

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

2

2022

第36卷 总第142期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》(维普网)全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



东方电气评论

第三十六卷第二期

二〇二二年六月

公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第36卷第2期(总第142期)
出版日期:2022年6月25日

国内邮发代号:62-187
国内定价:8.00元



中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会



第36卷第2期 总第142期
(季刊, 1987年创刊)

東方電氣評論



目次

编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 董娜 杨永

委员: 马擎天 王晓亮 王 愚 王建录 王拯元
方 宇 邓仲勇 乐劲松 石清华 光海杰
刘世洪 刘泰生 张启德 张国荣 邹 杰
何 维 陈文学 陈杰富 杨武勇 杨要武
杨华春 闵泽生 吴建东 赵永智 赵世全
侯小全 贺建华 钟 杰 郭 延 唐洪驹
谢光有 曾明富 赖成毅 潘乾刚 霍锁善

秘书长: 杨永

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 王为民

副主编: 董娜 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道18号

邮编: 611731

电话: 028-87898262/63

传真: 028-87898267

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

印刷单位: 成都金恒信印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京782信箱

基础研究

三元体系18650电池性能研究 廖小东 张中伟 黄兴兰等(1)
三电平逆变器优化特定谐波消除调制策略研究 王正杰 崔宇 张筱(5)
信息安全、网络安全、网络空间安全概述 张愉菲 陈虹 赵晨宇等(9)
应用于汽轮发电机的自抗扰控制器设计 周运红 桑梓 刘丝丝(16)
基于AspenPlus的生活垃圾衍生燃料与油漆废渣的等离子体气化模拟研究 谢斐 徐莹璐 胡春云等(21)
P掺杂Fe₃O₄纳米阵列的制备及其电催化析氢性能 潘军 卢彦杉 黄旭锐等(28)
碲化镉废料中碲和镉元素回收工艺研究 雷聪 袁小武 张程等(33)

核能发电

核设备筒体零件局部变形后的材料性能变化和残余应力研究 肖水仙 周迎平 董明亮等(37)
热处理制度对ER316H熔敷金属力学性能影响的研究 蒋宇晨 李恩 何冰等(41)

燃煤发电

大容量机组锅炉钢结构优化研究及应用 高玲(44)
大型清洁高效发电设备智能车间系统设计 张琳 刘伯兴(50)
基于专家模拟故障数据的智慧电厂发电机在线监测分析软件测试方法研究 王传刚 赵娅因(57)
深度调峰工况下典型中速磨制粉系统改造分析 魏丽君 宁晓睿 张宇鹏(61)

汽轮机

汽轮机齿轮转子系统弯扭耦合模态频率研究 彭林 董卫红 张健等(65)
轴封送汽温度对机组启停的影响 伍文华 刘兴波 袁朝兴等(69)
试论东莞某燃气-蒸汽联合循环项目对东莞市的必要性 杨振(71)

水力发电

大容量灯泡贯流机非旋转对称转子支架研究 王建康 杜芳勉 刘政(75)
浅谈某水电站水轮机接力器改造可行性 刘代山(78)
谈令里水电站1[#]水轮发电机组技改检修成果 邓家勇(81)

光伏发电

塔式光热电站吸热器高温隔热防护装置研究 丁路 刘亚尼 黄际兵等(84)

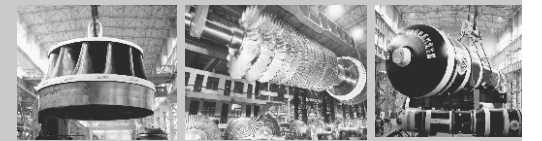
[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*20*2022-02

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2022-6-25 Vol.36 No.2
(Quarterly, since 1987)

CONTENTS



BASIC RESEARCH

Study of Performance in NCM 18650 Lithium Ion Battery LIAO Xiaodong,ZHANG Zhongwei,HUANG Xinglan,et al (1)
Research on Optimizing Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation for Three-level Inverter WANG Zhengjie,CUI Yu,ZHANG Xiao (5)
The Overview of Information Security, Network Security and Cyberspace Security ZHANG Yufei CHEN Hong ZHAO Chenyu,et al (9)
Design of Active Disturbance Rejection Controller for Turbo-generator ZHOU Yunhong,SANG Zi,LIU Sisi (16)
Simulation of Plasma Gasification of Refuse Derived Fuel and Paint Waste Based on AspenPlus XIE Fei,XU Yinglu,HU Chunyun,et al (21)
Preparation of P-doped Fe₃O₄ Nanoarrays for Boosting Hydrogen Evolution Performance PAN Jun,LU Yanshan,HUANG Xurui,et al (28)
Study on Recovery Technology of Tellurium and Cadmium from Cadmium Telluride Waste LEI Cong,YUAN Xiaowu,ZHANG Cheng,et al (33)

NUCLEAR POWER

The Study of Material Performance and Residual Stress Changes on RVI Core Barrel after Local Deformation XIAO Shuixian,ZHOU Yingping,DONG Mingliang,et al (37)
Research on Influence of Heat Treatment Process on Mechanical Properties of ER316H Deposited Metal JIANG Yuchen,LI En, HE Bing,et al (41)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Research and Application of Steel Structure Optimization for Large Capacity Boiler GAO Ling (44)
Design of Intelligent Workshop System for Large-scale Clean and High-efficiency Power Generation Equipment ZHANG Lin,LIU Boxing (50)
Research on Test Method of Online Monitoring and Analysis Software for Generators in Smart Power Plant Based on Expert Simulation Fault Data WANG Chuangang,ZHAO Yanan (57)
Analysis of Typical Medium Speed Milling System Retrofit for Peak Load Regulation WEI Lijun,NING Xiaorui,ZHANG Yupeng (61)

TURBINE

Research on the Bending-torsional Coupling Mode Frequency of Steam Turbine Gear Rotor System PENG Lin,DONG WeiHong,ZHANG Jian,et al (65)
Influence of Shaft Sealing Steam Temperature on Unit Startup and Shutdown WU Wenhua,LIU Xingbo,YUAN Chaoping,et al (69)
On the Necessity of A Gas-steam Combined Cycle Project in Dongguan YANG Zhen (71)

HYDRO POWER

Research of High-capacity Bulb Hydro-generator Non-rotational Symmetrical Rotor Bracket WANG Jiankang,DU Fangmian,LIU Zheng (75)
Discussion on the Feasibility of Hydraulic Turbine Servomotor Transformation in Some Hydropower Station LIU Daishan (78)
Effect of Technical Reformation and Maintenance of 1[#] Unit of Lingli Hydropower Station DENG Jiayong (81)

SOLAR POWER

The Study of the High Temperature Heat Insulation Protection Device of Receiver in the Tower Solar Power Station DING Lu,LIU Yani,HUANG Jibing,et al (84)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

Members: MA Qingtian, WANG Xiaoliang, WANG Yu, WANG Jianlu, WANG Zheng yuan, FANG Yu, DENG Zhongyong, LE Jinsong, SHI Qinghua, GUANG Haijie, LIU Shihong, LIU Taisheng, ZHANG Qide, ZHANG Guorong, ZOU Jie, HE Wei, CHEN Wenxue, CHEN Jiefu, YANG Wuyong, YANG Yaowu, YANG Huachun, MIN Zesheng, WU Jiandong, ZHAO Yongzhi, ZHAO Shiquan, HOU Xiaquan, HE Jianhua, ZHONG Jie, GUO Yan, TANG Hongju, XIE Guangyou, ZENG Mingfu, LAI Chengyi, PAN Qiangang, HUO Suoshan

Chief Secretary: YANG Yong

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: WANG Weimin

Vice Chief Editors: DONG Na, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

Edited and Published by:

Editorial Department of Dongfang Electric Review
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu, Sichuan, P. R. China

Postal Code: 611731

Tel: 028-87898262 87898263 Fax: 028-87898267

E-mail: dfdqpl@dongfang.com

Overseas Distribution by:

China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)

三元体系 18650 电池性能研究

廖小东 张中伟 黄兴兰 李明科 阮晓莉

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 本文制备了四组不同正极配比的18650电池, 并通过分析电池的电性能:不同温度循环、倍率、高低温和安全性能数据。从放电倍率数据能看出, B组和D组电池的放电倍率特性优异; 高低温数据中A、B、C三组均表现出高度一致的高低温性能; 在常温1C/3C循环条件下, A、B、D三组表现不错, 循环次数可以延续到1 000次; 安全性能结果四组电池均通过测试要求。

关键词: 锂离子电池; 性能; 18650

中图分类号: TM 911

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0001-04

Study of Performance in NCM 18650 Lithium Ion Battery

LIAO Xiaodong, ZHANG Zhongwei, HUANG Xinglan, RUAN Xiaoli, LI Mingke

(DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: Four different 18650 battery of cathode was made. The performance of electrical properties, different temperature cycles, rate, H/L was investigated. From the results, the performance of groups B, C in rate is the best. Group A, B, C in H/L is better than group D. In normal temperature 1C/3C cycles performance, group A, B, D shows good performance and has 1 000 cycles. Four different groups all passed in safety performance.

Key words: Li-ion battery; performance; 18650

锂离子电池作为21世纪的绿色能源, 越来越成为人们日常生活中必不可少的部分。锂离子电池的应用场合从小到大依次为3C数码产品、电动工具、电动汽车动力电池、储能电池等^[1-2]。

其中电动工具作为日常建筑行业、电气行业等领域的专用工具, 一般还是依靠工人手持操作, 广泛应用于建筑装修, 轻工制造等领域。相较纯人力的手工工具, 电动工具通过电力大幅提高工具的扭力、转速、冲击力等, 极大提升了工作效率。电工工具的种类丰富, 主要包括: 电钻、角磨机、电扳手、电锯和砂光机等。电动工具最早采用的是插线结构, 即通过电线接入家用电源。但该结构使用环境受到大大限制, 逐渐发展成无绳结构, 即采用锂离子电池作为内置电源, 极大的方便了工人的操作。电动工具用锂离子电池随着不断发展, 已逐渐演变

成以18650、26650为标准的锂离子电池作为内置电源, 18650作为行业内的通用型号, 其有着尺寸固定, 容量可调, 焊接工艺成熟等优势。

用于电动工具的18650锂离子电池, 主要的材料体系是三元体系, 因为其能量密度高, 倍率特性好, 可以满足电动工具对大电流放电的要求, 三元体系在低温性能上也有较好的优势, 行业内对三元体系的电池有着较深入的研究^[3-13]。除了电性能要求外, 安全性能也是衡量电动工具电池的特性之一, 因此开发出电性能优良, 无安全问题的电池成为一大热点。

1 实验

1.1 主要材料和仪器

三元材料镍钴锰(来自国内某厂家)、镍锰(来

收稿日期: 2022-01-20

作者简介: 廖小东(1982-), 男, 2009年毕业于东北师范大学无机化学专业, 硕士, 高级工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司储能与新材料技术研究所主要从事储能电池研发工作。

自国内某厂家)、镍钴铝(来自国内某厂家)、锰酸锂(来自国内某厂家)、石墨A2(来自国内某厂家)、NMP、导电碳黑、隔膜(Celgard2300)、PVDF(HSV900)、CMC、SBR、去离子水、铜箔集流体10 μm、铝箔集流体16 μm、电解液(来自国内某厂家)、搅拌机、涂布机、杭可电池测试仪。

1.2 设计信息

表1 电池的设计信息

组别	正极				负极				
	材料	活性物占比 (%)	导电剂	面密度 (g/1540.25mm ²)	材料	活性物占比 (%)	面密度 (g/1540.25mm ²)	电液 (μm)	铝箔厚 (μm)
A	镍钴锰	94.00	Super-P	0.325	A2	97.50	0.136/0.145	A1	15 16
B	镍钴锰:镍锰=9:1	94.00	Super-P	0.33	A2	97.50	0.136/0.145	A1	15 16
C	镍钴锰:镍钴铝=9:1	94.00	Super-P	0.33	A2	97.50	0.136/0.145	A1	15 16
D	镍钴锰:锰酸锂=9:1	94.00	Super-P	0.33	A2	97.50	0.136/0.145	A1	15 16

1.3 实验过程

(1) 正极极片A组的制备: 将三元材料镍钴锰、导电碳黑、PVDF按95%:2%:3%的质量比混合搅拌成浆料, 并用涂布机将浆料涂在16 μm的铝箔集流体上, 并通过辊压制成阴极极片。

(2) 正极极片B组的制备: 将三元材料镍钴锰+镍锰(9:1)、导电碳黑、PVDF按95%:2%:3%的质量比混合搅拌成浆料, 并用涂布机将浆料涂在16 μm的铝箔集流体上, 并通过辊压制成阴极极片。

(3) 正极极片C组的制备: 将三元材料镍钴锰+镍钴铝(9:1)、导电碳黑、PVDF按95%:2%:3%的质量比混合搅拌成浆料, 并用涂布机将浆料涂在16 μm的铝箔集流体上, 并通过辊压制成阴极极片。

(4) 正极极片D组的制备: 将三元材料镍钴锰+锰酸锂(9:1)、导电碳黑、PVDF按95%:2%:3%的质量比混合搅拌成浆料, 并用涂布机将浆料涂在16 μm的铝箔集流体上, 并通过辊压制成阴极极片。

(5) 负极极片的制备: 将石墨A2、CMC、SBR按94.5%:1.5%:2.5%的质量比例混合搅拌成浆料, 并用涂布机将浆料涂在10 μm的铜箔集流体上, 并

通过辊压制成水性阳极极片。

将以上制好的极片按阴极、隔膜、阳极的顺序卷绕成18650电芯, 注液, 化成、分容等工序制成18650圆柱电池。

2 电性能结果与讨论

2.1 放电倍率

表2 各组别电池的放电倍率

条目	放电倍率百分比 (%)			
	A	B	C	D
2A	100.00	100.00	100.00	100.00
6A	99.40	100.10	98.80	99.30
8A	99.10	100.60	97.50	100.00
10A	98.40	100.80	92.60	100.60
15A	89.50	100.10	57.90	100.10
20A	59.60	100.10	31.10	99.20

从表2 放电倍率数据能看出, B组和D组电池的放电倍率特性优异, 在20A的放电电流下, 依然能保持初始容量100%的放电能力。A组的电池放电倍率较好, 但在20A时, 只能放出初始容量的近60%。C组电池的放电倍率最差, 尤其在20A时, 仅能放出约30%的初始容量。

在涂布面密度、电解液种类, 正极主料均一致的情况下, 唯一变量是正极主料的掺杂物。镍锰和锰酸锂掺入后, 放电倍率有很大提升, 原因可能是此两种材料的倍率特性优异所致。在掺入镍钴铝后, 放电倍率下降明显, 原因可能是该材料放电倍率特性不好, 或是镍钴铝本身PH值较高, 导致易吸水, 最终是由于工艺原因引起倍率特性差。

2.2 高低温

表3 各组别电池的高低温特性

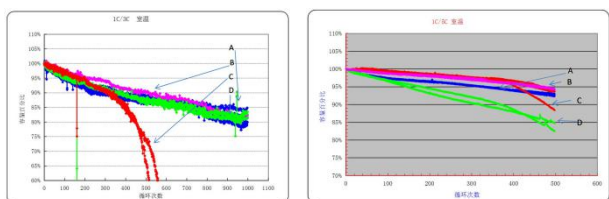
条目	不同组别放电百分比 (%)				
	A	B	C	D	
温度	-10℃	77.90	82.40	83.60	66.80
	0℃	88.20	89.40	89.50	83.70
	室温	100.00	100.00	100.00	100.00
	45℃	104.30	105.20	105.60	105.30

从表3 高低温数据能看出, A、B、C三组在0℃以上的温度条件下, 放电容量均一致, 在零下10℃

的温度条件下，B、C组体现在掺入镍锰和镍钴铝后，低温性能有约5%幅度的提升，充分体现镍锰和镍钴铝这两种材料良好的低温性能。

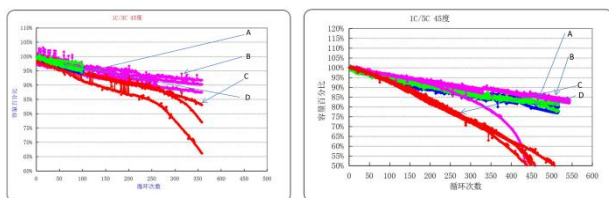
D组显示出在掺入锰酸锂后，低温性能反而有所下降，从锂电各正极材料的低温机理来看，锰酸锂有非常不错的低温性能，但在此处却未显示出来，原因可能是A组厂家的石墨本身低温性能已经很好，锰酸锂的加入并未使其低温性能有提升。

2.3 循环性能



(a) 常温 1C/3C

(b) 常温 1C/5C



(c) 45°C 1C/3C

(d) 45°C 1C/5C

图1 三种体系在不同温度、不同电流的循环曲线

电动工具电池在实际使用条件下，有着不同的使用工况，但大体上体现的两种不同温度和两种不同放电电流，在实际测试中，一般以常温和45°C来模拟，电流一般按1C的充电电流，3C，5C的放电电流来模拟。

如图1所示，在常温1C/3C循环条件下，A、B、D三组表现出的循环特性高度一致，循环次数可以延续到1000次，C组在经过300次后，容量百分比出现跳水。在45°C 1C/3C循环条件下以及45°C 1C/5C的循环条件下，也出现了同样跳水的现象。原因可能与该材料不适合大电流放电有关，也有可能是极片中的水分无法全部烘烤出来所致。

除C组外，其余组别的在各温度和放电电流下均表现出较好的循环性能。

3 安全性能结果与讨论

电动工具锂离子电池在使用过程中仍然与一

般锂离子电池一样，会出现滥用引起的安全问题。因此有必要对所制备的电池进行诸如，过充，过放，55°C短路等安全测试，来检验电池在极端情况下是否会引发安全问题。

3.1 过充

表4 各组别过充结果

组别	充电电压 (V)	充电倍率 (C)	最高电压 (V)	最低电压 (V)	持续时间 (min)	是否漏液	重量(g)		是否冒烟	是否着火	结果
							实验前	实验后			
A	10	0.7	9.998	3.403	240.000	No	46.290	46.288	No	No	Pass
B	10	0.7	9.999	3.442	240.000	No	46.269	46.268	No	No	Pass
C	10	0.7	10.018	3.417	240.000	No	46.494	46.492	No	No	Pass
D	10	0.7	10.024	3.445	240.000	No	46.065	46.062	No	No	Pass

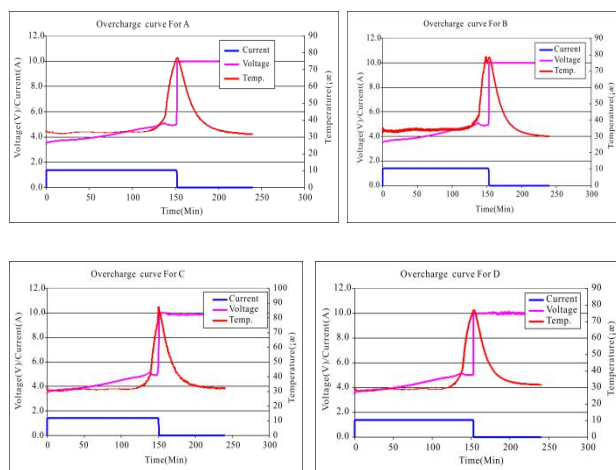


图2 各组别的过充过程的电压和升温变化

过充是引发锂离子电池不安全的因素之一。过充的危险源头主要来自锂离子电池内部的有机电解液，当锂离子电池发生过充时，阴极脱锂电位会随着过充程度的增加迅速上升，当超出有机电解液稳定的电化学窗口后，有机溶剂在阴极表面发生不可逆的氧化分解，同时产生可燃性的有机小分子并放出大量热，引起电池内部温度和内压急剧上升，当温度上升到120°C时，负极表面的SEI膜发生分解，失去钝化膜的保护性，有机溶剂与石墨电极发生剧烈反应，继续放出大量热，温度和内压进一步上升，当温度上升到200°C以上时，高度脱锂的正极氧化物又会发生剧烈的析氧反应（仅限钴酸锂），相当于给电池内部提供了氧化反应所需的助燃剂，同时释放大量热。短时间内压力和热量的释放，会引起

爆炸燃烧等安全问题。

过充数据见表 4 和图 2，本文中所制备的四个批次的电池，在过充测试中，最高温度仅在 70~80℃ 之间，且并未出现漏液、冒烟、起火的现象，说明这四个批次的电池过充特性优良（见表 4）。

3.2 过放

表 5 各组别的过放结果

S/N	充电倍率 (C)	最高电压 (V)	最低电压 (V)	最小电流 (A)	持续时间 (min)	总容量 (Ah)	是否漏液	是否冒烟	是否着火	结果
A	1	4.202	-1.315	-2.000	150.000	1.071	No	No	No	pass
B	1	4.204	-1.331	-1.999	150.000	1.072	No	No	No	pass
C	1	4.202	-1.388	-2.000	150.000	1.062	No	No	No	pass
D	1	4.202	-1.320	-2.001	150.000	1.070	No	No	No	pass

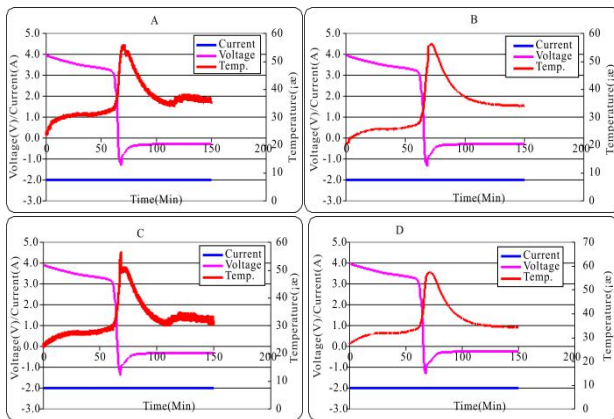


图 3 各组别的过放过程的电压和温升变化

过放是引发锂离子电池另一个不安全的因素。过放的机理主要体现在过放可能导致负极铜集电极溶解，负极石墨电极是以铜箔作为载体，铜箔溶解后，石墨电极无载体可支撑，会引发负极极片剥离，引起电性能急剧下降；再者，负极溶解的铜会在正极形成铜枝晶，铜枝晶有一定刚度，类似锂枝晶，会刺穿隔膜，引发电池内短路，内短路发生后同样会在短时间内聚集大量的内压和温度，引起电池燃烧或爆炸等一系列安全问题。

过放数据见表 5 和图 3，本文所制备的四组电池在过放测试中，60 分钟后，电池电压开始急剧下降，同时温度开始从常温迅速升高到 50℃ 以上，电压逐渐过放到负数，但温度并未再升高。电池的最高温度均值在 55 度，并未达到有机溶剂燃点，且也未出现漏液、冒烟、着火等现象（见表 5）。

3.3 55 度短路

表 6 短路测试数据

组别	开路电压(V)		内阻(mΩ)		重量(g)		最高温度 (°C)	是否漏液	是否冒烟	是否着火	Result
	实验前	实验后	实验前	实验后	实验前	实验后					
A	4.171	0.220	20.90	250Ω	51.240	49.051	115.8	Yes	No	No	Pass
B	4.169	0.218	20.60	250Ω	51.124	48.979	108.1	Yes	No	No	Pass
C	4.167	0.011	21.40	250Ω	50.795	50.794	113.4	Yes	No	No	Pass
D	4.168	0.005	20.70	250Ω	51.734	50.024	108.3	Yes	No	No	Pass

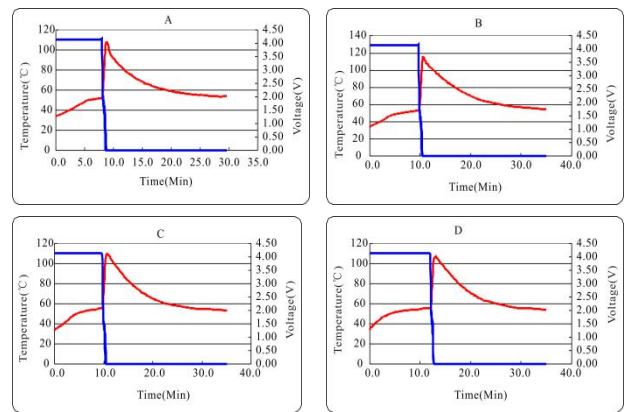


图 4 各组别的短路过程中的电压和温升变化

短路是锂离子电池的另一个可能的安全隐患，因此需要将所制备的电池进行短路测试，短路机理与上述安全隐患类似，这里不再累述。

表 6 和图 4 是短路测试结果以及电压和温升的变化，本文所制备的四组电池在实验前后，内阻急剧上升，但最高温度均在 120℃ 以下，未达到有机溶剂的燃点，电池均有漏液现象，但未发生冒烟，着火等现象，四组电池的短路测试全部通过。

4 结语

本文制备了四组不同正极配比的 18650 电池，并通过分析电池的电性能和安全性能数据，电性能结果如下：

(1) 从放电倍率数据能看出，B 组和 D 组电池的放电倍率特性优异，C 组电池的放电倍率最差。

(2) 高低温数据中 A、B、C 三组均表现出高度一致的高低温性能，D 组高低温数据最差。

(3) 在常温 1C/3C 循环条件下，A、B、D 三组表现不错，循环次数可以延续到 1 000 次，C 组

(下转第 8 页)

三电平逆变器优化特定谐波消除调制策略研究

王正杰 崔宇 张筱

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 本文以三电平特定谐波消除技术为研究对象, 深入研究波形合成原理、初值获取方法、开关角轨迹迭代求解策略等关键技术。进而提出一种SHEPWM优化方案及其算法实现, 用于改善逆变器输出电压的总谐波畸变情况。最后, 本文通过MATLAB数值仿真验证了所提优化方案的有效性和实用性。

关键词: 特定谐波消除法; 三电平逆变器; 总谐波畸变

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0005-04

Research on Optimizing Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation for Three-level Inverter

WANG Zhengjie, CUI Yu, ZHANG Xiao

(DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: This paper does research on the three-level selective harmonic elimination pulse width modulation strategy, and deeply analyzes the key technologies such as the principle of waveform synthesis, the method to obtain the initial value, the iterative steps of switching angle trajectory, and so on. Furthermore, an optimization method and corresponding algorithm are proposed to improve the harmonic performance of inverter's output voltage. Finally, this paper verifies the effectiveness and practicality of the proposed strategy through MATLAB numerical simulation.

Key words: selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM); three-level inverter; harmonic performance

在大功率海上风电、特高压直流输电、柔性交流输电等大容量电力电子装置及其系统中, 受电力电子器件的尺寸以及生产工艺的限制, 开关损耗逐渐成为制约其功率提升的重要因素^[1-2]。为了降低开关损耗, 一方面可以采用软开关技术, 降低功率器件通断过程中的损耗^[3-4]; 另一方面, 可以优化 PWM 调制策略, 在相同控制效果的前提下, 降低单个器件的等效开关频率, 从而实现降低总开关损耗的目的。

特定谐波消除法 (Selective Harmonic Elimination PWM, SHEPWM) 是一种逆变器常用的 PWM 优化技术^[5-7], 其主要原理是通过对逆变器输出电压波形进行傅里叶变换, 得到关于开关角的傅

里叶级数展开式, 再约束固定次谐波分量为零, 得到一组非线性超越方程, 然后通过求解该方程组, 得到最优的开关角序列, 进而实现对输出电压波形的控制。由于 SHEPWM 方法可精确控制功率器件在单个开关期间内的动作时刻, 因此它可以在相同的开关频率下, 比其他调制技术消除更多低次谐波, 从而提高输出电压波形的质量, 降低交流侧滤波器的设计容量和生产成本。

本文以三电平逆变器为例, 对 SHEPWM 方法应用中涉及的基本原理、初始开关角选取策略、迭代计算方法等关键技术开展研究工作。进而提出一种以总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 最低为约束条件的优化特定谐波消除法, 并通过

收稿日期: 2022-03-16

作者简介: 王正杰 (1991—), 男, 2016年毕业于西安交通大学测试计量技术及仪器专业, 硕士, 工程师。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司电力电子所主要从事变流器仿真与控制、软件研发工作。

MATLAB 数值仿真验证该方法的有效性和实用性。

1 三电平 SHEPWM 基本原理

典型的二极管中点钳位三电平逆变器(3L-NPC)拓扑结构如图 1 所示。

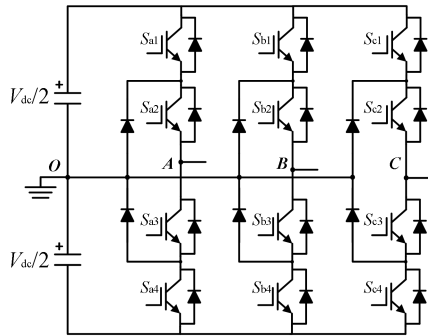


图 1 三电平逆变器拓扑结构图

由于 3L-NPC 利用二极管来钳位开关器件上的电压，因此其每相可以输出 $V_{dc}/2$ 、0 或者 $-V_{dc}/2$ 三个电平，典型的相电压波形 V_{AO} 如图 2 所示：

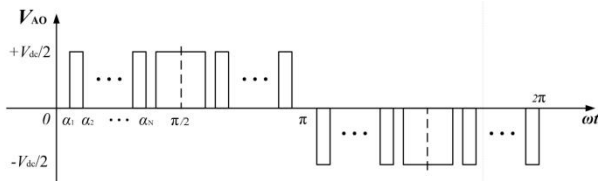


图 2 典型的三电平相电压 PWM 波形

其傅里叶级数展开式如下，式中： ω 为基波频率，此处为 100π 。

$$V_{AO} = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

对于传统的 SHEPWM 调制方法，其 PWM 波形通常需要满足正负 1/2 周期镜像对称，来消除偶数次谐波；而且满足正负半个周期内，前后 1/4 周期轴对称，来消除谐波中的余弦项，因此公式 (1) 中的 a_n 和 b_n 满足下列条件：

$$\begin{aligned} a_n &= 0 \\ b_n &= \frac{4}{n\pi} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(n\alpha_i), \quad n \text{ 为奇数} \end{aligned} \quad (2)$$

$b_n=0$, n 为偶数

其中， b_1 为基波电压的幅值，相电压调制度 m 可以表示为：

$$m = \frac{b_1}{V_{dc}/2} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(\alpha_i) \quad (3)$$

对于一个有 N 个自由度的 SHEPWM 调制策略（前 1/4 周期有 N 个开关角）而言，由于需要利用一个自由度来控制输出的基波电压幅值 b_1 满足调制度 m 的需求，所以最多还可以消去 $N-1$ 个特定频率的谐波。整理得到下列需要求解的非线性方程组：

$$\begin{cases} f_1(\vec{\alpha}) = m \cdot \frac{V_{dc}}{2} \\ f_n(\vec{\alpha}) = 0 \\ f_n(\vec{\alpha}) = \frac{4}{n\pi} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cos(n\alpha_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\vec{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N-1}, \alpha_N]$ 。

2 求解开关角轨迹

对于上述超越方程组，目前还没有解析表达式，常用的求解方法是采用 Newton-Raphson 迭代方法对开关角度进行数值求解^[8]。然而，为了使迭代法能快速地收敛到精确解，开关角的迭代初值选取就显得十分关键，必须在精确解的一个非常小的领域内才行。若随意采用不合适的初始值，不仅会使得迭代计算缓慢，甚至还可能导致迭代发散，出现无解的情况。

对于三相逆变器而言，考虑到三相三线系统的轮换对称特性，输出的线电压中不会包含 3 次及其整数倍谐波。因此，对于一个有 N 个自由度的 SHEPWM 调制方法，需要消除的前 $N-1$ 次谐波中可以不用考虑 3 次及其整数倍谐波，于是需要消去的谐波次数分别为：5 次、7 次、11 次、...、 $3N-2$ 次。在此约束条件下，参考相关文献根据经验公式选取 $m=0$ 处的开关角初始值为：

$$\begin{cases} \alpha_{2k-1}^0 = 30^\circ + 120^\circ k / (N+1) - \Delta\alpha \\ \alpha_{2k}^0 = 30^\circ + 120^\circ k / (N+1) + \Delta\alpha \\ \alpha_N^0 = 90^\circ - \Delta\alpha \end{cases} \quad (5)$$

其中，式中： $k=1, 2, \dots, (N-1)/2$ ； $\Delta\alpha$ 为用来避免 Newton-Raphson 迭代法异常的微小量。

考虑到 SHEPWM 方程组的连续可微性，开关角在整个调制度范围内应该是连续变化的，于是可将 m 作为自变量，以 Δm 为变化步长，将本次 $m=m(0)$ 非线性方程组的计算结果，作为下一次 $m(1)=m(0)+\Delta m$ 的迭代初值，进行迭代计算。理论上，

只要 Δm 的变化值足够小,就可以有效地避免迭代收敛性的问题。

本文选取 $N=7$, $\Delta\alpha=3^\circ$,由公式(5)计算得到 $m=0$ 处的迭代初值 $\alpha^0=[42^\circ, 48^\circ, 57^\circ, 63^\circ, 72^\circ, 78^\circ, 87^\circ]$,然后选取 $\Delta m=0.005$ 为分辨率,让 m 从0向1.15递增,利用Matlab中的fsolve函数求解非线性方程组,离线计算得到 $m\in[0, 1.15]$ 范围内的开关角随调制度的变化曲线如图3所示。

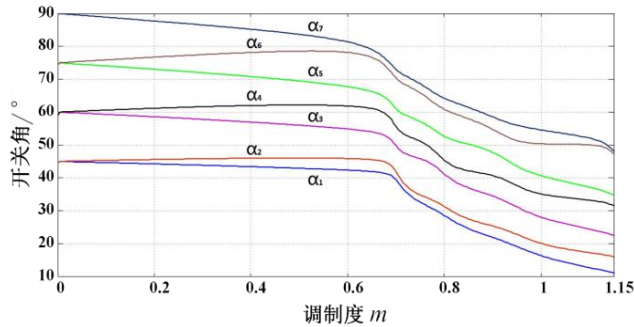


图3 典型的三电平相电压 PWM 波形

为了保证求解得到的开关角能够在物理上进行实现,还需要满足条件: $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N$ 。由上图可知,满足上述条件的 m 的最大值大约在1.15左右。此时线电压调制度 $M = U_{L-L} / V_{dc} = m \times 1.732/2 \approx 1$,因此采用SHEPWM调制可以实现与传统SVPWM调制一样的直流电压利用率。

3 优化特定谐波消去方法

传统SHEPWM方法中的非线性方程组约束条件是将固定次数谐波的幅值设定为0,该策略确实能够将设定次数的谐波分量完全消除,然而一旦超过最大可消去的谐波次数,谐波含量便会大幅度增加,仍然不利于交流侧滤波器器的设计。

为此,本文提出了一种优化特定谐波消去策略,将非线性方程组的约束条件,由原本的消去前 $N-1$ 次谐波,调整为在给定的次数范围内输出电压总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)最低。进而,重新构建需要求解的非线性方程组,得到下列公式:

$$\begin{cases} \min_{\alpha} \sqrt{\sum_k \left(\frac{f_k(\bar{\alpha})}{f_1(\bar{\alpha})} \right)^2} \\ f_1(\bar{\alpha}) = m \cdot \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \pi/2$, $5 < k < N_2$ 且 k 不为3

的整数倍, N_2 为期望约束的最高次数($N_2 > 3N-2$)。

对于上述带约束条件的超越方程组的最值问题,之前提出的开关角初始值计算方法将不再适用,因此本文提出一种步进式的迭代策略,具体求解方法如下:

(1) 迭代初始值为传统SHEPWM方法中对应调制度 m 下求解得的开关角。

(2) 首先将 N_2 设定为 $3N$,求解上述方程组。

(3) 再令 $N_2 = N_2 + 2$,将上次求解得到的开关角作为此次迭代的初值,再次求解上述方程组。

(4) 重复第(3)步直到 $N_2 = N_2^*$ (最终期望值)。

其中值得注意的是,将第 $n-1$ 次的解作为第 n 迭代初值时可能出现计算结果不收敛的情况,此时可以采用第 $n-2$ 次或第 $n-3$ 次的解作为初值进行尝试。

本文借助Matlab离散数学工具对上述非线性超越方程组进行求解,得到了 $m=1.0$, $N=7$, $N_2=33$ 时,优化前和优化后的开关角对比,如表1所示。

表1 优化前和优化后的开关角对比 ($m=1.0$)

序号	1	2	3	4	5	6	7
优化前	16.3	20.1	28.1	35.1	40.7	50.4	54.6
优化后	24.6	27.1	32.7	36.8	40.9	46.6	49.0

图4和图5分别给出了优化前后的相电压PWM波形频谱分析图。对比可以看出,在传统SHEPWM策略中,最大可消去谐波次数为 $3 \times 7 - 2 = 19$ 次,小于19次的非3的整数倍的谐波分量均被有效地消除,然而一旦超过19次谐波含量便大幅度增加,主要集中在25次左右。在优化后的SHWPWM策略中,低次分量虽然略有增加,但主要谐波分量集中在大于35次的高频段,成功地实现了“移频”的效果。

计算后得到,前35次谐波的THD(不包含3的整数倍谐波)从原本的39.5%下降至15.03%,优化效果明显。结果表明,该策略在同等开关频率下,可有效地改善输出电压波形质量,降低并网滤波电抗器的设计成本和容量需求。

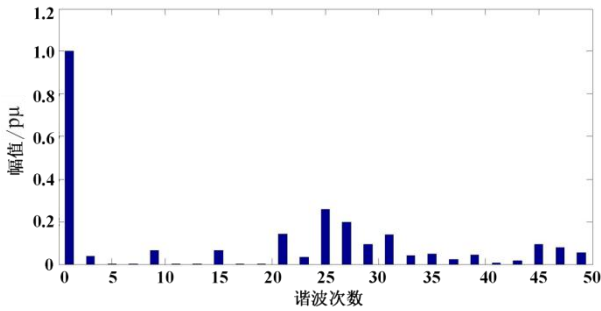


图4 传统 SHEPWM 策略 FFT 分析(m=1.0)

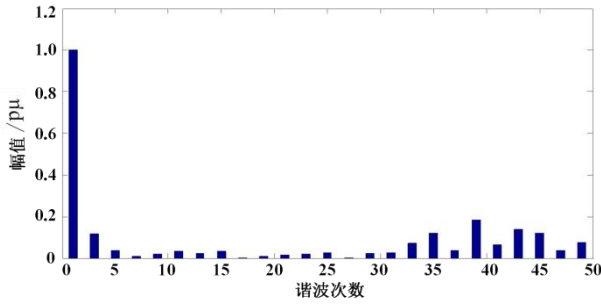


图5 优化 SHEPWM 策略 FFT 分析(m=1.0)

4 结语

本文分析了三电平逆变器 SHEPWM 调制策略的基本原理, 深入研究了该技术中涉及的初始开关角选取策略、开关角轨迹迭代计算方法等关键技术,

(上接第 4 页)

在经过 300 次后, 容量百分比出现跳水。在 45°C 1C/3C 循环条件下以及 45°C 1C/5C 的循环条件下, 也出现了同样跳水的现象。

安全性能结果显示: 四组电池均进行了过充、过放、短路三项安全测试, 过充、过放两项测试, 四组电池均未出现漏液、冒烟、爆炸等现象; 短路测试四组电池均出现漏液, 但仍未出现冒烟、爆炸等极端现象, 显示出良好的安全性能。

参考文献

[1] 刘春娜. 电动汽车电池应用与展望[J]. 电源技术, 2011, 35(1): 12-14
 [2] 程哲远. 锂离子电池在电动工具中的应用情况分析[J]. 新材料产业, 2019 (8):39-41
 [3] 汪伟伟, 丁楚雄, 高玉仙等. 磷酸铁锂及三元电池在不同领域的应用[J]. 电源技术, 2020, 44(9):1383-1386

进而提出了一种以 THD 最低为约束条件的优化特定谐波消除实现方法, 并通过 MATLAB 数值计算仿真验证了所提优化方案的有效性和实用性。同时, 所提优化思路同样适用于其他电平 SHEPWM 调制, 具有良好的拓展性。

参考文献

[1] 王琛琛, 李永东. 多电平变换器拓扑关系及新型拓扑[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1):92-99
 [2] Blaabjerg F, Chen Z. Power Electronics for Modern Wind Turbines[J]. Synthesis Lectures on Power Electronics, 2006, 1(1):1-68
 [3] 李艳. 软开关双输入全桥变换器的参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9):167-174+189
 [4] 李睿, 马智远, 徐德鸿. 一种新型有源箝位软开关三相并网逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30):30-38
 [5] 王榕生, 吴汉光. 消谐波 SHEPWM 的谐波影响数值分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9):183-189
 [6] 张艳莉, 费万民, 吕征宇等. 三电平逆变器 SHEPWM 方法及其应用研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1):16-20+54
 [7] 张永昌, 赵争鸣, 张颖超等. 三电平变频调速系统 SVPWM 和 SHEPWM 混合调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007(16):72-77
 [8] 苏毅. 半周期对称 SHEPWM 技术的开关角求解方法[D]. 武汉大学, 2012

[4] 吴小兰, 王光俊, 陈炜等. 复合三元电池高温循环劣化分析[J]. 电池, 2017, 47(6):347-350
 [5] 殷志刚, 王静, 曹敏花. 镍钴锰三元电池与磷酸铁锂电池性能对比[J]. 电池工业, 2021, 25(3):136-142
 [6] 王光俊, 吴小兰, 袁雪芹等. 复合三元电池高温循环性能研究[J]. 电源技术, 2018, 42(3):343-346
 [7] 张跃强, 田君, 赵鼎等. 高镍三元电池热反应机理及其改善性研究进展[J]. 电源技术, 2019, 43(7):1223-1225+1229
 [8] 张培红, 袁威, 魏钟原等. 湿热环境下 NCM 三元锂离子电池热失控分析[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2020, 41(6):881-887
 [9] 程建良, 李新海, 王志兴等. 18650 型柱状锂离子电池的容量衰减机理[J]. 中国有色金属学报(英文版) 2017, 27(7):1602-1607
 [10] 贺元骅, 刘奕, 孙强等. 不同外热部位下 18650 型锂离子电池热失控研究[J]. 电源技术, 2021, 21(1):124-132
 [11] 陈聪, 陈龙, 张兴娟. 18650 型锂离子电池循环性能一致性研究[J]. 电源技术, 2019, 43(1):67-70
 [12] 黄锋涛. 一种新型 18650 三元锂离子电池的制备[J]. 科技风, 2020 (12):17-18
 [13] 林涛, 赖沛恒, 李丽雅等. NCR18650A 电池的充放电温度特性与管理[J]. 新能源进展, 2020, 8(6):455-461

信息安全、网络安全、网络空间安全概述

张愉菲^{1,2} 陈虹^{1,2} 赵晨宇^{1,2} 陈厅³

1. 能源装备工控网络安全四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731;

3. 电子科技大学, 成都 611730

摘要: 信息技术的发展伴随着层出不穷的安全问题, 在不同阶段业界提出了“信息安全、网络安全和网络空间安全”三种不同的概念加以描述。这三个词汇在各种资料中交叉出现, 其具体内涵和逻辑关系并不清晰。为厘清三者之间的关系, 本文对它们的起源、定义及研究目标进行了阐述, 探讨了不同时期所面临的安全问题的主要区别, 并介绍了相应的关键技术。

关键词: 信息安全; 网络安全; 网络空间安全

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0009-07

The Overview of Information Security, Network Security and Cyberspace Security

ZHANG Yufei^{1,2}, CHEN Hong^{1,2}, ZHAO Chenyu^{1,2}, CHEN Ting³

(1. Energy equipment Cyber security Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

3. University of Electronic Science and Technology of China, 611730, Chengdu, China)

Abstract: The development of information technology is accompanied by a steady stream of security problems. At different stages, the concepts "information security, network security and cyberspace security" were proposed to describe these problems. These three concepts intersect in various materials, and their specific connotations and logical relationships are not clear. In order to clarify the relationship between the three concepts, this paper elaborates on their origins, definitions, and research objectives, explores the main differences in the security problems faced by different periods, and introduces the corresponding key technologies.

