

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM



2022

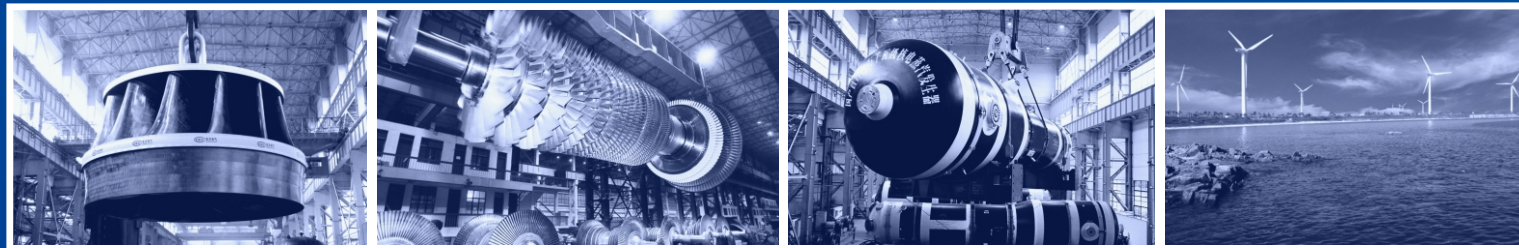
第36卷 总第143期

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

第三十六卷第三期

二〇二二年九月

公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第36卷第3期(总第143期)
出版日期:2022年9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



2022
第36卷第3期 总第143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

储能电池技术发展研究浅析……………杨于驰 张媛(1)
危险废物等离子体处理技术的应用研究……………胡春云 蒋太波(5)
柔性作业车间分批调度问题优化研究进展…石致远 闫富乾 张剑等(11)
基于整数线性优化的蛇形管备料中心智能排料算法研究
……………李勇 殷庆文 王川等(15)

燃煤发电

CFB锅炉燃尽风对氮氧化物排放影响研究……………周旭 李维成 周祺等(20)
大型G115钢弯头成型工艺研究……………卢洪 张俊 龚雪莲(24)
供热抽汽改造方式及管道布置分析……………魏丽君