Key words: information security; network security; cyberspace security

从信息技术诞生伊始, 安全问题便伴随出现, 随着时间和技术的发展, 出现了信息安全、网络安全、网络空间安全三种不同的描述。在各种场合和文件中, 这几个词汇交叉出现, 但其概念和逻辑关系并不清晰, 需要进行深入研究。因此本文依据近年来安全领域的文献资料探讨信息安全、网络安全、网络空间安全等概念及相互关系, 厘清这些词汇的来源、定义、目标及主要技术。

1 信息安全

信息安全 (information security) 是一门动态发展的科学, 伴随历史进程不断进步。从古罗马时期密码学兴起开始, 随通信技术和计算机技术的进步, 信息安全的对象、要求和技术方法不断更新迭代。直至进入现代, 信息安全学科逐步形成。至今, 信息安全逐步发展为保护、维持信息的保密性、完整性和可用性, 也包括真实性、可核查性、抗抵赖性、可靠性等性质的科学。信息安全旨在保护所有

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目: 汽轮机网络安全一体化保护系统关键技术研究与开发; 项目编号: 2019YFG0534。

作者简介: 张愉菲(1994-), 女, 2020年毕业于电子科技大学计算机技术专业, 硕士。现在东方电气集团科学技术研究院有限公司主要从事工控网络安全脆弱性研究工作。

数据，其面向的信息是任何数据存储点，包括网络空间之外的点^[1]。本节讨论狭义的“信息安全”，主要关注信息及其系统安全。

1.1 信息安全的起源及发展

业内普遍认为信息安全起源于通信安全。古罗马时期《高卢战记》中描述凯撒曾使用 Caesar 密码加密传递军事信息，这是历史上首次记载有使用价值的通讯保密技术。直至 16 世纪，伴随着战争频发，多表、多字母代替密码出现并逐渐成为古典密码学的主流。由于密钥空间小，此时期信息安全技术主要依赖于对加密和解密算法的保密。

进入 19 世纪，信息安全技术的核心逐步转变为现代密码学。1949 年香农发表《保密通信的信息理论》，将信息理论引入密码学，标志着通信保密科学诞生。此时期通信技术不发达，计算机零散分布，信息安全主要研究对通信信道传输的信息编码以防止攻击者窃听通信信道获取信息。编解码和密码学是这个阶段应用的关键技术，通过对消息的变换保证信道不被恶意读取。这个时期仅能保证计算机的物理安全以及通过密码（主要是序列密码）解决通信安全的保密问题。

20 世纪 60 年代后，半导体和集成电路技术的进步推动计算机软硬件快速发展，计算机的应用逐步规模化和实用化，信息的传输通道转向计算机网络。1985 年 12 月美国国防部发布《可信计算机系统评估准则》(TCSEC)，又称橘皮书，该标准是计算机系统安全评估的第一个正式标准^[2]，至此，人们对信息安全的需求已逐步扩展为以保密性、完整性和可用性为目标的计算机安全阶段，既要保护数据在传输过程中不被窃取，被窃取也不泄露，又要保护数据在传输过程中不被篡改，保证其正确性。

20 世纪 90 年代初，英、法、德、荷四国基于 TCSEC 提出“信息技术安全评估准则 (ITSEC)”，俗称白皮书。其中首次提出信息安全的保密性、完整性及可用性等概念，并在可信计算机的基础上将信息安全扩展到可信信息技术的范畴。1996 到 1998 年，六国七方（英国、加拿大、法国、德国、荷兰、美国国家安全局和美国标准技术研究所）颁布《信息技术安全性通用评估准则》，1999 年 12 月 ISO 接受其作为国际通用准则，标准号为 ISO/IEC 15408。2005 年 ISO 27000 体系《信息技术 安全技术 信息

安全管理体系》颁布，“信息安全”一词得到公认的定义和解释。

我国围绕信息安全问题开展了一系列系统研究及实践。1999 年 9 月国家质量技术监督局颁布了国家强制标准《计算机信息系统安全保护等级划分准则》(GB 17589-1999)，将安全保护等级分为五级；2001 年，我国将 ISO/IEC 15408 国际标准转化为国家标准 GB/T 18336-2001^[3]，国内信息安全行业发展逐步规范化；此后的 2002-2006 年间，我国对标国际相继出台 GB/T 18238、GB/T 15843 等一系列信息安全技术国家标准，形成了相对完善的信息安全标准体系。

1.2 信息安全的定义和目标

信息安全的保护对象是信息及其系统，主要研究计算机系统中的数据泄漏控制和通信系统中的数据保密问题，包括信息设备安全、数据安全、内容安全和行为安全^[4]。

ISO 27001:2005 对信息安全的定义为“保持信息的保密性、完整性和可用性，也包括真实性、可核查性、抗抵赖性和可靠性等”^[5]。其中，保密性、完整性和可用性至关重要，被称为信息安全三要素：

保密性：信息不能被未授权的个人、实体或者进程利用或知悉的特性^[6]。加密是防止信息非法泄露的最基本手段。

完整性：保护资产的准确和完整的特性。完整性表明数据没有遭受以非授权方式所作的篡改或破坏。

可用性：根据授权实体的要求可访问和使用的特性。可用性也包含信息资源在非正常情况下能恢复使用的能力，期望是系统正常运行时能够正确存取所需信息，在遭受意外攻击或破坏时可以迅速恢复并投入使用。

此时期，信息安全的目标在于保护信息资源及其载体不受到来自内外各种形势的危险、威胁和侵害。

1.3 信息安全的主要技术

密码技术、访问控制技术、隐蔽信道和可信计算等是信息安全研究中的重要内容。

(1) 密码学：密码技术是信息安全的关键技术，主要由密码编码学和密码分析学组成。密码编

码学的核心是研究安全性高的有效密码算法和协议，而密码分析学主要负责密码破译以获取明文信息。密码编码学与密码分析学相互对立，又相互依存，共同推动密码学的快速发展。传统密码理论与技术的研究大致可分为两类：基于数学的和非数学的。包括分组密码、数字签名、基于生物特征的识别理论与技术等^[7]。

(2) 访问控制技术：访问控制技术通过对用户访问资源活动的有效监控，使合法用户在合法时间获得有效的系统访问权限来保证信息不被非法使用和访问。早期的安全策略分为自主访问控制 (Discretionary Access Control, DAC) 和强制访问控制 (Mandatory Access Control, MAC) 两大类^[8]。由于 DAC 的低灵活性和 MAC 不支持完整性保护的局限性，出现了基于角色的访问控制模型 (Role-Based Access Control, RBAC)^[9]，通过定义不同的角色、角色的继承关系和各角色之间的联系及限制，动态或静态地规范用户行为。

(3) 隐蔽信道：隐蔽信道是指允许进程以危害系统安全策略的方式传输信息的通信信道^[10]。隐蔽信道分析技术主要关注其建模、识别、度量 and 处置^[11]，信道建模关注隐蔽信道的产生原因和信道的模型表示，主要包括信息流模型和无干扰模型；信道识别对系统设计和代码进行分析，寻找可能被用来构建信道的共享资源、原语等设施，具体识别方法有无干扰分析法、信息流分析法、共享资源矩阵方法、隐蔽流树方法、代码级分析技术等；信道度量使用信道容量作为信道威胁的评价指标，信道容量度量方法分为形式化和非形式化两类。此外信道度量指标还包括短消息指标、隐蔽信道因素、相对容量等；信道处置措施包括信道消除、限制、审计和监测，由于信道消除难以实现，一般采用限制信道能力的处置措施破坏隐蔽信道传输能力，包括添加干扰、延时^[12-13]等。

(4) 可信计算：可信计算是从微机的芯片、硬件结构和操作系统等方面综合采取措施确保源头微机的信息安全。ISO/IEC 15408 标准定义可信为：参与计算的组件、操作或过程在任意的条件下是可预测的，并能够抵御病毒和物理干扰^[14]。可信计算平台的基本思想是首先构建一个信任根，再建立一条信任链，从信任根开始到硬件平台、操作系

统、再到应用，一级认证一级，一级信任一级，从而把信任扩展到整个计算机系统^[15]。可信计算平台的主要技术包括可信硬件平台、可信平台模块、支撑软件、信任链和密码技术。依此技术形成的可信计算机可以构成各种安全应用平台，也可应用于网络将信任链从平台延伸至网络可信。

20 世纪 70 年代后，随网络技术的发展使计算机暴露在开放环境中，受到了新的安全挑战，信息安全研究开始从信息系统向虚拟的网络世界集中。

2 网络安全

2.1 网络安全问题的起源及发展

20 世纪 70 年代起，以互联网为代表的计算机网络快速发展。计算机网络的发展带来了新的安全威胁，“网络安全”一词也逐渐被大众所知晓。

计算机网络是指多台计算机设备通过硬件通信介质相连，并通过软件系统实现计算机之间通信的计算系统的集合。通过计算机网络，可以共享资源、协同工作、信息交互、实时处理，以及提供各种网络服务等^[16]。

20 世纪 60 年代至 70 年代，计算机网络由最初美国的 4 台计算机互联扩展到英国、挪威，逐步形成了互联网。20 世纪 70 年代末，TCP/IP 协议规范出台，为互联网的构建和运行提供了技术支撑^[17]。20 世纪 90 年代，依托超文本传输协议 (HyperText Transfer Protocol, HTTP) 的万维网 (World Wide Web, WWW) 被广泛应用在互联网上，降低了非专业人员的使用门槛，互联网迅速发展成为供全球使用的商业网络。

互联网的普及与应用实现了资源互通和共享，但由于互联网缺少足够的安全设计，也带来了逐年递增的网络安全事件，木马病毒、后门、蠕虫病毒、网络攻击、网络窃听等安全问题成为信息安全行业的新趋势和新特点，信息安全开始聚焦于网络世界。此时，“信息安全”一词已无法准确描述行业发展的新特征和新进展，“网络安全 (Network Security)”开始被广泛使用。进入以网络为核心的 21 世纪，“网络安全”成为更为社会和业界所关注的概念。

随着全球社会信息化、智能化的深入发展和持续推进，网络武器、网络间谍、网络犯罪等安全问

题相继发生，这些安全问题具有综合性和全球性的新特点，“网络空间安全（Cyberspace Security）”随之出现，本节中我们仅讨论“网络安全（Network Security）”。

2.2 网络安全的定义和目标

网络安全（Network security）是一项具有多种功能需求的系统工程，ISO/IEC 27033-1:2015 标准指出：网络安全适用于设备的安全，与设备、应用/服务和最终用户相关的管理活动的安全，以及通过通信链路传输的信息的安全^[18]。

“信息安全”所反映的安全问题基于“信息”，“网络安全”所反映的安全问题基于“网络”。信息安全最初是基于加密通信所提出的概念，以往较多地注意数据安全。网络安全是基于互联网发展以及网络社会到来所面临的信息安全新挑战所提出的概念，网络安全从网络系统软硬件的互联互通着眼，关注网络系统中的数据内容是否遭到破坏、更改、泄露，系统是否连续可靠地正常运行等^[19]。

网络安全具有如下特点：①网络安全是一个系统概念，需要建立完善的安全体系来保障。网络安全不仅仅是技术问题，也是管理问题，安全管理、法律约束和安全教育都必不可少；②网络安全是多层次、多等级的，不同层次和等级的网络要求是不同的，需要采用不同层次和等级的手段进行安全防护；③网络安全是随着服务和应用而动态变化的，需要提供相应的网络安全技术支持。网络的安全机制与技术也在发展变化，其安全策略需要不断地检查、评估和调整；④网络安全不是绝对的，是相对的。安全防护手段并不能保证网络绝对安全，无法杜绝所有对网络的侵扰和破坏，其作用在于尽可能地防护，以及在受到攻击后尽量将损失降低^[20]。

网络安全的目标是保护网络中的信息数据和网络系统本身的安全^[21]，主要包含以下几个方面：①身份真实性：能够鉴别网络通信双方身份的真实性；②信息机密性：保证数据不会泄露给非授权的用户或实体；③信息完整性：保证数据的一致性，防止数据被非授权的用户或实体篡改或破坏；④服务可用性：保证合法用户能正常获取信息和使用系统资源；⑤不可否认性：建立相应的机制，所有通

信参与者无法否认其行为；⑥系统可控性：限制对网络资源和数据的访问，阻止未授权使用资源、未授权公开或修改数据；⑦可审查性：对出现的网络安全问题提供可调查的依据和手段。

2.3 网络安全的主要技术

网络安全的常见技术主要可分为五类：数据加密与访问控制技术、防火墙技术、入侵检测技术、虚拟专用网技术（VPN）和防病毒技术^[22]。

（1）数据加密与访问控制技术：数据加密技术主要用于网络传输以及数据存储。可以分为数据存储、数据传输、数据完整性鉴别以及密钥管理技术等。网络的主要功能是资源共享，但共享是在一定范围、一定权限内的共享，访问控制技术可以控制非法访问，保护资源的合法使用。

（2）防火墙技术：防火墙技术是在不同计算机网络之间设置安全屏障，对通过防火墙的数据进行筛选，阻止不符合安全策略的数据流。防火墙是由一些软、硬件组合而成的网络访问控制器，根据一定的安全规则来控制流过防火墙的数据包，如阻断或转发、屏蔽内部网络的信息、拓扑结构和运行状况。防火墙技术主要分为包过滤技术、状态检测技术、代理服务技术等，主要用来阻止外部网络对内部网络的入侵。

（3）入侵检测技术：入侵检测系统被看作网络安全防护的第二道闸门，它通过收集分析网络或计算机系统中若干关键点的信息，检测其中是否有违反网络安全策略的行为，判断是否受到攻击，在运行中一旦发现入侵攻击，系统就会通过其防护系统阻断入侵攻击。与此同时，入侵检测系统具有记录分析数据的功能，通过记录入侵攻击相关信息，从而加强系统的防范能力，避免再次遭到此类攻击。

（4）虚拟专用网技术：VPN 指通过在一个公用网络中建立一条安全、专用的虚拟通道，连接异地的两个网络，构成逻辑上的虚拟子网。VPN 通过公用网络来传输私有数据，因此需要确保传输的数据不会被窃取、篡改，其安全性的保证主要通过密码技术、鉴别技术、隧道技术和密钥管理技术等实现。

（5）防病毒技术：计算机病毒指一组具有自

我复制、传播能力的代码，具有隐蔽性、传染性、潜伏性、破坏性等特点。伴随计算机网络技术的迅速发展，计算机病毒也日新月异，不断产生的新型病毒对计算机网络安全造成更大的威胁。防病毒技术通过比较法、特征字识别法、分析法等方式检测网络和系统中的病毒源，阻断病毒传播途径并加以清除。

3 网络空间安全

3.1 网络空间安全问题的起源及发展

21世纪以来，伴随信息技术的飞速发展，出现了物联网、人工智能、云计算、大数据、移动互联网、智能制造等新一代信息技术，人们的生产生活方式发生全面改变。新技术的发展带来了新的安全问题，网络空间安全（Cyberspace Security）的概念逐步进入大众视野。

2003年，美国政府发布《网络空间安全国家战略》，该战略明确了网络空间安全的战略地位，认为新形势下恐怖敌对势力与信息技术的结合对美国国家安全构成严峻威胁。2008年，第54号国家安全总统令发布并成为强制性的政府命令，目的是打造和构建国家层面的网络空间安全防御体系。2011年，美国国防部发布《网络空间行动战略》，这一战略明确将网络空间与陆、海、空、太空并列为五大行动领域^[23]。

2012年，中国共产党举行第十八次代表大会并发表大会报告，报告中指出，国防和军队现代化建设，要适应国家发展战略和安全战略新要求，高度关注海洋、太空、网络空间安全，提高以打赢信息化条件下局部战争能力为核心的完成多样化军事任务能力。2016年11月，《中华人民共和国网络安全法》（《Cybersecurity Law of the People's Republic of China》）颁布，明确要“保障网络安全，维护网络空间主权和国家安全、社会公共利益，保护公民、法人和其他组织的合法权益，促进经济社会信息化健康发展”。

除国家战略逐步向网络空间安全部署外，国际标准组织ISO也陆续推出相应文件。2012年发布ISO/IEC 27032:2012信息技术-安全技术-网络安全指南^[24]，指出现有的信息安全和网络安全等无法再

覆盖网络空间中的安全问题。2020年发布ISO/IEC TS 27100:2020信息技术-网络安全-概述和概念^[25]，进一步完善了网络空间安全相关的内容。

3.2 网络空间安全的定义及目标

在ISO/IEC 27032:2012中，对于网络空间安全的定义为：保护网络空间中信息的保密性、完整性、可用性。此外，也可包含真实性、可追责性、不可否认性和可靠性等其他属性。注解提到，该定义是根据ISO/IEC 27000:2009中信息安全（information security）的定义改编。二者对比可以发现，对网络空间安全的定义仅增加了“in the Cyberspace”这样的扩展描述。这一阶段的定义具有很大的局限性，该版标准还提出了一个新的概念“Cybersafety”作为补充：网络空间安全性是一种状态，可免受物理的、社会的、精神的、财务的、政治的、情感的、职业的、心理的、教育的或者其他类型或后果的失败、损害、错误、事故、伤害或者其他在网络空间中可以视为不希望发生的事件。可见，对于网络空间安全，ISO并非真的只关注“信息”本身。

在2020年发布的技术规范ISO/IEC TS 27100:2020中重新对网络空间安全进行了定义：保护人民、社会、组织和国家免受网络风险，保护意味着将网络风险保持在可容忍的水平。对于网络风险也给出了相应的定义：风险是不确定性对目标的影响，网络风险可以表示为不确定性对网络空间中实体目标的影响；网络风险与将利用网络空间漏洞从而对网络空间实体造成伤害的潜在的威胁有关。至此，网络空间安全的定义趋于成熟。

目前，网络安全（Cybersecurity）与网络空间安全（Cyberspace Security）是同一个概念，因为中文翻译的原因，在现阶段处于混用状态，但与传统意义上的网络安全（Network Security）不是一个概念，它们在研究对象和目标上都发生了新的变化。

Cyber一词最早出现在1948年，数学家维纳首创控制论(cybernetics)，该词源自希腊语Kubernetes，原意是指舵手(rudder、steersman)。控制论的副标题是“关于动物和机器中控制和通信的科学”，cyber在此文中具有控制、通信的双重涵义^[26]。

国际标准组织ISO发布的技术规范中对cyberspace这样定义^[25]：网络、服务、系统、人员、

流程、组织的互连数字环境，以及驻留在数字化环境中或贯穿数字化环境的事物。并在概念中指出：网络空间是一个基于数字化技术的复杂环境，它为人與人之间、人与企业、政府、非营利组织或其他团体等公共或私人的实体之间的正式或非正式的互动提供了一个全球性的数字化交互场所。

随着时间推移和技术的变革，网络空间所代表的范围已远大于传统网络的概念，除因特网、电信网外，还包括各种新型的信息网络，如工控网、物联网。此外，网络空间还与陆海空天一样具有全球空间的性质，在这个空间中有全人类的宝贵战略资源，不仅仅是用于作战，还可用于政治、经济、外交等活动。

对于网络空间安全的研究目标，ISO 的技术规范中有如下阐述^[25]：保持在网络空间中运营的实体的稳定性、连续性和安全性在可接受的水平。其关注的领域包括：①社会、组织和国家的稳定性和连续性；②个人和组织的财产（包括信息资产）；③人的生命和健康。

美国《网络空间安全国家战略》提出三大战略目标：防止美国关键基础设施遭受网络攻击；减少美国针对网络攻击的脆弱性；确实遭受网络攻击时，将损害及恢复时间降至最低。2016年，美国《国防授权法案》将网络司令部提升为完备的作战司令部，聚焦于三项核心使命：防卫国防部网络并确保其数据安全性；支持联合军事指挥官制定的各项作战目标；在接收到指令后，保护美国的各项关键性基础设施^[23]。

2016年12月，国家互联网信息办公室发布《国家网络空间安全战略》，阐明了我国推进网络空间和平、安全、开放、合作、有序，维护国家主权、安全、发展利益，实现建设网络强国的战略目标。文中指出，维护我国网络空间安全，有九大战略任务：①坚定捍卫网络空间主权；②坚决维护国家安全；③保护关键信息基础设施；④加强网络文化建设；⑤打击网络恐怖和违法犯罪；⑥完善网络治理体系；⑦夯实网络安全基础；⑧提升网络空间防护能力；⑨强化网络空间国际合作。

从标准和国家层面的部署来看，网络空间安全的目标可以总结为：保卫网络空间中所有构成要素的广义安全，包含①数据安全、网络及通信安全、

系统及设备安全；②用户安全，既包括个人的生命财产安全，也包括社会与国家的安全稳定。最终保持网络空间这个复杂体系的连续可靠。

网络空间安全具有如下特点^[27-28]：

(1) 随着网络空间成为一大主权领域空间，保卫网络空间安全已经上升到了保卫国家安全的高度。网络空间安全与政治、军事等领域交联在一起，成为国家间较量的新形式。

(2) 纵观国内外网络空间安全的政策和战略布局，保护关键信息基础设施是重中之重。

(3) 网络空间安全面临快速发展的新技术带来的挑战。除了传统的信息保密、网络基础设施等安全建设外，网络空间安全在各种部署模式中具有特定的安全需求，如移动互联网安全、云计算安全、大数据安全等。

(4) 相较于传统网络安全，网络空间安全既关注以信息技术为主的物理域和信息域，还要防止由信息技术滥用所引发的政治安全、经济安全、文化安全等问题。

3.3 网络空间安全的主要技术

业界对于网络空间安全技术的研究也随着新技术的发展在不断向前推进^[29-36]，重点关注的领域有：移动终端安全、云平台安全、工业控制系统安全、大数据安全以及新密码体制等。

(1) 移动互联网的快速发展使得智能终端成为了网络攻击的一大目标，对用户采取身份认证是一道非常重要的防线。现有移动终端的认证技术可分为登录阶段的认证技术和会话期间的认证技术两类。主要包含基于知识和基于令牌的认证技术、基于用户生物特征的认证技术、基于击键行为特征的认证技术、基于步态的认证技术、基于触控行为特征的认证技术等。智能终端的另一大安全技术就是恶意代码检测，将原有的恶意代码检测技术和云查杀等相结合，以符合智能终端算力有限的场景。

(2) 云平台安全主要研究方向有：①云容灾技术，利用物理上隔离的两台设备以及一些特殊的算法，实现资源的异地分配；②虚拟化安全，云计算环境下针对虚拟机的攻击可分内部攻击和外部攻击两类，现有的防御技术主要包括虚拟机安全监控、虚拟机隔离性保护和虚拟机监控器安全防护三个方面。

(3) 工控安全关键技术主要包含如下方面:

①分区隔离与数据安全交换技术,按照等级保护的基本原则,进行网络分区和分区管理,并研究分区之前的网络隔离技术和数据传输技术;②通信规约和协议安全分析技术,包括工控系统规约一致性和安全性研究、工控协议语义分析及异常监测技术研究等;③终端设备攻防技术研究,包含密码破解技术、权限突破技术、后门技术等;④特种木马病毒检测与防护技术;⑤工控蜜罐技术。

(4) 大数据安全最受关注的问题和关键技术难点就是隐私保护。目前隐私保护的研究大致可分为两个方向:基于数据发布的隐私保护研究和针对数据挖掘的隐私保护研究。此外,数据的不一致性检测和生命周期管理也是业界重点研究的方向。

(5) 密码技术是保障网络空间安全的基本手段。大数据、云计算、物联网和量子计算等新技术的发展,不断给密码技术带来挑战,抗量子密码、面向云环境的全同态加密、可搜索加密和功能加密、面向物联网环境的轻量级加密等新兴技术相继被提出。

需要注意的是,除了上文提及的为应对新技术挑战而发展的安全研究,网络空间治理的其他方面如打击电信网络诈骗、制止煽动宗教极端主义和民族分裂思想、加强互联网内容建设等,仍需要结合更多更全面的信息技术手段和管理手段,在本文中暂不展开介绍。

4 结语

本文探讨了信息安全、网络安全和网络空间安全三个词汇的含义、目标及主要技术。信息安全作为最早出现和最广泛使用的词汇,侧重于信息资源及其载体的安全。随着计算机网络的发展,新的安全问题出现,网络安全是基于互联网发展以及网络社会到来所面临的信息安全新挑战所提出的概念,除了关注数据安全,网络系统自身的可靠运行也是关注的重点。

随着新技术的发展,网络空间成为一大主权领域空间,保卫网络空间安全上升到保卫国家安全的高度。网络空间安全涵盖了信息、物理、政治、经济和文化等多个领域,具有跨时空、多层次、立体化、广渗透、深融合等特征。网络空间安全包含了

信息域与物理域的安全,针对安全问题从信息域传播至物理域中,导致设备损坏甚至威胁人身安全的问题,目前暂无相应技术手段可以妥善解决。

参考文献:

- [1] GB/T 25069-2010, 信息安全技术 术语[S]
- [2] 印润远. 信息安全导论[M]. 中国铁道出版社, 2011
- [3] GB/T 18336 3-2001, 信息技术 安全技术信息技术安全性评估 准则第 3 部分:安全保证要求[S]
- [4] 沈昌祥, 张焕国, 冯登国等. 信息安全综述[J]. 中国科学(E 辑: 信息科学), 2007(2):129-150
- [5] ISO/IEC 27001:2005, Information technology — Security techniques — Information security management systems — Requirements [S]
- [6] ISO/IEC 27000:2018 Information technology — Security techniques — Information security management systems — Overview and vocabulary[S]
- [7] 冯登国. 国内外密码学研究现状及发展趋势[J]. 通信学报, 2002(5):18-26
- [8] 李风华, 苏锐, 史国振等. 访问控制模型研究进展及发展趋势 [J]. 电子学报, 2012, 40(4):805-813
- [9] Ferraiolo, David F. Role-Based Access Control[M]. 2007
- [10] 鲍存军. 动态重传网络隐蔽信道的研究[D]. 南京理工大学, 2011
- [11] 王永吉, 吴敬征, 曾海涛等. 隐蔽信道研究[J]. 软件学报, 2010, 21(9):2262-2288
- [12] Hu W M. Reducing timing channels with fuzzy time[C]. Proceedings. 1991 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy, 1991:8-20
- [13] Tsai C R, Gligor V D. A Bandwidth Computation Model for Covert Storage Channels and Its Applications[C]. Proceedings. 1988 IEEE Symposium on Security and Privacy, 1988:108-121
- [14] 辛超, 苏京晶, 袁艺. 可信计算与可信网络及对网络安全的影响 [J]. 保密工作, 2013(11):40-41
- [15] 张焕国, 罗捷, 金刚等. 可信计算机技术与应用综述[J]. 计算机安全, 2006(6):8-12
- [16] 徐茂智, 邹维. 信息安全概论[M]. 人民邮电出版社, 2007
- [17] 寇晓葵, 王清贤. 网络安全协议: 原理、结构与应用 (第二版) [M]. 高等教育出版社, 2016
- [18] ISO/IEC 27033-1:2015, Information technology — Security techniques — Network security — Part 1: Overview and concepts[S]
- [19] 王世伟. 论信息安全、网络安全、网络空间安全[J]. 中国图书馆学报, 2015, 41(2):72-84

(下转第 20 页)

应用于汽轮发电机的自抗扰控制器设计

周运红^{1,2} 桑梓^{1,2} 刘丝丝^{1,2}

1. 能源装备工控网络安全四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 针对传统汽轮发电机转速控制响应慢、无法有效抑制网侧负荷变化引起的应急响应情况, 提出一种基于自抗扰控制的转速控制器。首先, 为了精准而快速地评估汽轮发电机组在各种环境下的运行工况, 在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建了汽轮发电机组的半实物仿真模型。其次, 基于自抗扰的控制方法优化了转速控制逻辑, 以减少非必要应急控制动作, 提高运行效率, 最后对汽轮机发电机组的暂稳态进行仿真分析。仿真实验结果表明, 基于自抗扰控制的汽轮发电机组在负载变化时能快速恢复稳定, 使转速在极小的范围内波动后快速稳定, 减少触发应急控制的概率, 有效提高了机组运行效率。

关键词: 汽轮发电机; 自抗扰控制; 应急控制; MATLAB/Simulink

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0016-05

Design of Active Disturbance Rejection Controller for Turbo-generator

ZHOU Yunhong^{1,2}, SANG Zi^{1,2}, LIU Sisi^{1,2}

(1. Energy equipment Cyber security Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: In order to solve the problem that the slow response of the traditional speed control adopt on turbo-generator which cannot effectively suppress the emergency response caused by the load change on the grid side, a speed controller based on active disturbance rejection control is proposed. First, in order to evaluate the operating conditions of the turbo-generator in various environments accurately and quickly, a simulation model of the turbo-generator is built in the MATLAB/Simulink simulation environment. Secondly, the speed control logic is optimized by the control method based on the active disturbance rejection control to reduce unnecessary emergency control actions, which improves the operation efficiency. Finally, the transient-steady state of the turbo-generator is simulated and analyzed. The simulation results show that the turbo-generator adopt the active disturbance rejection control can quickly recover stabilize while the grid side load changes, which means the speed can be quickly stabilized after fluctuating within a very small range, reducing the probability of triggering emergency control, and effectively improving the operating efficiency of the turbo-generator.

Key words: turbo-generator; active disturbance rejection control; emergency control;MATLAB/Simulink

随着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高, 用电量正在逐年攀升, 对发电厂供电品质的要求也在不断提高, 包括要求发电机组拥有更好的负荷适应能力和更快的响应速度^[1]。在电力系统中, 保持频率稳定是使系统安全运行的重要因素。电力系统不稳定不仅会影响用户用电, 触发应急控制动作, 损害系统设备, 甚至会导致电网崩溃, 从而引

起大面积停电, 对社会造成巨大损失^[2]。目前, 大多汽轮机是采用数字电液式调节系统来作为其主要控制系统, 具有很高的拓展性, 可以根据实际工况拓展不同的功能, 组态灵活方便。然而现有的 DEH 在可控性方面已无法满足电网自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 和协调控制系统 (Coordinated Control System, CCS) 等的要求,

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目: 汽轮机网络安全一体化保护系统关键技术研究与开发; 项目编号: 2019YFG0534。

作者简介: 周运红(1994—), 男, 2021年毕业于西安交通大学控制科学与工程专业, 博士, 工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司工控网络安全实验室研究员, 主要研究方向为能源装备工控网络安全技术研究。

不仅给用户运行维护带来了许多不便, 频繁的应急控制动作, 而且难以满足现代发电厂的技术发展要求, 甚至会严重威胁电网和机组的安全^[3]。因此为满足实际工况需要, 得到平稳、快速的转速及功率控制, 需要构建稳定、控制效果良好的汽轮发电机组仿真模型^[4]。

为了保证负荷快速响应的同时减小主汽压力的波动, 文献[5]提出一种结合广义动态模糊神经网络 (Generalized Dynamic Fuzzy Neural Network, GD-FNN) 与强化学习方法设计具有在线学习能力的神经网络逆控制器, 虽然该方法取得了较好的控制性能, 然而其算法训练不仅复杂, 且极度依赖训练方法。文献[6]提出一种变结构模糊控制策略以控制汽轮机转速, 减少负荷干扰对发电系统的影响, 增加发电机组的鲁棒性, 文献[2]为了增加电力系统的鲁棒性, 减少非必要的应急控制动作此时, 提高系统运行效率, 提出电力系统自抗扰控制, 侧重用电侧的负荷干扰问题, 然而未更深入的考虑发电侧转速功率问题。文献[7]提出一种基于模糊控制器的电力应急指挥系统自动控制策略, 减少控制指令传输时间, 提高了控制效率, 然而新增的控制设备加大了系统成本。

因此本文针对发电过程中, 用电负荷变化的情况, 提出一种基于自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 的汽轮发电机组控制策略, 以优化数字电液系统控制性能。当外部负荷反馈量发生变化时, 自抗扰控制器通过接收变量信号发出的控制信号调整机组原来的功率控制器输入信号, 然后调节汽轮机的开度, 从而更好地控制汽轮机的转速以达到控制的目的, 减少非必要的应急控制动作此时, 提高系统运行效率。最后, 采用 Matlab 软件的 Simulink 仿真环境, 搭建基于自抗扰控制的汽轮发电机组仿真模型, 对系统启动、负载突变 2 种典型的工况进行仿真分析, 并与传统汽轮机机组的调节效果进行对比, 验证其可靠性。

1 汽轮发电机组拓扑结构

汽轮发电机主要拓扑结构如图 1 所示, 汽轮机发电系统的主要结构可按照压水堆、调节阀、电液转换器、油动机、蒸汽容积箱、转子、励磁系统、

同步发电机这几个部分来划分。压水堆为汽轮机提供原始动力, 汽轮机动力上的变化转化为其功率变化并与给定值进行比较后, 经调节阀得到开度信号; 然后电液转换器将此信号转换放大后调节油动机, 再由油动机提供的动力反过来控制阀门大小, 即通过控制汽轮机的进气量来达到控制汽轮机输出转速的目的。汽轮机通过输出转矩驱动发电机, 然后发电机在励磁系统的电压调节下得到工况要求的输出电压。

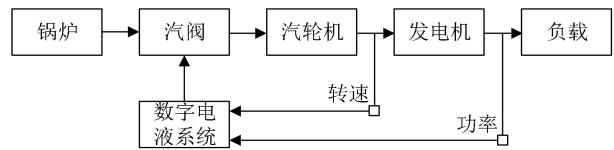


图 1 汽轮发电机控制结构

2 汽轮发电机组数学模型

2.1 电液转换模型

通过文献[4]中电液系统的机理分析, 电液转换器模型可简化为一阶系统:

$$T(s) = \frac{1}{T_d s + 1} \quad (1)$$

其中, T_d , 为电液转换器时间常数。

2.2 油动机模型

通过油动机系统的机理分析发现, 油动机可采用二阶系统进行建模, 在不考虑卸荷阀的情况下, 其数学描述如下所示^[8]:

$$G(s) = \frac{1}{T_{sv} s + 1} \times \frac{1}{T_{ch} s} \quad (2)$$

其中, T_{sv} 是伺服阀的时间常数, T_{ch} 是油动机的时间常数。两个时间常数主要通过分别对油动机及其伺服阀进行系统辨识来获得。

2.3 蒸汽容积模型

根据工程热力学知识, 蒸汽容积模型为简单的一阶系统:

$$G_x(s) = \frac{1}{T_x s}, x = h, i, l \quad (3)$$

其中, T_h 是高压缸的时间常数, T_i 是中压缸的时间常数, T_l 是低压缸的时间常数。汽缸的时间常数 T_x 通过各级组的蒸汽质量总和和温度进行计算

2.4 汽轮机转矩模型

由发电机的运行特性已知，发电机的端电压主要决定于无功功率，而无功功率又决定于发电机的励磁；电力系统的频率主要决定于有功功率，即决定于原动机的驱动功率。因此，发电厂的电压由发电机的励磁系统调节，频率由汽轮机的功率控制系统调节。

汽轮发电机组的转速决定着发电频率，而汽轮发电机组转子的转速又决定于作用在转子上的力矩。作用在机组转子上的力矩主要是蒸汽驱动力矩 M_{st} 、电磁阻力矩 M_{em} 和机械摩擦阻力矩 M_f ，转子旋转运动的动态方程为：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} - M_{em} - M_f \quad (4)$$

其中， J 为转子的转动惯量， ω 为转子旋转角速度。

当上述三个力矩失去平衡时，即蒸汽力矩大于或小于电磁与摩擦阻力矩之和，转子在不平衡力矩作用下，转速加速上升或减速下降。

2.5 发电机模型

发电机主要通过励磁系统控制无功功率输出来控制机端电压，其励磁系统采用一阶模型进行建模得到：

$$\frac{V_{fd}}{e_f} = \frac{1}{K_e + sT_e} \quad (5)$$

其中， V_{fd} 为励磁电压， e_f 为励磁控制量， K_e 为增益， T_e 为时间常数。

3 自抗扰控制器设计

韩京清教授在深入认识了调节理论和现代控制理论的优缺点的基础上^[9]，提出了一系列控制设计思想并形成了自抗扰控制技术，其自抗扰控制技术的核心思想就是把作用于被控对象的所有不确定因素作用都归结为“未知扰动”而用对象的输入输出数据对它进行估计并予以补偿^[10]，因此对于实际的系统，并不需要了解各个扰动量，从而简化了建模过程。

自抗扰控制技术可以分为三个主要模块，跟踪微分器，扩张的状态观测器，非线性反馈。本文提出的电压控制策略中，通过调节控制器参数 $b_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 等参数，就可以得到很好的控制效果。其 ADRC 控制器主要结构如图 2 所示。

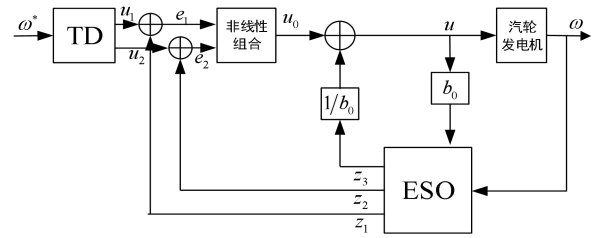


图 2 自抗扰控制器结构

3.1 跟踪微分器

该模块事先安排过渡过程，提取含有随机噪声的输入信号及其微分信号以解决 PID 超调性、快速性之间的矛盾。其一般的响应特征：在有限的时间单调地跟上输入信号，同时也给出此过程的微分信号，即阶跃信号将以有限时间无超调的进入稳态过程。

$$\begin{cases} e = \omega^* - u_0 \\ fh = fhan(e, v_2, r_0, h) \\ u_1 = u_1 + h \cdot v_2 \\ u_2 = u_2 + h \cdot fh \end{cases} \quad (6)$$

其中， ω^* 是参考转速，而 u_1 为其跟踪值， u_2 为其跟踪微分值， r 表示跟踪速度，其值越大，速度越快， h 表示步长。 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 函数为非线性函数，其定义如下：

$$\begin{cases} d = rh^2 \\ a_0 = hx_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ a = (a_0 + y)fsy(y, d) + a_2(1 - fsy(y, d)) \\ fhan = -r(a/d)fsy(y, d) - r\text{sign}(a)(1 - fsy(a, d)) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $fsy(x, d)$ 函数定义如下：

$$fsy(x, d) = (\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d))/2 \quad (8)$$

3.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器估计系统内外扰动的实时作用值，并在反馈中给予补偿，用补偿的方法消除扰动的影响，从而具有抗干扰的作用。该模块主要通过控制对象的输入和输出来实时的估计对象的状态即实际转速以及产生一个被扩张的状态，而扩展状态是独立于描述对象传递关系的，其主要实现过程为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ fe = fal\left(e, \frac{1}{2}, d\right) \\ fe_1 = fal\left(e, \frac{1}{4}, d\right) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_1 e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_2 \cdot fe + b \cdot u) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_3 \cdot fe_1) \end{cases} \quad (9)$$

$$fal(e, a, d) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{a-1}}, |e| \leq d \\ |e|^b \cdot sign(e), |e| > d \end{cases} \quad (10)$$

其中, y 为当前的直流侧电压即控制对象的输出, z_1 为其实时估计值, z_2 为估计值的微分, z_3 为扩展的状态观测量, u 为其 ADRC 输出的控制量即控制对象的输入, 该模块的调节量为 $b_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 。

3.3 非线性组合控制

误差反馈控制主要是扰动抑制和消减: 根据 TD 得到的跟踪信号, 与 ESO 观测到的系统输出、输出导数的误差, 进而进行控制和扰动补偿。其非线性方程为:

$$\begin{cases} u_0 = k_p \cdot fal(e_1, \alpha_1, d) + k_d \cdot fal(e_2, \alpha_2, d) \\ e_1 = u_1 - z_1 \\ e_2 = u_2 - z_2 \end{cases} \quad (11)$$

当系统出现干扰而导致转速发生突变, ESO 会及时地发现并跟踪突变信号, 使其作为总的内外干扰而产生相应的补偿转速控制量, 通过控制对象使得因扰动而改变的转速能快速地回到参考值。

因此应用于汽轮发电机的控制结构如图 3 所示。

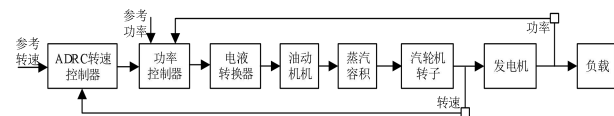


图 3 基于 ADRC 的汽轮发电机控制结构

4 实验结果

为了验证本文所提出的基于 ADRC 控制的汽轮发电机模型的有效性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建了汽轮发电机的仿真模型如图 4 所示。该模型首先搭建汽轮机内部控制结构模型, 然后再在汽轮机模型的基础上搭建汽轮发电机组模型, 最后采用本文所提控制器进行仿真分析。

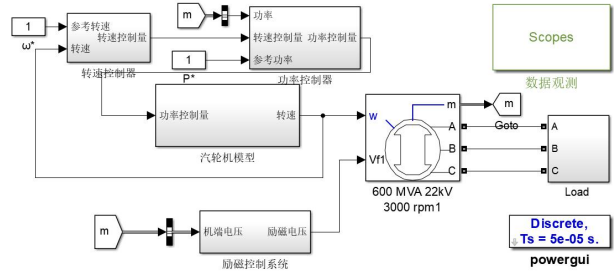


图 4 汽轮发电机组仿真模型

仿真实验平台所涉及参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

参数	数值
发电机功率/W	600E6
发电机线电压/V	22E3
发电机频率/Hz	50
励磁系统初始电压/V	0

为了验证所提 ADRC 算法的有效性, 与传统 PI 转速控制进行对比实验。

4.1 汽轮机启动过程

其中图 5 和图 6 为本文所提 ADRC 转速控制器与原有 PI 控制器下汽轮机转速的仿真波形。稳定转速为 3000 r/min, 可以看到 ADRC 控制器能快速达到参考值同时有效抑制超调, 而传统 PI 算法在快速到达稳定值时往往伴随着较大的超调。

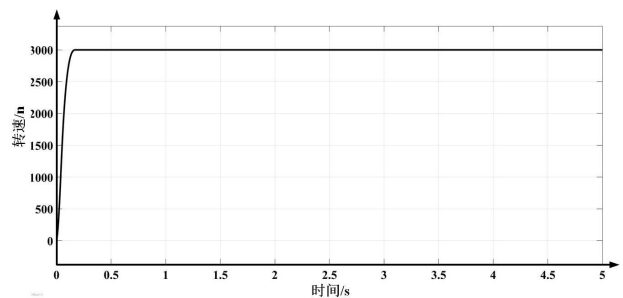


图 5 采用 ADRC 控制器启动过程

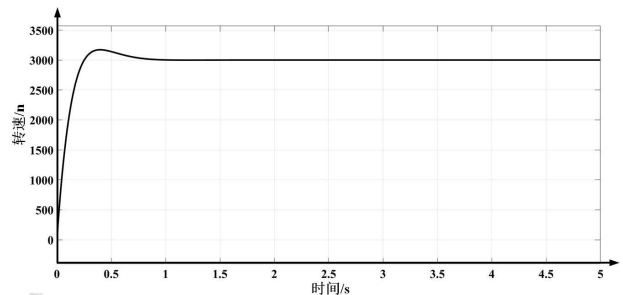


图 6 采用 PI 控制器启动过程

4.2 汽轮发电机负载改变过程

在转速及机端电压稳定时，闭合开关投入电阻负载，使得系统达到额定功率，观察转速变化，通过图7和图8的运行状态经过放大后可以看到所提ADRC算法能有效抑制转速波动并快速恢复到参考值；而原有PID控制器经过一段超调后回到原有参考值。

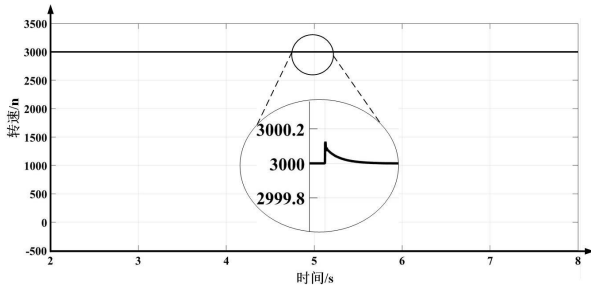


图7 采用ADRC突加负载过程

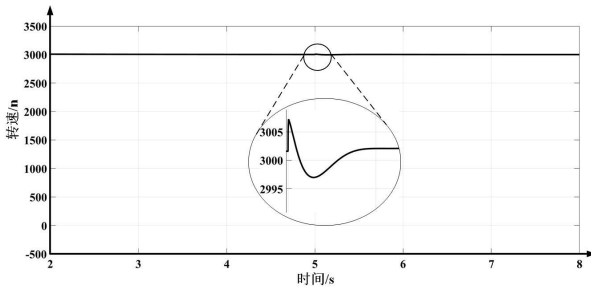


图8 采用PI控制器突加负载过程

5 结语

本文针对汽轮发电机组调速器控制，提出了一种自抗扰控制器，该控制器具有易实现、操作性强、鲁棒性强、控制精度高等优点。当汽轮机发电机组

(上接第15页)

[22] 彭沙沙, 张红梅, 卞东亮. 计算机网络安全分析研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(4):109-112+116

[23] 高荣伟. 美国网络空间安全战略建设[J]. 军事文摘, 2018(9):54-57

[24] ISO/IEC 27032:2012, Information technology — Security techniques — Guidelines for cybersecurity[S]

[25] ISO/IEC TS 27100:2020, Information technology — Cybersecurity — Overview and concepts [S]

[26] 戴浩. 赛博空间(cyberspace)概念的由来及译名探讨[EB/OL]. <https://xueshu.blogchina.com/606177333.html>

[27] 张焕国, 杜瑞颖. 网络空间安全学科简论[J]. 网络与信息安全学报, 2019, 5(3):4-18

[28] 张焕国, 韩文报, 来学嘉等. 网络空间安全综述[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(2):125-164

[29] 王群, 李馥娟, 周倩. 网络空间安全体系结构及其关键技术研

究[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(4):495-504

[30] 罗军舟, 杨明, 凌振等. 网络空间安全体系与关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(8):939-968

[31] 张应辉, 郑东, 马春光. 网络空间安全体系及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(1):10-13+18

[32] 朱世顺, 黄益彬, 朱应飞等. 工业控制系统信息安全防护关键技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(11):106-109

[33] 陶耀东, 李宁, 曾广圣. 工业控制系统安全综述[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(13):8-18

[34] 杨婷, 张嘉元, 黄在起等. 工业控制系统安全综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(5):1035-1053

[35] 陈兴蜀, 杨露, 罗永刚. 大数据安全保护技术[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5):1-12

[36] 王丹, 赵文兵, 丁治明. 大数据安全保障关键技术分析综述[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(3):335-349+322

参考文献:

[1] 潘琛, 向国进, 朱晓锦. 汽轮机数字电液控制系统的设计与实现[J]. 仪表技术, 2021(6):5-8

[2] 陈增强, 郑月敏, 孙明玮等. 含发电速率约束的三区域互联电力系统自抗扰控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9):1312-1319

[3] 袁晓舒, 吴桐, 刘杨等. 能源装备的网络安全要素分析[J]. 东方电气评论, 2021, 35(4):6-11

[4] 詹锦皓, 李维波, 高佳俊等. 基于串级前馈PID协调控制的汽轮发电机组建模方法[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(S1): 149-156

[5] 侯志鹏. 基于强化学习的模糊神经网络控制研究及应用[D]. 华北电力大学(北京), 2007

[6] 包艳. 汽轮机调速器的变结构模糊智能控制[J]. 制造业自动化, 2008, 30(11):86-89

[7] 刘军, 杨可军, 马跃江等. 基于模糊控制器的电力应急指挥系统自动控制策略[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(10): 219-222

[8] 桑梓. 基于信息物理融合的汽轮机数字电液控制系统信息安全仿真测试方法研究[J]. 东方电气评论, 2018, 32(2):15-20+28

[9] Han J Q.From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906

[10] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008:255-261

基于 AspenPlus 的生活垃圾衍生燃料与油漆废渣的等离子体气化模拟研究

谢斐¹ 徐莹璐² 胡春云¹ 吴家桦²

1. 东方电气洁能科技成都有限公司, 成都 611731; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 本文利用 AspenPlus 软件建立了等离子体气化模型, 针对不同混合比例的生活垃圾衍生燃料与油漆废渣研究在不同的等离子体输入功率、空气加入量、水蒸气/空气加入量对制备合成气特性的影响。结果表明, 等离子体输入功率的提高有利于气化合成气气体热值的提高, 随着油漆废渣比例的提高, 可以改变合成气中 CO 和 H₂ 的组分含量, 有利于合成气的进一步利用。ER 和蒸汽/空气比是影响气化过程的重要因素, 当 ER 为 0.35 时, 合成气产气率最高。当蒸汽/空气比增大时, CO 含量逐渐降低。因此应根据合成气的具体利用方式, 控制气化剂的种类和用量。

关键词: 等离子体气化; AspenPlus; 模拟; 生活垃圾衍生燃料; 油漆废渣

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0021-07

Simulation of Plasma Gasification of Refuse Derived Fuel and Paint Waste Based on AspenPlus

XIE Fei¹, XU Yinglu², HU Chunyun¹, WU Jiahua²

(1. Dongfang Electric Clean Energy Technology Chengdu Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: In this paper, the plasma gasification model is established by using Aspenplus software. Aiming at different mixing ratios of refuse derived fuel and paint waste, the different plasma input power, air addition and water vapor / air addition on the characteristics of syngas are studied. The results show that the increase of plasma input power is conducive to the increase of calorific value of gasification syngas. With the increase of the proportion of paint waste, the component contents of CO and H₂ in syngas can be changed, which is conducive to the further utilization of syngas. ER and steam / air ratio are important factors affecting the gasification process. When ER is 0.35, the gas production rate of syngas is the highest. When the steam / air ratio increases, the CO content decreases gradually. Therefore, the type and dosage of gasification agent should be controlled according to the specific utilization mode of syngas.

Keywords: plasma gasification; AspenPlus; simulation; refuse derived fuel; paint waste

焚烧技术是世界各国广泛采用的生活垃圾及危险废物的处理方式, 目前生活垃圾主要采用炉排炉焚烧技术, 而危险废物主要采用回转窑焚烧技术, 但是由于焚烧会产生二次污染, 容易造成邻避效应; 世界各国都在寻找更加环保的替代技术, 等离子体气化技术因为其环保排放低, 是一种非常有

潜力的处理技术^[1-3]。

近年来部分学者开展了针对等离子气化技术处理城市垃圾的数值模拟研究及实验研究, 通过利用热力学平衡建立了数值模拟模型来研究气化过程参数对固体废物气化的影响, 取得了部分进展。

Mountouris 等人对等离子体气化过程进行了热

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 四川省科技计划资助: 城镇生活垃圾及危险废物高效清洁气化关键技术研究; 立项编号: 2020YFG0393。

作者简介: 谢斐 (1985—), 2008 年毕业于华南理工大学化学工程与工艺专业, 本科, 高级工程师。现在东方电气科学技术研究院有限公司主要从事等离子热解气化技术研发工作。

力学分析,包括合成气产生、能量和火用分析,针对等离子体气化建立了 EPJ 模型,并进行了验证^[4]。

曹青则对比研究等离子体条件下与常规条件下生物质的热解行为特征,结果发现,与常规热解相比,等离子体条件下生物质热解 CO 产率高很多。同时也研究了等离子体分别热解煤和生物质混合物,由于生物质的挥发性成份所占比率要比煤炭高得多,所以生物质热解过程的转化率要明显高于煤的转化率;反应压力、热解温度、产物在装置内停留时间等因素是造成生物质在常规热解与等离子体热解两种情况下气体产物不同的主要原因^[5]。

长沙理工大学的曹小玲等人利用 ASPEN PLUS 软件建立模型,分别引入 O₂、水蒸气和 CO₂ 进行气化模拟过程,分析各个反应的实验结果和数据,数据发现,其中影响最大的因素是氧气当量值;O₂ 气化时,气体产物中 CO 与 H₂ 百分比之和能高达 72%,水蒸气气化时 CO 与 H₂ 百分比之和能高达 82.1%,CO₂ 气化时 CO 与 H₂ 百分比之和可达 82.4%之高;相比于氧气气化,H₂O 和 CO₂ 气化的合成气含有更多 CO 和 H₂,合成气质量较高;当不断增大三种气化剂量时,合成气的热值皆有减小的趋势;当增大 O₂ 当量值,气体产率先增加后平缓趋于 1.614 m³/kg;通入水蒸气和 CO₂ 时,气体产率不断增大^[6]。

本文利用 AspenPlus 软件开展生活垃圾衍生燃料与油漆废渣的共等离子体气化工工艺的模拟,获取实验条件下难以得到的气化过程参数,为气化工工艺进一步优化提供参考。与常规热解气化不同,生活垃圾衍生燃料与油漆废渣在等离子体气化中反应

温度更高,反应速率更快,反应也更加完全,因此更适合利用 AspenPlus 软件开展等离子体气化工工艺的模拟。

1 等离子体气化模型

1.1 模型建立

本文利用 AspenPlus 软件,结合固定床气化特点及吉布斯最小化自由能原理,建立等离子体气化工工艺模拟流程,针对不同混合比例的垃圾衍生燃料与油漆废渣研究在不同的等离子体输入功率、空气当量比、水蒸气/空气加入量对气化工合成气的影响。

为了准确模拟等离子体气化过程,并简化气化工模拟流程,本文根据固定床等离子体气化过程的工艺与反应机理,做如下假设:①反应物与气化剂在反应器内瞬间混合反应,气化过程稳态进行;②气化炉理想的分为高温反应区和中温反应区,各个反应区内温度分布均匀且反应中不考虑压力损失;③系统内不产生焦油;④物料中的灰分不参与气化反应。

根据反应器内的温度分布,可以将反应器分为中温反应区(LTZ)、高温反应区(HTZ),并将 H₂O、CO、CO₂、CH₄、N₂、O₂、C、S、COS、SO₂、H₂S 组分定义为常规组分。本文在利用 AspenPlus 建立模型时,物性方法采用 RK-Soave。给入物料 FEED1 利用煤的焓模型(HCOALGED)和密度模型(DCOALLIGT)被定义为非常规组分,灰分 ASH 也被定义为非常规组分。本文建立的反应模型如图 1 所示。模型流程图中各主要模块的作用如表 1 所示。

表 1 本模型中 AspenPlus 单元操作模型及用途

模块名称	Aspen Plus 模块类型	描述
HX0	HEATER	热交换器
HX3	HEATER	
DECOMP	RYIELD	收率反应器,模拟热解过程
HTZ	RGIBBS	吉布斯反应器,模拟气化炉内高温反应区
LTZ	RGIBBS	吉布斯反应器,模拟气化炉内中温反应区
B1	RSTOIC	计量反应器,模拟气化炉排渣部分燃烧室内燃烧反应
SEP1	SEP	分离器,根据工艺特点分离部分反应产物
SEP2	SEP	
SEP3	SEP	
MIX	MIXER	混合器,根据工艺特点,重新混合顶部干燥出来的水蒸气
MIXO2	MIXER	水蒸气气化时水蒸气与空气混合器

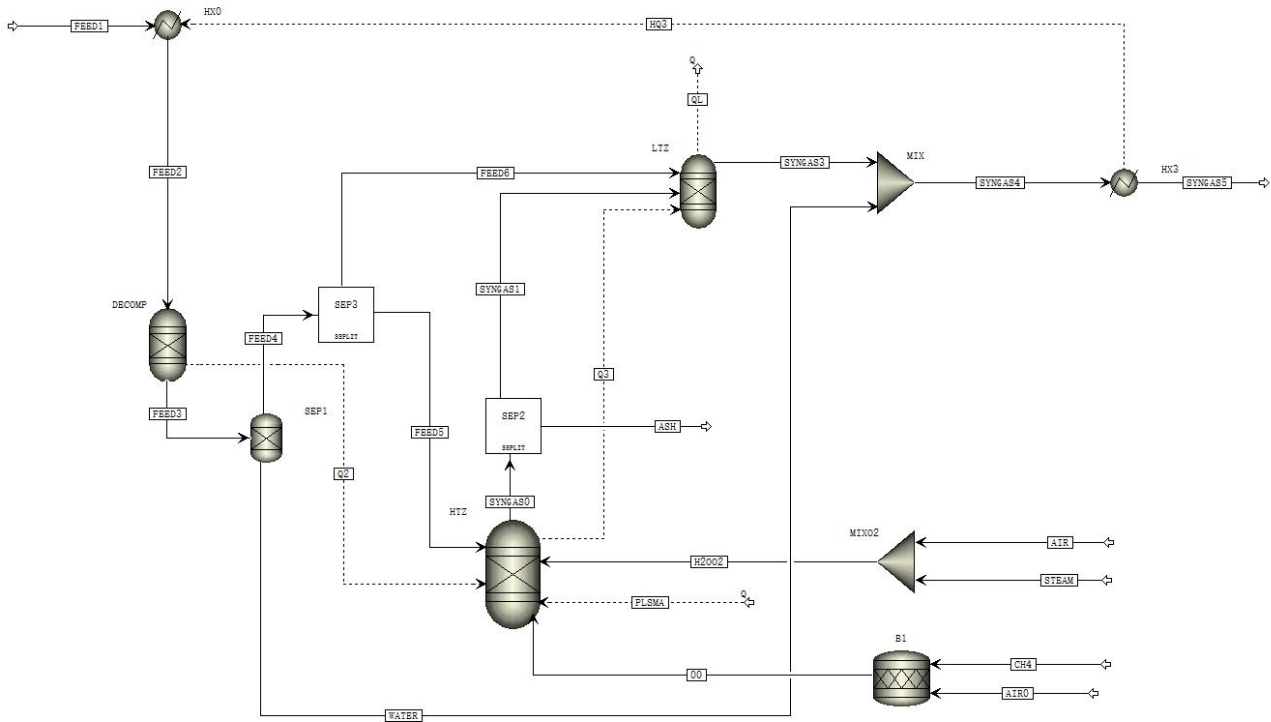


图 1 等离子体气化工艺流程

1.2 模型验证

为验证该模型，采用广东中山市大涌镇的原生生活垃圾制成的生活垃圾衍生燃料为原料开展仿真模拟及小试试验，该原料组分分析见下表 2。

表 2 生活垃圾衍生燃料的工业分析和元素分析

物料	工业分析/%				热值/(kJ/kg)	元素分析/%				
	水分	挥发分	灰分	固定碳		C	H	O	N	S
生活垃圾衍生燃料	6.65	71.64	9.98	11.73	21.97	48.73	6.54	26.95	0.85	0.29

将该原料的模拟结果与小试试验获得的结果进行对比，见表 3。

表 3 模拟结果与小试试验结果比较

气体成分	数值模拟结果	小试试验结果
CO	0.221 3	0.227 7
H ₂	0.159 1	0.151 3
CO ₂	0.094 8	0.099 8
N ₂	0.399 8	0.4
H ₂ O	0.124 2	0.120 6
SO ₂	0.000 7	0.000 6

由表 3 可以看出，数值模拟结果与试验结果相近，该模型成

2 等离子体气化模拟分析

等离子体气化过程是一个非常复杂的化学反

应，反应不仅受气化原料组成和气化剂的影响，而且气化过程工艺参数也会对其产生影响，例如气化原料组成、等离子功率、系统压力等。故本文将

垃圾衍生燃料与油漆废渣以不同比例混合，研究不同等离子功率下油漆废渣的添加量对混合物的气化性能的影响，并采用空气、水蒸气/空气等不同的气化剂研究其对气化工艺的影响。

模拟参数给定：进料量 100 kg/h，环境温度 25 °C。空气压力 0.5 MPa，温度 25 °C。蒸汽温度 180 °C，压力 0.5 MPa。

2.1 不同混合比例的原料的模拟分析

本文模拟使用的垃圾衍生燃料和油漆废渣原料的理化特性见下表 4。模拟参数输入条件：进料量 100 kg/h，油漆废渣混合比例范围 0~100%，环境温度 25 °C。气化介质：空气，压力 0.5 MPa，温度 25 °C。等离子功率占比 5%~20%。

表 4 生活垃圾衍生燃料与油漆废渣的工业分析和元素分析

物料	工业分析/%				热值/(kJ/kg)	元素分析/%				
	水分	挥发分	灰分	固定碳		C	H	O	N	S
生活垃圾衍生燃料	8.6	57.84	23.43	10.13	17.12	38.76	5.53	19.37	3.11	1.2
油漆废渣	3	56.51	39.05	1.44	11.31	31.75	2.49	23.37	0	0.34

本文模拟中入口给定物料为生活垃圾衍生燃料和油漆废渣以一定比例的混合物，混合后工业分析及元素分析见下表 5。

表 5 混合物料的工业分析和元素分析

混合物中油漆废渣含量/%	水分/%	挥发分/%	灰分/%	固定碳/%	热值 MJ/kg	C/%	H/%	O/%	N/%	S/%
0%	8.6	57.84	23.43	10.13	17.12	38.76	5.53	19.37	3.11	1.2
10%	8.04	57.71	24.99	9.26	16.54	38.60	5.23	19.77	2.80	1.11
20%	7.48	57.57	26.55	8.39	15.96	37.36	4.92	20.17	2.49	1.03
30%	6.92	57.44	28.12	7.52	15.38	36.66	4.62	20.57	2.18	0.94
40%	6.36	57.31	29.68	6.65	14.80	35.96	4.31	20.97	1.87	0.86
50%	5.8	57.18	31.24	5.79	14.212	35.26	4.01	21.37	1.56	0.77
60%	5.24	57.04	32.80	4.92	13.63	34.55	3.71	21.77	1.24	0.68
70%	4.68	56.91	34.36	4.05	13.05	33.85	3.40	22.17	0.93	0.60
80%	4.12	56.78	35.93	3.18	12.47	33.15	3.10	22.57	0.62	0.51
90%	3.56	56.64	37.49	2.31	11.89	32.45	2.79	22.97	0.31	0.43
100%	3	56.51	39.05	1.44	11.31	31.75	2.49	23.37	0	0.34

根据表 3，本文利用 AspenPlus 软件进行模拟，为更准确评价等离子对气化系统的影响，本文在模拟中采用等离子功率占比作为输入条件，用于获得在不同等离子功率占比下混合物的有效气产气率和气体热值。

$$\text{等离子功率占比} = \frac{\text{等离子输入功率}}{\text{原料热值} \times \text{进料量}}$$

$$\text{有效气产气率} = \frac{\text{CO 产气量} + \text{H}_2 \text{ 产气量}}{\text{进料量}}$$

$$\text{气体热值} = \text{CO 含量} \times \text{CO 气体热值} + \text{H}_2 \text{ 含量} \times \text{H}_2 \text{ 气体热值}$$

模拟获得的混合物的有效气产气率和有效气气体热值如图 2 所示。由图 2 可知，当油漆废渣

添加比例一定时，随着等离子功率占比逐渐增大，气化产生的有效气产气率逐渐升高，当等离子功率占比 20% 时，有效气产气率最高达到 1.16 Nm³/kg。在一定的油漆废渣添加比例下，气体热值也同样随着等离子功率占比的增大而逐渐升高。可见当等离子功率占比增大时，等离子提供了气化反应所需的一部分热量，原料中的 C 和 H 则更多的转换为 CO 和 H₂，气化产生的有效气量逐渐增多，CO 和 H₂ 组分含量增大，气体热值也随之增大。

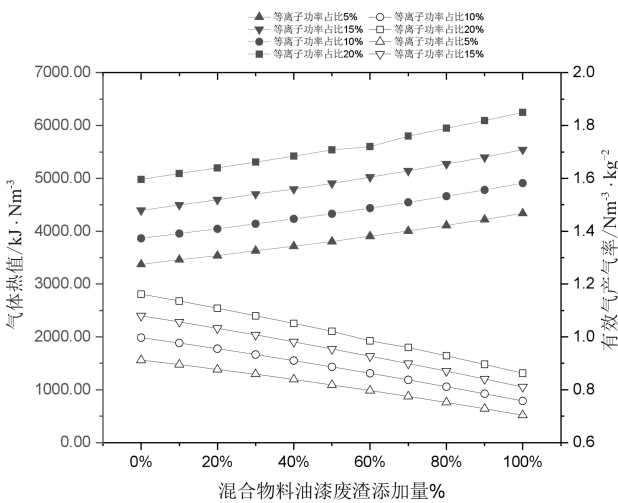


图 2 有效气产气率和气体热值随油漆废渣添加量的变化

由图 2 和表 3 可看出，当等离子功率占比一定时，随着油漆废渣添加比例的增加，混合物气化反应产生的有效气的产气率逐渐减小，气体热值逐渐增大。这是因为，随着油漆废渣的加入，混合物中灰分含量上升，混合物的热值逐渐降低，由于气化反应是吸热反应，反应所需的热量是由等离子和部分原料燃烧提供，因此在相同的等离子功率占比下，随着油漆废渣添加比例的增大，混合物的热值减小，更多的原料被用于燃烧提供反应所需的热量，气化反应产生的 CO 和 H₂ 量会逐渐减少，从而造成气化反应产生的有效气产气率减小。

结合图 2 和图 3，当等离子功率占比为 20% 时，随着油漆废渣的加入，气化合成气的气体热值由 4 979 kJ/Nm³ 升至 6 247 kJ/Nm³，主要是由于 CO 组分含量的快速上升造成的。

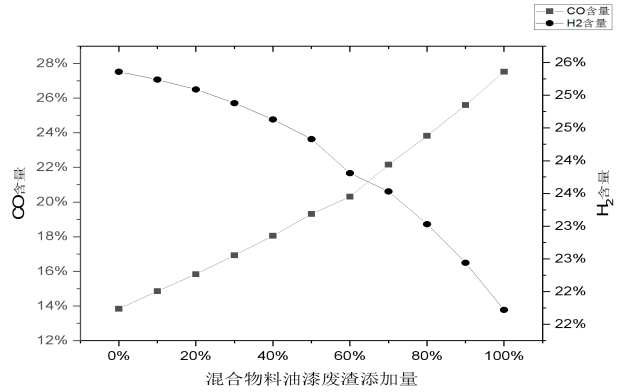


图 3 等离子功率占比 20% 时合成气组分含量的变化

由图 3 可看出，随着油漆废渣添加比例的增加，气化合成气中 H₂ 组分含量缓慢下降，CO 组分含量快速上升，有效气组分含量增加，气体热值变大，当油漆废渣添加量在 80% 时，CO 组分含量超过 H₂ 组分含量。这是由于油漆废渣中含有大量的酚醛类、树脂类等高碳的有机成分，随着油漆废渣的加入气化产生的合成气中 CO 组分含量上升幅度较快，而 H₂ 组分含量下降幅度较小，因此气体热值逐渐增大。

综上，在生活垃圾衍生燃料与油漆废渣共气化时，等离子功率占比提高有利于混合物气化合成气产气量及气体热值的提高，虽然油漆废渣的加入降低了有效气的产气率，但可改变合成气中 CO 和 H₂ 的组分含量，有利于气化合成气的进一步利用。

不过在实际气化过程中，因为生活垃圾衍生燃料灰成分中酸性氧化物 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量高，灰渣的碱度低（碱度=碱性氧化物/酸性氧化物），熔渣的粘度较大，不利于气化熔渣的排出，而油漆废渣的灰成分中碱性氧化物 Fe₂O₃ 和 MgO 含量较高，因此在生活垃圾衍生燃料和油漆废渣的共气化中，添加适当比例的油漆废渣，也有利于提高灰渣的碱度，从而降低熔渣的粘度，有利于熔渣的排出。

2.2 不同空气当量比的模拟分析

空气是气化反应中最常见的气化剂，空气中的氧可以与气化原料中的可燃部分进行气化反应，生成可燃气体，但是由于空气含 79% 的氮气，使得可燃气体组分含量相对较少，气体热值也相对较低。

空气投入量是影响气化过程的重要参数，其投入的多少影响气化过程合成气的气体成分和产率。

因此本文引入 ER 作为输入条件, 来获取不同的空气投入量对气化过程的影响, ER 的具体定义是气化原料所消耗空气量与其完全燃烧时所需的理论空气量之比。

$$ER = \frac{\text{气化过程中实际消耗的空气量}}{\text{理论上完全燃烧所需要的空气量}}$$

本文将模拟输入条件设定为: 气化原料为油漆废渣含量 40% 的混合物, 进料量 100 kg/h, 环境温度 25 °C。空气压力 0.5 MPa, 温度 25 °C, ER 变化范围为 0.2~0.6。

由以上条件模拟获得混合物的有效气产气率和气体热值如下图 4 所示。

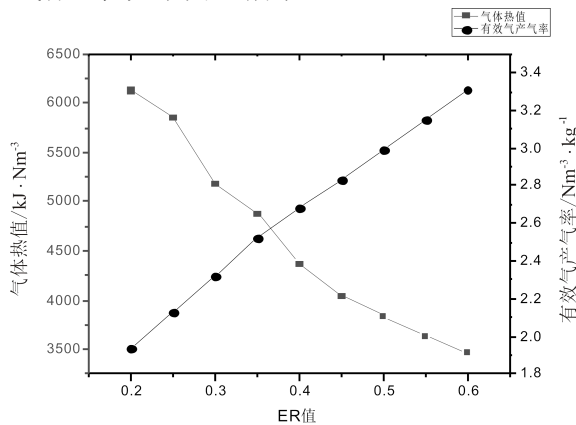


图 4 不同 ER 值下气体热值和有效气产气率的变化

由上图可知, 随着 ER 值的增大, 有效气产气率先增大后逐渐减小, 这是因为 ER 值过小, 原料与空气的燃烧反应产生的热量不足以支持气化反应的进行, 反应主要以热解为主, 此时需要提供更多的外部热源来满足反应的继续进行。当 ER 值逐渐增大, 有效气产气率也随之增大, 这是因为将更多的氧气带入系统, 促进气化反应的进行。当 ER 值增大至 0.35 时, 有效气产气率达到最高 0.92 Nm³/kg。当 ER 值由 0.35 增大至 0.6 时, 有效气产气率随之减小, 这是因为加入更多的空气会使可燃气体与多余的氧气发生燃烧反应, 从而消耗可燃气体量。

结合图 4 和图 5, 可以看出当 ER 值逐渐增大时, CO 含量和 H₂ 含量都呈现先增大后减小的趋势, 当 ER 值为 0.35 时, CO+H₂ 含量最高达到 36.73%, 之后随着 ER 值的增大, CO 含量和 H₂ 含量逐步下降。主要原因是当 ER 值过小时, 反应主要以热解

为主, CH₄ 含量随 ER 值的变化也充分说明了 ER 值过小造成反应以热解方式进行。随着空气量逐渐增大, 更多的氧气进入系统反应, 此时反应则以气化反应为主, 当 ER 值为 0.35 时, 带入的空气量达到最佳值, 使得 CO+H₂ 含量达到最高。当 ER 值大于 0.35 时, 系统带入了多余的氧气, 反而与可燃气体发生了燃烧反应, 造成 CO 和 H₂ 含量的降低。

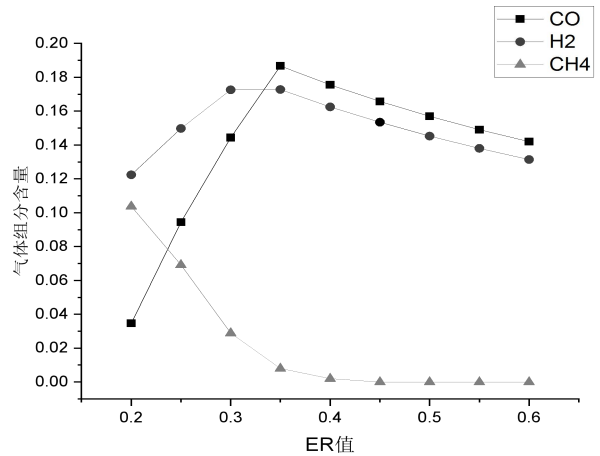


图 5 不同 ER 值下气体组分的变化

2.3 不同蒸汽/空气比的模拟分析

水蒸气也是气化过程中常见的气化剂之一, 本文将蒸汽与空气混合后作为气化剂, 通过改变水蒸气质量流率与空气流量之比 (S/A) 来分析其对气化结果的影响。气化的模拟运行在以下条件进行: 气化原料为油漆废渣含量 40% 的混合物, 进料量 100 kg/h, 环境温度 25 °C。空气压力 0.5 MPa, 温度 25 °C。蒸汽温度 180 °C, 压力 0.5 MPa, S/A 变化范围 0.14~0.41 kg/Nm³。

$$\text{蒸汽/空气 } (S/A) = \frac{\text{蒸汽质量流率 } \text{kg/h}}{\text{空气流量 } \text{Nm}^3/\text{h}}$$

模拟结果如图 6 所示。从图 6 可看出, 有效气产气率变化幅度较小, 随着 S/A 的增大, 有效气产气率呈缓慢下降趋势。这是由于水蒸气的加入促进 H₂ 和 CO₂ 的形成, 而抑制 CO 的形成, H₂ 的增加量与 CO 减少量相抵消, 对有效气总体产气量影响较小。当 S/A 由 0.14 kg/Nm³ 增大至 0.3 kg/Nm³, 气体热值则由 5 496 kJ/Nm³ 增至最大值 5 928 kJ/Nm³。当 S/A 继续增大至 0.41 时, 气体热值随之减小。这是由于前期随着 S/A 的增大, 水蒸气加入

量相对增大,水蒸气的加入促进了H₂含量快速的生长,而H₂的气体热值较大,造成气体热值整体呈增大趋势。后期随着S/A的继续增大,水蒸气的加入对H₂的增长影响降低,增加了合成气中水分含量,稀释了可燃成分,造成气体热值的降低。

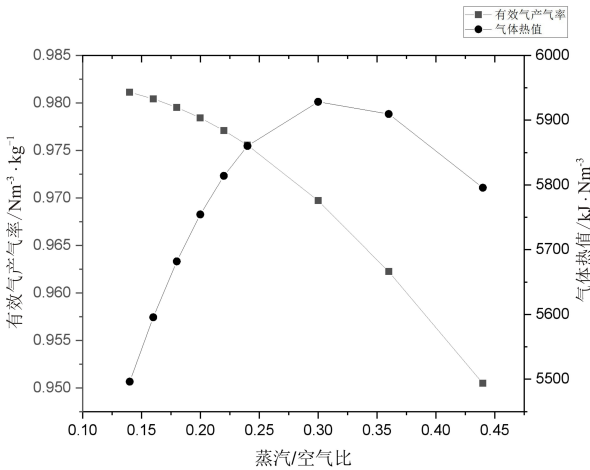


图 6 不同蒸汽/空气比下有效气产气率和气体热值的变化

不同S/A值对合成气可燃成分的影响见下图7。图7可看出,随着S/A的增大,CO含量逐步减小,由8.28%降至2.21%,H₂含量由26.77%增大至27.86%,后再降至26.73%。主要因为水蒸气增多促进水煤气反应的正向进行,H₂和CO₂含量增多,CO含量减小,进一步印证了水蒸气的加入有利于H₂的增长,而抑制CO的形成。

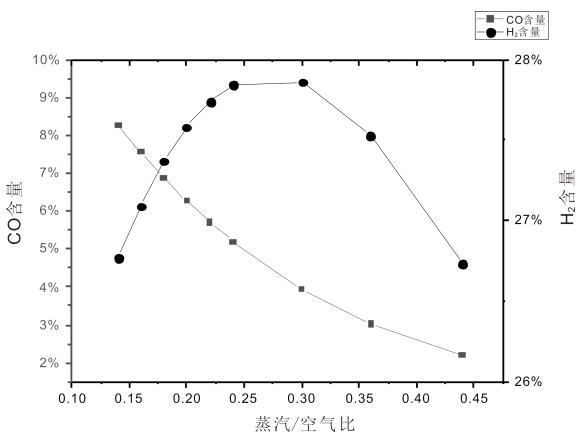


图 7 不同蒸汽/空气比下可燃气体成分的变化

3 结语

(1) 当生活垃圾衍生燃料与油漆废渣共气化时,等离子功率占比提高有利于混合物气化合生成

气体热值的提高。虽然油漆废渣的加入降低了有效气的产气率,但可改变合成气中CO和H₂的组分含量,有利于气化合生成气的进一步利用。不过在实际气化过程中,仍需要根据混合物灰渣的碱度来确定油漆废渣的添加比例。

(2) 空气当量比、蒸汽/空气比是影响气化过程的重要因素,空气当量比、蒸汽/空气比的改变会引起合成气成分的变化。空气当量比过小时,合成气中CH₄含量较高,反应以热解为主,因此应当控制合理的空气当量比以促进系统内反应向气化反应进行。蒸汽/空气比会影响CO与H₂的组分含量,当蒸汽/空气比增大时,CO含量逐渐降低,因此应根据合成气的利用方式,控制合理的蒸汽/空气比,来改变合成气的成分含量。

(3) 当通入空气当量比增大时,合成气有效气产气率呈先增大后减小的趋势,应控制合理的空气当量比使得有效气量产出较高。

(4) 当通入的蒸汽/空气比增大时,对合成气产气率的影响不大,合成气气体热值呈先增大后减小的趋势。

(5) 通入两种不同气化剂时,合成气有效气产气率、成分与气化剂种类和加入量相关,应根据合成气的具体利用方式,控制气化剂的种类和用量。

参考文献

- [1] 孙英杰. 城市生活垃圾填埋液处理方案研讨[J]. 环境污染治理技术和设备, 2002, 3(3):65-68
- [2] 王勤. 利用热等离子体熔融垃圾焚烧飞灰微晶玻璃的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- [3] 王希, 张春飞, 王晓亮等. 城市生活垃圾等离子气化技术研究进展[J]. 现代化工, 2012, 32(12):20-24
- [4] MOUNTOURIS A, VOUTSAS E, TASSIOS D. Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and energy analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(13-14):1723-1737
- [5] 曹青. 生物质常规与非常规条件下的热解行为及升值利用研究. 太原理工大学博士学位论文. 2005
- [6] 曹小玲, 陈建行, 唐世斌等. 基于 ASPEN PLUS 的垃圾等离子体气化模拟研究[J]. 工业炉, 2014, 36(2):1-5

P 掺杂 Fe_3O_4 纳米阵列的制备及其电催化析氢性能

潘军 卢彦杉 黄旭锐 张行 何彬彬

广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620

摘要: 由于传统的电催化析氢反应 (HER) 的催化剂大多为贵金属催化剂, 无法得到广泛的使用, 所以开发可推广的非贵金属催化剂是 HER 领域的突破点。铁作为自然界丰度最高的过渡金属元素, 其氧化物被证明在 HER 中有一定的催化性能。本实验以泡沫铁为出发点, 用阳极氧化法制备出 Fe_2O_3 纳米片阵列以增加其表面积, 从而增多催化活性位点; 接着在真空管式炉中将 P 掺杂到材料中以提高其催化性能, 并最终将 Fe_2O_3 纳米片阵列转变成 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列。经形貌表征和电化学测试, 材料表现出了一定的催化性能, 且改性后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的性能明显优于 Fe_2O_3 纳米片阵列。

关键词: 电催化析氢; 阳极氧化; Fe_3O_4 ; 纳米片阵列; P 掺杂

中图分类号: TQ426

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0028-05

Preparation of P-doped Fe_3O_4 Nanoarrays for Boosting Hydrogen Evolution Performance

PAN Jun, LU Yanshan, HUANG Xurui, ZHANG Hang, HE Binbin

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., 510620, Guangzhou, China)

Abstract: Because most of the traditional electrocatalytic hydrogen evolution reaction (HER) catalysts are precious metal catalysts, which can not be widely used, the development of non precious metal catalysts that can be popularized is a breakthrough in the field of HER. As the most abundant transition metal element in nature, iron oxide has been proved to have certain catalytic performance in HER. Based on foam iron, Fe_2O_3 nano sheet array was prepared by anodic oxidation method to increase its surface area and increase catalytic active sites. Then P was doped into the material in a vacuum tube furnace to improve its catalytic performance, and finally Fe_2O_3 nano chip array was transformed into $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ nano chip array. Through morphology characterization and electrochemical test, the material shows certain catalytic performance, and the performance of the modified material $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ nano chip array is obviously better than Fe_2O_3 nano chip array.

Keywords: electrocatalytic hydrogen evolution; anodic oxidation; Fe_3O_4 ; nano chip array; P doping

随着能源危机、温室效应等环境问题的日益严重, 化石能源对环境的危害逐渐显露, 控制碳排放、发展可再生能源已经成为当今时代的一大主题。作为一种清洁并且可以再生的能源, 氢气一直被认为是未来最具发展潜力的新能源, 越来越受到人们的关注。

氢是自然界中丰度最高的元素, 当其作为燃料

时, 不像传统的化石燃料会产生大量的有害气体, 氢气的燃烧产物是零污染的水, 作为一种绿色可再生的资源, 氢能源具有很大的应用潜力。近些年来, 氢气受到了众多科学家们的关注和研究, 同时也已经作为一种原材料应用于许多行业, 它将在未来的能源市场中发挥极其重要作用。

工业上氢气的制备方法有很多种, 其中最主要

收稿日期: 2022-01-19

基金项目: 南方电网公司科技项目: 固态储供氢装置在加氢站的系统集成示范应用研究 (国重配套); 项目编号: GZHKJXM20200090。

作者简介: 潘军 (1981—), 男, 2006年毕业于上海交通大学电力电子与电力传动专业, 工学硕士, 高级工程师。现任广东电网有限责任公司广州供电局氢能源研究中心总经理助理, 主要从事氢能与综合能源研究工作。

的有化石燃烧制氢、生物制氢、光催化分解水制氢、电催化分解水制氢等。其中电催化制氢的方法由于方法简单、廉价、技术成熟等特点而受到广泛关注和研究^[1-2]。但是由于电催化析氢反应的动力学过程缓慢，通常需要在 HER 过程中添加高效催化剂以提高产氢效率。贵金属 (Pt, Ru 等) 由于吸附氢的吉布斯自由能小及自身优越的选择性和稳定性而被广泛认为是高效的电催化剂^[3-4]，但由于其储量稀缺且价格昂贵而难以实现大规模生产。因此，开发廉价且高效的 HER 电催化剂成为研究热点。近年来许多非金属材料由于其独特的电学、光学及廉价的特点而被广泛应用在电催化析氢反应中，包括各种过渡金属如 Mo、Co、Ni、Fe 以及他们的硫化物、碳化物、磷化物、氮化物^[5-9]。

为了提高铁基催化剂的反应面积及活性位点，将材料进行纳米化处理是一种高效的方法。本文通过阳极氧化法直接在 Fe 基板上生长出无需添加粘合剂的铁基氧化物纳米阵列，该方法制备出的铁基氧化物较水热法或溶胶-凝胶法合成出的材料形貌更好、纯度更高、方法更简单，而且基板是更有助于电子传输的 Fe 材料。另外本文研究了 P 掺杂的方法及对材料电催化性能的影响。过渡金属磷化物 (TMPs) 因其独特的化学和物理特性，比如铁磁性、超导性、半导体性等而被大量研究和应用^[10-12]。其中，过渡金属磷化物因优异的催化活性最开始被应用于工业催化中^[13-15]。随着对此类材料的发展和研究的深入，人们发现它们不仅可以作为高效的工业催化剂，在新起的电催化中也具有巨大的应用潜能。本文将找寻一种简单高效地掺 P 方法对材料进行改性，并比较改性前后的电催化性能。P 掺杂的方法也有许多种，本文将采取一种巧妙的方法，将 P 掺杂到材料表面的同时实现 Fe_2O_3 转化为 Fe_3O_4 的过程。

1 实验部分

主要试剂包括泡沫铁，乙二醇，氟化铵，氢氧化钾，氮气，无水乙醇，天然石墨。

1.1 磷掺杂 Fe_3O_4 纳米片阵列的合成

首先利用阳极氧化的方法制备 Fe_2O_3 。阳极氧化的过程采用的是简单的两电极体系，阳极为泡沫铁，阴极为石墨片，电解液为 0.5 wt% 氟化铵 + 3 vol% 去离子水 + 乙二醇的混合溶液，两电极之间用木块隔开 2.5 cm，使两电极正对且泡沫铁尽量浸入在电解液中。装置示意图如图 1 所示。

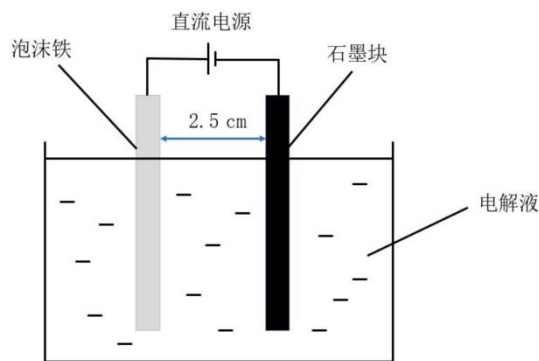


图 1 阳极氧化实验装置示意图

将装置按图 1 所示搭好，电极材料两端连接好电极夹，检查无误后（重点检查是否有短路可能），打开恒流电源，调节电压至 50 V，保持反应 5 min。整个反应是在常温下进行的，随着反应的进行，可以观察到电极表面有大量气泡生成，泡沫铁慢慢由银白色变成红棕色，同时溶液温度会升高，所以尽量将实验安排在散热比较好的地方进行。待实验结束，取下反应后的泡沫铁，用大量去离子水冲洗，用纸巾稍微擦拭表面过剩的水后，放入真空干燥箱中干燥 4h。然后将两个石英舟清洗干净并烘干，分别放入事先制备的 Fe_2O_3 纳米片阵列和 NaH_2PO_2 ，摩尔质量比为 1:5。在准备一个小石英管和一块碳毡，裁剪好碳毡使其能够塞进石英管的一端。实验装置示意图如图 2 所示。整个过程是用真空管式炉完成的，首先用到的是与管式炉配套的大石英管，本实验用一种比较巧妙的方法，为了使 P 能更好更充分的掺杂到材料中，利用小石英管制造了一个半封闭的空间：将 P 源 NaH_2PO_2 放在小石英管的前端，后端放上制备的 Fe_2O_3 纳米阵列，管式炉的尾端用碳毡堵住，目的是减缓气流，使小石英管中的气体流动减慢，增强 P 的氛围，最后将小石英管放在大石英管中，完成整个实验装置。整个实验过程中体

系内不间断地通入氮气，以保证整个实验是在惰性氛围中完成的，没有其它气体的干扰。

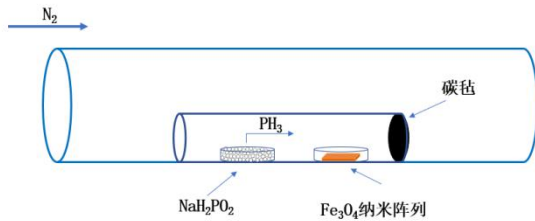
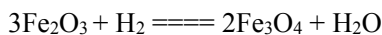
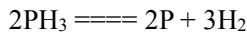
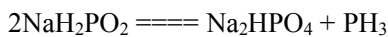


图2 真空管式炉掺杂P实验装置示意图

整个实验的原理是： NaH_2PO_2 受热时会分解成 PH_3 气体，而 PH_3 气体由于不稳定会分解成 P 和 H_2 ，当小石英管中的 NaH_2PO_2 分解成 PH_3 气体，由于末端有碳毡堵着，管内的 PH_3 气体无法迅速排出，从而形成很浓的 PH_3 氛围，当 PH_3 分解时，大量的 P 和 H_2 能与 Fe_2O_3 接触，从而实现 P 的掺杂和 Fe_3O_4 的形成，具体反应式如下：



将放入好样品的小石英管平稳地放入大石英管中，将大石英管两段封闭，通入氮气，尾气一次通入到两瓶足量的饱和 KOH 溶液中，调整好气流大小，确保尾气瓶中有连续稳定的气泡鼓出。先通气 15 分钟以保证管内空气完全排出，通气的时候先把管式炉参数设置好。通气完毕，启动管式炉，控制体系以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 350°C ，再保温 2 h，最后以自然速率降温。反应完毕后，等体系降至室温关闭气体，关掉仪器，取出产物，得到最终的 P 掺杂的 Fe_3O_4 纳米片阵列。

1.2 表征与测试

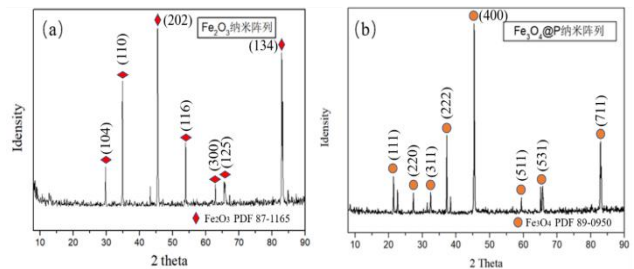
本文中 XRD 实验数据由 Rigaku D/max 2500 PC 型 X 射线衍射分析仪对制备的 Fe_2O_3 纳米片阵列和还原及掺 P 后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列进行测试。测试条件为：靶材为 $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)，管电压为 40 kV，管电流为 20 mA，扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$ ，扫描范围为 $5\sim 85^\circ$ 。本实验采用的是 ZEISS Gemini 300 型号的扫描电镜，对制备出的 Fe_2O_3 纳米片阵列和还原及掺 P 后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列进行了形貌观测。电化学测试在 CHI660E 电化学工作站中完

成。将制备 P 掺杂的 Fe_3O_4 纳米片阵列裁剪成 $1 \times 1 \text{ cm}$ 的规格，用电极夹固定好作为工作电极，对电极和参比电极分别使用的是石墨电极和 Hg/HgO 电极，电解质为 50 mL、1.0 mol/L 的氢氧化钾溶液。将测试所用的三电极体系搭建完成后，向体系中连续通入氮气 30 min，将溶液中的氧气等气体排出干净。待排尽后分别将工作站的工作电极、对电极和参比电极电极夹连接到材料电极、碳电极和 Hg/HgO 电极上。随后对制备的材料进行线性伏安扫描 (LSV) 并根据 LSV 曲线做出塔菲尔 (Tafel) 曲线。然后对制备的材料进行交流阻抗 (EIS) 测试和时间-电流曲线 (I-t 曲线) 测试。

2 结果与讨论

2.1 XRD 结果分析

图 3 为 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的 XRD 图，可以大致看出两种材料有着相似的衍射峰。由于材料的基底为泡沫铁，所以在图中在 45.37° 、 65.72° 和 82.91° 出现了比较强的铁的特征峰。图 3 (a) 的 XRD 图中可以看到在 29.71° 、 34.85° 、 43.23° 、 53.92° 、 62.90° 处的衍射峰分别对应了 Fe_2O_3 晶体中的 (112)、(211)、(220)、(024)、(224) 晶面；图 3 (b) 的 XRD 图中可以看到在 32.45° 、 37.24° 、 38.35° 、 44.34° 、 56.83° 、 63.41° 分别对应了 Fe_3O_4 的 (220)、(311)、(222)、(400)、(511)、(440) 晶面，同时图中也能观察到 P 对应的一些特征峰。XRD 的结果证实了实验中出现的 Fe_2O_3 及 Fe_3O_4 的结构，验证了实验计划，成功通过阳极氧化的方法制备出 Fe_2O_3 材料并将其还原成 Fe_3O_4 ，同时掺杂入 P 元素。



(a) Fe_2O_3 纳米片阵列 (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列

图3 样品的 XRD 图

2.2 SEM 结果分析

用扫描电子显微镜对样品进行形貌观测,如图4、5分别为 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的SEM图。从 Fe_2O_3 纳米片阵列的SEM图中可以看到在泡沫铁的基板上长出了排列规整的纳米片,在很大程度上达到了增大表面积、增加活性位点的目的,更有利于HER反应的进行。从 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的SEM图中可以看到,还原之后的材料在形貌上并没有发生太大的变化,都是呈现纳米片阵列的形貌,而且在高倍率的电镜图中可以在纳米片表面看到颗粒物,证实了实验的可行性。

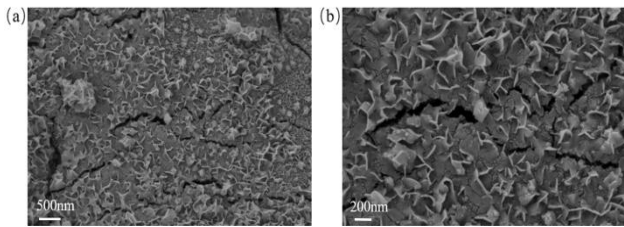


图4 Fe_2O_3 纳米片阵列的SEM图

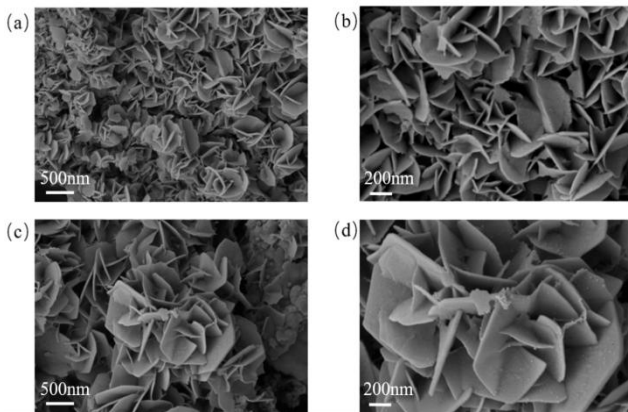


图5 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的SEM图

2.3 电催化析氢性能

Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的LSV曲线如图6所示,测试是在1M的KOH溶液中以5 mV/s的速率完成的。从图中可以看到当电流密度为 10 mA/cm^2 时, Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的析氢过电位分别为253 mV和130 mV (vs.RHE)。LSV曲线的结果表明,实验所制得的材料在碱性条件下有一定的催化制氢性能,并且改性之后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列在性能方面提升了接近一倍,说明材料还原过程以及P的掺杂对材料性能的改性起到了很大的作用。

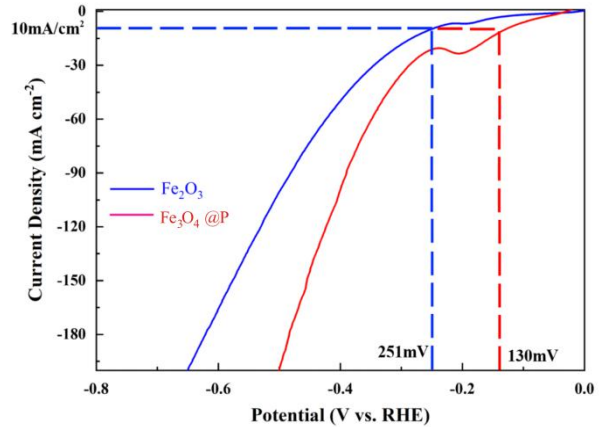


图6 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的LSV曲线

图7所示的是 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的Tafel曲线,Tafel曲线是根据LSV曲线拟合而得到的,从图中可以看到 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的塔菲尔斜率分别为 364 mV/dec 和 347 mV/dec ,也可以证明改性后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列具有更好的催化性能。

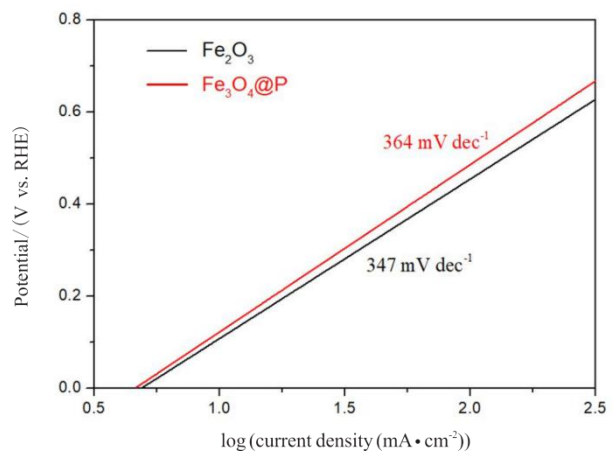


图7 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的Tafel曲线

为了进一步探究所制得材料的在催化制氢过程中的电子转移动力学,在1M KOH中对材料的交流阻抗(EIS)进行了测试,测试电压分别是 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列工作电流密度为 10 mA/cm^2 时对应的电压,其EIS测试结果如图8所示。由图中可以看到, Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的接触阻抗分别为 7.0Ω 和 0.9Ω ,交流阻抗分别为 17.7Ω 和 4.0Ω 。这不仅在反应动力学上证明了改性后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的电催化制氢性能更好,还展现出铁基材料应用在电催化制氢领域的可行性。

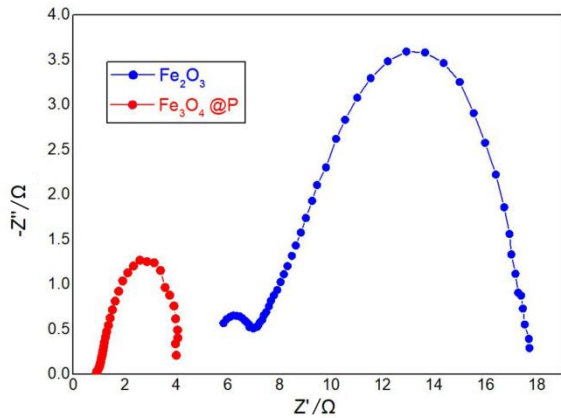


图 8 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的 EIS 曲线

为了验证材料的稳定性，将制得的两种材料在 10 mV/cm^2 时的工作电压下进行稳定性曲线测试，如图 9，随着时间的增加， Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的电流密度反而有所上升，这可能与材料自身发生的反应有一定关系。值得关注的是， $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的稳定性明显要好于 Fe_2O_3 纳米片阵列，进一步说明了还原后和掺杂 P 之后的材料有更好的性能。

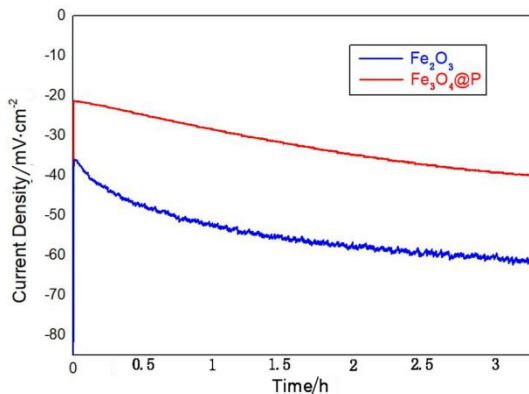


图 9 Fe_2O_3 纳米片阵列和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列的 I-t 曲线

3 结语

在电催化制氢的过程中，由于贵金属催化剂的稀缺及昂贵，开发非贵金属催化剂具有很大的研究意义。铁基材料由于其自然含量丰富、价格便宜和绿色环保等优点，具有很大的应用前景。为了进一步提高和改性材料的催化性能，进行材料的纳米化和元素掺杂是目前比较常用、效率比较高的方法。本文以改性铁基材料的电催化制氢性能为目的，用方法简单的阳极氧化法以泡沫铁为基板原位生长出 Fe_2O_3 纳米片阵列以增大材料的表面积，并在真

空管式炉中将 Fe_2O_3 还原成 Fe_3O_4 并将 P 掺杂到材料中，并对它们进行了结构、形貌以及电化学性能的测试，结果表明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@P$ 纳米片阵列较 Fe_2O_3 纳米片阵列有着更好的电催化析氢性能，本文为铁基非金属材料应用于电催化析氢提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] CHEN Y, RONG J, TAO Q, et al. Modifying microscopic structures of MoS₂ by high pressure and high temperature used in hydrogen evolution reaction [J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 357:136868
- [2] MUGHERI A Q, ALI S, NAREJO G S, et al. Electrospun fibrous active bimetallic electrocatalyst for hydrogen evolution [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41): 21502-21511
- [3] GUO Z, LI W, HE Y, et al. Effect of Cd source on photocatalytic H₂ evolution over CdS/MoS₂ composites synthesised via a one-pot hydrothermal strategy [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 512:145750
- [4] CAI Y, KANG H, JIANG F, et al. The construction of hierarchical PEDOT@MoS₂ nanocomposite for high-performance supercapacitor [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 546:149088
- [5] LI H, TSAI C, KOH A L, et al. Corrigendum: Activating and optimizing MoS₂ basal planes for hydrogen evolution through the formation of strained sulphur vacancies [J]. *Nat Mater*, 2016, 15(3): 48-53
- [6] DENG J, LI H, XIAO J, et al. Triggering the electrocatalytic hydrogen evolution activity of the inert two-dimensional MoS₂ surface via single-atom metal doping [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(5): 1594-1601
- [7] WANG D Y, GONG M, CHOU H L, et al. Highly active and stable hybrid catalyst of cobalt-doped FeS₂ nanosheets-carbon nanotubes for hydrogen evolution reaction [J]. *J Am Chem Soc*, 2015, 137(4): 1587-1592
- [8] DENG J, REN P, DENG D, et al. Highly active and durable non-precious-metal catalysts encapsulated in carbon nanotubes for hydrogen evolution reaction [J]. *Energy Environ Sci*, 2014, 7(6): 1919-1923
- [9] ZENG M, LI Y. Recent advances in heterogeneous electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(29): 14942-14962
- [10] KIBSGAARD J, TSAI C, CHAN K, et al. Designing an improved transition metal phosphide catalyst for hydrogen evolution using

(下转第 49 页)

碲化镉废料中碲和镉元素回收工艺研究

雷聪¹ 袁小武² 张程¹ 杨武勇¹ 雷云棣¹ 蒋杰昌¹

1.峨嵋半导体材料研究所, 四川 峨眉山 614200; 2.东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 通过研磨、氧化酸浸、还原等步骤进行碲化镉废料中碲和镉元素的回收工艺研究。研究表明, 酸浸温度 80℃, 硫酸浓度 80 g/L, 酸浸时间 2 h, 物料质量与双氧水质量比值 1.3, 亚硫酸钠质量与物料质量比值 1.5, 硫化钠质量与物料质量比值 1.6, 在此条件下碲的回收率达到 93%以上, 镉的回收率达到 95%以上。

关键词: 碲化镉; 氧化酸浸; 还原; 回收率

中图分类号: X705; TQ125.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0033-04

Study on Recovery Technology of Tellurium and Cadmium from Cadmium Telluride Waste

LEI Cong¹, YUAN Xiaowu², ZHANG Cheng¹, YANG Wuyong¹, LEI Yundi¹, JIANG Jiechang¹

(1. Emei Semiconductor Material Institute, 614200, Emeishan, Sichuan, China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: The recycling process of tellurium and cadmium from cadmium telluride waste was studied by grinding, oxidation acid leaching, reduction reaction etc. The results show that the acid leaching temperature is 80 °C, the sulfuric acid concentration is 80g / L, the acid leaching time is 2h, the mass ratio of material to hydrogen peroxide is 1.3, the mass ratio of sodium sulfite to material is 1.5, and the mass ratio of sodium sulfide to material is 1.6. Under these conditions, the recycling of tellurium and cadmium is more than 93% and 95%.

Keywords: cadmium telluride; oxidizing acid leaching; reduction reaction; rate of recycling

碲化镉的化学式为 CdTe, 分子量 240, 是一种重要的 II - VI 族化合物半导体材料, 可广泛应用于光伏、电子等领域。碲化镉可用于制造碲化镉薄膜太阳能电池、红外光电调制器、红外探测器、红外透镜和窗口、磷光体、常温 γ 射线探测器、接近可见光区的发光器件等^[1]。

碲 (Te) 是重要的稀有元素, 被誉为“现代高新技术材料的维生素”, 广泛应用于石油化工、冶金、玻璃陶瓷、电子器件、医药、国防军工等领域, 尤其在现代高科技领域有着不可取代的作用^[2-4]。镉 (Cd) 是有毒有害物质, 含镉废弃物需要回收处理, 不能随意处置。因此, 对碲和镉资源进行回收具有

极其重要的经济价值和环保意义。

本次研究以碲化镉废料为原料, 以稀硫酸为溶解液, 双氧水为氧化剂, 亚硫酸钠为还原剂, 硫化钠为反应物, 旨在研究不同条件下对碲化镉废料中碲元素和镉元素回收效果。

1 实验

1.1 实验目的

研究从碲化镉废料中回收碲和镉元素的方法, 寻找最适合回收工艺条件, 把化合物中的碲和镉元素分解出来, 实现碲和镉资源的回收再利用。

1.2 实验原料

收稿日期: 2021-11-18

作者简介: 雷聪 (1984—), 男, 2007年毕业于四川理工学院化学工程与工艺专业, 本科, 高级工程师, 现在峨嵋半导体材料研究所技术研发部从事新产品及新材料及技术研发工作。

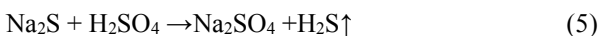
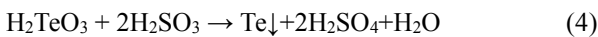
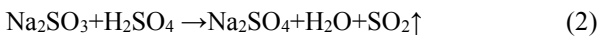
本实验用的原料为碲化镉废弃物，纯度为99.999%，主要以碲、镉和微量杂质元素为主，成分见表1。

表1 碲化镉废料的化学成分

元素	Te	Cd	其他杂质
质量分数	53.16%	46.83%	0.001%

1.3 实验原理

碲化镉粉末中加入一定浓度的硫酸和双氧水溶液，在水浴加热的条件下将发生氧化反应，得到的 $CdSO_4$ 和 H_2TeO_3 ，再用 Na_2SO_3 作为还原剂，还原出溶液中的碲元素；用硫化钠回收 $CdSO_4$ 溶液中的镉元素，得到硫化镉^[4-5]。其反应方程式如下。



1.4 主要试剂及仪器

浓硫酸（98%、AR）、 H_2O_2 （30%水溶液）、无水 Na_2SO_3 （AR）、无水 Na_2S （AR）。

仪器：ICP-MS（电感耦合等离子体质谱仪）、数显恒温水浴锅（带磁力搅拌器）、PH计（PH试纸）、电子天平、抽滤泵、烘箱；

器材：玻璃烧杯(3000 mL×2、500 mL×2、100 mL×2)、量筒(250 mL×1、100 mL×1、50 mL×1)、恒压滴液漏斗(500 mL×3)、三口烧瓶(500 mL×2)、塑料滴管(10 mL×10、5 mL×10)、抽滤漏斗、玻璃棒、塑胶手套、抽滤套装。

1.5 工艺流程

实验前，对碲化镉废料进行破碎、磨细，筛选粒径小于0.2 mm的碲化镉废料加入反应容器中，以双氧水和浓硫酸为氧化剂，亚硫酸钠作为还原剂，该废料中的碲元素被氧化还原为碲单质和少量二氧化碲；废料中的镉元素以硫酸镉的形式溶出，以硫化钠为反应物质，在酸性环境中与硫酸镉溶液反应得到硫化镉。本实验工艺流程图如图1所示。

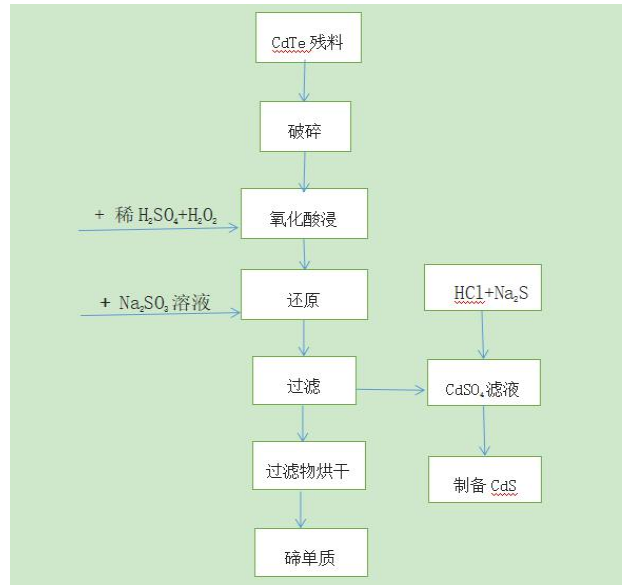


图1 碲化镉废料中回收碲和镉元素工艺流程图

2 结果与讨论

在恒定碲化镉粉末加入量和搅拌速度的条件下，对浸出温度、硫酸浓度、氧化剂（ H_2O_2 ）加入量、氧化酸浸时间、还原剂（ Na_2SO_3 ）加入量、反应物质（ Na_2S ）加入量等因素进行试验及讨论，研究这些因素对碲化镉废料中碲元素和镉元素回收率的影响。碲以粗碲的形态回收，镉以硫化镉的形态回收。

2.1 工艺中反应温度对回收率的影响

以粒径小于0.2 mm的碲化镉粉末作为原料，在 H_2SO_4 浓度为80g/L固液质量比为1:6，酸浸时间为2 h，氧化剂30%的双氧水按固液比（物料质量/双氧水质量）1.3加入，还原剂 Na_2SO_3 以1.5（ Na_2SO_3 加入量/物料质量）加入；镉离子回收反应物 Na_2S 按1.6（ Na_2S 加入量/物料质量）加入回收镉元素，恒定搅拌速度的条件下，研究反应温度对碲化镉中碲和镉回收率的影响，结果如图2所示。

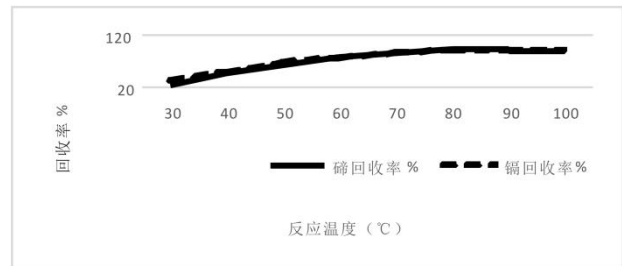


图2 不同温度下对碲和镉的回收率

由图 2 可知，碲化镉中碲和镉的回收率随着反应温度的升高而增大。随着反应温度的升高，增大了碲化镉粉末与浸出试剂的有效碰撞几率，增大了碲化镉中元素的浸出效率，碲和镉的回收率也相应提高。当反应温度提高的 80℃ 时，碲和镉的回收率都增长到了 93% 以上，所以最佳的反应温度为 80℃。

2.2 工艺中硫酸浓度对回收率的影响

以粒径小于 0.2 mm 的碲化镉粉末作为原料，在物料与 H₂SO₄ 的固液质量比为 1:6，反应温度为 80℃，酸浸时间为 2h，氧化剂 30% 的双氧水按固液比（物料质量/双氧水质量）1.3 加入，还原剂 Na₂SO₃ 以 1.5（Na₂SO₃ 加入量/物料质量）加入；镉离子回收反应物 Na₂S 按 2.4（Na₂S 加入量/物料质量）加入回收镉元素，恒定搅拌速度的条件下，研究反应温度对碲化镉中碲和镉回收率的影响，结果如图 3 所示。

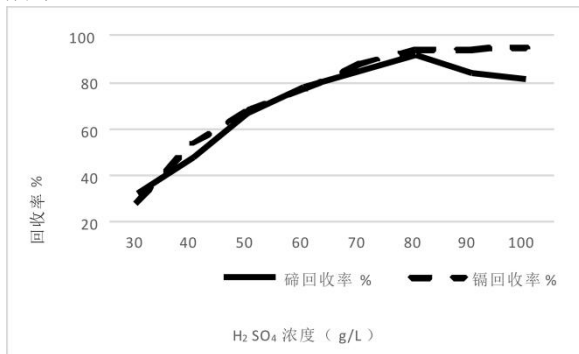


图 3 不同 H₂SO₄ 浓度时碲和镉的回收率

由图 3 可知，碲化镉中碲和镉的回收率在不同硫酸浓度时的情况。随着硫酸浓度的变化，碲和镉的回收率也随之发生变化。硫酸浓度由 30 g/L 增加到 80 g/L 时，碲和镉的回收率也由 30% 左右提高至 92% 以上。当硫酸浓度增加至 90 g/L 以上，碲的回收率逐渐在下降，镉的回收率基本上没有变化。因此，结合碲和镉的回收率情况，在酸浸的过程中，最佳的硫酸浓度为 80 g/L。

2.3 工艺中酸浸时间对回收率的影响

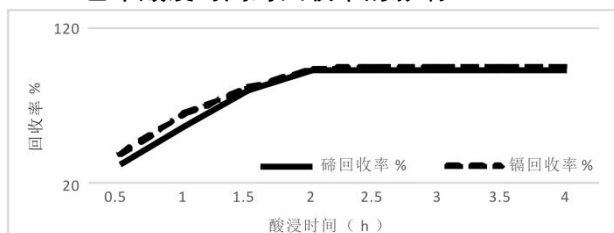


图 4 不同酸浸时间下碲和镉的回收率

以粒径小于 0.2mm 的碲化镉粉末作为原料，在 H₂SO₄ 浓度为 80 g/L，物料与 H₂SO₄ 的固液质量比为 1:6，反应温度为 80℃，氧化剂 30% 的双氧水按固液比（物料质量/双氧水质量）1.3 加入，还原剂 Na₂SO₃ 以 1.5（Na₂SO₃ 加入量/物料质量）加入；镉离子回收反应物 Na₂S 按 2.4（Na₂S 加入量/物料质量）加入回收镉元素，恒定搅拌速度的条件下，研究酸浸时间对碲化镉中碲和镉回收率的影响，结果如图 4 所示。

由图 4 可知，碲化镉中碲和镉的回收率在不同酸浸时间时的情况。随着酸浸时间的增加，碲和镉的回收率也随之发生变化。酸浸时间由 0.5 小时增加到 2 小时后，碲和镉的回收率也由 30% 提高至 94% 以上。当酸浸时间继续延长至 2 小时以上时，碲和镉的回收率基本上没有变化。因此，综合考虑碲和镉的回收率和生产效率，在碲化镉的酸浸的过程中，最佳的酸浸时间为 2 小时。

2.4 工艺中双氧水的加入量对碲回收率的影响

以粒径小于 0.2 mm 的碲化镉粉末作为原料，在 H₂SO₄ 浓度为 80 g/L，物料与 H₂SO₄ 的固液质量比为 1:6，反应温度为 80℃，酸浸时间为 2h，还原剂 Na₂SO₃ 以 1.5（Na₂SO₃ 加入量/物料质量）加入，恒定搅拌速度的条件下，研究固液比（物料质量/双氧水质量）对碲回收率的影响，结果如图 5 所示。

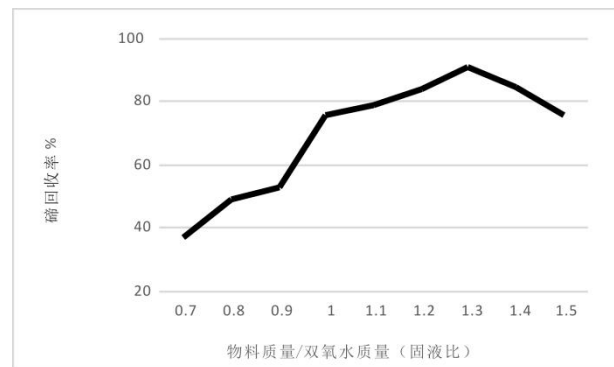


图 5 不同固液比时碲的回收率

由图 5 可知，碲化镉中碲的回收效果随双氧水的加入量的变化情况。固液比由 0.7 增大至 1.3 时，碲的回收率由 37% 升高到 92% 以上；当固液比继续增大时，碲的回收率开始下降。双氧水的加入，使碲以四价偏碲酸的形式进入浸出液中，以致在下一步的还原工序中能有效的还原出碲。所以，在氧化酸浸过程中，最佳的双氧水加入量为固液比 1.3。

2.5 工艺中还还原剂 Na₂SO₃ 加入量对碲回收率的影响

碲化镉废料粉末经过氧化酸浸工艺处理后，最终以 H₂TeO₃ 和 CdSO₄ 溶液形态体现，需要加入还原剂 Na₂SO₃ 还原出 H₂TeO₃ 中的碲元素。研究还原剂 Na₂SO₃ 加入量与物料质量的比值对碲回收率的影响，结果如图 6 所示。

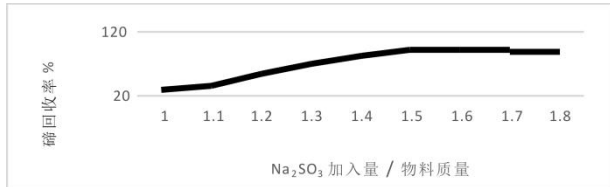


图 6 不同 Na₂SO₃ 加入量时碲的回收率

由图 6 可知，碲化镉粉末氧化酸浸后的滤液含有 H₂TeO₃，随着 Na₂SO₃ 加入量的变化，碲的回收率也发生变化。Na₂SO₃ 加入量与物料质量的比值由 1 增大至 1.5 时，碲的回收率由 28% 升高到 93%；当比值继续增大时，碲的回收率变化不大，且溶液中 Na₂SO₃ 过饱和后有白色物质析出，回收碲分析检测 Na 元素含量高，结果如表 2 所示。所以在还原反应过程中，最佳的 Na₂SO₃ 加入量与物料质量的比值为 1.5。

表 2 不同比值下回收碲中 Na 元素含量情况

Na ₂ SO ₃ 加入量与物料质量的比值	Na 元素含量 (ppm)	溶液颜色
1.5	132	黑灰色中夹杂微量白色
1.6	435	黑灰色中白色加深
1.7	1 342	有白色物质析出
1.8	5 428	白色物质析出越来越多

2.6 工艺中 Na₂S 加入量对镉回收率的影响

碲化镉废料粉末经过氧化酸浸和还原工艺，过滤溶液中的还原沉淀物后，滤液中主要以 CdSO₄ 溶液形态体现，需要加入化学物质 Na₂S 反应回收其中的 Cd²⁺。研究 Na₂S 加入量与物料质量的比值对溶液中镉回收率的影响，结果如图 7 所示。

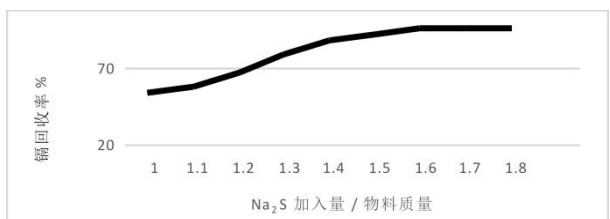


图 7 不同 Na₂S 加入量时镉的回收率

由图 7 可知，还原过滤后的滤液中主要为 CdSO₄，在酸性条件下，随着 Na₂S 加入量的变化，镉的回收率也发生变化。Na₂S 加入量与物料质量的比值由 1 增大至 1.6 时，镉的回收率由 53% 升高到 95% 以上；当比值继续增大时，碲的回收率基本上无变化，此时由 Na₂S 在酸性环境中产生的过量 H₂S 气体不再与 CdSO₄ 溶液反应，而进入尾气处理系统。所以在 Cd²⁺ 处理过程中，最佳的 Na₂S 加入量与物料质量的比值为 1.6。

3 结语

通过研究表明，采用氧化酸浸还原及镉离子化学反应相结合的工艺能有效回收碲化镉中的碲和镉。

在恒定反应搅拌速度的条件下，研究酸浸温度、硫酸浓度、酸浸时间、双氧水加入量、亚硫酸钠加入量及硫化钠加入量的最佳值为：酸浸温度 80℃，硫酸浓度 80 g/L，酸浸时间 2h，物料质量与双氧水质量比值 1.3，亚硫酸钠质量与物料质量比值 1.5，硫化钠质量与物料质量比值 1.6，在此条件下碲的回收率达到 93% 以上，镉的回收率达到 95% 以上。

参考文献

- [1] 殷亮, 朱刘. 从碲化镉废料中回收碲的方法[P]. 中华人民共和国知识产权局: 107128885A, 2019.07.02
- [2] 杨兴文. 不同价态含碲物料的湿法回收[J]. 有色冶炼, 1997(6):11-12+20
- [3] 刘鹏, 张兴勇, 蔡加武. 稀散金属硒、碲的火法回收工艺研究进展 [J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(4):19-21+24
- [4] 肖鹏, 王红军, 叶逢春等. 稀散金属硒、碲回收工艺现状与展望 [J]. 金属矿山, 2020(4):52-60
- [5] 魏昊. 碲铜渣高效湿法浸出及回收碲的实验研究 [D]. 安徽工业大学, 2019
- [6] 李秋旭. 碲锌镉中碲的提取研究 [D]. 浙江理工大学, 2015:3-13

核设备筒体零件局部变形后的材料性能变化和残余应力研究

肖水仙 周迎平 董明亮 舒华安

东方电气(武汉)核设备有限公司, 武汉 430223

摘要: 压水堆核电站某设备的主体材料是奥氏体不锈钢,筒体是该设备的重要组成部分,对尺寸精度要求苛刻。筒体焊接后往往需要局部校圆,然后进行尺寸稳定化热处理。校圆过程中如操作不当可能会产生局部变形,变形处材料性能及应力状态也会随之发生变化。本文通过模拟局部变形进行材料性能试验,采用X射线衍射法测量不同阶段筒体表面的应力,以探索筒体局部变形、尺寸稳定化热处理影响材料性能和表面应力的规律。

关键词: 筒体;奥氏体不锈钢;局部变形;材料性能;残余应力

中图分类号: TL353.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)02-0037-04

The Study of Material Performance and Residual Stress Changes on RVI Core Barrel after Local Deformation

XIAO Shuixian, ZHOU Yingping, DONG Mingliang, SHU Huaan

(Dongfang Electric (Wuhan) Nuclear Equipment Co., Ltd., 420223 Wuhan, China)

Abstract: Austenitic stainless steel is the main material of the RVI in light water reactors. As an important part of RVI, core barrel has stringent requirement of dimensional accuracy. After welding, the local core barrel is usually required to be circle checked. In that processing, improper operation may cause local deformation, which can change the properties of the materials, the residual stress distribution will also be changed. This paper researched regulation of local deformation, dimensional stability heat treatment affecting on material performance and residual stress, by material mechanics experiment on simulator of local deformation, and stress measurement on the surface of core barrel in different stages.

Key words: barrel; austenitic stainless steel; local deformation; material performance; residual stress

奥氏体不锈钢具有优良的耐腐蚀性能、抗高温氧化性能、较低的辐照敏感性、较好的低温力学性能及优良的机械加工性能,是轻水堆核电站常用的一种结构材料。例如压水堆主管道、堆内构件、热交换器管、主泵的泵壳以及泵轴等关键设备多采用奥氏体不锈钢^[1]。其中堆内构件是核岛主设备之一,在反应堆压力容器内为堆芯部件提供支承、为控制棒升降提供导向,引导冷却剂流入和流出,为堆芯测量部件提供支承和导向。筒体是核反应堆堆内构

件的重要组成部分,设计公差与间隙要求苛刻。制造过程中除了焊接过程中严格控制变形外,焊后局部需要校圆方能满足要求,最后还需要进行尺寸稳定化热处理。校圆过程中如操作不当会发生局部塑性变形,改变该处的材料性能及应力分布。本文通过模拟筒体局部塑性变形进行材料性能试验、采用X射线衍射法测量不同阶段筒体表面的应力来探索筒体局部变形、尺寸稳定化热处理影响材料性能和表面应力的规律。

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 肖水仙(1987-),女,2010年毕业于华中科技大学材料成型及控制工程专业,本科,工程师。主要从事堆内构件材料及热处理工艺工作。

1 筒体局部变形模拟试验

1.1 模拟件材料

模拟件使用材料为 Z2CN19-10+N₂ 控氮奥氏体不锈钢的板材，使用状态为固溶态。其化学成分见表 1。

表 1 Z2CN19-10+N₂ 不锈钢合金成分

						wt%
C	Cr	Ni	Si	Mn	S	
≤0.035	18.50~20.00	9.00~10.00	≤1.00	≤2.00	≤0.015	
P	Cu	B	N	Co		
≤0.030	≤1.00	≤0.0018	≤0.080	≤0.06		

1.2 模拟件成型

52 mm 厚的板材卷成 D3400 mm 的筒体后，在切下的（开管嘴孔）一块直径约为 1 m 的弧形板上用压力机进一步压出最大深度为 20 mm、水平深度最大 31 mm，直径约 400 mm 的变形区，为模拟试件一，见图 1。另一块弧形板带产品模拟焊缝，模拟变形最大深度为 19 mm，水平最大深度为 34 mm，为模拟试件二，见图 2。试件一未经历热处理，试件二经历了 400℃×8h 保温尺寸稳定化热处理。

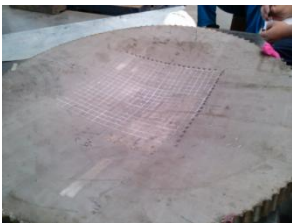


图 1 模拟试件一



图 2 模拟试件二

1.3 试验设计

1.3.1 母材性能试验设计

共设计 4 组母材性能试验，分别是：

组 1 固溶状态的板材力学性能试验、晶间腐蚀试验及金相试验；

组 2 试件一模拟变形区域外的力学性能试验、金相试验；

组 3 试件一模拟变形区域内的力学性能试验、晶间腐蚀试验及金相试验；

组 4 试件二模拟变形区域内的力学性能试验、晶间腐蚀试验及金相试验。

上述取样图见图 3、图 4，取样位置满足 RCC-M M3310(2000 版+2002 补遗)的规定。

1.3.2 焊缝性能试验设计

共设计 1 组焊缝性能试验：

组 5 试件二模拟变形区域内焊缝的力学性能试验、晶间腐蚀试验及金相试验。将试验结果与相应焊接工艺评定检查结果进行比较。

取样图见图 4。

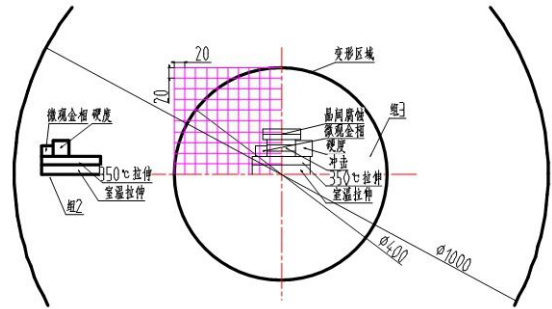


图 3 模拟件一取样图

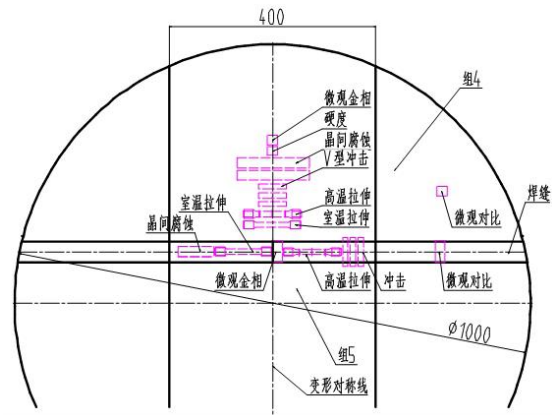


图 4 模拟件二取样图

1.4 试验结果

1.4.1 母材力学性能试验结果，见表 2。

表 2 母材力学性能试验结果

组别	试验项目	室温拉伸			350℃拉伸		冲击 /J	硬度 /HB
		Rp0.2/MPa	Rm/MPa	A/%	Rp0.2/MPa	Rm/MPa		
	技术条件	≥210	≥520	≥40	≥125	≥394	最小平均值 ≥60	/
1	头部	248	563	62.5	133	417	272,274,277	/
	尾部	261	576	60.0	132	412	293,271,274	/
2	凹面	325	575	58.5	235	430	/	180
	凸面	275	575	59.5	185	435	/	172
3	凹面	350	566	59	266	433	317,323,341	216
	凸面	447	616	48.5	367	464	297,300,309	228
4	凹面	301	587	59	213	435	353,349,352	235
	凸面	309	606	57.5	213	440	333,411,365	225

分析表 2 中数据可以得出:

(1) 塑性变形使材料室温及 350℃ 高温屈服强度提高, 但是经过尺寸稳定化热处理后有所回弹, 模拟变形处热处理后的材料屈服强度与筒体卷圆后强度值接近;

(2) 塑性变形和尺寸稳定化热处理对材料的室温抗拉强度、延伸率及 350℃ 抗拉强度影响不大;

(3) 局部塑性变形模拟试件热处理前后材料的力学性能均能满足技术条件。

1.4.2 焊缝力学性能试验结果, 见表 3。

表 3 焊缝力学性能试验结果

组别	试验项目	室温拉伸		350℃ 拉伸		冲击	
		Rp0.2/MPa	Rm/MPa	A/%	Rp0.2/MPa		Rm/MPa
工艺评定要求		≥210	520~700	≥30	≥125	实测	≥60 (单个)
工艺评定结果		510	630	43.5	430	480	210,238,233, 200,209,232
5	凹面	416	594	41.5	364	441	191,175,179
	凸面	490	593	47.5	367	422	211,187,225

分析表 3 中数据可以得出:

局部塑性变形模拟试件焊缝熔敷金属的力学性能仍能满足产品焊缝焊接工艺评定要求。

1.4.3 母材和焊缝的晶间腐蚀

组 3、4、5 均在凹凸表面取试样进行了晶间腐蚀试验, 试验按标准 RCC-M MC1310 进行, 敏化处理为 B 处理。声响试验与弯曲试验结果均合格。说明变形处母材和焊缝晶间腐蚀性能均能满足要求。

1.4.3 母材和焊缝的金相试验结果

组 3、4、5 在模拟件变形区凹凸表面取试样进行晶粒度和微观组织检查, 与变形区域外的试样结果进行对比, 结果一致。说明模拟变形对材料及焊缝晶粒度及金属显微组织未造成明显影响。

2 筒体表面残余应力测量

2.1 残余应力

在筒体卷圆、进一步局部变形和焊接过程中, 外力和温度变化引起的不均匀塑性变形是产生残余应力的主要原因^[2]。残余应力的存在, 一方面工

件会降低强度, 使工件在制造过程时产生变形和开裂等工艺缺陷; 另一方面又会在制造后的自然释放过程中使工件的尺寸发生变化或者使其疲劳强度、应力腐蚀等力学性能降低^[3]。

2.2 测量方法及原理

测量方法: X 射线衍射法; 设备型号: JV iXRD。

基本原理: 其原理是基于布拉格方程 $2d\sin\theta=n\lambda$: 即一定波长的 X 射线照射到晶体材料上, 相邻两个原子面衍射时的 X 射线光程差正好是波长的整数倍。当材料中存在残余应力时, 原子晶面间距将发生变化, 通过测量衍射角变化 $\Delta\theta$ 从而得到晶格间距变化 Δd , 根据胡克定律和弹性力学原理, 计算出材料的残余应力。但是, X 射线穿透深度有限, 通常为 5~30 μm 。此次测量奥氏体不锈钢材料选用 Mn 靶, 测深约 10 μm 。

2.3 测量位置选取

本试验的主要目的是研究筒体在正常工艺下产生残余应力的基础上, 局部塑性变形带来的影响程度。选取以下 4 个位置进行测量分析。

位置 1 筒体卷圆后不经任何处理内外表面的应力;

位置 2 筒体卷圆后经尺寸稳定化热处理、表面喷砂处理后外表面的应力;

位置 3 筒体卷圆后经校圆、局部塑性变形、尺寸稳定化热处理、表面喷砂处理后, 塑性变形区外表面的应力, 测量点分布见图 5;

位置 4 焊缝的焊接应力。

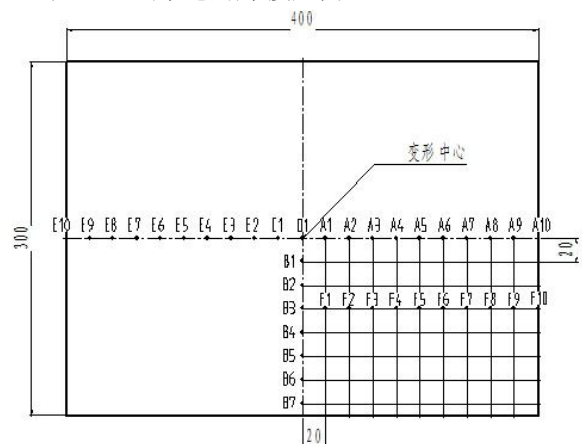


图 5 测点分布图

2.4 测量结果

位置 1、2 和 4 的测量结果见表 4。

表 4 位置 1、2 和 4 应力测量结果

测量点	1	2	3	4	5
位置 1 外表面	516	505	502	516	574
位置 1 内表面	-327	-198	-349	-387	-388
位置 2	-617	-579	-570	-	-
位置 4	477	-	-	-	-

位置 3 的测量结果见表 5。

表 5 位置 3 应力测量结果

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	-459	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-450	-15	-151	-509	80	225	-217	493	-123	-25
B	-404	-367	-368	-313	-309	未测	未测	-	-	-
E	-488	-400	11	328	467	195	117	-39	231	187
F	-353	-268	-354	-466	-652	-592	-658	-615	-636	无效

2.5 测量结果分析

表 4 中位置 1 内外表面测量结果反映了板材卷圆成筒体后外表面残余拉应力，内表面残余压应力，以及应力大小。位置 2 测量结果反映了筒体外表面经过喷砂处理后，材料表面引入了残余压应力。一般来说疲劳裂纹总是起源于表面，为了提高材料抗疲劳性能，通常采用喷丸处理在金属靶材的表面引入压缩残余应力^[4]。虽然位置 2 表面采用的是以清洁和美观为主要目的的喷砂处理，而非以表面强化为主要目的的喷丸处理，但介质砂中添加有不锈钢切丸，起到了强化的附加作用。

表 5 中的数据显示局部塑性变形区域有拉应力也有压应力，这是因为筒体部分位置为去除划伤而进行了抛光处理，去掉了表面压应力层，这种状态下测得的应力为拉应力。有研究表明^[5]，磨削对表面残余应力的贡献不超过 30kPa（见图 6），相对于筒体表面测量结果（单位为 MPa）可忽略不计，因此可认为抛光面测得的表面拉应力为板材经历两次塑性变形和热处理后的残余应力(个别测点实测值较低，主要是位于喷砂与抛光区域之间，受表面

状态影响，未能体现喷砂前的应力状态)。

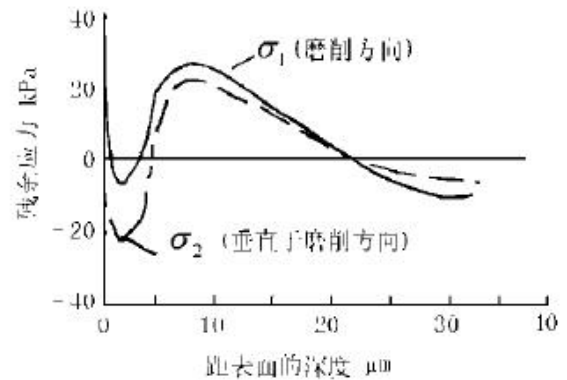


图 6 磨削后表面层的残余应力分布

表 5 中测得最大拉应力为 493 MPa，通过数值模拟分析，局部热处理可以削减变形处约 20% 的峰值残余应力，可还原热处理前的应力水平约为 620 MPa。而筒体卷圆后外表的拉应力值最高为 574 MPa，可见微量的二次塑性变形并未造成拉应力明显增加，并且经热处理后变形处表面拉应力降至正常卷圆水平以下。同时，通过对焊缝及附近的应力测量，采集到焊缝中心最大拉应力 476 MPa，变形区域采集到的最大表面拉应力 493 MPa 与之水平相当。

3 试验结论

通过在筒体上开孔切下的弧形板上模拟最大深度为 20 mm，最大水平深度为 30 mm，变形区域为 400 mm 的模拟试验，和 X 射线衍射法测量筒体实体局部变形，可得出以下结论：

(1) 筒体局部塑性变形使材料室温及 350℃ 高温屈服强度提高，但是经过尺寸稳定化热处理后下降至与变形前接近。局部变形对材料的室温及 350℃ 抗拉强度影响不明显；

(2) 筒体局部塑性变形后，变形区内母材和焊缝的力学性能、晶间腐蚀性能及金相组织仍能满足技术要求；

(3) 板材卷制后，筒体外表面残余拉应力，经喷砂后，转变为压应力，且变形区和正常卷圆区域受喷砂影响程度相当；

(4) 试验中塑性变形未造成拉应力明显增加，

（下转第 56 页）

热处理制度对 ER316H 熔敷金属力学性能影响的研究

蒋宇晨 李恩 何冰 张丹萍

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 本文针对某核岛主设备用 ER316H 不锈钢氩弧焊焊丝, 通过在不同热处理制度下的焊接工艺试验, 获得了不同热处理保温时间对 ER316H 未稀释熔敷金属高温抗拉强度和室温冲击功的影响规律。为相关项目蒸汽发生器不锈钢焊材的研究和使用奠定了基础。

关键词: ER316H; 不锈钢氩弧焊焊丝; 热处理保温时间; 抗拉强度; 冲击功

中图分类号: TG441.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0041-03

Research on Influence of Heat Treatment Process on Mechanical Properties of ER316H Deposited Metal

JIANG Yuchen, LI En, HE Bing, ZHANG Danping

(Dongfang Electric (Guangzhou) Heavy Machinery Co.,Ltd., 511455, Guangzhou, China)

Abstract: In this paper, focusing on ER316H argon arc welding wire of stainless steel welding wire for nuclear island equipment, through welding process tests under different heat treatment systems, the influence of different heat treatment holding time on high temperature tensile strength, room temperature impact performance of ER316H deposited metal is obtained. A foundation has been made for the research and use of stainless steel welding materials for steam generators in related projects.

Key words: ER316H; Argon arc welding wire of stainless steel; heat treatment holding time; tensile strength; impact energy

ER316H 焊材是一种奥氏体型不锈钢焊材, 在不锈钢领域中扮演着重要的角色, 其生产量和使用量约占不锈钢总产量的 70%^[1]。奥氏体不锈钢组织为面心立方, 在高温下具有优良性能, 适用于要求耐腐蚀、抗氧化、耐高温的零部件和设备, 广泛应用于石油化工、容器及管道等行业。

某核岛主设备在高温下工作运行, 其接管材质为 2.25Cr1Mo, 为了使安全端与接管由异种钢焊缝变成同种金属的焊接, 需要在铬钼钢接管端面堆焊 ER316H 作为隔离层, 因此不锈钢隔离层需要经历与铬钼钢母材相同制度的热处理。然而, 现有的大

部分 ER316H 焊丝在焊态下进行使用, 为了满足产品的焊接要求, 探究热处理制度对 ER316H 未稀释熔敷金属力学性能的影响, 本文开展了手工氩弧焊 ER316H 未稀释熔敷金属的力学性能试验研究, 分析了在 $690^{\circ}\text{C}\pm 15^{\circ}\text{C}$ 热处理保温温度下, 不同热处理保温时间对 ER316H 未稀释熔敷金属力学性能的影响。

1 材料与方法

试板采用不锈钢试板 SA-240M TP.316, 试板厚度 25mm, 焊接材料采用国内供应商生产的 ER316H

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 蒋宇晨 (1991—), 女, 2015 年毕业于香港城市大学材料科学与工程专业, 硕士, 工程师。现在东方电气(广州)重型机器有限公司从事核岛主设备焊接工艺和焊接材料研究工作。

不锈钢氩弧焊焊丝，焊丝的化学成分见表 1，试件坡口及装配尺寸要求见图 1。试验采用同一批次的 ER316H 不锈钢焊丝，在平焊位置下进行手工 TIG 焊对接，保护气体成分为高纯氩，保护气体流量为 7-20 L/mn。焊接完成后，将试板分别进行焊态和热处理态处理，热处理保温温度为 690℃±15℃。

对焊态和不同热处理保温时间下的 ER316H 未稀释熔敷金属开展了如下试验，详见表 2：按照拉伸试验标准 AWS B4.0M-2000 和 ASTM E21-1998 对 1#、2#、3#、4#试验组进行了高温拉伸试验和室温冲击试验；为了研究 ER316H 未稀释熔敷金属老

化规律，对 5#、6#、7#试验组进行了时效冲击试验；此外，还选取经历热处理保温时间最长的试样进行了弯曲试验和耐晶间腐蚀试验。

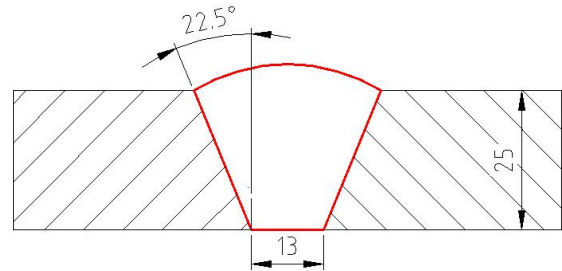


图 1 试板坡口形式

表 1 试验焊丝 ER316H 化学成分

元素	C	S	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Pb	wt%
ER316H	0.51	<0.001	0.47	1.61	0.005	18.48	12.76	2.35	0.02	0.01	<0.001	
元素	Sn	As	Sb	Bi	Al	V	Nb	N	B	Ca		
ER316H	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.03	0.01	0.01	0.050	<0.0001	0.001		

表 2 试验组与试验项次对照

试验组	试样状态	试验项次
1#	焊态	高温拉伸: 350℃、450℃、515℃、530℃; 室温冲击
2#	2-2.5h	高温拉伸: 350℃、450℃、515℃、530℃; 室温冲击
3#	4-4.5h	高温拉伸: 350℃、450℃、515℃、530℃; 室温冲击
4#	8-8.5h	高温拉伸: 350℃、450℃、515℃、530℃; 室温冲击
5#	焊态	750℃/100h 加速时效处理的室温冲击
6#	3.5-4h	750℃/100h 加速时效处理的室温冲击
7#	8-8.5h	750℃/100h 加速时效处理的室温冲击

2 结果

2.1 热处理保温时间对 ER316H 未稀释熔敷金属高温抗拉强度的影响

按照相同焊接工艺焊接后，1#、2#、3#、4#试验组在不同热处理保温时间状态下，ER316H 未稀释熔敷金属的焊态和热处理态下的高温抗拉强度试验结果见图 2。

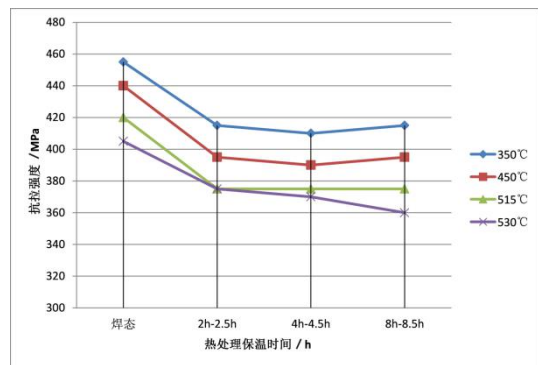


图 2 不同热处理保温时间对未稀释熔敷金属高温抗拉强度的影响

本试验采用手工 TIG 焊进行焊接，从试验结果可以看出：未稀释熔敷金属在焊态下，高温拉伸强度值最高，经过一定时间的热处理后，抗拉性能有所降低；但随热处理保温时间增加，变化不明显，分别稳定在 410~415 MPa, 390~395 MPa, 375 MPa。

2.2 热处理保温时间对 ER316H 未稀释熔敷金属室温冲击功的影响

按照相同焊接工艺焊接后，1#、2#、3#、4#试验组在不同热处理保温时间状态下，其未稀释金属的焊态和热处理态下的室温冲击功试验结果见图 3。

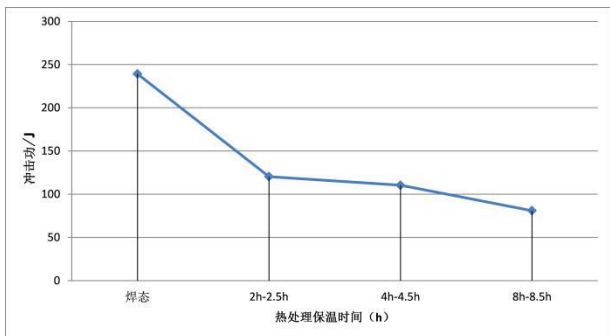


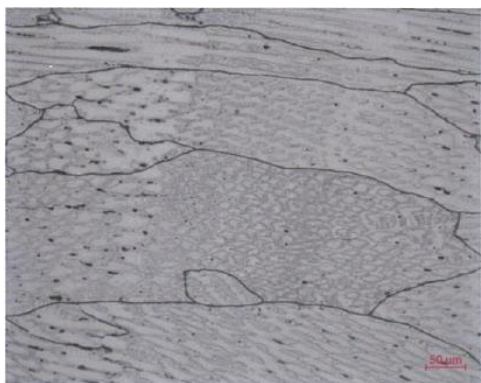
图3 不同热处理保温时间对未稀释熔敷金属冲击功的影响

从试验结果可以看出：在手工 TIG 焊焊接工艺下，焊态焊缝金属冲击功最高，平均值为 248 J，随着热处理保温时间的增加，焊缝金属的冲击功成下降趋势，当经过 8 h-8.5 h 的热处理制度后，焊缝金属的冲击功降低至 86 J，降幅比例约为 65%。

通过观察焊缝的微观组织发现，经过一定时间的热处理后，组织中的晶粒逐渐长大，有效晶界较少，同时碳化物在晶界析出与粗化，焊缝的冲击吸收能量降低，塑性降低^[2]，如图 4 所示。



(a) 焊态组织



(b) 热处理态组织

图4 焊态和热处理态下焊缝金属的微观组织

此外，为了研究 ER316H 未稀释熔敷金属老化规律，模拟实际温度下更长时间的冲击功变化，对 5#、6#、7#试验组的试样进行了 750 °C/100h 的加

速时效处理，每种状态的试样进行了 1 组（5 个试样）冲击试验，得到每个状态下 1 组（5 个试样）的平均室温冲击功，试验结果见图 5。

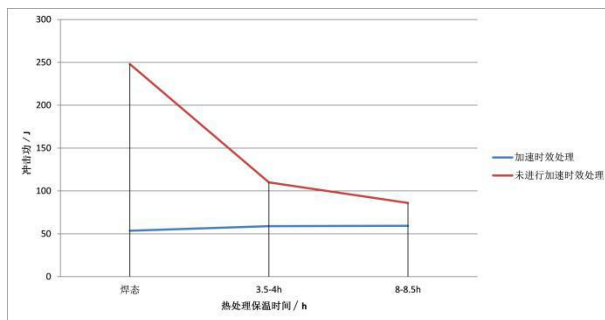


图5 不同热处理保温时间对未稀释熔敷金属加速时效冲击功的影响

从试验结果可以看出：焊缝熔敷金属经历 750 °C/100h 的加速时效处理后，所有状态的焊缝未稀释熔敷金属冲击功都有明显下降，是因为加速时效处理导致 σ 相的析出，导致冲击韧性的下降^[3]，详见图 6；经过热处理的焊缝未稀释熔敷金属冲击功较焊态焊缝未稀释熔敷金属有所提高，但提高趋势并不明显；经历不同保温时间的焊缝未稀释熔敷金属的冲击功差异并不明显。



图6 经过时效冲击处理后的焊缝组织

2.3 其他性能

根据前一阶段的试验结果，选取经历最长热处理保温时间的试样进行弯曲试验和晶间腐蚀，考察长时间热处理是否会对它造成不利影响，试验结果如下：

按照 AWS B4.0M 进行纵向面弯、纵向背弯和横向侧弯试验，试验压头直径为试样厚度的 4 倍，弯曲角度 180°，受拉面在弯曲角度内的熔敷金属沿任何方向无开口缺陷，试样完好；

(下转第 60 页)

大容量机组锅炉钢结构优化研究及应用

高玲^{1,2}

1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 随着市场竞争的日趋激烈, 对产品的成本控制要求愈来愈严。而作为支撑悬吊锅炉的钢结构, 如何实现既安全又经济, 是所有结构设计人员必须要考虑的问题。本文以 660 MW 高效超超临界锅炉钢结构为例, 对钢结构的优化设计进行了系统的思考及研究。

关键词: 钢结构; 优化研究

中图分类号: TK223

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0044-06

Research and Application of Steel Structure Optimization for Large Capacity Boiler

GAO Ling^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 643001, Zigong, SiChuan, China)

Abstract: With the increasingly fierce market competition, the cost control requirements of products are more and more strict. As the steel structure supporting the suspended boiler, how to achieve both safety and economy is a problem that all structural designers must consider. Taking the steel structure of 660MW high efficiency ultra supercritical boiler as an example, the optimization design of steel structure is systematically considered and studied.

Key words: steel structure; optimization research

锅炉钢结构是锅炉的重要组成部分, 作为支撑锅炉的承重结构, 设计时, 除了考虑锅炉及其附属部分的全部自重荷载外, 还要考虑其在地震、风等外荷载作用下的水平力, 使结构在设计周期内, 将所有这些传给结构的荷载, 通过一定的路径安全有效地传递给基础, 最后传到地基。即结构设计的两个重要原则就是安全性与经济性。本文以此为切入点, 在保证安全的条件下, 如何体现经济性方面进行深入研究, 并于实际工程中进行应用。

1 结构体系布置

整个结构采用空间桁架的受力结构体系, 悬吊锅炉顶部负荷通过顶板系统传给锅炉立柱, 又通过在锅炉炉膛四周设置刚性梁, 将锅炉在地震、风等荷载作用下所受水平力通过与刚性梁相连的导向

装置传递给锅炉钢结构。结构在深度及宽度方向柱梁之间分别设计有垂直支撑, 在水平面上还有水平支撑, 整个结构体系通过立柱、钢梁、水平支撑及垂直支撑、形成了侧向传力体系, 其刚度中心与锅炉的质心相重合。

锅炉布置在主跨内, 尾部布置空气预热器, 空气预热器上方布置有脱硝反应器。结构柱网布置见下图 1。

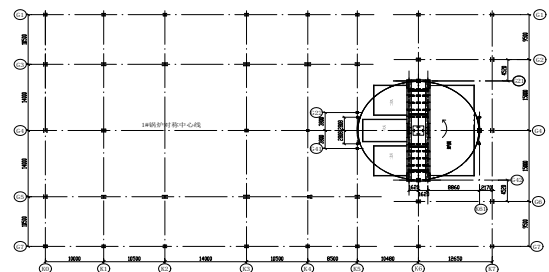


图 1 柱网平面图

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 高玲 (1982—), 女, 2005 年毕业于西安交通大学土木工程专业, 现任东方锅炉股份有限公司技术中心产品设计员, 主要从事结构设计工作。

2 结构优化研究

在深度和宽度方向分别布置有抗侧力体系，节选部分立面图如下图 2 和图 3。

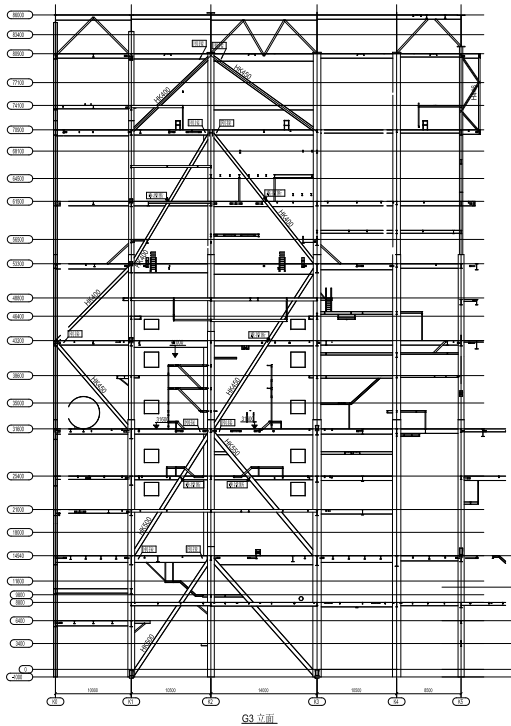


图 2 深度方向抗侧力体系布置

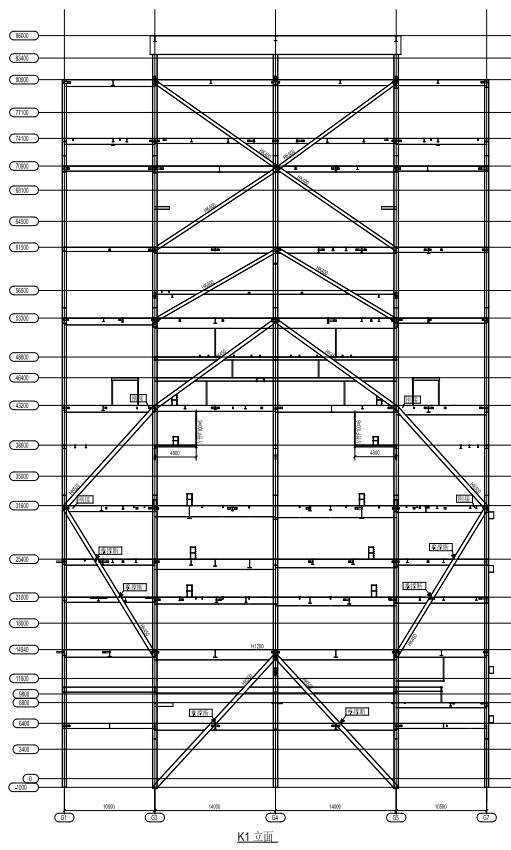


图 3 宽度方向抗侧力体系布置

2.1 立柱优化

本工程为两台 660 MW 高效超超临界燃煤机组，前后墙对冲燃烧方式，露天布置，侧煤仓结构。侧煤仓与前煤仓布置不同，煤仓间是布置在锅炉一侧，那么由磨煤机引出的煤粉管道在锅炉构架与煤仓间构架之间的部分，其部分荷载要由构架外排柱承受。通常，会通过在此构架上设计牛腿的形式支撑。如此，则在未布置煤仓间的另外一侧，锅炉外排柱仅承受锅炉范围内的设备及平台荷载。与煤仓间侧相比，往往会小几十吨至几百吨，受力荷载存在较大差异。下图 4 是侧煤仓布置示意图，从图中可以看到煤仓间位于两台锅炉之间。

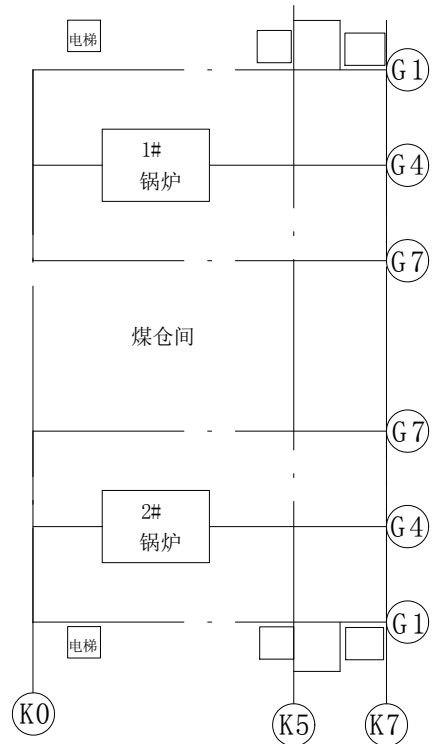


图 4 侧煤仓布置图

那么，由结构力学理论知，在对称荷载作用下，结构应对称。结构对称即结构的杆件对称布置，杆件截面亦对称。同理，在外排柱荷载不对称时，杆件不对称布置亦是合理的。再根据控制不均匀沉降的原则，由于地基的沉降主要是由两部分组成，一是地基在准永久荷载组合下，由附加应力引起的地基压缩变形，另一个则是上部结构杆件自身的压缩变形。此处，考虑立柱的压缩变形，按轴心受力构件考虑，则在线弹性范围内，立柱的压缩量计算

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (1)$$

可知，压缩量值与轴力 N 、杆件长度 l 、弹性模量 E 以及杆件截面面积 A 有关。在两侧立柱的长度 l 及弹性模量均相同，那么要保证相同的压缩量，

所受轴力 N 值与截面面积 A 成正比关系。 N 变大， A 应增加， N 小，则 A 也应相应减小。这也体现了“变刚度调平”的原则。

那么，根据侧煤仓两侧荷载不同，根据计算得到柱截面如下表 1 所示，并对比了立柱重量差。

表 1 外排立柱计算截面表

立柱	煤仓间侧 立柱截面	延米 重量(kg/m)	另一侧 立柱截面	延米重量 (kg/m)	立柱长度(m)	降低重量 (kg)
K1	H500×800×16×40	555.15	H500×700×14×36	442.67	33.8	3 802
K2	H500×800×16×40	555.15	H500×650×14×30	354.5	33.8	6 782
K3	H560×900×16×50	764.27	H500×800×16×40	555.15	33.8	7 068
K4	H500×700×14×36	442.67	H500×650×14×30	354.5	33.8	2 980
K5	H500×750×14×36	470.93	H500×700×14×36	442.67	33.8	955
					共计	21 587

由上表可知，单台锅炉外排五根立柱根据侧煤仓荷载分别计算截面，降低重量总计为 2 1587 kg。

此外，还可以通过改变约束条件、控制应力比、拼接节点设计、减少非必要肋板等措施进一步优化。

2.2 支撑体系优化

2.2.1 水平支撑优化

水平支撑的作用有三，一是增加锅炉钢结构的整体刚度，并保证结构构件在安装过程中的稳定性；二是保证立柱在无垂直支撑平面的稳定性，控制柱的计算长度；三是承受和传递锅炉的风荷载、地震作用和导向力等。

水平支撑宜布置在承载较大的平面内，其标高应与设备检修等一并考虑，且与导向装置设计相协调。水平支撑并应在锅炉钢结构周围形成连续的封闭结构，设计时应避免主平面层水平支撑不封闭或不连续，以免造成平面处刚度发生削弱，以及在水平力作用下结构产生扭转。

从水平支撑的作用及受力原理，可知其优化设计可从以下两方面入手：①根据不同地震烈度对应的长细比限值及受力选取不同截面，如下表 2；②减少冗余杆件，使传力路径简洁、直接。如下图 5、图 6 所示。

表 2 水平支撑截面

标记	对应截面	适用长度(m)
HB-1	方管 F100×6	$L \leq 4.5m$
HB-2	方管 F160×6	$L \leq 9.3m$
HB-3	方管 F200×6	$L \leq 11.8m$
HB-4	角钢 L50X50X5	$L \leq 2m$
HB-4	角钢 L75X75X5	$L \leq 3m$

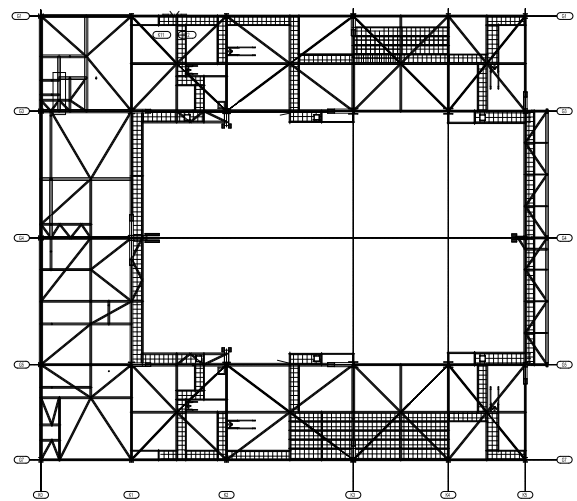


图 5 有较多冗余支撑的布置

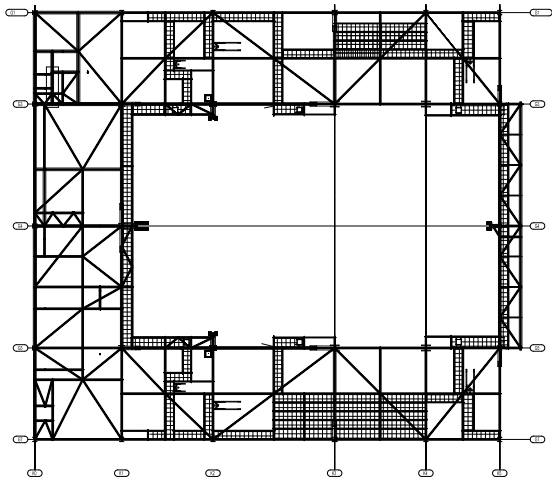


图6 减少冗余支撑的布置

由上图布置结合计算结果，图6在减少冗余支撑设计后，计算依然满足要求，且传力路径更加简洁、明了，减少约一半的用量。

2.2.2 垂直支撑优化

垂直支撑的作用同样有三：一是与立柱及梁组成空间桁架体系，保证结构的整体刚度；二是承受和传递水平力；三是保证柱的侧向稳定，提供水平支撑的弹性支撑。

垂直支撑宜布置在承载较大的框架平面内，布置时需兼顾设备、管道等的位置。根据概念设计原理，垂直支撑应沿锅炉高度方向均匀、连续布置，使水平荷载以明确且最短的途径传到基础。且在前后方向或两侧垂直支撑所在立面刚度应均匀，不能有较大的刚度差异。根据其轴心受力的特点，支撑截面采用双轴对称且两个方向回转半径接近的杆件，如方管、圆管等，其材料强度将能得到最大程度地利用。

抗震设计时，还需考虑抗震构造措施、如板件宽厚比、杆件长细比等结合受力进行合理选取。本工程地震烈度为6度，长细比按压杆120控制。支撑截面设计如下表3，布置如图7。

表3 垂直支撑截面

标记	对应截面	适用长度
HK400	HK400-12-12×400/360	L≤17.5m
HK450	HK450-14-14×450/400	L≤19.5m
HK500	HK500-16-16×500/450	L≤22m
HK550	HK550-18-18×550/500	L≤24.3m

在设备穿出处，支撑布置在副跨区域，在地震以及风荷载作用下，设计需考虑外排柱受到的上拔力作用。

垂直支撑设计的经济性在于合理布置抗侧力体系，如对中小炉型，在前后方向各取一个立面布置支撑，而对大炉型，在前、中、后一般取三到四个立面进行布置。此外，根据支撑受力的稳定性计算公式合理选取截面，稳定性计算公式如下：

$$\frac{N}{\Psi A} \leq f \quad (2)$$

在轴力 N 以及 A 一定时，应力与稳定系数 Ψ 成反比。而 Ψ 值应与构件的长细比，钢材屈服强度和截面分类有关。垂直支撑杆件一般两个方向计算长度相同，那么控制两个形心主轴方向的回转半径相同，则两个方向 Ψ 值亦相同，那么材料就会得到最大程度的发挥，经济性也最佳。

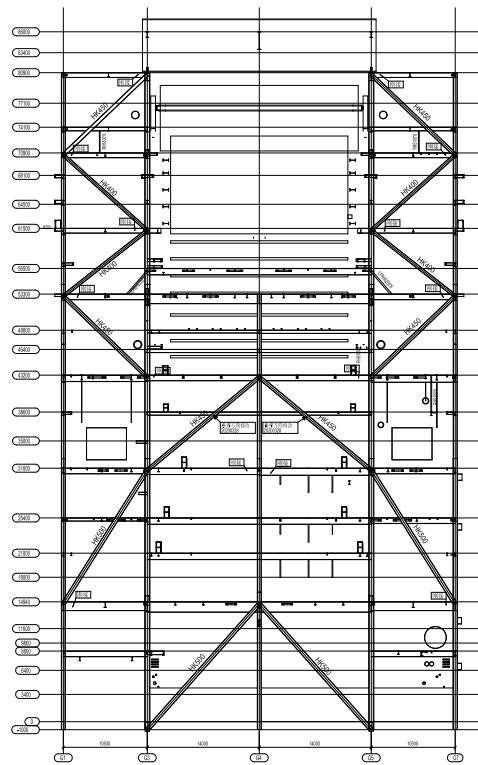


图7 垂直支撑布置

3 顶板优化

3.1 顶板简介

顶板由主梁、次梁、隔条梁、水平支撑、垂直支撑组成。其作用为将锅炉顶部的负荷通过格条梁、次梁、主梁传给立柱。节选部分顶板布置，如下图

8所示。

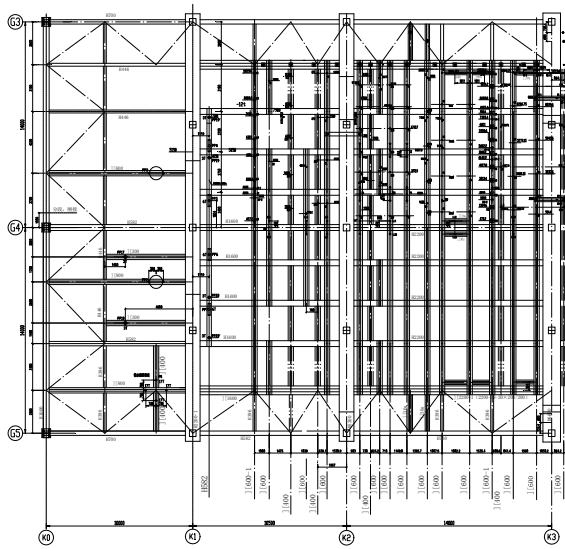


图8 顶板系统

3.2 顶板组成

从以往工程的经验数据中得到660 MW锅炉顶板中各系统重量所占的比重如下表4所示。

表4 顶板各部分重量比重

序号	分项	重量百分(%)
1	板梁	55%
2	次梁	31%
3	隔条梁	12%
4	支撑	1%
5	高强螺栓	1%

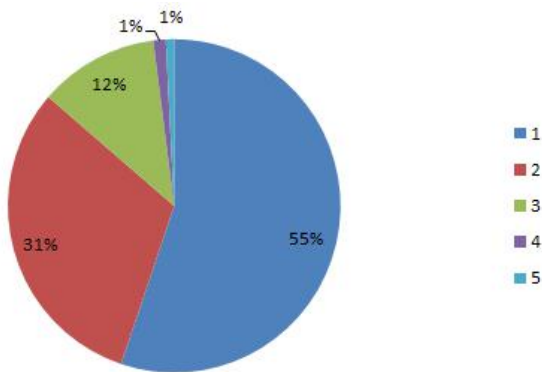


图9 顶板各部分重量占比图

由表中数据可知，板梁占比最高，超过整个顶

板重量的一半之多，次梁其次，隔条梁次之，支撑及螺栓占比极小。那么，顶板的优化也就应该重点从板梁入手进行。

3.3 顶板优化

具体优化措施归纳为如下四个方面：

(1)变截面设计。根据板梁受力特点，端部剪力较大，而弯矩较小，可减小翼缘宽度，采用翼缘变截面设计。

(2)加劲肋优化设计。加劲肋包括支座加劲肋、横向加劲肋及纵向加劲肋。
①支座加劲肋优化：根据支座处反力，选加劲肋及腹板组成的十字截面按轴心受力构件进行计算。设计表明用单加劲肋取代双加劲肋，既减少用材，又方便现场高强螺栓的安装施工。
②横向加劲肋：严格按构造要求进行厚度及宽度的选取。
③纵向加劲肋：通过合理选取腹板厚度，按照区格计算腹板稳定性，证明适当提高腹板厚度比用较小的厚度加纵向加劲肋的设计更优。

(3)通过厂内预制上挠的措施，从而达到加载后，挠度依然满足协议要求，而不必为了挠度的限制而刻意提高板梁高度。

(4)合理选取受力模型。次梁及隔条梁根据计算结果调整截面，在满足强度、刚度及稳定性的前提下选取最经济的截面。且隔条梁按照连续梁设计比简支梁设计所需截面更小。

4 平台扶梯优化

4.1 平台优化

平台作用在于通行与检修的需要，设计时结合协议要求，合理选取平台宽度，在主要的检修层设置环形通道，方便检修，其余局部检修处仅设置与扶梯的连通平台。减少不必要的绕道与观光，按需设置，按最短路径设计，设计中需与相关专业详尽配合设备及管道布置，使得平台可以尽量直线布置，减少曲线或者环形的的设计。这样既可以减少平台次梁的数量，也可以减少栅格及栏杆的用量。

4.2 扶梯优化

扶梯设计，根据《火力发电厂与变电站防火设

计规范》5.1.1 条要求,最远工作地点到外部出口或楼梯的距离不应超过 50 m。考虑到扶梯一般位于锅炉钢架两侧布置,那么当深度方向柱距大于 50 m 时,在炉前及炉后分别设计从 0 m 到结构顶层的扶梯通道,当深度方向柱距小于 50 m 时,可在锅炉中部区域设计。扶梯宽度及角度严格按照技术协议要求进行设计。同样的跨度和高度情况下,选用角度小的扶梯比角度大的扶梯钢材用量更少。

4.3 人性化的改进优化

虽然在结构设计中极尽最大可能地优化,但并非只是一味地“抠”,同时也充分考虑了用户的使用体验,改进了原有不合理的设计,使得设计更加地人性化,在细节处彰显质量。

(1) 在检修进出的人孔处,设计了可开启的活动栏杆门,如下图 10 所示。

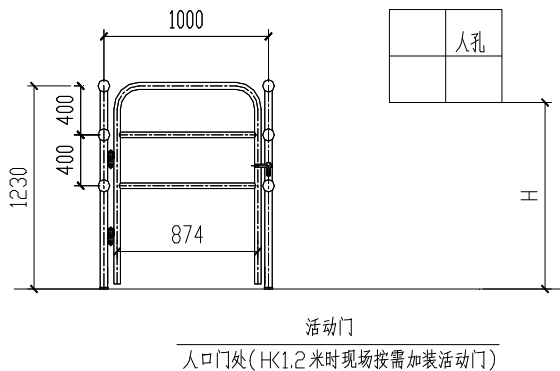


图 10 人孔位置人性化的活动门设计

如此可避免在停炉检修时,检修人员需翻越栏

杆进出人孔门,既不方便,也存在安全隐患。

(2) 在混凝土或栅格与花钢板等高度突变处增加过渡折板,如下图 11 所示。

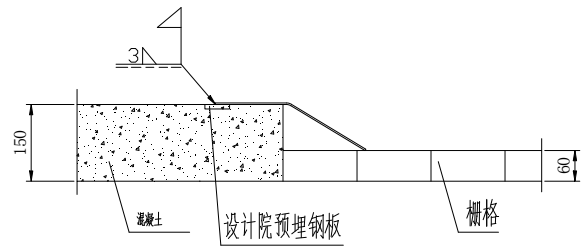


图 11 平台高度突变处折板的设计

过渡折板的设计,既美观,又安全。

5 结语

钢结构优化设计是一项系统且复杂的工程,需从结构整体布置入手,考虑概念设计、抗震设计,合理布置主层以及抗侧力体系,整体把握,细节优化,做到既安全又经济。同时,也受于炉型、容量等级、燃烧方式及煤仓间位置等各因素的制约。但总体而言,都可以极尽可能地去优化与完善。以使我公司产品能够在激烈的市场竞争中保持核心竞争力,同时,改进原有不合理的设计,使设计更加的人性化,可以更好地服务于用户。虽然本文只是以大容量机组为例,但部分优化措施同样也适用于中小机组锅炉钢结构的设计。希望通过本文的分析及研究,对今后的工程设计有所启迪和指导。

(上接第 32 页)

- experimental and theoretical trends [J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(10): 3022-3029
- [11] JIA Y, ZHANG L, GAO G, et al. A Heterostructure Coupling of Exfoliated Ni-Fe Hydroxide Nanosheet and Defective Graphene as a Bifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting [J]. Adv Mater, 2017, 29(17):1700017
- [12] FABER M S, LUKOWSKI M A, DING Q, et al. Earth-Abundant Metal Pyrites (FeS₂, CoS₂, NiS₂, and Their Alloys) for Highly Efficient Hydrogen Evolution and Polysulfide Reduction Electrocatalysis [J]. J Phys Chem C Nanomater Interfaces, 2014, 118(37): 21347-21356
- [13] SEH Z W, FREDRICKSON K D, ANASORI B, et al. Two-Dimensional Molybdenum Carbide (MXene) as an Efficient Electrocatalyst for Hydrogen Evolution [J]. ACS Energy Letters, 2016, 1(3): 589-594
- [14] WANG X, KOLEN'KO Y V, BAO X Q, et al. One-Step Synthesis of Self-Supported Nickel Phosphide Nanosheet Array Cathodes for Efficient Electrocatalytic Hydrogen Generation [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2015, 54(28): 8188-8192
- [15] KOVERGA A A, FLÓREZ E, JIMENEZ-OROZCO C, et al. Not all platinum surfaces are the same: Effect of the support on fundamental properties of platinum adlayer and its implications for the activity toward hydrogen evolution reaction [J]. Electrochimica Acta, 2021, 368:137598

大型清洁高效发电设备智能车间系统设计

张琳 刘伯兴

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文针对国家能源战略需求和电力装备转型升级要求, 率先选定大型清洁高效发电设备的共性核心零件-定子线圈、转子线圈、定子冲片为智能制造新模式的应用突破点, 建设大型发电设备的数字化智能化冲剪和线圈车间, 构建多车间生产设施和软件平台的信息物理系统, 让数字化、智能化手段贯穿发电设备的“规划-设计-制造-试验-服务”全过程, 实现智能制造和绿色制造, 建立智能化、数字化的研制体系和运维服务平台, 最终建成高端发电设备智能制造数字化工厂, 促进了关键部件、装备和系统集成创新能力大幅提升。

关键词: 发电设备; 智能制造; 数字化

中图分类号: TH181; TP278

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0050-07

Design of Intelligent Workshop System for Large-scale Clean and High-efficiency Power Generation Equipment

ZHANG Lin, LIU Boxing

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: In response to the national energy strategy needs and the requirements for the transformation and upgrading of power equipment, this paper takes the lead in selecting the common core parts of large-scale clean and high-efficiency power generation equipment-stator coils, rotor coils, and stator punches as the breakthrough points for the application of new modes of intelligent manufacturing, and the construction of large-scale power generation equipment digital and intelligent punching and shearing and coil workshops, building a cyber-physical system of multi-workshop production facilities and software platforms, allowing digital and intelligent means to run through the whole process of "planning-design-manufacturing-testing-service" of power generation equipment to realize intelligent manufacturing and green manufacturing, the establishment of an intelligent and digital R&D system and operation and maintenance service platform, and finally the establishment of a digital factory for intelligent manufacturing of high-end power generation equipment, which has greatly improved the innovation capabilities of key components, equipment and systems.

Key words: power generation equipment; intelligent manufacturing; digitalization

1

随着物联网、云计算、大数据、数字孪生等新一代信息技术和人工智能技术的快速发展及其与制造的不断融合与落地应用, 各制造强国纷纷提出了一系列国家层面先进制造战略, 如美国的工业互联网^[1]和基于 CPS(Cyber-physical systems, CPS)的制造或 Cyber Manufacturing, 德国工业 4.0^[2], 中国制造 2025 和“互联网+制造”等^[3]。虽然提出背景

不同, 但是均异曲同工地表达了同一主题, 即通过新一代信息技术融合制造的物理世界和信息世界, 最终实现智能制造^[4]。向智能制造转型升级, 已成为制造业发展的必然趋势。智能制造可以实现产品全生命周期(包括产品调研、设计、生产、服务、物流等)的智能化^[5-7], 故我国提出了中国制造 2025 以促使制造业向智能制造转型。

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 张琳 (1982—), 女, 2004 年毕业于武汉理工大学环境工程专业, 本科, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司主要从事科技管理工作。

电力装备是“中国制造 2025”的十大重点支持行业之一。发电设备制造业是保证我国能源安全、优化能源结构、改善生态环境的核心关键产业。在当今全球化和国际竞争的背景下，我国发电设备制造企业竞争优势的关键在于智能制造模式下抢得先机，通过运用先进的制造技术和制造模式，提高发电设备品质，减少环境污染，降低成本，满足大型清洁高效发电设备制造的需要。发电设备对研制能力、质量安全的高水平要求，决定了其发展智能制造推行数字化车间的必要性和迫切性。国际领先的发电设备制造企业充分利用智能制造技术开展产品研制，产品全面覆盖了整个制造和服务流程，实现了加工设备的高度集成运行及在制品的精益管控，其制造效率、精细化管理、质量管控均达到了极高水平，同类装备的研制周期比国内缩短一半左右^[8]。我国发电设备关键零部件制造中尚未实现数字化（自动化），如发电机线圈、铁芯冲片等的制造与装配过程，70%-80%以上都是人工劳动密集型作业，其制造效率低，制造品质难以保证。以智能制造为核心，建设发电设备关键零部件数字化智能制造车间，提升装备研制的数字化、智能化、绿色化水平，具有极为重要的意义。

定子冲片、定子线圈及转子线圈等关键零部件的制造能力和水平是提升整个发电机制造能力和水平的关键，本文以冲片、线圈为重点，设计大型清洁高效发电设备智能制造数字化车间系统，突破其制造工艺优化、物流自动有序、质量检验智能等技术关键，提高该类核心零部件制造的技术水平。

1 数字化车间系统整体架构

数字化车间架构分为4层，分别为设备层、控制层、执行层和决策层^[9]。通过以上四个层面的整体集成，并建立数据中心，提供管理统一的数据支撑，实现生产业务的实时驱动。

(1)设备层：针对关键零件的制造和检验过程，升级和改造设备，包括专用设备，工业机器人，自主研制测量设备，以及传感设备。

(2)控制层：监控设备状态，实现设备互联互通，对设备状态进行监控，采集工艺过程参数及生产过

程数据，为现场提供决策参考。

(3)执行层：由制造运营管理平台(MOM 平台)构成，实现计划、执行、物流、质量、设备的集中管控；通过可视化生产控制中心实现生产过程的远程监控、可视化呈现。

(4)决策层：由企业资源计划系统和产品生命周期管理系统组成，实现企业资源、产品数据的管理，可通过数据统计为管理决策提供支持。

下文将针对设备层和控制层进行详细描述。

2 数字化车间系统智能制造模块介绍

2.1 车间建模、仿真分析与重构

针对大型清洁高效发电设备的核心制造车间，以加工设备单元智能化、物流过程自动化、工艺流程精益化为目标，对车间进行了建模、仿真分析与重构。

2.1.1 形成绝缘真空浸渍系统(VPI)为主的绝缘体系

发电机定子线棒主绝缘设计场强统一为2.4 kV/mm~3.2 kV/mm。对定子线棒与定子冲片从材料选型、结构设计、制造工艺和电气检测等全过程梳理分析和标准化与单一化研究，消除了多种绝缘技术标准并存的现象，解决了定子线棒与铁芯冲片绝缘设计重复、部件和材料数量巨大、制造工序繁多、制造和转运链长、检验结果不能直接比对等一系列问题，大幅减少产品的设计制造成本和周期。指明了产品制造标准的发展方向，奠定了数字化车间的建设基础。

2.1.2 车间物流仿真分析

利用离散事件驱动的生产与物流仿真技术，基于已知的工艺、设备等基础数据和预先给定的生产物流规则^[10]，模拟车间/产线布局、生产工艺过程、物流过程、仓储缓冲过程等过程，一方面科学地辅助物理车间的规划建设及结构优化，确保车间综合性能满足预期要求，另一方面为未来的实际生产策略提供指导性的建议^[11]。

(1)定子冲片物流仿真分析：采用WBS分层网络方法对车间进行全要素研究，根据实际情况构建冲剪24米跨二维布局；梳理冲片制造工艺流程，采用工艺相似性原则和布局调整后进行物流仿真

分析，着重考察库存量大小和智能搬运设备(Automated Guided Vehicle, AGV)物流运输情况。

定子冲片车间布局调整的物流分析图如下图1所示。经物流仿真分析，得出在冲剪车间设立原材料存放区1个，半成品存放区1个，成品存放区1个，原料区存放入厂的卷料，参考容量40料盘;半成品存放区用于存储车间内加工的半成品，参考容量60料盘;成品区用于存放车间内的成品，在一定时间内以特定批量运至发电机分厂进行装配，参考容量40料盘。经计算得出AGV小车4个，一个用于卷料配送至各个机台机位，另外3个用于冲片在制品工序间转运和半成品、成品入库。



图1 定子冲片车间布局调整物流分析图

(2)定子线圈物流仿真分析:基于生产纲领的要求,在布局分析的过程中,主要是在保证车间物流通畅的前提下,以搬费用最小和设备利用率为评价的主要标准来建立车间布局评价的目标函数。现线圈生产车间为多品种小批量生产车间,设备为机群式布置。基于定子线圈产品实际类型与工艺流程,新设计了大型定子线圈、小型定子线圈大小两条柔性生产线布局方案。该方案结合成组布置形式的特点,即一系列相似工艺的线圈分别组成大小两个产品族,针对每个产品族的设备形成的一系列制造单元。该布局是将原始的工艺(功能)布置系统转化为伪产品布置系统(流水线)布置系统,其加工时间较短、物流效率较高、准备时间较短,同时又具有工艺布置的柔性的特点,是一种具有发展潜力的布置方式。

针对不同的工艺布局方案,绘制定子线圈物流流,红色箭头线表示大型定子线圈的物流流动情况,

蓝色箭头线表示小型定子线圈的物流流动,黑色箭头线表示所有线圈的物流流动。图2和图3分别为原始布局大小线圈物流和最新布局大小线圈物流。直观地观察两种布局的物流流,可以明显看出新方案的物流流动更加顺畅,折返更少。但新的布局方案对物流的具体影响则需要进一步通过仿真模型来验证和定量分析。

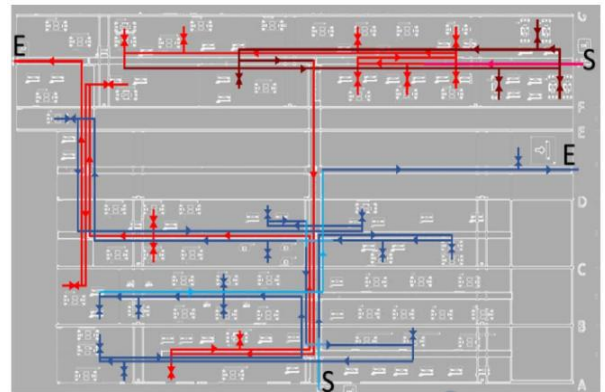


图2 原始布局线圈物流

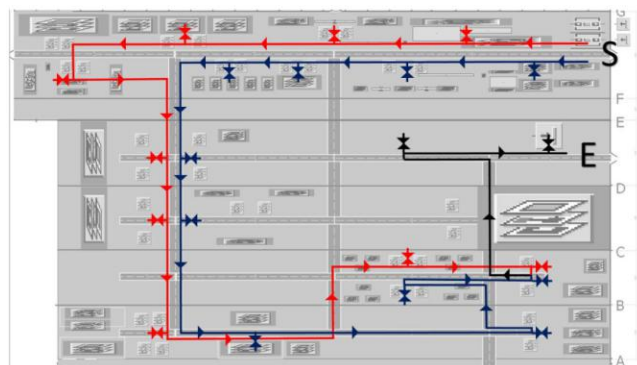


图3 最新布局物流

2.1.3 构建车间的三维数字化模型

在三维虚拟空间建立一个与物理车间1:1的虚拟车间模型,包括数字化车间整体环境、车间布局、物流设施、设备模型等,辅助设施布局优化调整,并动态模拟关键的工艺细节、生产物流过程,直观呈现车间的建设方案和预期效果。按照设备基础数据以及优化后工艺布局方案,建立三维虚拟制造车间模型^[12],通过PostEngineer引入三维虚拟车间模型。图4、图5分别为线圈车间和冲剪车间的三维模型图。

2.2 冲剪车间智能化设计

通过引入机器人(上下料、叠装等)、质量检测等数字化智能化设备,并对现有的关键设备进行数

字化智能化升级,从而构建满足大型发电机定子冲片高效高精制造的现代化冲剪车间。

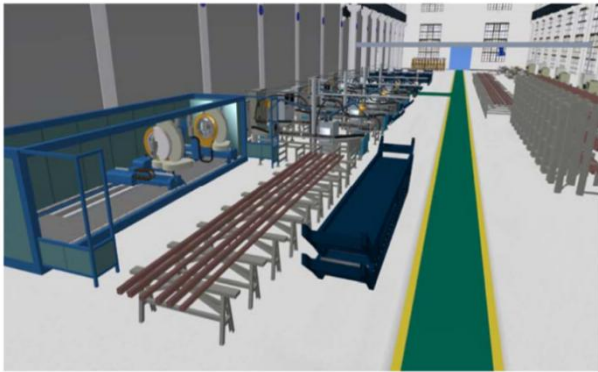


图4 定子线圈分厂三维布局图



图5 冲剪车间三维布局图

2.2.1 引入工业机器人

在劳动量大、有毒有害、噪音和粉尘等作业环境下,应用工业机器人实现工序替代,完成了机器人上下料、机器人叠片和机器人焊接等集成应用。

(1)机器人上下料和转向:在定子冲片清洗机与刷漆炉之间新增一套上下料抽检单元,完成半成品的上下料、抽检等工作。该单元由六关节工业机器人、可调抓手、视觉系统、厚度检测装置等组成。

(2)机器人叠片:充分利用现有设备资源,对原有机器人叠片系统进行升级,实现了调相机和燃机产品的自动叠片。可以快速实现9片燃机与12片调相机的产品灵活更换。通过二次定位平台消除送料的位置偏差;通过视觉检测系统消除不良品。

(3)焊接专用机器人:针对发电设备部套结构特征及机器人焊接难点,开发机器人窄间隙焊接技术,使焊接过程得到优化,大幅提高水电设备结构件的焊接效率。弧焊机器人已全面投入发电设备部套大型结构件的焊接,降低厚板50%~72%焊接量,提高效率3~4倍,探伤合格率达98%以上。

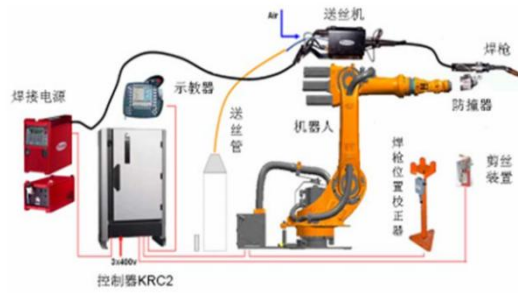


图6 弧焊机器人硬件配置

2.2.2 引入AGV以及自动化传输带

在传统定子冲片制造环节,落料、去毛刺、清洗、刷漆等工序,操作者进行大量手工上下料重复劳动作业,其劳动强度大、操作风险巨大、严重影响员工身体健康。该条生产线从原材料上料到成品下线入库实现了全自动化。通过凯撒400t冲床、清洗机、毛刺机、刷漆炉等生产设备的集成,避免物料的来回转运,减少不必要的吊运过程,提高生产效率。

(1)凯撒冲床智能化改造:采用西门子高性能PLC和人机界面,提高设备运行可靠性;支持生产线联网系统对相关数据的读取,方便第三方进行自动控制;对接自动产线和AGV自动物流。

(2)Hymmen刷漆炉智能化改造:移除Hymmen刷漆炉的上料机构,通过传送带将冲片送入涂漆头,进入链网烘干、冷却、自动码垛;增加换空托盘机构和工位缓存装置,避免下料时产线中断。

(3)上下料抽检多工位融合单元:采用六轴机器人、可调多功能抓手、高精视觉系统、厚度检测装置等组成。

(4)物流系统集成:全自动产线与物流系统有效集成,通过产线上料接驳点与重载AGV卷料上料小车进行无缝对接,具备了卷料自动感应与自动上料功能。

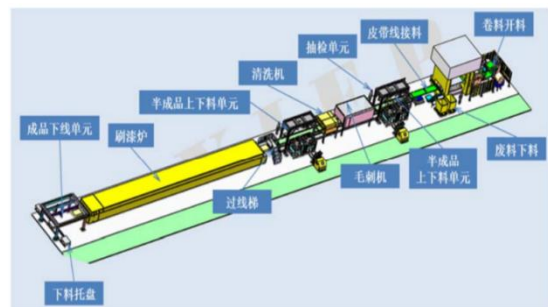


图7 定子冲片自动生产线工艺布局

2.2.3 引入多种智能检测系统

引入二维影像检测、毛刺超景深三维显微检测及红外线干涉非接触式漆膜厚度检测系统,实现定子冲片质量特性的数字化检测。

将三坐标测量机的移动龙门气浮导轨结构与复合式多传感器的影像测量技术结合,研制了二维影像测量系统,保证冲片检测的高精度和几何质量的判定;利用超景深三维显微检测技术,对冲片平面及断面的扫描并进行3D合成,实现冲片平面毛刺及断面毛刺的测量;利用红外干涉纳米测量技术,采用非接触方式,快速精确检测冲片绝缘漆膜厚度,漆膜厚度检测精度达到 0.1μ ,实现自动采集、自动判定,保证测量过程的稳定性和准确性。

2.3 线圈车间智能化设计

通过引入非接触、在线无损检测设备、直线胶化压机等数字化智能化设备,对端部成型机进行升级,对物流过程进行自动化升级,构建满足大型发电机线圈高效高精制造的现代化车间。

2.3.1 导线前序的制造设备升级模块

导线前序由上料机械手、下料机、压弯机、自动薄膜包带机、直线胶化压机及打磨除尘设备构成,并利用无动力辊道完成各工位间的物流运输。

为提高线圈制造自动化水平,采用半自动压弯设备,设备根据不同产品自动调整压弯装置间的距离。图8为数控压弯机模型。

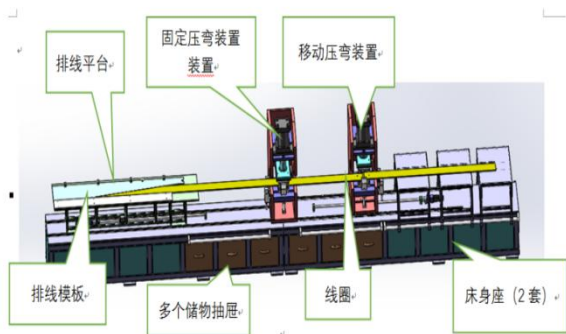


图8 数控压弯机模型

为实现线圈流水式操作,减少线圈转运过程中的搬抬、起吊,减少吊车的使用,减轻操作者劳动强度。通过辐筒传输线(大产品线、小产品线),起到不同工序间连接转运的作用。

为保证导线包扎的紧密度和平整度,避免后序常出现的导线松散、不平直、固化翻线,实现薄膜

包扎自动化。

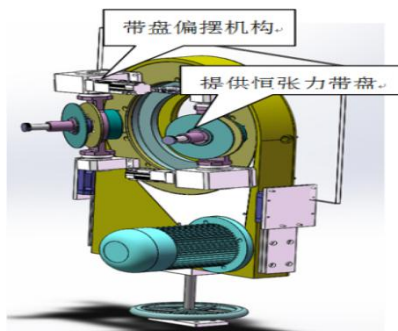


图9 薄膜包带机设计模型

新增直线胶化压机实现压型参数设定和一键式自动操作,提高生产效率,减少人为因素影响,大幅提高产品质量。



图10 直线胶化压机

2.3.2 导线后序的制造设备升级模块

实现线圈绝缘包扎的自动化。所有的条式线圈主绝缘包扎都在净化间内进行,净化间湿度 $\leq 65\%$ 、温度 $15\sim 28^{\circ}\text{C}$ 。对于关键瓶颈工序,新增一台龙门包带机,提高整体制造过程自动化、数控化。提升重要关键工序主绝缘包扎的质量水平,消除因设备及人工偏差造成的质量波动。对线棒绝缘电气性能稳定提升,减薄绝缘提升机组性能提供有力保障,降低工人劳动强度。

在绝缘体系统一后,进行了绝缘真空浸渍系统(VPI)的升级。作为线圈制造关键设备和瓶颈设备,新增一套VPI系统,实现定子线圈的全VPI制造技术,提高定子线圈质量。引入的GVPI技术可以推动电机绝缘减薄,减小电机体积,降低电机损耗,提高效率,达到降本增效目的,提高市场竞争力。

2.3.3 质量控制模块

搭建与生产紧密结合的质量控制模块,通过软

件系统规范质量控制流程，并集成便捷、易于操作的数字化检测系统^[13]，提高检测系统的自动化、智能化水平，形成数据共享的质量信息平台，保证产品过程受控的同时，更好地满足质量追溯、工艺改进、结构优化等环节对产品质量信息的使用^[14]。



图 11 绝缘包扎净化间



图 12 定子线圈 VPI 浸渍系统

(1)几何量三维扫描检测系统：引入三维定位系统、机器人系统、光幕感应安全技术，柔性工装技术，VRM 虚拟测量技术，构成一整套高精度、全自动测量方案。可以全自动测量 7 m 内各种类型的线棒，测量误差在 0.1 mm 以内。一次可以测量 4 只线棒，测量时长在 15 分钟以内，大大提高了测量效率。经过对软件的二次开发，成功实现了和 MOM 系统对接，可以直接在 MOM 系统中接收任务，并上传测量结果。

(2)几何量移动式无线检测系统：整个系统由质检专用 APP、便携式移动终端 PDA 和无线蓝牙数字化量具三部分组成。其中，APP 通过专用软件接口及无线 WIFI 与 MOM 系统对接；PDA 通过数据解析协议及无线蓝牙与无线蓝牙数字化量具对接；负责用户登录、任务获取、测量、数据提交、创建

任务等功能。集成并调用了 PDA 自身定义的激光扫码功能，在条件满足时，可识别条形码、二维码、DM 码等图形信息。

(3)升级改造的介质损耗试验系统：通过对现有常态介质损耗测试系统进行软件、硬件升级改造，由检测系统对试验过程的电压进行自动控制，实现了由原来人工点动升压的方式转变为通过检测系统从 MOM 系统中下载检验任务，由检测系统识别任务要求，并根据试验任务要求，自动控制试验电压，并自动采集试验数据，达到了试验设备自动化、数字化改造的目的。

2.3.4 设备互联互通与数据采集模块

该模块实现下料机、压型机、包带机及烘炉等近 80 台设备状态感知与监控。实施了数字化车间的设备互联互通，完成制造数据和设备状态数据的采集。实现了所有车间的物理信号如力、热、光、电等采集，并能在终端屏上实时显示相应的数据值，同时也可上传到车间服务器。主要的设备数据项主要包括如下几类：①设备状态信息：开机、停机、作业、空闲、调试、故障等；②统计信息：生产计数、生产用时、节拍；③工艺信息：平移、旋转等各种速度、温度、电流、电压。

随即对数据按设备编号、地址、特性进行归档管理，并统筹应用端。为 MOM，车间大屏，车间仿真等提供数据支撑。这样，可实时监控到设备的状态、异常情况，也可通过 LED 等技术手段对设备的状态进行可视化展现，对设备故障停机、关键工艺参数超差等重要事件可通过短信等形式及时送达相关人员，便于及时地采取相关措施。为分厂生产信息的可视化，奠定数据基础，带动生产过程透明化和质量提升^[15]。

3 结语

本文研究课题广泛应用三维数字设计技术，实施数字化运营管理，推行数字化质量检测，课题完工达效后，有关核心部件的加工技术水平与设备自动化程度大幅提升，制造周期缩短，综合成本下降，产以常规的 600 MW 汽轮发电机为例，其制造周期

从原来的 18 个月缩短至 14 个月，显著提高行业示范力。在定子冲片的制造方面，采用数字化车间建设后，生产效率提高 48.2%，运营成本降低 31.9%，产品研制周期缩短 30.7%，产品不良品率降低 20%；能源利用率提高 57.3%。在转子线圈的制造方面，优化改善了车间物流，实现了铣孔类转子线圈的一体化生产，节约了场地，提升了作业的洁净化和绿色化水平，其生产效率比原来提高 28%，综合运营成本降低 21.3%，产品不良品率降低 54.8%。在定子线圈的制造方面，在统一的 VPI 主导绝缘体系下，整个车间的物流自动化水平，设备数控化率都显著提高，原有的产品缺陷得到了有效改善，仅仅定子线圈破压率一项，就减少了 25%。根据测算，整个定子线圈数字化车间的生产效率提高 45%以上，产品不良品率降低 35%以上，能源利用率提高 55%以上，运营成本降低 33.5%。

参考文献

- [1] ANNUNZIATA M, EVANS P. Industrial Internet: pushing the boundaries of minds and machines[J]. General Electric, 2012(1-2): 1-23
- [2] KAGERMANH, HELBIG J, HELLINGERA, et al. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry ; final report of the

- Industrie 4.0 working group[M]. Berlin:Forschungsunion, 2013
- [3] 中国制造 2025[EB/OL]. [2015-05-08]. http://www.gov.cn/jzhengcelcontent/2015/05/19/content_9784.htm
 - [4] 陶飞, 张萌, 程江峰等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1):1-9
 - [5] 张洁, 高亮, 秦威, 吕佑龙, 李新宇. 大数据驱动的智能车间运行分析与决策方法体系[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5):1220-1228
 - [6] 张曙. 智能制造与 i5 智能机床[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(1):1-8
 - [7] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16):11-23
 - [8] 孙伟川. 法士特智能制造迎接工业 4.0[J]. 商用汽车新闻, 2015(25):1-3
 - [9] 冰与火之歌——卢秉恒院士谈智能制造[J]. 卫星与网络, 2016(9): 1-5
 - [10] 叶成刚. 装备制造企业数字化转型战略与实施[J]. 橡塑技术与装备, 2018(4): 10-15
 - [11] 吴鸣军. 试论工业 4.0 下的精益生产线构想[J]. 中国新技术新产品, 2018(15): 65-66
 - [12] 尹天文, 柴熠, 高孝天. 用户端电器数字化车间建设探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2017(24): 9-12
 - [13] 柏隽. 数字化工厂规划之七剑下天山[J]. 中国工业评论, 2017(9): 28-35
 - [14] 张兆坤, 邵珠峰, 王立平等. 数字化车间信息模型及其建模与标准化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017(2):128-133+140
 - [15] 王磊, 刘强. 轻装配智能制造系统框架及管控模式[J]. 计算机集成制造系统, 2016(9):2108-2117

(上接第 40 页)

并且经热处理后表面拉应力降至正常卷圆水平以下；

(5) 筒体局部塑性变形后，经过尺寸稳定化热处理，变形最大处表面拉应力与焊缝中心应力水平相当。

4 结语

本次研究为筒体局部塑性变形区域经过一系列工艺处理后材料性能仍然满足设计要求、未明显产生有害的残余应力提供了理论依据，同时该设备通过了冷试、热试验收已服役多年，运行一切正常。本次的研究方法及成果可用于行业内同类情况的

参考。

参考文献

- [1] 宋冠宇, 赵杰, 程从前等. 核电用奥氏体不锈钢表面铁素体污染的影响及对策[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(10):813-816
- [2] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. 机电工程, 2011, 28(1):11-15+41
- [3] 蒋刚, 谭明华, 王伟明等. sss 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压, 2007, 228(6):213-216+220
- [4] 黄韬, 张铁虎. sss 喷丸残余应力及工艺参数优化[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(21):5145-5150
- [5] 吴建强, 陈树峰. sss 机械加工表面的残余应力研究[J]. 煤矿机械, 2007, 234(8):101-103

基于专家模拟故障数据的智慧电厂发电机在线监测分析软件测试方法研究

王传刚 赵妍因

华电莱州发电有限公司, 山东 莱州 261400

摘要: 智能诊断软件是“智慧电厂”的重要组成部分。本文提出一种基于专家模拟故障数据的智能诊断软件测试方法, 并搭建了一套发电机在线监测分析软件测试平台。该智能诊断软件测试方法以专家知识为基础, 结合同型号发电机组真实运行数据、典型故障数据和发电机运维故障库, 构造专家模拟故障数据及故障清单。将专家模拟故障数据输入发电机在线监测分析软件进行诊断, 得到诊断结果。对比诊断结果与专家模拟故障清单, 综合评价智能诊断软件的故障识别率和诊断准确率。最后以发电机集电环故障诊断功能为例进行了测试验证, 测试结果达到了预期。

关键词: 智慧电厂; 专家模拟故障数据; 故障识别率; 诊断准确率

中图分类号: TM62

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0057-04

Research on Test Method of Online Monitoring and Analysis Software for Generators in Smart Power Plant Based on Expert Simulation Fault Data

WANG Chuangang, ZHAO Yanan

(Huadian Laizhou Power Company Co., Ltd., 261400, Laizhou, Shandong, China)

Abstract: Intelligent diagnostic software is an important part of "smart power plant". This paper proposes an intelligent diagnosis software test method based on expert simulation fault data, and builds a set of generator online monitoring and analysis software test platform. The intelligent diagnostic software testing method is based on expert knowledge, combined with the real operating data, typical fault data and generator operation and maintenance fault database of the same model generator set to construct expert simulation fault data and fault list. The expert simulation fault data is input into the generator online monitoring and analysis software for diagnosis, and the diagnosis result is obtained. By comparing the diagnosis results with the expert simulation fault list, the fault recognition rate and diagnosis accuracy rate of the intelligent diagnosis software are comprehensively evaluated. Finally, a test verification was conducted with the fault diagnosis function of the generator slip ring as an example, and the test results reached expectations.

Key words: smart power plant; expert simulation fault data; fault recognition rate; diagnosis accuracy rate

火电厂建设逐渐从自动化、数字化、信息化向智慧化转变, 建设“智慧电厂”将是未来火电行业发展的必然趋势^[1]。智能诊断作为建设智慧电厂的关键任务, 在提高火电机组运行的安全性、经济性和生产过程的可控性中都有重要作用^[2]。目前缺乏智慧电厂智能诊断软件的诊断功能有效测试方法。如果在发电厂实际运行环境对智能诊断软件进行

测试, 许多诊断功能并不能有效的测试到位。并且在实际运行环境测试会影响发电厂正常生产运行, 测试成本较高。

为此, 本文综合考虑智能诊断软件测试成本和测试效果, 提出一种基于专家模拟故障数据的智慧电厂发电机在线监测分析软件测试方法, 并以发电机集电环故障功能为例进行了测试验证。

收稿日期: 2021-11-01

作者简介: 王传刚(1980—), 男, 2000年毕业于山东省电力学校发电厂及电力系统专业, 本科, 工程师。现任华电莱州发电有限公司生产技术部电气专工。

1 测试环境

测试环境如表 1 所示。

表1 发电机在线监测分析测试环境

编号	名称	内容
1	测试地点	东方研究院电力电子实验室
2	服务器型号	深信服超融合一体机 aServer-R-2105 深信服计算服务器虚拟化软件 V6.0、
3	服务器软件平台	深信服网络虚拟化软件 V6.0、深信服 虚拟存储软件 V3.0
4	测试数据	同型号 1000MW 机组真实运行数据
5	数据软件平台	Cloudera's Distribution Including Apache Hadoop(CDH)
6	微服务应用平台	Kubernetes(k8s)
7	算法模型软件	发电机在线监测分析软件
8	前端展示软件	智慧电厂前端软件
9	操作台电脑	联想启天 M420

2 测试平台搭建

如图 1 所示，在东方研究院电力电子实验室搭建发电机在线监测分析测试平台。该平台硬件由三台深信服超融合一体机 aServer-R-2105 组成的深信服超融合服务器。服务器软件平台包括深信服计算服务器虚拟化软件 V6.0、深信服网络虚拟化软件 V6.0、深信服虚拟存储软件 V3.0。在深信服超融合服务器软件平台上搭建智慧主机软件平台。

智慧主机软件平台主要由 CDH 大数据平台和 k8s 微服务器平台组成。CDH 大数据平台为各监测与诊断服务提供数据可持久化存储、数据缓存、数据交互、数据消费队列等服务^[3]。汽轮机状态监测与诊断、锅炉状态监测与诊断、发电机在线监测分析等功能模块以微服务的形式部署在 k8s 微服务平台，相互协同完成主机状态监测、评估及风险监控各项功能。

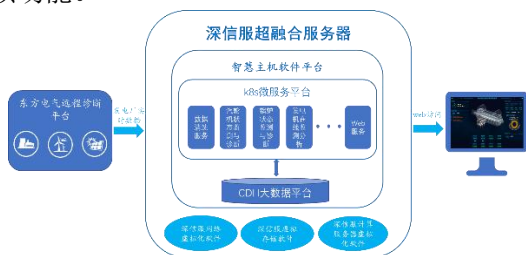


图1 发电机在线监测分析测试平台

为了更好地测试功能，将现有东方电气远程诊断平台同型号 1 000 MW 机组实时运行数据接入测试平台用于诊断功能测试和连续运行测试。可通过现地操作台电脑浏览器访问 web 前端页面，实时观测各诊断功能结果。

3 主机状态监测软件测试测试方案

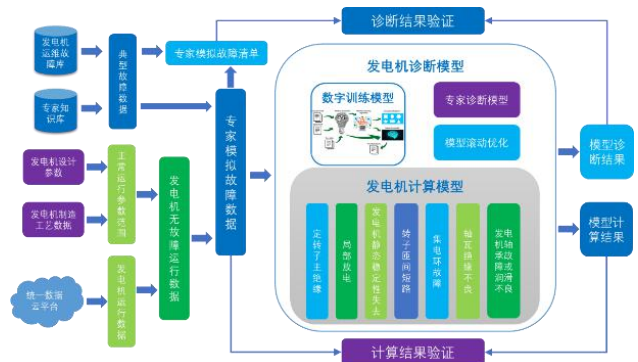


图2 发电机在线监测分析诊断功能测试方案

为了更好地评估发电机在线监测分析诊断性能，构建如图 2 所示测试方案。测试思路如下：首先通过发电机典型故障数据融入发电机无故障运行数据得到专家模拟故障数据和专家模拟故障清单；其次将专家模拟故障数据输入诊断模型得到模型计算结果和模型诊断结果；最后将模型计算结果与专家模拟故障数据进行对比分析得到计算结果验证，将模型诊断结果与专家模拟故障清单对比分析得到诊断结果验证。

测试过程中专家模拟故障清单由数据模拟专家掌握，测试人员事先不知道该清单内容。测试数据输入诊断模型得到模型计算结果和模型诊断结果后才揭盲专家模拟故障清单，进行诊断结果验证。

3.1 专家模拟故障数据及故障清单构造

单台发电机正常运行时很少发生故障，相应的故障数据非常有限，利用单台发电机正常运行数据很难对发电机诊断模型进行有效的测试。而 1 000 MW 同型号几十台发电机数十年运行过程中所发生的故障种类和故障条数非常丰富，相应故障数据也比较充足。因此，需要发电机专家提取典型故障数据，然后融入发电机无故障运行数据得到专家模拟故障数据和专家模拟故障清单。

主机厂商——东方电气拥有六十多年的发电

机设计、制造、售后维护历史，拥有丰富的发电机设计专家知识库和发电机运维故障库。依托东方电气 1 000 MW 同型号发电机几十台十数年的运行发电机运维故障库和专家知识库，提取发电机定转子主绝缘、局部放电、发电机静态稳定性失去、转子匝间短路、集电环故障、轴瓦绝缘不良、发电机轴承故障或润滑不良等 7 大类相应典型故障数据。

为了得到高质量的专家模拟故障数据，需要从发电机运行数据中筛选出发电机无故障运行数据，避免原始数据中隐含故障影响后续测试结果。结合发电机设计参数和发电机制造工艺数据得到发电机正常运行参数范围。将发电机运行数据与发电机正常运行参数范围进行逐一比对得到发电机无故障运行数据。

将发电机典型故障数据依据工况匹配原则随机多次（随机：保证同种工况能有多种故障，多次：用以验证故障识别率）融入发电机无故障运行数据中。在融入时，记录相应故障名称和融入数据时间形成专家模拟故障清单。

3.2 计算模型测试方法

首先将专家模拟故障数据输入发电机相应的计算模型（电机定转子主绝缘、局部放电、发电机静态稳定性失去、转子匝间短路、集电环故障、轴瓦绝缘不良、发电机轴承故障或润滑不良等）得到模型计算结果。然后将模型计算结果与输入的专家模拟故障数据和专家模拟故障清单进行比对，输入正常运行数据得到正常误差范围，输入模拟故障数据得到在正常误差范围之外的数据量为模拟故障异常数据量，则可认为计算模型通过测试。通过统计模型计算结果准确率来确定计算模型是否通过测试。若模型计算结果准确率大于等于 95%，则认为通过测试。

3.3 诊断模型测试方法

首先将专家模拟故障数据输入发电机相应的诊断模型（电机定转子主绝缘、局部放电、发电机静态稳定性失去、转子匝间短路、集电环故障、轴瓦绝缘不良、发电机轴承故障或润滑不良等）得到模型诊断结果。然后将模型诊断结果清单与专家模拟故障清单进行比对。分别对每一种故障进行统计

比对。在一个时间段内，专家模拟某故障次数为 n_1 ，诊断模型诊断出故障次数为 n_2 ，诊断模型诊断准确故障（相同时刻诊断出相同故障）次数为 n_3 ($n_3 \leq n_2$ 且 $n_3 \leq n_1$)。因此可以根据模拟故障次数、诊断出故障次数和诊断准确故障次数计算出故障识别率和诊断准确率。

若 $n_2 \leq n_1$ ，则

$$\text{故障识别率} = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{诊断准确率} = \frac{n_3}{n_1} \times 100\% \quad (2)$$

若 $n_2 > n_1$ ，则

$$\text{故障识别率} = \frac{n_1}{n_2} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{诊断准确率} = \frac{n_3}{n_2} \times 100\% \quad (4)$$

若故障识别率大于等于 95%、诊断准确率大于等于 90%，则认为通过测试。

本文以发电机集电环故障功能为例对测试方法进行试验。

4 集电环故障功能测试

选取同型号 100 万 kW 汽轮发电机的正常运行数据 30 万条用于计算模型和诊断模型的正常运行工况测试；在前述正常运行数据基础上，修改数据模拟异常故障，用于计算模型和诊断模型的故障识别测试。

集电环故障模拟：选择一段时间正常运行数据，某段时间进风温度增加到超过报警值（阈值暂定 50℃），用于集电环进口风温异常诊断模型报警测试；同样的正常运行数据，部分集电环进出口风温温差增加到超过阈值（高，30℃），部分集电环进出口风温温差减小到小于阈值（低，5℃），用于极限阈值诊断模型报警测试。集电环出口风温异常（阈值暂定 80℃）、集电环进口风温变化超限（阈值暂定 5℃）、集电环出口风温变化超限（阈值暂定 5℃）等诊断模型故障模拟同集电环进口风温异常诊断模型。



图3 集电环风温异常页面展示

将集电环故障模拟数据输入发电机在线监测分析软件。如图3所示，在web前端页面观测记录集电环故障种类和每类故障次数，得到如表3所示诊断结果对照表。从表中数据可得集电环故障功能测试通过。

表3 诊断结果对照表

编号	模拟故障名称	测试数据条数	模拟故障次数	故障识别次数	诊断准确次数	故障识别率	诊断准确率
1	集电环出口风温异常	30万	1000	962	931	96.2%	93.1%
2	集电环进口风温变化超限	30万	1000	953	927	95.3%	92.7%
3	集电环出口风温变化超限	30万	1000	957	924	95.7%	92.4%

(上接第43页)

按照 GB/T 4334 标准“E”法进行晶间腐蚀试验，共进行了3组试验，分别为焊态基准试样，焊态+敏化态试样、热处理态+敏化态试样，敏化处理热处理制度为 650℃×2 h，空冷。经过试验，三组试样的拉伸面上均无晶间腐蚀裂纹及开裂倾向。

3 结语

通过对 ER316H 未稀释熔敷金属进行 690℃±15℃热处理保温温度下，不同热处理保温时间处理的性能研究，得到试验结果如下：

(1) 对于 ER316H 未稀释熔敷金属，经历该热处理后抗拉强度显著下降。但随着热处理时间的增加，抗拉强度下降不明显；

(2) 对于 ER316H 未稀释熔敷金属，经历该热处理后室温冲击功显著下降，且随着热处理保温

5 结语

本文提出一种基于专家模拟故障数据的智能诊断软件测试方法，并搭建了一套发电机在线监测分析软件测试平台。并以发电机集电环故障功能为例对测试方法进行试验。后续发电机在线监测分析软件部署到莱州电厂长期运行。通过实际电厂长期实时运行诊断测试进一步验证诊断功能的故障识别率和诊断准确率。

参考文献

[1] 华志刚, 郭荣, 崔希等. 火电智慧电厂技术路线探讨与研究[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 8-14

[2] 陈东超. 基于贝叶斯网络的汽轮发电机组故障诊断方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018:3-4

[3] 陈木斌. 基于 Storm 与 Kafka 集群的火电厂分布式流式数据建模与分析系统[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(5): 33-34+36

[4] 欧阳丹彤, 刘扬, 刘杰. 故障响应指导下基于测试集的故障诊断方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(3): 1017-1025

时间增加，冲击功呈下降趋势；对于经过加速时效处理的试样，冲击功明显下降，但随着热处理保温时间的增加，冲击功无明显差异；

(3) 该热处理制度对 ER316H 未稀释熔敷金属的弯曲性能和耐晶间腐蚀性能没有产生不利影响。

参考文献:

[1] 孙佳佳. 奥氏体不锈钢热处理工艺及其应注意的若干问题[J]. 科技资讯, 2011(35):91

[2] 李少峰, 马成勇, 宋志刚等. 800MPa 级高强钢焊接接头组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(5):91-96+102

[3] IB RAHIM O H, IB RAHIM I S, KHALIFA T A F. Effect of Aging on the Toughness of Austenitic and Duplex Stainless Steel Weldments [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2010, 26(9): 810-816

深度调峰工况下典型中速磨制粉系统改造分析

魏丽君 宁晓睿 张宇鹏

东方电气(成都)工程设计咨询有限公司, 成都 611731

摘要: 随着碳达峰、碳中和目标的提出,我国国内电源结构亟需调整,以消纳更多的绿电,传统火电机组面临着节能减排、适应深度调峰低负荷运行的压力。本文以北方某热电厂机组灵活性运行改造为依托,对中速磨直吹式制粉系统与锅炉低负荷运行的相互适应性进行理论计算,并与调试运行参数进行对比,提出存在的问题,以期对同类制粉系统满足锅炉低负荷运行需求的改造工作提供参考。

关键词: 深度调峰; 灵活性; 直吹式制粉系统; 中速磨

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)02-0061-04

Analysis of Typical Medium Speed Milling System Retrofit for Peak Load Regulation

WEI Lijun, NING Xiaorui, ZHANG Yupeng

(Dongfang Electric(Chengdu) Engineering & Consulting Co.,Ltd., 611731,Chengdu, China)

Abstract: With the goal of carbon peak and carbon neutralization, the domestic power supply structure of China needs to be adjusted to consume more green power. Traditional thermal power units are facing the pressure of retrofit to meet the demand of deep peak regulation. In this paper, based on the flexible operation retrofit of one thermal power plant, we carried out the theoretical calculation of low load operation condition of medium speed mill, and compared with the commissioning operation result, in order to provide reference for the evaluation and retrofit of similar pulverizing system to meet the low load operation demand of boiler.

Keywords: peak load regulation; flexibility; direct firing pulverizing system; medium speed milling

为贯彻碳达峰、碳中和的战略决策,2021年10月国务院在《2030年前碳达峰行动方案》通知中提出加快现役煤电机组节能升级和灵活性改造,积极推进供热改造,推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重的转型。作为我国的主要电力来源^[1],煤电在节能减排、灵活性运行方面的改造迫在眉睫。

火电机组的灵活性主要包含燃料的可变性和负荷调整的灵活性两个方面。对于在役煤电机组而言,实现灵活性的经济可靠途径是通过局部改造,提高深度调峰能力。

发改运行(2021)1519号“全国煤电机组改造

升级的通知”中要求:现役机组灵活性改造应改尽改,纯凝工况调峰能力的一般要求为最小发电出力达到35%额定负荷,采暖热电机组在供热期运行时,要通过热电解耦力争实现单日6h最小发电出力达到40%额定负荷的调峰能力。通知中还提出,“十四五”期间需完成2亿千瓦改造的目标,煤电机组低负荷运行改造需求潜力巨大。

煤电机组设备及系统在技术上实现灵活运行,是负荷调整灵活性的基本要求。在深挖现有设备潜力、调整现有系统运行方式外,还需要评估主要设备及其系统在低负荷工况下运行的安全性和可靠性,针对不满足低负荷安全稳定运行的设备及系统

收稿日期: 2022-04-01

作者简介: 魏丽君(1983-),女,2008年毕业于华中科技大学热能工程专业,工学硕士,高级工程师。现在东方电气(成都)工程设计咨询有限公司工作,主要从事火电机组系统设计工作。

进行局部改造。

目前现役煤电机组的灵活性改造，汽机侧可采用低压缸零出力等改造技术提升供热出力、减小发电量，实现机组的灵活、可靠运行；锅炉侧的灵活性运行，多采用降负荷运行，此时除了需要考虑水动力侧的安全、可靠性外，还需要对燃烧侧进行评估，不仅要满足灵活性指标，还应保证机组运行时的排放不超标。

作为“三北”地区第一批火电灵活性改造试点之一的北方某热电厂，已于2016年底完成1号机组灵活性及控制改造升级专项工作，期间对锅炉侧进行了低负荷稳燃试验、磨煤机动态分离器和风环改造，实现了机组负荷最低至25%THA工况、多磨煤机工作方式下的连续稳定运行^[2]。本文将依据该电厂改造前后的部分数据，对国内较普遍的中速磨直吹式制粉系统进行低负荷运行工况核算，以供其他改造项目参考。

1 电厂制粉系统现状

我国大多数火电机组建成投运后存在着煤源不稳定、实际燃煤质偏离设计煤的情况，水分高、热值低，且有着不同程度的煤质掺烧、混烧，因此制粉系统需留有一定的可调范围。

以该热电厂2×330 MW机组为例，锅炉采用东方锅炉设计制造的DG 1025/18.2-II 6型亚临界自然循环汽包炉，单炉膛π型布置。根据2016年7月煤质的取样结果，拟合出两种实际燃煤质，并与原设计煤质-乌海地区烟煤做对比，具体煤质分析见表1。

表1 煤质分析及燃料消耗量

名称	符号	单位	原设计煤种	实际煤种(1)	实际煤种(2)
收到基水分	M _{ar}	%	5.5	17	17
收到基灰分	A _{ar}	%	28.19	25	28
收到基碳	C _{ar}	%	52.67	47.01	43.5
收到基氢	H _{ar}	%	3.22	3.21	3.21
收到基氧	O _{ar}	%	8.43	5.53	6.04
收到基氮	N _{ar}	%	0.75	0.75	0.75
收到基硫	S _{ar}	%	1.34	1.5	1.5
干燥无灰基挥发分	V _{daf}	%	31.38	34	35
低位发热值	Q _{net,ar}	kJ/kg	20 223	18 280	17 080
哈氏可磨指数	HGI	/	76.0	55	55

该电厂采用的是中速磨正压直吹式冷一次风机制粉系统（流程示意图见图1）。此类型制粉系统一般配备两台公用的冷一次离心风机；在一次风机出口侧，布置两台密封风机，提供多台磨煤机所需的密封用风，一运一备。

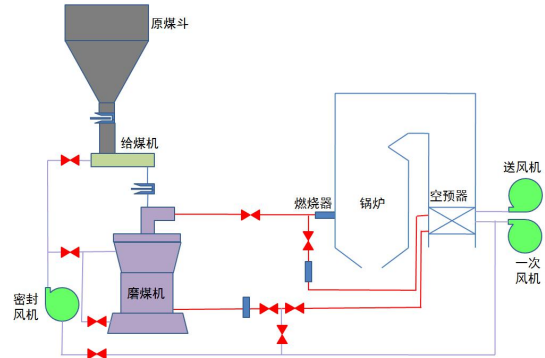


图1 正压冷一次风直吹式制粉系统

适用于直吹式制粉系统的中速磨煤机，目前国内投运较广的有碗式(HP型)、辊轮式(MPS、ZGM、MPS-HP-II)和球式(E型)。该电厂采用的是MPS170-HP-II型中速磨煤机，该型磨煤机在MPS型磨煤机基础上加以改进，可以有效提高磨盘转速和加载力，并增加反作用力液压加载系统，使得出力调节范围较大、磨机运行单耗低，且煤质水分适应性较好^[3]。

其控制系统能快速响应锅炉负荷变化，因此该型磨对电网调峰需求适应性较好。

该电厂1号锅炉安装五台中速磨煤机，每台磨煤机出口由4根煤粉管道接至同一层四角布置的燃烧器磨。磨煤机原设计参数详见表2。

表2 磨煤机设计参数

项目	单位	数值
型式	-	轮式中速磨
型号	-	MPS170HP-II
分离器	-	静态分离器 SLK310 (带手动调节挡板)
台数	台	5
基本出力	t/h	43.58
最大通风量	t/h	60.58
通风阻力	Pa	6160
磨碗转速	rpm	34.45
磨煤机出口气体温度	℃	≤90
磨辊加载方式	-	液压变加载
排渣量	t/h	0.072
制造厂	-	长春发电设备总厂
配套电机型号	-	YMPS450-6
额定功率	kW	355
额定电流	A	49.4

在磨制设计煤质时，煤粉细度 R_{90} 取为 22%，4 台磨煤机运行就可以满足锅炉 BMCR 工况所需燃料消耗量。

2 制粉系统的改造因素

原煤中的水分、灰分、挥发分，及其可磨性等特性，直接影响着磨煤机的运行参数选取，制粉系统的出力取决于磨煤机碾磨出力、通风出力和干燥出力三者中的最小者。

不同类型的磨煤机，通风出力和设计出力下的负荷率相关^[4]。对于轮式磨煤机，在不同负荷下通风率一般不小于 75%，因此深调低负荷运行时，磨煤机的出力实际取决于碾磨出力或干燥出力。

磨煤机碾磨出力主要受煤粉细度、煤粉均匀性的影响，干燥出力还受热一次风参数及磨煤机出口温度的制约。因此锅炉侧灵活性改造分析中，建议基于实际燃用煤质，关注以下几个因素：

(1) 煤粉细度

对于中速磨直吹式制粉系统，系统设计计算时需要确定经济细度 R_{90} ，其取值主要综合三个因素来考虑：煤的燃烧特性；锅炉的燃烧方式、炉膛大小及热强度；煤粉的均匀性。

现行制粉系统设计计算技术规定^[4]中针对煤质及炉型给出了 R_{90} 的经验计算公式及推荐范围，张安国、梁辉在书中^[5]还提供了部分电厂综合节能减排因素后的 R_{90} 值，靖长财^[6]也在文中论述了不同煤粉细度对应的磨煤机单耗、煤粉均匀性指数的变化趋势，可供制粉系统的初步计算参考。对于锅炉低负荷运行工况而言，本文建议制粉系统出力初算时 R_{90} 在 12~18%之间取值，调试时可根据实际煤质、磨煤机的磨损程度进行调整。

(2) 均匀性

煤粉的均匀性可以通过改造分离器结构形式，如将静态分离器改造为动静态分离器，确保磨煤机出力的情况下，对碾磨细度做线性调整，同时提高煤粉均匀性系数，有利于低负荷下炉膛的稳燃。

煤粉的均匀性程度，还可通过优化分离器出口煤粉分配器的结构来实现。对于四角布置的燃烧系

统，西安热工院曾在望亭制粉系统改造过程中提出一种“双可调煤粉分配器”技术，并在此基础上提出了“紧凑型煤粉分配器”^[7]，后者能将煤粉分配偏差降低至 10%以内，且具有阻力小、可调节的优点，弥补了最初双可调煤粉分配器对空间要求高的缺点，相比更适于大容量机组的制粉系统改造。

3 制粉系统计算结果汇总

(1) 碾磨出力核算

根据制粉系统设计计算技术规定中的方法，以及上述制粉系统相关设备及参数的改造因素，制粉系统出力计算各修正系数取值及碾磨出力计算结果汇总见表 3。

表 3 修正系数和碾磨出力的计算值

参数	设计煤种	实际煤种 (1)	
f_H	0.97	0.78	
f_R	1.059	1.072	0.944 ($R_{90}=13\%$)
f_M	0.99	0.91	
f_A	0.97	0.95	
f_E	1.0	1.0	
f_C	0.95	0.95	
f_{Si}	1.07	1.07	
B_M (t/h)	50.6	38	34.5 ($R_{90}=13\%$)

通过对碾磨出力的核算看出，该热电厂原设计煤种下磨煤机的备用系数较高，在实际煤种水分及可磨性指数 HGI 均升高的情况，其碾磨出力 B_M 仅有 38t/h ($R_{90}=21\%$)，4 台磨同时运行刚能满足 BMCR 工况下入炉煤耗量需求；若调整煤粉细度至 $R_{90}=13\%$ 时，碾磨出力相应下调为 34.5t/h，需要 5 台磨才能保证燃料量，经济性较差。

因此煤粉锅炉及其制粉系统运行中，需要注意不同负荷工况下对 R_{90} 的调整，避免不恰当的煤粉细度导致磨煤机出力不足的情况。

(2) 干燥出力核算

根据 DL/T 5145 中的计算方法，结合锅炉在不同负荷下燃用实际煤质 (1) 时的热算数据，对该制粉系统分别在 100%THA、25%THA 工况下的干燥出力进行核算，主要计算结果见汇总表 4。

表4 不同负荷下单台磨煤机热平衡计算

序号	名称	符号	单位	100%THA	25%THA
1	原煤蒸发水量	ΔM	kg/kg	0.12	0.12
2	蒸发原煤水分消耗热	q_{cv}	kJ/kg	316.5	316.5
3	干燥剂终温	t_2	℃	65	65
4	原煤温度	t_c	℃	0	0
5	终端干燥剂带出热量	q_{ag2}	kJ/kg	108.0	160.0
6	干燥剂量	g_1	kg/kg	1.61	2.39
7	终端干燥剂比热容	c_{a2}	kJ/(kg·℃)	1.014	1.014
8	加热燃料消耗热量	q_f	kJ/kg	72.3	72.3
9	干燥煤的比热容	c_{dc}	kJ/(kg·℃)	1.101	1.101
10	磨单位吨煤电耗	e	kJ/kg	25	25
11	磨煤机工作时产生的热	q_{mac}	kJ/kg	15	15
12	密封风物理热	q_s	kJ/kg	0.65	0.71
13	干燥剂初温	t_1	℃	297.5	228
14	干燥剂比热容	c_{ag1}	kJ/(kg·℃)	1.030	1.024
15	终端干燥剂含湿量	d_2	g/kg	86	61
16	露点温度	t_{dp}	℃	50	44
17	风煤比	-	-	1.638	2.50
18	磨煤机干燥出力	$B_{M,d}$	t/h	30.5	21.1

通过计算不同负荷下的磨煤机干燥出力，可以看到：随着低负荷下锅炉运行热一次风量、风温的下降，磨煤机入口干燥剂初温及自身所需通风量均有所下降，其低负荷下的干燥出力仅相当于100%THA工况下干燥出力的70%左右。对于该厂，25%THA负荷下磨煤机至少需要投运2台，相应的锅炉燃烧器也需投运两层。

该厂技改调试过程中采集到的运行数据显示：在25%THA负荷稳燃工况下，锅炉最下面两层燃烧器对应的磨机实际出力分别为25.23 t/h和21.39 t/h，投运二、三层时，对应两台磨煤机的出力则相差不多，分析差异原因，除了炉膛热负荷调整需要外，还可能存在着不同磨的磨损情况及加载力调整不同的原因。

除了干燥风外，中速磨运行中还需保证一定量的密封风风量，但这部分风量对干燥出力影响很小，因此当锅炉需降负荷切除部分磨煤机运行时，密封风机的风量可不做调整。

4 结语

(1) 煤电机组灵活性改造中，需要确定一个经济煤粉细度 R_{90} ，在此基础上经评估仍不能满足低负荷磨煤机出力需求时，可采用新型分离器和分

配器，降低煤粉细度的同时，提高煤粉均匀性。

(2) 中速磨直吹式制粉系统中，燃烧所需一次风量的大小直接影响着磨煤机干燥出力，及炉内的燃烧稳定性。该热电厂由于实际燃用煤种比原设计煤水分较大且热值低，满足锅炉稳燃所需的一次风量时，制粉系统的干燥出力则稍有不足，可适当降低磨煤机出口终端干燥剂温度运行。

(3) 从风煤比的计算结果看，磨煤机低负荷下的风煤比较大，长期低负荷下运行容易造成磨煤机相关部件的磨损量增加，运维中应多注意监测磨损情况，适时更换磨损件。对于送粉管道，可采用煤粉管道优化节能技术^[8]。

(4) 中速磨能根据锅炉负荷的要求实现“变加载”，碾磨力随锅炉的负荷要求进行自动调整，使磨煤机在最经济的条件下运行。但弹簧加载方式需定期停机调整压缩量和碾磨件之间的间隙，否则会引起磨煤机出力下降。

(5) 煤粉炉在40%~25%THA低负荷运行工况下，锅炉侧仍能实现稳定运行，但此时锅炉尾部SCR入口前烟温偏低，无法满足脱硝系统的正常运行，因此灵活性改造方案中还需要考虑烟侧的改进措施。

(6) 制粉系统灵活性技术改造中，需要根据局部改造及试验结果，对热控控制与保护逻辑进行相应调整。

参考文献：

- [1] 中国电力企业联合会. 2021-2022年度全国电力供需形势分析预测报告[DB/OL]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-306171>, 2022-01-27
- [2] 牟春华, 居文平, 黄嘉骐等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7
- [3] 孙科, 靳士奇, 秦大川. MPS-HP-II型中速磨煤机在高水分燃煤机组上应用的试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(9): 725-730
- [4] DL/T 5145-2012. 火力发电厂制粉系统设计计算技术规定[S]
- [5] 张安国, 梁辉. 电站锅炉煤粉与制备[M]. 北京: 中国电力出版社 2010.8
- [6] 靖长财. 锅炉制粉系统运行经济性分析及建议[J]. 电站辅机, 2014, 35(2): 31-33
- [7] 刘定坡, 杨培军, 冯扩磊, 刘洋, 员盼峰. 直吹式制粉系统风粉偏差对机组灵活性的影响[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 139-143
- [8] 李广伟. 燃煤机组制粉系统灵活性改造技术综述[J]. 锅炉制造, 2019(1): 1-4+10

汽轮机齿轮转子系统弯扭耦合模态频率研究

彭林¹ 董卫红¹ 张健¹ 周传月²

1.东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 2.北京东方极峰科技有限公司, 北京 100022

摘要: 本文建立了高压汽轮机转子、低压汽轮机转子、挠性联轴器、高速齿轮转子、扭力杆和套筒轴装配而成的低速齿轮柔性转子、发电机转子组成的复杂轴系的弯扭耦合动力学模型, 计算结果表明: 空负荷起机时因齿轮轴承对齿轮转子弯曲振动的约束弱因而弯扭耦合效应显著, 主要表现为扭转振动的前两阶频率与纯扭转计算结果相比分别下降了6.5%和4.5%, 因此建立弯扭耦合计算模型是必要的; 满负荷运行时因齿轮轴承对齿轮转子弯曲振动的约束强因而弯扭耦合效应不明显, 主要表现为扭转振动的前两阶频率与纯扭转计算结果相比分别下降了0.8%和0.9%, 可采用纯扭转模型代替弯扭耦合模型; 满负荷运行与空负荷起机相比扭振主导频率下伴随的弯曲振动减弱, 轴承对弯扭耦合系统引入的阻尼比变小。

关键词: 弯扭耦合; 齿轮轴系; 柔性转子; 动力学建模

中图分类号: TH113

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2002) 02-0065-04

Research on the Bending-torsional Coupling Mode Frequency of Steam Turbine Gear Rotor System

PENG Lin¹, DONG WeiHong¹, ZHANG Jian¹, ZHOU Chuanyue²

(1.Dongfang Turbine Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2.Beijing EMAX Technology Co.,Ltd., 100022, Beijing, China)

Abstract: This paper established the bending-torsional coupling dynamic model of a complex shaft system composed of a high-pressure steam turbine rotor, a low-pressure steam turbine rotor, a flexible coupling, a high-speed gear rotor, a torsion bar and a quill shaft assembly of a low-speed gear flexible rotor, and a generator rotor. The calculation results show that the bending-torsional coupling effect is significant due to the weak restraint of the gear bearing on the bending vibration of the gear rotor when starting with no load, compared with the calculation results of pure torsion, the first two frequencies of torsional vibration have decreased by 6.5% and 4.5% respectively, so it is necessary to establish a bending-torsional coupling calculation model; during full-load operation, the bending-torsional coupling effect is not obvious due to the strong constraint of the gear bearing on the bending vibration of the gear rotor, compared with the calculation results of pure torsion, the first two frequencies of torsional vibration have decreased by 0.8% and 0.9% respectively, thus the pure torsional model can be used to replace the bending-torsional coupling model; full load operation compared with no load starting, the bending vibration at the dominant frequency of torsional vibration is weakened, and the damping ratio introduced by the bearing to the bending-torsional coupling system becomes smaller.

Key words: bending-torsional coupling; gear rotor system; flexible rotor; dynamic modeling

大功率电力装备发电机通常采用汽轮机直接驱动, 因此弯曲振动和扭转振动可解耦计算。为提高小流量汽轮发电机组的效率, 近年我公司在60 MW等级以内汽轮机开始采用高转速并通过齿轮箱减速驱动发电机。许多研究表明^[1-4]齿轮-转子-轴承系统在固有特性、不平衡响应和非线性响应等方面与纯弯曲或纯扭转振动模型存在着很大的差别, 耦合轴

系会因齿轮啮合作用而耦合出新的模态频率、产生新的临界转速和振动峰值。

汽轮机-齿轮箱-发电机轴系动力学设计中汽轮机转子和齿轮箱高速转子组成高速端轴系, 两者通常采用膜片式联轴器挠性连接; 齿轮箱低速转子和发电机转子组成低速端轴系, 两者采用刚性靠背轮连接。由于相互啮合的齿轮同时产生横向力和力矩,

收稿日期: 2022-04-02

基金项目: 项目名称: 东方汽轮机有限公司企业课题, 高速重载五瓦可倾瓦轴承试验研究; 项目编号: 科 2020-150600。

作者简介: 彭林 (1987-), 男, 工程师, 硕士研究生。主要从事转子动力学、轴承方面的研究。

其重要特征是原本相互独立的汽轮机-齿轮箱高速轴系和齿轮箱-发电机低速轴系转子轴承系统通过齿轮啮合而相互作用，因此弯曲振动和扭转振动通过齿轮相互耦合，需建立轴系的弯扭耦合模型进行设计计算，相关资料可参考 API684 标准。

齿轮传动的另一个重要特征在于齿轮轴承所受载荷大小和方向随传递扭矩的变化而改变，从而在大范围内改变了齿轮轴承的刚度阻尼，一方面空负荷启动轴承轻载时轴系振动特性需特别关注，另一方面需关注满负荷运行轴承重载时自身特性如流量、瓦温等重要参数^[5-6]。由于齿轮的耦合作用改变了整个系统的动力特性，并有可能激发出新的弯扭耦合振动使整个系统的动力特性变得更加复杂，对其进行深入研究对保障机组的稳定运行具有重要意义。

1 动力学模型

本文研究的汽轮机-齿轮箱-发电机轴系由汽轮机转子、平行轴减速器齿轮轴系和发电机转子组成，机组功率为 45 MW，轴系示意图如图 1 所示。汽轮机高压转子和低压转子通过靠背轮刚性连接，汽轮机低压转子通过膜片式挠性联轴器与齿轮箱高速转子连接，高速轴系工作转速为 5 025 rpm；齿轮箱低速柔性转子通过扭力杆驱动端的靠背轮与发电机转子靠背轮刚性连接，低速轴系工作转速为 3 000 rpm。

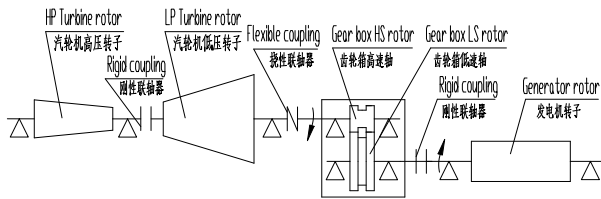


图 1 汽轮机-齿轮箱-发电机轴系示意图

基于齿轮强度及减速箱传动效率考虑，为吸收发电机发生两相短路、非同期误并列等故障的电磁激励，30 MW 等级以上齿轮箱低速转子通常采用柔性结构。扭力杆套筒齿轮装配转子是一种特殊的柔性转子结构，带中心孔的大齿轮轴称之为套筒轴，其内部的细长轴称之为扭力杆，通常两者之间直径方向有 10 mm 以上的间隙，如图 2 所示。

扭力杆非驱动端和套筒轴过盈装配并通过花键或者锥销传递扭矩，驱动端的定位块用于调整套筒

轴和扭力杆的对中，当驱动端的靠背轮和被驱动设备连接成为轴系后拆除定位块。这种特殊结构的柔性转子动力学计算难以采用传统的传递矩阵方法，可采用有限元方法对其进行装配建模。本文基于 Timoshenko 梁理论建立包括高压汽轮机转子、低压汽轮机转子、挠性联轴器、高速齿轮转子、低速齿轮柔性转子、发电机转子连接而成的复杂轴系的弯扭耦合动力学有限元模型。

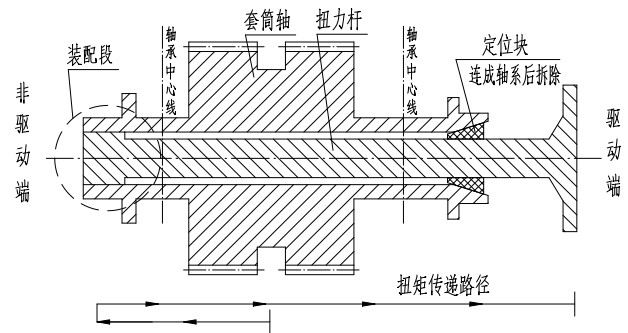
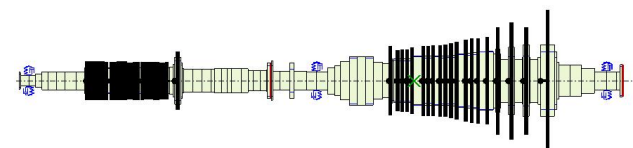


图 2 套筒轴扭力杆柔性转子示意图

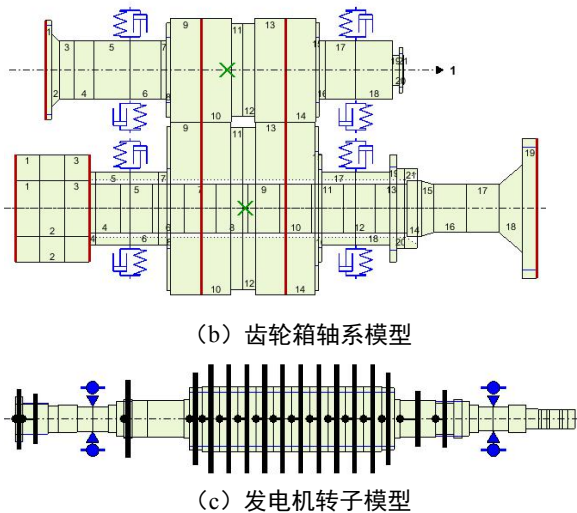
汽轮机轴系由汽轮机高压转子和低压转子组成，计算模型如图 3（a）所示，高压转子为全反动式结构，低压转子为冲反结合结构，轴系为三支承形式，全部轴承采用可倾瓦结构。

齿轮箱轴系计算模型和节点编号如图 3（b）所示。齿轮箱小齿轮转子和大齿轮转子在节点 10 和节点 14 通过齿轮传动连接，传动比为 1.675；扭力杆和套筒轴在节点 1 和节点 4 过盈装配成一体组成低速齿轮柔性转子；小齿轮转子和大齿轮转子均由两个错位椭圆轴承支承。

发电机转子计算模型如图 3（c）所示，发电机为无刷励磁因此没有励磁机转子。由于发电机转子采用端盖轴承支承因而轴承座支承柔性不能忽略，因此建模时发电机转子支承由两个椭圆轴承和轴承座串联而成。



(a) 汽轮机轴系模型



(b) 齿轮箱轴系模型

(c) 发电机转子模型

图3 动力学模型

轴系弯扭耦合动力学模型如图4所示。

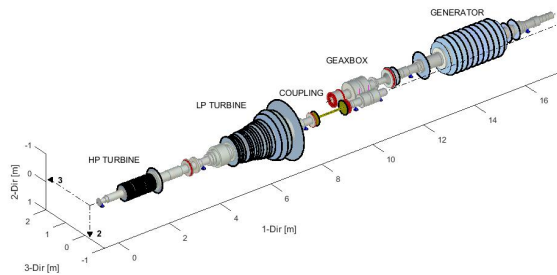
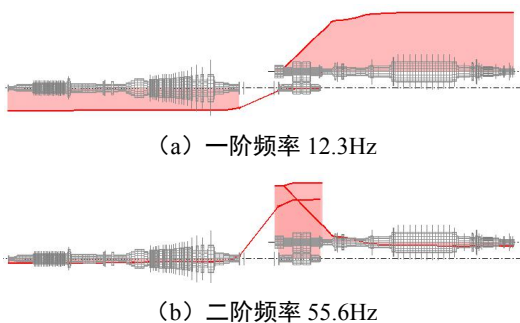


图4 轴系弯扭耦合动力学模型

2 纯扭转振动模态频率

纯扭转模态计算中约束了汽轮机-齿轮箱-发电机轴系的弯曲振动自由度，仅保留沿轴向扭转的自由度。齿轮啮合过程中齿轮啮合进出时的啮合齿数不同导致啮合刚度会随时间变化，另一方面齿轮啮合刚度随齿轮传递的扭矩而变化，为简化计算本文采用齿轮平均啮合刚度替代齿轮时变啮合刚度，平均啮合刚度计算可参考 API684 标准。

纯扭转计算的轴系前四阶扭振频率和模态振型如图5所示。



(a) 一阶频率 12.3Hz

(b) 二阶频率 55.6Hz



(c) 三阶频率 114.3Hz

图5 纯扭转轴系固有频率和模态振型

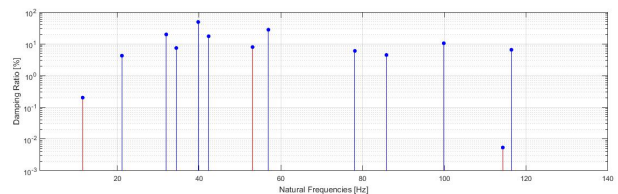
API684 转子动力学设计规范要求所有扭转固有频率与系统运行转速范围内的可能激励频率隔离裕度 10%以上，汽轮机-齿轮箱-发电机组轴系中可能的激励频率主要有质量不平衡激励、电网一倍频激励、电网二倍频激励、齿轮啮合频率激励，纯扭转计算的轴系固有频率满足避开率的设计要求。

3 弯扭耦合振动模态频率

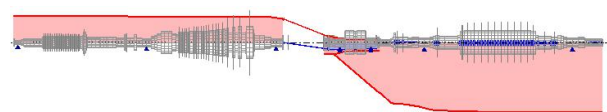
齿轮传动的特殊性在于相互啮合的齿轮同时产生横向力和力矩，其重要特征是原本相互独立的汽轮机-齿轮箱高速轴系和齿轮箱-发电机低速轴系转子轴承系统通过齿轮啮合而相互作用，由于扭转和弯曲振动通过齿轮发生耦合，因此齿轮箱转子的弯曲和扭转自由度均设置为自由；由于汽轮机轴系的弯曲振动由挠性联轴器隔离，为减少计算规模约束了汽轮机轴系弯曲振动的自由度，汽轮机轴系的扭转振动通过挠性联轴器和齿轮箱转子耦合；发电机转子与齿轮箱转子通过刚性连接耦合，其弯曲自由度和扭转自由度均设置为自由。由于齿轮轴承刚度随机组负荷的变化而改变，因此不同工况下的弯扭耦合模态频率需分别计算，其中最典型的工况为空负荷起机工况和机组满负荷运行工况。

3.1 空负荷起机时轴系弯扭耦合模态频率

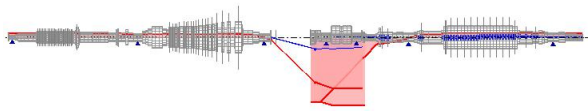
空负荷起机时弯扭耦合计算的轴系频率和阻尼比如图6(a)所示，轴系中主要表现为扭转振动的前两阶振型如图6(b)和6(c)所示。



(a) 频率-阻尼比



(b) 弯扭耦合频率 11.5Hz



(c) 弯扭耦合频率 53.1Hz

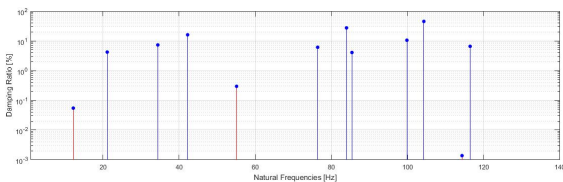
图6 空负荷起机时轴系弯扭耦合模态频率

从图6(a)可知在工作转速范围内存在多阶固有频率,其中主要表现为弯曲振动振型的固有频率如图6(a)中蓝线所示,对应齿轮箱转子的刚体振动振型、发电机转子和扭力杆的弯曲振动振型;主要表现为扭转振动振型的固有频率如图6(a)中红线所示。图6(b)和6(c)红线表示扭转振动振型、蓝线表示弯曲振动振型,由于扭转振动伴随着弯曲振动,因此轴承给弯曲扭转耦合系统引入了阻尼,各阶模态的阻尼比见图6(a)。

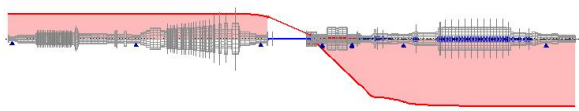
空负荷起机时因齿轮轴承载荷轻因而刚度小,轴承对齿轮转子弯曲振动的约束弱因而弯扭耦合效应显著,轴系中主要表现为扭转振动的前两阶频率下降明显,与纯扭转计算结果相比分别下降了6.5%和4.5%,因此空负荷起机时建立弯扭耦合计算模型是必要的。

3.2 机组满负荷时轴系弯扭耦合模态频率

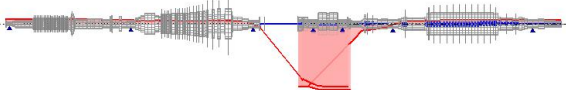
机组满负荷时弯扭耦合计算的轴系频率和阻尼比如图7(a)所示,轴系中主要表现为扭转振动的前两阶振型如图7(b)和7(c)所示。



(a) 频率-阻尼比



(b) 弯扭耦合频率 12.2Hz



(c) 弯扭耦合频率 55.1Hz

图7 满负荷运行时轴系弯扭耦合模态频率

图7(a)与图6(a)相比,工作转速范围内固有频率的阶数减少,这是因为机组满负荷运行时因齿轮轴承载荷和刚度大对齿轮转子弯曲振动的约束

强进而抑制了齿轮转子的刚体振动模态。另一方面,图7(b)、7(c)与图6(b)、6(c)相比扭振主导频率下伴随的弯曲振动减弱,轴承对弯扭耦合系统引入的阻尼比变小。

机组满负荷运行时因齿轮轴承载荷和刚度大对齿轮转子弯曲振动的约束强,轴系中主要表现为扭转振动的前两阶频率下降不明显,与纯扭转计算结果相比分别下降了0.8%和0.9%,弯扭耦合效应不显著,可采用纯扭转模型代替弯扭耦合模型。

4 结语

本文建立了高压汽轮机转子、低压汽轮机转子、挠性联轴器、高速齿轮转子、扭力杆和套筒轴装配而成的低速齿轮柔性转子、发电机转子组成的复杂轴系的弯扭耦合动力学模型,计算结果表明:

(1)空负荷起机时因齿轮轴承对齿轮转子弯曲振动的约束弱因而弯扭耦合效应显著,扭振主导模态下的频率明显降低,建立弯扭耦合计算模型是必要的。

(2)机组满负荷运行时因齿轮轴承对齿轮转子弯曲振动的约束强,弯扭耦合效应不显著,可采用纯扭转模型代替弯扭耦合模型。

(3)满负荷运行与空负荷起机相比扭振主导频率下伴随的弯曲振动减弱,轴承对弯扭耦合系统引入的阻尼比变小。

参考文献:

- [1] Lee An Sung, Ha Jin Woong, Choi D. H.. Coupled lateral and torsional vibration characteristics of a speed increasing geared rotor-bearing system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003,263(4):725-742
- [2] 朱丽莎, 张义民, 马辉等. 多齿轮耦合复杂转子系统的振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2013,32(14):34-39
- [3] Chen Siyu, Tang Jinyuan, Luo Caiwang, et al. Nonlinear dynamic characteristics of geared rotor bearing systems with dynamic backlash and friction[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011,46(4):466-478
- [4] 车永强, 徐静霞, 钱小东等. 齿轮传动转子系统弯扭耦合振动研究[J]. 机电工程, 2012,29(6):632-635+649
- [5] Ouyang Wu, Peng Lin, Chen Runlin, et al. Simulated identification on dynamic characteristics of large heavy-load bearing[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(5):3230-3242
- [6] 郭勇, 袁永强. 轴颈偏斜对椭圆轴承性能影响的试验研究[J]. 东方汽轮机, 2018(1):37-41

轴封送汽温度对机组启停的影响

伍文华 刘兴波 王文中 郑建 刘晓燕 刘兴

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：轴封系统作为汽轮机的重要辅助系统之一，主要作用是在汽轮机启动、运行、停机工况下，为轴封密封提供汽源，以及引导并回收轴封及阀杆漏汽，防止高温高压蒸汽外漏或空气漏入汽轮机，影响机组真空。本文主要介绍轴封送汽温度对机组启动和停机的影响。

关键词：轴封送汽；启动；停机

中图分类号：TK26

文献标识码：A

文章编号：0001-9006（2022）02-0069-02

Influence of Shaft Sealing Steam Temperature on Unit Startup and Shutdown

WU Wenhua, LIU Xingbo, WANG Wenzhong, ZHENG Jian, LIU Xiaoyan, LIU Xing

(Dongfang Steam Turbine Corporation, 618000 De yang, Si chuan, China)

Abstract: As one of the important auxiliary systems of the steam turbine, the shaft seal system is mainly used to provide steam source for the shaft seal and recover the steam leakage of the shaft seal and valve under the conditions of steam turbine startup, running and shutdown, so as to prevent the leakage of high temperature and high pressure steam or air into the steam turbine, and affect the vacuum of the unit. This paper mainly introduces the influence of shaft sealing steam temperature on unit startup and shutdown.

Key Words: shaft seal steam delivery; start up; shut down

随着能源成本和环境保护要求的不断提高，经济性成为电厂选择汽轮机的重要指标之一，再加上工业抽汽和采暖抽汽的不断提高，高、中压分缸机组备受电厂的青睐。较合缸机组而言，高中压分缸机组在轴封结构上，增加了高温段的高压前轴封和中压前轴封，因此在机组热态、极热态启动以及停机过程中，对轴封送汽温度的要求远高于合缸机组，轴封送汽温度与缸温的匹配度直接影响机组顺利启动和安全停机^[1]。

停机各种工况下，为端部轴封密封提供合适的汽源；引导并回收汽轮机轴端汽封及阀杆的泄漏蒸汽，以防止高温蒸汽泄漏，或大气中的空气漏入汽轮机，影响机组真空^[2]。

汽轮机轴封系统通常采用自密封形式，即在机组正常运行时，由高、中压缸轴端汽封的漏汽经喷水减温后作为低压轴端汽封供汽的汽轮机汽封系统，多余漏汽溢流至凝汽器或某级低压加热器。在机组启动、停机过程中，通过辅助蒸汽向各段轴封送汽，防止冷空气经轴封窜入汽缸，引起机组振动。

分缸机组轴封抽、送汽段示意图1，其中实线表示正常运行阶段抽汽状态，虚线表示启动、停机阶段送汽状态。

1 轴封系统

轴封系统的主要作用是在汽轮机启动、运行、

收稿日期：2021-10-11

作者简介：伍文华（1987—），男，工程师，2013年毕业于电子科技大学，主要研究方向为汽轮机结构设计。

刘兴波（1983—），男，高级工程师，2006年毕业于大连理工大学，主要研究方向为汽轮机结构设计。

王文中（1967—），男，高级工程师，1988年毕业于西安交通大学，主要研究方向为汽轮机设计。

郑建（1990—），男，工程师，2012年毕业于大连理工大学，主要研究方向为汽轮机设计。

刘晓燕（1984—），女，高级工程师，2006年毕业于西安交通大学，主要研究方向为汽轮机设计。

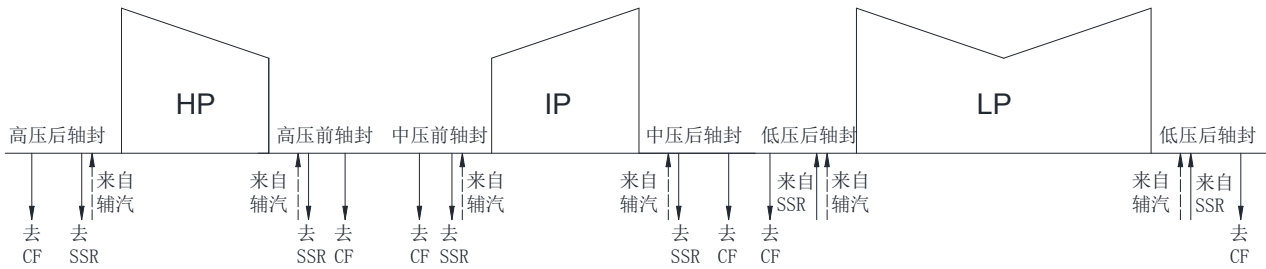


图1 分缸机组轴封抽送汽段示意图

2 送汽温度对机组启停的影响

轴封送汽温度对机组启动和停机的影响主要表现在当送汽温度与金属温度不匹配时，由于汽封体是薄壁圆筒，而转子是实心圆柱，汽封体将先于转子被加热或冷却，导致轴封径向间隙发生变化。径向间隙变化值 δ 与轴封送汽温度的关系如下：

$$\delta = d_1 \times (T_1 - 20) \times \varepsilon_1 - d_2 \times (T_2 - 20) \times \varepsilon_2 \quad (1)$$

其中， d_1 ——轴封送汽处汽封轴径 (mm)；

d_2 ——轴封送汽处转子轴径 (mm)；

T_1 ——轴封送汽温度 (°C)；

ε_1 ——汽封体在 T_1 温度下对应的线膨胀系数 (10^{-6})；

T_2 ——转子温度 (°C)；

ε_2 ——转子在 T_2 温度下对应的线膨胀系数 (10^{-6})；

由于转子和汽封体材质的线膨胀系数 (ε_1 和 ε_2) 差异较小，转子轴颈 (d_1 和 d_2) 是定值，因此径向间隙变化值 δ 主要受轴封送汽温度和转子温度的影响。

若不考虑线膨胀系数的影响，当 $T_1 > T_2$ (正温差) 时， δ 为正值，轴封径向间隙变大；当 $T_1 < T_2$ (负温差) 时， δ 为负值，轴封径向间隙变小。因此负温差越大，径向间隙越小，当达到一临界值时，会引起动静碰磨，造成机组振动，严重的将导致大轴抱死，因此要严格控制送汽温度，满足设备安全运行的要求。

3 解决措施

由于低压轴封温度较低，无论是正常运行阶段来自 SSR 送汽还是启动、停机阶段来自辅助汽源的送汽，经喷水减温均能满足低压轴封的要求，而高压后和中压后轴封正常运行时温度均小于 350 °C，

电厂的辅助蒸汽温度通常在 300 °C~350 °C，能满足在启动、停机阶段对送汽温度的要求。但是高压前轴封和中压前轴封正常运行温度远高于辅助蒸汽温度，仅依靠辅助蒸汽不能满足机组在热态、极热态启动以及正常停机时，对轴封送汽温度的要求。

图 2 为某项目在停机过程中，因轴封送汽温度与金属温度不匹配，导致在盘车过程中，振动增大，盘车因电流过载跳闸，强投盘车失败，最终导致大轴抱死。



图2 轴封温度不匹配导致机组抱轴过程

为解决因轴封送汽温度与金属温度不匹配导致机组在热态、极热态启动及停机过程中振动过大的问题，可以采取设置主汽站或增加电加热器两种形式。由于主汽站温度过高，在冷态和温态启动过程中，轴封送汽温度远高于金属温度，会对机组造成热冲击，影响机组寿命。

电加热器方案是在高压前轴封和中压前轴封送汽管路上设置轴封电加热装置。为方便布置和操作，通常将高、中压前轴封送汽管路合成一根小母管，将电加热器布置在母管上，该装置含控制箱和

(下转第 74 页)

试论东莞某燃气-蒸汽联合循环项目对东莞市的必要性

杨振

东方电气股份有限公司，成都 611731

摘要：为贯彻落实党的十九大报告提出的“持续实施大气污染防治行动，打赢蓝天保卫战”的要求，提升全市空气质量，推动美丽东莞建设，促进粤港澳大湾区绿色发展，东莞市结合本市实际，制定了东莞市蓝天保卫战行动方案。本文主要就东莞某燃气-蒸汽联合循环项目建设对东莞市的必要性进行分析。

关键词：蓝天保卫战；电力缺口；能源综合利用；电源支撑能力

中图分类号：TM611.31

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）02-0071-04

On the Necessity of A Gas-steam Combined Cycle Project in Dongguan

YANG Zhen

(Dongfang Electric Co.,Ltd.,611731,Chengdu,China)

Abstract:In order to implement the requirements of "continuously implementing air pollution prevention and control actions and winning the blue sky defense war" put forward in the report of the 19th National Congress of the Communist Party of China, improve the air quality of the whole city, promote the construction of beautiful Dongguan and promote the green development of Dawan District of Guangdong, Hong Kong and Macao, Dongguan has formulated the action plan for the blue sky defense war of Dongguan in combination with the actual situation of the city. This paper mainly analyzes the necessity of the construction of a gas steam combined cycle project in Dongguan.

Key words: blue sky defense; power gap; comprehensive utilization of energy; power supply support capability

随着世界经济的发展，化石能源消费不断增长，环境问题日益突出，国内社会关注度也在不断提高。目前，由于技术和经济原因，可再生能源尚未达到大规模利用程度，常规化石能源仍担负着供需主要份额，而在化石能源中，天然气的利用不但利用率高，而且对环境的影响极小，因此需求迅速增加，这种趋势预测将持续到2035年，甚至到2050年，作为相对清洁能源，天然气的发展和消费，当前受到了全球的青睐^[1]。东莞市为落实“蓝天保卫战”工作部署，减轻该市电力缺口产生的压力，改善社会环境压力，通过建设某2×460 MW级(F级改进型)燃气热电联产项目，并配套建设供热管网，加快淘汰燃煤锅炉，促进资源高效利用。

1 概述

1.1 东莞市电力系统概况

东莞市位于广东省中南部，东江下游，珠江三角洲东北部，东与惠州市接壤，北与广州市、惠州市隔江为邻，西与广州市隔海相望，南与深圳市相连，毗邻港澳，处于广州至深圳经济走廊中西间，地理位置得天独厚。东莞电网划分为西北、西南、东北、东南四个分区：西北区包括莞城、万江、东城、中堂、望牛墩、洪梅、麻涌、道滘、高埗、石龙、石碣等11个镇区；西南区包括虎门、沙田、长安、厚街、大岭山、南城等6个镇区；东北区包括茶山、桥头、企石、东坑、横沥、常平、石排、谢岗等8个镇区；西南区包括大朗、寮步、松山湖、

收稿日期：2021-10-25

作者简介：杨振(1982-)，男，2005年毕业于昆明理工大学热能与动力工程专业，本科，工程师。现在东方电气股份有限公司产业发展部主要从事天然气发电及火力发电产业推广。

樟木头、黄江、清溪、塘厦、凤岗等8个镇区。

截至2018年底，东莞市电源总装机容量为7 790.22 MW，其中火电装机7 425 MW，其他装机(生物质能、光伏)365.22 MW。

2018年东莞市全社会用电量806.64亿kWh，同比增长6.04%，全社会用电最高负荷15 516.8 MW，同比增长3.03%。供电量787.8亿kWh，同比增长4.51%，供电最高负荷15 545 MW，同比增长3.91%。用电量按产业分，第一、二、三产业和居民生活用电量分别为1.43亿kWh、567.66亿kWh、138.93亿kWh、98.62亿kWh，占比0.177 2%、70.3734%、17.223 3%、12.226 0%，同比增长3.36%、6.01%、7.20%、4.69%。

1.2 东莞电力需求预测

根据东莞电网相关规划的最新研究成果^[2-3]，2020年东莞市全社会用电最高负荷为18 650 MW，“十三五”期间年均增长率为6.9%；2025年东莞市全社会用电最高负荷预计为20 500 MW，“十四五”期间年均增长率为2.4%；2030年东莞市全社会用电最高负荷预计为22 000 MW，“十五五”期间年均增长率为1.4%。东莞市电力需求预测结果见表1。

表1 东莞市电力需求预测结果

年份	单位: MW			
	2015年	2020年	2025年	2030年
		(实绩)	(预测)	
全社会用电最高负荷	12 990	18 650	20 500	22 000
年均增长率(%)		7.5	2.4	1.4

注: 2020年、2025年、2030年年均增长率分别指“十三五”、“十四五”、“十五五”期间的年均增长率，下同。

参考将东莞市分为西北、西南、东北、东南四大分区的相关规划研究成果，该新建燃气热电联产项目位于西北区与西南区交界附近，因此选取西北区和西南区作为电厂近区开展研究。

预计东莞西南区2020年、2025年、2030年全社会用电最高负荷分别为5 174 MW、5 740 MW、6 160 MW；预计东莞西北区2020年、2025年、2030年全社会用电最高负荷分别为3 272 MW、3 616 MW、3 903 MW。相关电力需求预测结果见表2所示。

表2 东莞西南区、西北区电力需求预测表 单位: MW

项目	2015年	2020年	2025年	2030年
西南区				
用电最高负荷	/	5 174	5 740	6 160
年均增长率(%)		/	2.1	1.4
西北区				
用电最高负荷	/	3 272	3 616	3 903
年均增长率(%)		/	2.01	1.53

1.3 东莞市电源规划

(1) 电源退役计划: ①根据《广东省发展改革委关于印发沙角电厂退役及替代电源建设工作方案的函》，2025年底前逐步完成沙角10台机组退役工作，合计3 970 MW；沙角A1厂#1机组(210 MW)及沙角B厂#2机组(350 MW)已在2018年11月关停，合计关停容量560 MW；沙角A1厂#2、#3机组(2×210 MW)及沙角B厂#1机组(350 MW)在2019年年底前关停，合计关停容量770 MW；沙角A2厂(2×330 MW)在2023年年底前关停，合计关停容量660 MW；沙角C厂(3×660 MW)在2025年年底前关停，合计关停容量1 980 MW。②东莞中电新能源: 东莞中电新能源二期2台460 MW级热电联产机组建成，一期2台180 MW级燃气机组搬迁到虎门立沙岛；③“十四五”期间中堂燃气热电联产机组投产后，原有的东糖三联厂退役。

(2) 新增电源规划: ①谢岗燃气热电联产: 该项目位于谢岗镇，一期建设2套472.52 MW燃气一蒸汽联合循环机组，已于2020年建成投产；②樟洋电厂扩建: 该项目位于樟木头镇，在樟洋电厂原址扩建2套400 MW级燃气一蒸汽联合循环机组，已于2021年建成投产；③中堂燃气热电联产: 该项目位于中堂镇，建设2套460 MW级燃气-蒸汽联合循环机组，已于2021年建成投产；④沙角电厂退役替代电源: 该项目选址虎门镇宁洲水厂，规划机组容量为3×700 MW级(H级)燃气蒸汽-联合循环供热机组，预计分别于2022年6月、2022年12月和2023年6月投产；⑤中堂燃气热电联产二期: 该项目位于中堂镇，建设2套9F级燃气蒸汽-蒸汽联合循环机组，预计在2022年投产。

1.4 东莞电力缺口预计

对东莞进行的电力平衡分析后，东莞地区负荷

基数较大，区内装机相对匮乏，电网长期存在较大电力缺口，计及备用容量和东莞沙角电厂退役后替代电源，不考虑本工程，2022年、2025年、2030年电力缺口分别为15 749 MW、16 399 MW和18 124 MW；考虑本工程后，2022年、2025年、2030年电力缺口分别降低到15 422 MW、16 072 MW和17 797 MW。

2 项目情况介绍

2.1 项目简介

该联合项目位于东莞市西南某镇，该镇目前没有集中供热的热源设置，企业或单位基本以自建燃煤或重油的小容量锅炉来解决自身热负荷需求，经济性不好，且环境污染问题突出，项目建设目的主要是满足某造纸公司的用热需求，项目建成投产后除了可以满足当前用户的用热需求外，还可以提供大约60t/h的低压蒸汽满足周边企业的用热需求，下一步还能根据该镇周边企业用热需求再扩建。

2.2 项目配置

该项目建设2套460 MW级改进型燃气-蒸汽联合循环热电联产机组，机型采用东方电气引进三菱的M701F4型燃机“一拖一”多轴机组建设，每套联合循环机组由1台燃机、1台燃机发电机、1台余热锅炉、1台汽轮机和1台汽轮发电机组成，每套联合循环机组的出力如表1.3所示。在夏季满负荷纯凝工况下，每套联合循环机组出力约333.7 MW，扣除约2%厂用电后，送入系统电力约327 MW。

表 3 每套联合循环机组的出力 单位：MW

序号	工况	性能保证 工况	冬季工况	夏季工况
1	满负荷工况(纯凝) 燃机出力	320.42	328.908	285.694
2	满负荷工况(纯凝) 汽机出力	46.06	50.0	48.061

注：纯凝工况指抽取高压主蒸汽对外供热后，剩余高压主蒸汽和全部低压主蒸汽进入汽轮机的纯凝工况。

该项目用户侧蒸汽需求为9.8 MPa.a，545℃，300 t/h，根据配套的双压余热锅炉和汽轮机，单台机组高压主蒸汽最大量约为400 t/h蒸汽，低压主蒸汽最大量约为60 t/h。而该项目主要热用户的自备电

厂计划安装两台6F.03燃气轮机和1台350 t/h、1台260 t/h的高压燃气锅炉，每台燃气轮机配一台不补燃的余热锅炉。目前先安装一台6F.03燃机和一台配套余热锅炉，以及改造的1台350 t/h高压燃气锅炉，共产生高压蒸汽约460 t/h，因此本项目的机组可与该造纸公司自备电厂互为备用，灵活调度。

按照《热电联产项目可行性研究技术规定》的要求，还应考虑当其中最大一台机组检修或故障停运时的供热调度：

(1) 合理的安排机组检修时间，将机组检修时间安排在用热企业的自备电厂正常运行的时段，或用热企业生产淡季，这样可为机组运行满足供热要求创造更好的条件。

(2) 目前F级燃气—蒸汽联合循环机组已有大量成功的运行业绩，技术成熟，可靠性很高，因此机组事故工况的发生概率是较低的。

(3) 考虑设备检修以及机组事故状态，当汽轮机故障时，在汽机全切时余热锅炉高压主蒸汽最大供热能力可达到400 t/h左右，完全满足最大供热量和额定供热量，当超过热用户所需的供热量时，燃气轮机降负荷运行。当燃气轮机或余热锅炉故障时，通过调度热用户自备供热电厂高压燃气锅炉连续生产所需的平均用汽量，以确保供热的安全和可靠性。

3 项目建设的必要性^[4-5]

(1) 满足周边地区热用户的热源需求，提高能源利用效率。

2016年3月，由国家发展改革委、国家能源局、财政部、住房城乡建设部、环境保护部联合对外发布《热电联产管理办法》，以推进大气污染防治，提高能源利用效率，促进热电产业健康发展。

从一次能源的利用效率看，该热电联产项目全厂热效率达80.39%。在提高能源效率，减少污染排放，节约能源方面效果显著，社会效益明显。符合国家和广东省的产业政策，符合东莞市的能源结构调整和总量控制的政策，有利于提高能源利用效率、节约能源，实现能源与环境协调、社会经济可持续发展，是确保政府社会经济发展目标实现的重要保证措施之一。

(2) 满足东莞当地电力需求快速增长的需要。

从电力平衡角度来看,考虑东莞沙角电厂退役后替代电源及本工程的情况下,2022年、2025年、2030年东莞电网电力缺口分别为15 422 MW、16 072 MW和17 797 MW,西南区电网电力缺口分别为3 756 MW、2 879 MW和3 299 MW,西北区电网电力缺口分别为555 MW、766 MW、1 053 MW。

可见,“十三五”末以及“十四五”期间随着用电负荷的增长,东莞电网电源始终存在缺额。而该工程能够增加“十四五”期间广东省电力供应,并能够满足东莞地区就地消纳,提高负荷中心的电源保障,缓解主网输电压力。

(3) 珠三角地区改善环境、打赢蓝天保卫战的需要。

环境污染中严重污染物主要是SO₂、NO_x、烟尘等,这些污染物的80%是由于化石能源的应用,尤其是煤的直接燃烧所引起。天然气有输送能耗低、分布广泛、清洁环保等特点,天然气发电取代污染严重的燃煤小火电,可以减少SO₂、NO_x等污染物的排放量,降低污染,改善空气质量,可有效助力东莞地区淘汰落后能源供应方式,实现区域能源供应转型升级,为社会经济的可持续发展提供清洁的能源供应,打赢东莞市蓝天保卫战。

(4) 优化广东电源布局,提高负荷中心电源支撑能力的需要。

随着东莞市负荷的快速增长,东莞电网依靠省网供应的电力也将逐渐增加,东莞市骨干电源相对

缺乏,一旦省网供电故障,供电能力将严重不足。该项目2台460 MW级燃气-蒸汽联合循环热电冷联产机组作为东莞电网的地方支撑性电源,可扩大电网自身的电源装机容量,就地平衡电力需求,使广东电源布局更加合理,提高负荷中心电源支撑能力,从而在一定程度上提高了电网的抗灾保障能力。

4 结语

该天然气热电联产项目的建设,不仅能够满足周边热用户的用热需求,适应东莞电力需求增长的需要,缓解东莞电网电力供应不足的问题,提高电网供电可靠性,同时有利于优化能源结构和配置方式、达到节能减排的目的,也能够改善珠三角地区的环境质量,促进地区经济与环境的协调发展。

参考文献:

- [1] 隋朝霞,孙曼丽,张丹.碳中和目标对我国天然气行业影响分析及对策思考[J]. 天然气技术与经济, 2021, 15(3):69-73
- [2] 陈凯,朱雪飞,王美. 广东天然气发电发展研究[J]. 广东科技, 2020,29(1):54-57
- [3] 孙文娟,孙海萍,荆延妮. 中国天然气发电产业发展现状及展望[J]. 国际石油经济, 2020, 28(4):90-96
- [4] 蒲建军. 浅谈国内外燃机电厂发展经验[J]. 上海节能, 2020(4): 309-314
- [5] 王为伟,朱本刚,杨家强. 天然气发电对碳减排的贡献[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(1):9-11

(上接第70页)

管路阀门系统,能够根据机组冷热态自动运行,匹配金属温度,并可将压差信号、旁路阀开闭信号等传送到DCS,用于监控。采用电加热器方案的机组冷、温态启动时,通过辅助蒸汽向各段轴封送汽,热态、极热态启动和停机时,辅助蒸汽通过电加热器加热到要求温度后,再向高、中压前轴封送汽,其余段轴封仍由辅助蒸汽直接送汽。

4 结语

轴封送汽温度与金属温度的匹配程度,直接影

响机组顺利启动和安全停机,汽轮机运行要严格按照轴封送汽温度的要求执行。辅助蒸汽温度基本无法满足机组高压前轴封和中压前轴封在热态、极热态启动以及停机要求,设置电加热是目前普遍采用的方案,该方案已广泛应用到各大电厂,成熟可靠。

参考文献:

- [1] 刘磊,张秋生,何志永等. 1 000 MW 汽轮机轴封控制现状及优化[J]. 中国电力, 2016, 49(6):43-47
- [2] 黄大明,陶再素. 600 MW汽轮机轴封系统运行方式优化[J]. 华电技术, 2015, 37(6):62-63+71+79

大容量灯泡贯流机非旋转对称转子支架研究

王建康 杜芳勉 刘政

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文针对特殊磁极数量的灯泡贯流机斜立筋转子支架设计, 首次提出了非旋转对称转子支架概念, 并对非旋转对称转子支架构想方案进行有限元分析验证。最后提出了非旋转对称转子支架的设计原则, 对大容量特殊磁极数的灯泡贯流式水轮发电机转子支架设计具有一定的指导意义。

关键词: 灯泡贯流式发电机; 非旋转对称; 转子支架; 设计原则;

中图分类号: TM312

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0075-03

Research of High-capacity Bulb Hydro-generator Non-rotational Symmetrical Rotor Bracket

WANG Jiankang, DU Fangmian, LIU Zheng

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, to design rotor bracket of the bulb hydro-generator with special pole number, the concept of non-rotationally symmetrical rotor bracket is proposed, and verified by the finite element analysis. Finally, the design principle of the rotor bracket is put forward, which has guidance significance for the design of large-capacity bulb hydro-generator rotor bracket.

Key words: bulb hydro-generator; non-rotationally symmetrical; rotor bracket; design principle

转子支架是灯泡贯流式水轮发电机的关键受力部件, 主要传递扭矩和承受发电机转动部件的离心力。一方面由于结构限制, 转子支架局部应力较高, 另一方面由于不平衡磁拉力以及重力交变作用下易出现疲劳受损, 如比较常见的支架疲劳开裂问题。灯泡贯流式水轮发电机随着单机容量和泡体尺寸的不断增大, 转子支架局部应力增大、疲劳寿命短, 设计难度越来越大。

研究并设计出应力和疲劳寿命均能满足大容量灯泡贯流式水轮发电机要求的转子支架, 是一项重大的挑战。特别是针对大容量特殊磁极数的灯泡贯流式水轮发电机转子支架的创新设计, 相关研究成果尚未见诸报导。本文分析了传统转子支架斜立筋结构方式在特殊磁极数机组上应用的不足, 提出

非旋转对称转子支架的设计原则, 给出了新的思路以及解决方案。

1 非旋转对称转子支架的提出

1.1 旋转对称转子支架

传统设计时, 灯泡贯流式水轮发电机转子支架斜立筋数量为磁极数量的约数, 且斜立筋在圆周上均匀布置, 转子支架各斜立筋受力较均匀, 这种传统设计的转子支架即为旋转对称转子支架。

例如对于 40 个磁极的转子支架, 在不考虑受力的情况下, 斜立筋数量一般可选用 10、20、40 个等, 每个斜立筋对应 4 个、2 个或 1 个磁极, 都可实现斜立筋在圆周上均匀布置, 即为旋转对称转子支架。当电机容量较大时, 通常选每个斜立筋对应

收稿日期: 2021-10-28

作者简介: 王建康 (1985—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 毕业于西安交通大学电机专业, 现于东方电机有限公司从事水轮发电机设计工作。

杜芳勉 (1975—), 女, 高级工程师, 毕业于重庆大学电机专业, 现于东方电机有限公司从事水轮发电机设计工作。

刘政 (1984—), 男, 高级工程师, 毕业于清华大学电机系, 现于东方电机有限公司从事水轮发电机设计。

2个磁极；而容量较小的，通常选斜立筋对应3或4个磁极。在多个电站实际运用中，不推荐采用每个斜立筋对应1个磁极，这样会导致斜立筋在中心体上间隔较小，施焊困难，较难保证主要受力焊缝质量，同时造成转子支架重量增加，径向轴承负荷相应增大，不利于径向轴承安全运行。

1.2 对称支架的局限性

然而针对某些磁极数量的转子支架斜立筋数就需要特殊考虑。例如68个磁极的转子支架，斜立筋数量首选17或34个。对于容量在30MW以下的机组，转子支架受力相对较小，采用17个斜立筋一般可以满足设计要求，但对于大容量（50MW以上）灯泡贯流机转子支架来讲，若仍采用17个数量斜立筋(如图1所示)，布置太稀疏应力无法满足设计要求；若采用34个斜立筋，数量太多，在中心体上布置太密集，又无法满足施焊的空间要求。

此时，采用传统设计的旋转对称转子支架已不能满足设计要求，必须考虑新的布置方法。

1.3 非旋转对称转子支架

考虑到68极数位于64和72极数之间，所以斜立筋数量可以在16与24之间选取，结合我公司某72极机组、转子支架24斜立筋设计先例及成功运行经验，最终选取22个斜立筋，其中20个斜立筋对应3个磁极，另外2个斜立筋对应4个磁极。此种结构的转子支架即为非旋转对称转子支架，如图2所示。

非旋转对称转子支架在空间布置上主要考虑圆周方向上质量和局部应力均衡问题。2个特殊布置的斜立筋应设置在旋转对称位置上，由于此2处斜立筋对应4个磁极，相对其他20个斜立筋弦距大，局部应力相对较大，应进行局部结构加强处理。如增加斜立筋厚度、优化斜立筋倾斜角度以及增加局部加强筋板等等^[1]。

2 有限元对比分析计算

根据上述分析，对非旋转转子支架构想进行有限元分析验证。针对68极数转子支架的两种设计方案：17个斜立筋的传统旋转对称转子支架和22个斜立筋的非旋转对称转子支架方案进行有限元

对比分析计算^[2]。计算模型见图1和图2。

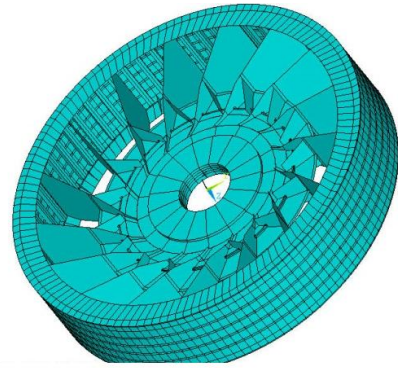


图1 17件斜立筋转子支架有限元模型

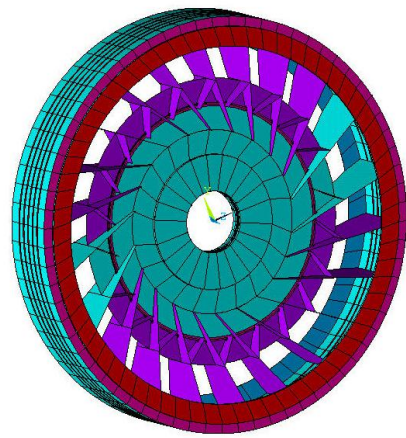


图2 22件斜立筋转子支架有限元模型

按ASME标准确定许用应力进行校核，转子支架材料的许用应力见表1。

表1 按ASME标准确定的许用应力(MPa)

材料名称	材料性能		按ASME标准确定许用应力		
	屈服极限 σ_s	强度极限 σ_b	S_m	$Pl+Pb < 1.5S_m$	$Pl+Pb+Q < 3.0S_m$
Q345B	345	490	163.3	245	490

2.1 应力结果分析

转子支架的应力计算结果详见下表2，从计算结果可以看出，采用非旋转对称转子支架应力指标良好，额定工况以及飞逸工况均能满足ASME标准确定的许用应力要求。

所对比分析的两种转子支架应力值均能满足发电机额定工况下运行要求。但采用17个斜立筋的旋转对称转子支架在飞逸工况下应力值超出ASME标准确定许用应力范围，无法满足转子支架

在飞逸工况下安全运行要求，故不能采用此方案。

表2 计算结果

工况	斜立筋数量	应力值 MPa	允用应力 MPa
额定工况	17(对比)	84	163.3
	22(采用)	43	
飞逸工况	17(对比)	532	490
	22(采用)	404	

2.2 疲劳寿命

根据钢板 Q345 材料的 S-N 曲线，额定工况时，采用 17 个斜立筋的旋转对称转子支架，其疲劳寿命仅有 4 年，不满足发电机至少 40 年的使用年限要求；采用 22 个斜立筋的非旋转对称转子支架，疲劳寿命高达 400 多年。

2.3 结论

采用 22 个斜立筋的非旋转对称转子支架结构，不仅能够满足飞逸工况要求，且疲劳寿命允许飞逸次数达 500 多次，完全处于安全运行范围之内，满足发电机长期安全稳定运行的要求。

可见，采用特殊数量斜立筋的非旋转对称转子支架，可以解决大容量灯泡贯流机组转子支架局部应力高和疲劳问题。目前在国内单机容量最大的沙坪二级大型灯泡贯流式水轮发电机上得到成功应用，已运行四年多时间，转子支架未出现开裂现象。

3 非旋转对称转子支架设计原则

针对大容量、特殊磁极数灯泡贯流机转子支架设计时，可采用非旋转对称转子支架，斜立筋数的确定一般按 2~4 个磁极对应 1 个斜立筋，对于磁极数量少的转子取下限值，磁极数量多取上限值。可按公式(1)进行选取

$$N_j = N / a \dots t \quad (1)$$

其中：

N_j : 斜立筋总数量

N : 磁极数量

a : 1 个筋板对应磁极数，一般取 2~4

t : 余数，只能为 1 或 2

方案一：斜立筋总数量取 N_j

当余数 t 为 1 时，以 58 极电机为例，非旋转对称转子支架斜立筋板的选取可用 $58/3=19$ 余数为 1，即转子支架斜立筋共 19 个，其中 1 个斜立筋对应 4 个磁极特殊布置，其它 18 个筋板各对应 3 个极。空间上无法对称布置、配重量较大，所以不推荐此方案。

当余数 t 为 2 时，以 68 极电机为例，非旋转对称转子支架斜立筋的选取，可用 $68/3=22$ 余数为 2，即转子支架斜立筋共 22 个，考虑圆周 180° 对称布置，其中 2 个斜立筋对应 4 个磁极。此方案可行。

方案二：斜立筋总数量取 N_j+1

t : 余数，即仅有 1 处特殊布置筋板对应 1 个或 2 个磁极。

出于对方案经济性以及结构空间布置考虑，方案二不推荐使用。

方案三：斜立筋总数量取 N_j-1

当余数 t 为 1 时，仍以 58 极电机为例，非旋转对称转子支架斜立筋的选取，可用 $58/3=19$ 余数为 1，方案一不推荐使用，可选择转子支架斜立筋总数共 18 个，其中 4 个斜立筋对应 4 个磁极特殊布置，其它 14 个斜立筋各对应 3 个极。考虑到转子支架的圆周质量平衡^[3]，4 个特殊斜立筋分别布置在轴线对称位置。

当余数 t 为 2 时，以 68 极电机为例，非旋转对称转子支架斜立筋的选取，可用 $68/3=22$ 余数为 2，即转子支架斜立筋共 21 个，其中 5 个斜立筋对应 4 个磁极，16 个斜立筋对应 3 个磁极，5 个特殊斜立筋和 16 个普通斜立筋在空间上无法对称布置，所以不推荐此方案。

综上所述，当余数 t 为 1 时，非旋转对称转子支架可按方案三进行设计，当余数 t 为 2 时，可按方案一进行设计。

另外，对于非旋转对称转子支架，在结构空间布置上，主要考虑圆周方向上质量和局部应力均衡问题。并注意对于特殊斜立筋处进行局部结构加强处理。

转子支架详细结构设计时，要综合考虑发电机容量、磁极数量及转子支架尺寸等因素来选取转子支架筋板数量及结构布置，并通过有限元受力分析后最终确定。

(下转第 80 页)

浅谈某水电站水轮机接力器改造可行性

刘代山

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司, 贵阳 550000

摘要: 某水电站位于重庆市石柱县, 水轮机装有两套带单套管直缸接力器, 机组运行一段时间后推拉杆与套管间出现漏油现象, 随着运行时间延长, 漏油越严重。通经分析, 拟对接力器进行技术改造, 采用新密封、新结构解决接力器漏油问题。

关键词: 接力器; 新结构; 技术改造

中图分类号: TV734.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0078-03

Discussion on the Feasibility of Hydraulic Turbine Servomotor Transformation in Some Hydropower Station

LIU Daishan

(SPIC Guizhou Jinyuan Co.,Ltd., 550000, Guiyang, China)

Abstract: The hydropower station is located in Shizhu County, Chongqing City. The turbine is equipped with two sets of straight cylinder servomotors with single casing. After a period of operation of the unit, there is oil leakage between the push rod and the casing. With the extension of operation time, the oil leakage is more serious. After analysis, it is proposed to carry out technical transformation of the servomotor and adopt new seals and new structures to solve the oil leakage problem of the servomotor.

Keywords: servomotor; new structure; technical transformation

某水电站位于重庆市石柱县, 是龙河流域上游最大的水电站工程, 该电站正常蓄水位相应库容为 $1.86 \times 10^8 \text{ m}^3$, 挡水建筑物为混凝土双曲拱坝, 最大坝高 117 m, 厂房内安装两台混流式水轮发电机组, 单机容量 35 MW, 总装机容量 70 MW。经两台容量 50 MVA 升压变压器 (10.5/110 kV) 升压到 110 kV 后, 两回线分别至大地坪变电站和彭水变电站, 机端设断路器。该工程以发电为主, 兼有梯级调节、防洪和养殖等功能, 该电站是龙河梯级开发方案中的龙头骨干工程。在电力系统中承担调峰、负荷备用、事故备用作用。

1 原接力器结构形式和存在的问题

原接力器结构为带单套管直缸接力器, 推拉杆随控制环的转动而摆动, 为了满足推拉杆摆动, 在推拉杆与缸盖间设置有套管, 推拉杆与套管间设计

间隙较大。推拉杆与活塞采用铰链连接, 以适应机组负荷调节时推拉杆运动规律变化, 套管与缸盖、套管与活塞、推拉杆与活塞、活塞销与活塞及推拉杆间均设置有各种形式的密封件。

机组在新安装运行初期, 接力器运行平稳, 工作可靠, 没有“跑、冒、滴、漏”现象^[1]。由于接力器缸内设置有大量的密封件, 机组经过一段时间运行后, 密封件会老化和磨损, 且活塞密封环为铸铁材料, 密封环与活塞缸间存在磨损及“拉缸”可能, 以及活塞销与推拉杆间的配合表面由于加工粗糙度不均匀影响, 将表面凸起高点磨掉后配合间隙增大, 导致推拉杆受力发生变化, 接力器在工作过程中呈“憋劲”现象, 影响密封性能, 严重时液压缸两腔“窜油”、推拉杆与套管间出现漏油现象。另外, 活塞与活塞缸之间密封采用两道“O”型密封圈, 缸内采用单一的“O”型密封圈, 其密封性能差, 同样

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 刘代山 (1972—), 男, 1994年毕业于南昌工程学院水电站动力设备专业, 工程师。现主要从事水轮发电机组安装与检修管理方面的研究。

容易引起接力器开、关腔窜油问题，影响机组安全运行。

结构形式如图 1。

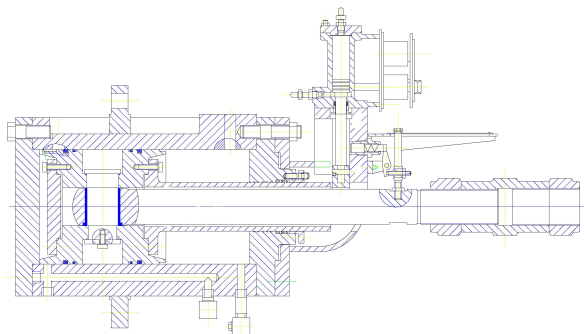


图 1 接力器结构形式

现电站一台机接力器的推拉杆与套管间就存在比较严重的漏油现象，通过前面的分析，存在几个渗漏点。首先，活塞两端的封盖和活塞销与活塞的连接处，但活塞两端封盖是静密封，损害渗漏的可能性不大；其次，接力器活塞在运动过程中，活塞销存在转动的可能，在活塞销转动的过程中，损害了上、下两端的密封件，以及活塞销和活塞孔由于加工原因，表面粗糙度差，活塞销在转动过程中将影响表面粗糙度的凸起磨掉后，活塞销与活塞孔间隙增大，接力器在工作过程中推拉杆受力发生变化，当推拉杆受力发生变化后，活塞销与活塞孔又会继续发生偏磨，偏磨导致间隙继续增大，间隙增大后推拉杆受力再次发生变化，这样恶性循环。如果仅仅更换密封件，并不能从根本上解决接力器还会继续渗漏的问题，活塞销与活塞孔间的间隙处理难度很大，风险很高，不易保证质量。因此，可以通过对接力器进行技术改造，达到从根本上解决漏油隐患的目的。

2 接力器技术改造方案

水轮发电机组运行时，负荷的调节是通过调节导叶开度来实现的，导叶开度是通过控制机构进行实施的，接力器为控制机构提供操作力，在操作过程中，推拉杆的运动轨迹是圆弧运动规律。即接力器在工作过程中，推拉杆与活塞之间存在相对运动关系，这种关系靠铰链来实现，转动件与固定件间设置有密封件，密封性能与机组运行时间、设备加工质量、装配质量及安装质量有关，若某些质量不

符合要求，接力器就存在漏油的风险，通过更换部件，不能从根本上解决问题。通过分析后，考虑将现在的推拉杆与活塞的铰链接技改为完全的刚性固定连接，即推拉杆与活塞间没有相对运动关系，将缸内的铰链设置在缸外，将漏油风险消除掉。技改后的接力器仍为双直缸接力器形式，布置形式和接口尺寸不发生变化，接力器仍布置在机坑里衬内，一个接力器带液压锁锭，一个接力器不带液压锁锭。接力器结构简单、工作可靠，接力器前缸盖上设置有径向轴承，各种密封圈和防尘圈，保证接力器在工作时运行平稳，密封可靠。

接力器改造方案如图 2 所示：一套为带液压锁锭接力器，另一套为不带液压锁锭接力器。

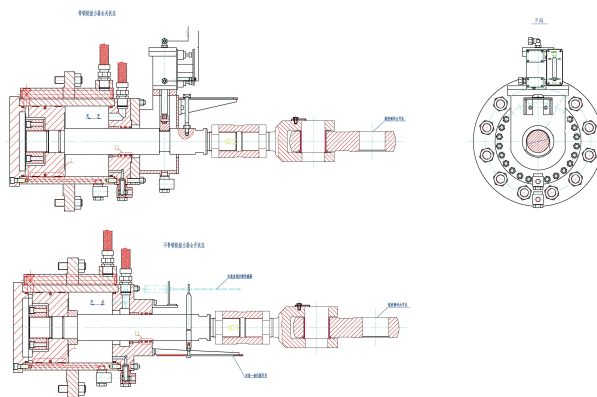


图 2 接力器改造方案

活塞与活塞缸间的密封结构形式、缸盖与推拉杆的密封结构形式现在已广泛应用在国内外许多水电站操作油压 6.3 MPa 和 16 MPa 的接力器上，这些结构形式均得到了很好的应用。

3 两种接力器工作原理及结构特点

技改前后两种接力器工作原理基本相同，均是靠液压油操作活塞，活塞带动推拉杆运动。每台机设置有两套接力器，一套带液压锁锭接力器，另一套不带液压锁锭接力器。两套接力器平行布置于机坑内^[2]，当要调节机组负荷时，两套接力器同时工作，一套接力器拉控制环，另一套接力器推控制环，当导叶接近全关状态时，两种接力器均设置有慢关闭装置，用于调节机组关闭速度，防止导叶相互碰撞，同时，接力器上还设置有显示导叶位置的位置开关和位移传感器，将导叶位置信号反馈给调速器

和计算机监控。

但两种接力器结构不同,原接力器为带单套管直缸接力器,推拉杆与缸盖之间设置有套管,套管与推拉杆间留有足够间隙,推拉杆与活塞间为铰链连接。活塞在运动过程中,推拉杆除作直线运动外,还围绕铰链中心作偏转摆幅运动,为防止铰链漏油,在活塞销两端设计有密封圈,当制造、装配、安装质量较好,同时机组运行时间不长的情况下,接力器不会漏油。当机组运行时间较长,控制环上的侧抗磨板和底抗磨板磨损后,控制环大耳孔中心高程发生偏移,导致接力器推拉杆受侧向力作用。接力器在运动过程中,由于推拉杆侧向力的存在,也会导致活销轴转动磨损密封圈,密封不好出现漏油现象。

技改后的接力器活塞与推拉杆间完全是刚性固定连接,两者间没有相对运动关系,推拉杆随活塞一起只做直线运动,铰链设置在缸外。推拉杆与缸盖间设置有两道密封圈和一道防尘圈,同时,为防止控制环上的抗磨环磨损后影响推拉杆受力,在缸盖上设置有径向轴承,承受附加力的作用,改善

(上接第 77 页)

4 结语

转子是发电机组的核心部件,而转子支架为转子的“心脏”,其设计直接影响发电机质量和稳定性。本文提出了非旋转对称转子支架,并对特殊磁极数的转子支架采用传统旋转对称方案和非旋转对称方案进行了有限元对比分析计算,验证了非旋转对称转子支架设计的合理性和有效性。本文还对非旋转对称转子支架斜立筋数量选取及圆周布置进行了说明,提出了非旋转对称转子支架的设计原则,

接力器运行平稳性。

4 结语

该电站原接力器结构为带单套管直缸接力器,推拉杆与活塞间为铰链转动结构,转动铰链在液压缸内,对加工、装配、安装质量要求较高,机组运行一段时间后,套管与推拉杆间出现了漏油问题。通过对原接力器结构进行分析,提出将铰链设置到活塞缸外,活塞与推拉杆间完全采用固定连接结构,活塞缸盖与推拉杆间设置有径向轴承及可靠的密封装置。通过这样技术改造后,能完全解决接力器漏油、窜油、拉缸问题,确保机组安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 叶伟东. 水电站接力器控制环跳动原因分析和处理[J]. 电力安全技术, 2017, 19(11):27-29
- [2] 温斌. 隔河岩水电厂接力器活塞杆弯曲变形原因及对策[J]. 水电与新能源, 2013(1):49-51

特别对大容量(50 MW 以上)特殊磁极数量的灯泡贯流式水轮发电机转子支架设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 杨德马. 水轮发电机斜支臂转子支架结构研究[J]. 东方电机, 2010(1):106-110
- [2] 张磊. 贯流水轮发电机组转子支架结构设计及有限元分析[D]. 天津大学, 2011
- [3] 冷志, 巩梅. 灯泡贯流式水轮发电机转子支架立式静平衡工艺[J]. 东方电气评论, 2013, 27 (1):8-11

勘误说明

尊敬的各位读者:

《东方电气评论》第 1 期第 1 页文章标题《某燃料工业数据空间 (IDS) 技术概述及其测试床部署实践》应为《工业数据空间 (IDS) 技术概述及其测试床部署实践》, 特此更正, 深表歉意!

谢谢大家对于《东方电气评论》的关注与支持!

《东方电气评论》编辑部

2022 年 6 月 25 日

谈令里水电站 1# 水轮发电机组技改检修成果

邓家勇

国家电投贵州金元集团股份有限公司 贵州 贵阳 550000

摘要: 令里水电站地处黔东南地区, 该电站 1 号机组于 2007 年 4 月 27 日投运, 2011 年 2 月进行常规性 A 级检修, 检修后机组运行出现振动大、轴承温度高、出力不足问题, 虽经多次反复处理, 直至 2020 年技改检修前机组出力仍不能达到额定出力。通过 2020 年的技改检修, 机组出力满发超发, 轴承温度低, 振动值优于国家标准要求, 圆满解决了机组多年存在的问题。

关键词: 水轮发电机组; 技改; 检修

中图分类号: TV738

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0081-03

Effect of Technical Reformation and Maintenance of 1# Unit of Lingli Hydropower Station

DENG Jiayong

(SPIC Guizhou Jinyuan Co., Ltd., 550000, Guiyang, China)

Abstract: Lingli Hydropower Station is located in the southeast of Guizhou Province. Unit 1 of the power station was put into operation on April 27, 2007. In February 2011, routine A-level maintenance was carried out. After the maintenance, there were problems such as large vibration, high bearing temperature and insufficient output. Although it was repeatedly treated, the unit output could not reach the rated output until 2020 before the technical reformation and maintenance. Through the technical reformation and maintenance in 2020, the output of unit can reach the rated and overload ones, and the bearing temperature is low, and the vibration value is better than the national standard requirements, and the problems existing in the unit for many years have been successfully solved.

Key words: hydraulic generating unit; technical reformation; maintenance

令里水电站位于贵州省从江县雍里乡令里村境内, 距从江县城约 38 km, 距雍里乡约 6 km, 工程开发主要任务为发电, 电站装机容量 3×2.5 MW, 经 35 kV 输电线路 1 回 (48 基杆) 全长 21.5 公里送至从江 110 kV 变电站, 设计年发电量 2 731 万 kW·h。令里水电站厂房位于从江县雍里河和南岑河交汇处, 电站坝址位于雍里河上游约 6 km 处 (广西融水县与从江县交界处), 属都柳江的一级支流, 发源于广西壮族自治区融水县, 向东流经雍里乡,

再流入从江县境汇入都柳江干流, 工程属 IV 等工程, 水库属小 (I) 型水库, 厂坝之间相距 5.5 km, 电站系一座引水式径流电站, 拦河坝有: 雍里河大坝和南岑河小坝, 坝型均为重力式坝。

1 水轮发电机组主要技术参数

令里水电站三台机组均为卧式两支点结构, 推力组合轴承布置于飞轮与水轮机之间, 主要技术参数如下:

收稿日期: 2021-11-04

作者简介: 邓家勇 (1980 年—), 男, 2002 年毕业于东北电力学院热动力专业, 工程师。现主要从事水电、光伏发电方面的研究。

1.1 水轮机主要技术参数（见表 1）

表 1

项目	单位	型号或参数
型号		HLD41-WJ-81
额定出力	kW	2 632
额定流量	m ³ /s	5.08
最高水头	m	61.57
额定水头	m	59.5
最小水头	m	58.6
额定转速	r/min	750
飞逸转速	r/min	1421
最大水推力	t	9.5~11.4
转轮直径	cm	81

1.2 发电机主要技术参数（见表 2）

表 2

项目	单位	型号或参数
型号		SFW2500-8/1730
额定功率	kW	2 500
额定容量	kVA	3 125
额定电压	V	6 300
额定电流	A	286.4
功率因数		0.8（滞后）
额定转速	r/min	750
飞逸转速	r/min	1 421
相数		3
接线方式		Y
绝缘等级		F/F
频率	Hz	50

2 1#机组历次检修情况

令里电站 1#机组于 2007 年 4 月 27 日投运，机组在运行初期虽存在各种问题，但经过处理后，能满足安全稳定运行的要求。2011 年 2 月进行常规性 A 级检修，由浙江某公司承担，检修完成投入试运行，带 500 kW 负荷时，推力轴承温度高达 60℃，振动值严重超标，若继续加大导叶开度，就会烧推力瓦。检修单位通过近一年反复调整检查，想尽各种办法仍无法彻底解决推力瓦温较高问题，在这种

情况下，1 号发电机组被迫停止运行。直至 2011 年 11 月检修单位再次进场，发现前导推力组合轴承座往水轮机方向位移 1.8 mm，每次烧瓦均为推力轴承下半部分。检修单位分析认为，由于 1#水轮发电机组水推力过大，导致推力轴承座发生变形，推力瓦受力不均而烧瓦。随后采取了以下措施：

（1）固定蜗壳，防止蜗壳变形。

（2）在水轮机尾水方向加装限流挡板，以减少水推力负荷。

（3）在静止状态下，通过葫芦、千斤顶施加外力，让推力轴承座人为产生 1.8 mm 的倾斜，模拟机组带负荷情况下推力轴承座的运行状态来调整推力瓦受力。

经过采取这些措施处理后，1#水轮发电机组重新开机运行，在三台机组同时运行时，1#机只能带 2 000 kW 负荷，单机运行时最高只能带 2 340 KW 负荷，无法满负荷运行。这种情况经过 6 年的运行，在 2016 年 3 月再次对机组进行大修，外委检修单位同样不能解决出力受限问题，仍然采用拉轴承座方式进行调整推力瓦，推力瓦温才能基本满足机组运行要求。2020 年初决定第三次对 1 号水轮发电机组进行大修和技术改造处理，大修前对机组存在的问题进行了深入分析，并在拆机前进行了各种试验。

3 主要技术改造内容

1#机经过两次大修及多次处理，机组一直不能发满额定出力，给电站造成了严重的经济损失，加大了电站的管理难度，经过深入分析，决定对水轮机进行如下技术改造：

（1）取消尾水锥管内的限流挡板，并对锥管进口进行适当处理。

（2）取消支撑蜗壳的四根支架。

（3）活动导叶材料更换为不锈钢。

（4）转轮叶片翼型修型处理并优化下环结构。

（5）新制推力瓦，保证推力瓦形位公差符合

要求。

以上相关部件委托有关单位进行生产制造，制造完后即开始进行A级检修，检修全过程严把质量关，关键点必须经验收才能进行下一步工作，经各方努力，全部工作于2020年3月底结束，随后进行机组启动前的各项试验和机组试运行。

4 技术改造分析

2011年1#机组大修前额定出力为2500KW，大修后最大出力2340KW，虽经检修人员反复处理，也仅仅是将轴承温度降到维持机组运行的程度，由于处理措施存在问题，机组出力仍为2340KW。

水流流过转轮转换能量，水轮机轴功率同水流具有的能量 $E=\gamma QH$ 之间的比值称之为水轮机效率，水流在水轮机中的功率损失，根据其损失方式，可分为三种：

(1) 部分水流没有通过水轮机转轮叶片、不作功就流往下游所造成的容积损失。

(2) 水轮机转动部分和固定部分间相对运动，水流由于粘性造成的圆盘损失。

(3) 水力损失，这是主要的损失部分。

水力损失又分为与雷诺数Re有关的摩擦损失和叶型损失；与雷诺数Re无关的撞击损失和出口动力损失^[1]。由于检修单位在尾水锥管进口设置挡板，不仅增加了叶片出口水流的撞击损失和出口动力损失，而且大大降低了尾水管的恢复系数，削弱了尾水管的能量回收性能。尾水管的恢复系数见下式(1)^[1]：

$$\eta_x = [(V_2^2 - V_3^2) / 2g - \sum h_{2-5}] / (V_2^2 / 2g) \quad (1)$$

V_2 ----尾水管进口流速

V_3 ----尾水管出口流速

由于尾水管进口设置挡板，过流面积减小，进口流速 V_2 增大，降低了尾水管的恢复系数。

5 机组技改检修成果

通过前面的分析，本次技改就是将影响叶片出口水流撞击损失和出口动力损失、尾水管能量回收

和恢复系数的因素消除掉，满足机组出力和稳定运行要求。1#机组经过72h试运行，机组各项指标均达到或超过国家标准要求，机组最大出力达到2850kW，较技改检修前增加500kW，具体参数指标见表3和表4：

表3 水轮发电机组检修后运行振动值（双幅值）

序号	项目	单位	空转	25%Ne	50%Ne	75%Ne	100%Ne
1	导叶开度	%	8.1	37.2	53.8	69.2	82
2	上游水位	m	327.8	327.8	327.8	327.8	327.8
3	尾水水位	m	263.9	263.9	263.9	263.9	263.9
4	前导水平振动	mm	0	0.028	0.019	0.023	0.013
5	前导垂直振动	mm	0	0.001	0.002	0.003	0.003
6	前导轴向振动	mm	0	0.003	0.001	0.001	0.001
7	后导水平振动	mm	0	0.023	0.024	0.025	0.021
8	后导垂直振动	mm	0	0.004	0.006	0.008	0.007
9	后导轴向振动	mm	0	0.011	0.007	0.009	0.009

表4 水轮发电机组检修后运行各测点温度值

序号	项目	单位	空转	空载	25%Ne	50%Ne	75%Ne	100%Ne
1	推力瓦温	℃	17.5	30.2	30.9	34.6	37.8	38.6
2	前导瓦温	℃	16.3	34.9	34.9	35.6	38.5	39
3	后导瓦温	℃	14.7	40.4	40.8	40.8	40.7	40.7
4	定子绕组温度	℃		46.3	49.5	49.7	52.1	55.7

6 结语

令里电站1#机组由于首次大修后机组运行各主要参数均不能满足设计和规范要求，虽经多次处理，机组出力仍不能满足设计要求，通过深入分析，找出问题的根源，并结合对水轮机相关部件技术改造，大修后机组出力达到和超过设计要求，各部振动值优于规范要求，圆满解决了困扰电站多年的难题，对同类型机组具有一定的借鉴作用。

参考文献

[1] 曹鹏, 姚志民. 水轮机原理及水力设计 [M]. 清华大学出版社, 1991

塔式光热电站吸热器高温隔热防护装置研究

丁路^{1,2} 刘亚尼^{1,2} 黄际兵^{1,2} 陈梁^{1,2} 林毅^{1,2} 孙登科^{1,2}

1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 在塔式光热发电站中, 太阳能吸热器是实现太阳能热发电最为关键的核心设备之一。除有效受热区域外, 其上下及周边布置有高温隔热防护装置, 其功能为保证吸热器内部支撑结构、系统设备或运行期间维护人员的绝对安全性, 避免其受到镜场反射的溢出光斑的高温辐射。因此, 高温隔热防护装置的设计、选材及结构是否合理直接关系到吸热器的安全、稳定及高效运行。

关键词: 吸热器; 高温辐射; 隔热防护

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 02-0084-05

The Study of the High Temperature Heat Insulation Protection Device of Receiver in the Tower Solar Power Station

DING Lu^{1,2}, LIU Yani^{1,2}, HUANG Jibing^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, LIN Yi^{1,2}, SUN Dengke^{1,2}

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: In the tower solar power station, solar receiver is one of the most important equipment to realize solar thermal power generation. Besides of the effective heating area, the upper, lower and surrounding parts are equipped with high temperature heat insulation protection devices, whose function is to ensure the absolute safety of the internal support structure of the receiver, the system and equipments or the maintenance personnel during operation, so as to avoid the high temperature radiation caused by the overflow light spot reflected by the heliostats field. The design, material and structure of high temperature heat insulation protection device are directly related to the safety, stability and efficient operation of the receiver.

Key words: receiver; high temperature radiation; heat insulation protection

太阳能因其储量的无限性, 利用的清洁性已成为目前世界范围内新能源开发利用的一个必然选择。塔式太阳能光热发电系统作为大规模开发利用太阳能的一项重要技术, 由于其运行温度高, 效率高, 成本较低, 加速推进其规模化发展已成为一种国际共识。在塔式太阳能光热发电系统中, 太阳能吸热器是实现太阳能光热发电最为关键的核心技术之一, 它是将定日镜所捕捉、反射、聚集的太阳能直接转化为可以高效利用的高温热能, 为发电机组提供所

需的热源或动力源, 从而实现太阳能热发电的过程^[1]。

国内对塔式太阳能吸热器的研究多侧重于工质或吸热管传热特性的理论研究, 对于吸热器系统设计、性能计算及具体结构等方面的研究则鲜有报道, 主要原因在于国内真正落地的商业化光热项目较少, 极少数企业通过自主投资建设不同规模的光热试验或商业化电站, 来推动其自主核心技术的发展及产业的市场推广, 但项目数量少, 且电站运行效果与情况出于技术保密或其它原因也鲜于对外报道。因

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 丁路(1983—)男, 2008年毕业于华中科技大学, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 太阳能热发电系统技术研发及关键设备设计。

此,整体来看在塔式太阳能吸热器的系统研究和设计方面国内、外仍有一定差距,大容量、高参数的太阳能吸热器的应用性研究有待进一步广泛地展开。

在市场需求方面,全球太阳能热发电产业正在兴起,装机容量逐年增加,紧迫的能源形势也将推动国内太阳能热发电技术的迅猛发展,因此,塔式光热电站太阳能吸热器必将拥有广阔的市场前景^[2-4]。

本文针对塔式光热电站太阳能吸热器重要组成部分-高温隔热防护装置进行了较详细研究与分析,包括功能、壁温计算、结构设计及材料选择等,希望对从事太阳能热发电产业的同仁予以一定的指导意义。

1 隔热防护装置功能及应用现状

1.1 隔热防护功能

对于塔式光热电站吸热器来说,无论是腔体式结构还是圆周式结构,由外观整体来看主要分为两部分,一部分为吸热器有效受热区,即表面涂有黑色吸收涂层的受热管屏;另一部分则为布置于吸热器有效受热区上部、下部或周边区域的白色高温隔热防护装置,如下图1所示。

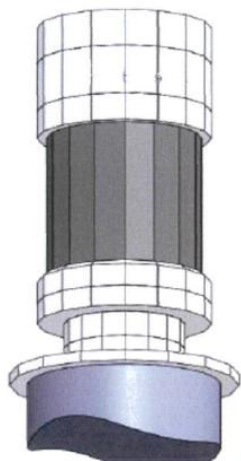


图1 吸热器隔热防护结构

隔热防护装置主要功能是保证吸热器内部支撑结构、系统设备或运行期间维护人员的绝对安全性,避免其受到镜场反射的溢出光斑的高温辐射^[5],因此隔热防护装置结构与材料选择是否合理,直接关系到吸热器的安全、可靠及连续运行。

1.2 应用现状

国外已投运的商业化光热电站,其隔热防护板装置采用的均是具有独家专利技术的纳米板或硬质陶瓷板以及成套的系统技术,如图2所示,由国外几家知名的高温绝热材料厂家提供,经过多年的运行测试,产品性能基本满足要求,但投资成本过高,约占吸热器整体设备成本的十分之一。因此,为降低项目总投资,提高设备的国产化率,国内几个投运的光热项目,其吸热器隔热防护系统和材料基本为国产化设计与采购。



图2 国外已投运光热电站吸热器

2 隔热防护材料选择

对于吸热器用高温隔热防护材料来说,其表面受到镜场反射光斑溢出的高温辐射,除需具有耐高热流密度干烧及大温差应力下不发生开裂或损坏的能力外,还因高空室外露天布置,同时需具备耐强紫外线照射、雨、雪、强风及暴晒等交替天气变化的能力。此外,为了减小防护板对太阳光的热量吸收以降低其表面承受温度,防护板自身通常会选用白色基底材料,甚至向光侧还会采用白色的高反射涂料进行滚涂,以提高其对太阳光斑的反射能力。隔热防护板通过金属框架固定于吸热器支撑钢构上,高空布置,承受着高空强风载作用^[6]。

结合已投运光热电站实际运行情况及多方调研,可用于隔热防护板材料的包括有硅酸钙板、陶瓷纤维板、纳米微孔隔热板以及泡沫玻璃等,在综合考虑耐温、环境适应性、强度及经济性等各因素条件下,推荐采用高密度的硬质硅酸钙板或硅酸铝

板材料。材料特性分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 硅酸钙板材料特性

	普通型	高温型
最高使用温度, °C	650	1 000
体积密度, kg/m ³	220~240	220~270
抗压强度, MPa	≥0.65	≥0.65
抗折强度, MPa	≥0.33	≥0.33
线收缩率, %	≤2.0	≤2.0
憎水率, %	≥98	≥98
导热系数, 平均 400°C	≤0.100	≤0.100
W/m·K 平均 600°C	≤0.130	≤0.130
最高使用温度 裂缝	无	无
匀温灼烧后 剩余抗压强度 (MPa)	≥0.4	≥0.4
(16h) 剩余抗折强度 (MPa)	≥0.35	≥0.4

参考国家标准 GB/T10699-2015 硅酸钙绝热制品^[7], 硅酸钙分为普通型 (650°C) 和高温型 (1 000°C), 项目选材时可根据表面实际承受温度及经济性选择合适的材料。在高空强风载作用下, 建议提高材料体积密度及抗压强度, 此外, 光热项目所在地尽管多干燥少雨, 但由于室外露天安装, 要求材料憎水率不得低于 98%。

硅酸铝板也称为陶瓷纤维板, 材料型号分为普通型、标准型、高纯型、高铝型及含锆型。对于光热电站吸热器用隔热防护板, 其类型至少应为高纯型以上; 此外, 材料在出厂前必须对其中有机物进行有效处理。

表 2 陶瓷纤维板材料特性

	高纯型	高铝型	含锆型
分类温度, °C	1 260	1 400	1 400
体积密度, kg/m ³	≥280	≥280	≥280
线收缩率, %	≤2.5	≤2.5	≤2.5
At(°C)×24h	(1 100)	(1 200)	(1 200)
有机物含量, %	≤1	≤1	≤1
含水率, %	≤1	≤1	≤1
抗折强度, MPa	≥0.65	≥0.65	≥0.65
导热系数, W/m·K (平均 500°C)	≤0.135	≤0.135	≤0.135
化学成分, %			
Al ₂ O ₃	≥43	≥50	≥35
SiO ₂	≥55	≥48	≥48
Al ₂ O ₃ + SiO ₂	≥99	≥99	—
Zr O ₂	—	—	≥15

3 设计计算

3.1 壁温计算

图 3 为国外已投运商业化光热电站运行状态下的吸热器照片, 从照片可以看出, 吸热器除中间吸热区域受镜场反射光斑照射外, 上、下隔热防护区也同样受到光斑的强光照射, 照射强度即表面热流密度与镜场目标点控制策略及定日镜跟踪精度有关; 同时对于受热区吸热管屏来说, 为减小温差与热应力, 避免堵管等以保证其安全运行, 分布于表面的热流密度希望能够尽可能均匀, 包括中间及上、下区域, 但对于光斑来说, 无论定日镜布置远近, 其反射光斑均具有一定的面积, 因此对于跟踪目标点在上、下边缘区域的光斑必然存在着能量溢出^[8]。



图 3 国外光热电站吸热器运行照片

隔热防护板受热状态下的热量平衡如图 4 所示, 同受热管屏一样, 隔热防护板也分为向光侧与背光侧。



图 4 隔热防护板受热平衡图

其中, 向光侧接受来自镜场入射光斑照射, 入射能量为 q , 被表面直接反射的热量为 q_1 , 表面受热温度升高, 同外界环境间的辐射热量为 q_2 , 同时

在高空强风载作用下存在着对流散热热量 q_3 ，因此，最终被防护板吸收的热量仅为 q_4 。

q_4 通过导热传递至防护背光侧，背光侧为吸热器内部，环境风速较低，因此表面仅需考虑自然对流散热量 q_6 以及背光侧与内部环境间的辐射热量交换 q_5 。综上所述，吸热器隔热防护板的热量平衡方程可表述如下：

$$q=q_1+q_2+q_3+q_4 \quad (1)$$

$$q_4=q_5+q_6 \quad (2)$$

其中，隔热防护板表面反射率 ρ 及发射率 ε 对防护板热量吸收及内外壁温有重要影响，两者越高， q_1 和 q_2 越大， q_4 越小，壁温则越低，对隔热防护板来说则越安全。因此为提高反射率 ρ 及发射率 ε ，正如上文所述，隔热防板材料通常选用白色基底材料，甚至向光侧采用白色的高反射涂料进行滚涂，此外，还需保证表面的清洁度。

向光侧强制对流散热热量 q_3 与外界环境风速紧密有关。吸热器位于高空，所在标高对应风速需与地面标高测量风速需进行转换，如下所示：

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^\alpha \quad (3)$$

其中： V_{10} -地面 10m 标高对应风速，m/s；

V_H -高空对应风速，m/s；

α -不同地面粗糙度地形对应指数。

利用公式 (3) 可依据地面测量风速对高空吸热器对应风速进行折算。

对流换热对应努塞尔数可取外掠平板传热经验公式求得^[9]。

$$Nu=0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (4)$$

其中：Nu-努塞尔数；

Re-雷诺数；

Pr-普朗特数。

导热热量 q_4 与防护板内外壁温有关，初始计算时可根据经验对隔热防护板内、外壁温进行假设，以防护板热量平衡为基准，通过迭代计算直至计算结果达到计算精度为止。

$$q_4 = A \frac{\lambda (T_w - T_i)}{\delta} \quad (5)$$

其中： A -换热面积， m^2 ；

λ -护板导热系数， $W/(m \cdot K)$ ；

T_w 、 T_i -护板外壁与内壁温度， $^\circ C$ ；

δ -护板厚度，mm。

吸热器内部空气流速很小，散热量 q_6 按大空间自然对流散热考虑，对应努塞尔数如下所示：

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (6)$$

其中： C 、 n -系数，按流动状态取值；

Gr-格拉晓夫数；

Pr-普朗特数；

图 5 为厚度一定的某种隔热防护板在不同热流密度入射太阳光照射下，其内、外壁温变化曲线图。其中，横坐标为热流密度 (kW/m^2)，纵坐标为温度 ($^\circ C$)。上部两条曲线表示外壁温，颜色不同表示对应表面反射率 ρ (0.75 和 0.8) 不同，下部曲线表示内壁温。总的来看，表面热流越高，壁温越高；表面反射率越高，壁温越低。其中，外壁温升高速率较快，内壁温略有升高。在入射热流密度为 $400 kW/m^2$ 时，外表面壁温极高，约 $800 \sim 900 ^\circ C$ ，如此高的温度对隔热防护板及金属支撑件的选材、经济性及吸热器安全性均提出了很高挑战。

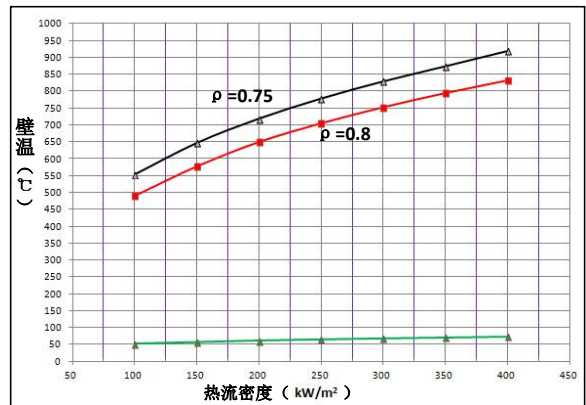


图 5 不同热流密度太阳光照射下防护板内外壁温曲线

因此，在光热电站聚光集热系统运行时，需制定合理的镜场目标点控制策略并提高定日镜跟踪精度，严格限制溢出至隔热防护板表面的热流密度值，以保证吸热器的绝对安全性。

3.2 结构设计

隔热防护板上、下区域高度取决于吸热器的整体结构设计。比如对于熔盐吸热器来说，整体结构高度需考虑顶部出口缓冲罐与排气管路的布置，下

部则需考虑入口缓冲罐的结构与布置以及疏盐支管的走向等,但总体上建议上、下隔热防护区高度应不低于吸热器有效受热区高度的1/2,以防止镜场入射的溢出光斑照射至吸热器内部结构。隔热防护层就能够防护吸热器转换平台上所有能够被太阳能照射到的吸热器钢架、线缆、管道及保温等,防护层以镜场任意镜子能够照射的区域为边界,凡是镜场任意镜子能够直射到的区域均应该做防护,如有必要,同样可对转换平台和吸热塔身进行防护保护。

隔热防护层与吸热管屏的夹角尽量不遮挡定日镜反射至吸热器受热管段的能量,建议下防护层与吸热管屏间的夹角小于40°。

隔热防护层尤其是集箱部位,需保证防护层与吸热管间的密封性良好(特别是高风速条件下),密封的设计要充分考虑吸热管膨胀变形导致的密封松动影响,不能对集箱的预热升温效果产生影响。

隔热防护板整体厚度与壁温计算有关,在强热流太阳光照射下需保证背部不超温。

隔热防护层的固定螺栓应使防护板在工作温度范围内可自由膨胀,防止运行中出现护板变形及固定螺栓脱落情况。护板固定的紧固件需采用高强紧固件(如高强螺钉或螺栓),且紧固件的允许使用温度不得低于外护板的允许使用温度。防护层的向光侧不得有任何裸露的固定材料(如锚固件、螺栓和螺钉等),所有裸露的固定材料均应喷涂或粉刷高温反射漆或其他耐高温反射材料,以确保防护层的有效性。

为便于设计、加工、运输及现场安装,防护板建议采用标准的尺寸,尽量减少非标件的选用。

隔热防护板建议采用模块化设计,考虑可拆卸性和吊装的便利性,需经常维修的部位如管屏集箱区,采用快速可拆卸的结构。在集箱与管屏接触处,考虑有密封结构,并且该密封结构应具有一定的弹性,可靠持久耐用。

由于板材单层厚度有限,隔热防护板通常采用多层结构,内、外层相对独立;同层相邻板间平齐安装,但需留有一定安装间隙;内、外层错缝安装,以避免太阳光透过间隙照射至背部结构。

隔热防护板采用金属支撑结构与吸热器主钢结构固定,该结构位于板材背侧,尺寸和材质取决于面板尺寸,工作温度及锚固方式等。金属支护结构载荷计算需进行多工况的考虑,比如强风载低温工况、高温低风载工况以及正常运行工况等。

4 结语

综上所述,关于塔式光热电站吸热器隔热防护主要结论如下:

(1) 对于隔热防护材料的选择,需综合考虑耐温、环境适应性、强度及经济性等各因素,推荐采用高密度的硬质板材;

(2) 在光热电站聚光集热系统运行时,需制定合理的镜场目标点控制策略并提高定日镜跟踪精度,严格限制溢出至隔热防护板表面的热流密度值,以保证吸热器的绝对安全性;

(3) 吸热器有效受热区上、下部的防护高度建议不低于有效受热高度的1/2,凡是镜场镜子可以直射的区域均应进行防护;

(4) 为便于加工、运输及后期安装,防护板建议采用模块化设计,并尽量选用标准尺寸。

参考文献

- [1] 杨敏林, 杨晓西, 左远志. sss塔式太阳能热发电吸热器技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2008(10):2632-2640
- [2] 杨金焕. 太阳能发电的进展及建议[J]. 世界科技研究与发展, 2003(4):39-43
- [3] 董自春, 赵煜, 赵静. 塔式光热电站熔盐吸热器关键技术研究[J]. 上海电气技术, 2018, 11(4):10-13+57
- [4] 杜凤丽, 原郭丰, 常春等. 太阳能热发电技术产业发展现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6):551-564
- [5] 罗彦, 杜小泽, 杨立军等. 塔式太阳能电站分离式吸热器热流分布与定日镜场设计研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(2):192-200
- [6] RODRIGUEZ-SANCHEZ M R, SORIA A, ALMENDROS IBANEZ J A, et al. Thermal Design Guidelines of Solar Power Towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1):428-438
- [7] GB/T 10669-2015, 硅酸钙绝热制品[S]
- [8] 王坤, 何雅玲, 邱羽等. 塔式太阳能熔盐腔体吸热器一体化光热耦合模拟研究[J]. 科学通报, 2016, 61(15):1640-1649
- [9] 杨世铭, 陶文栓等. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社 1998年版(2003年版)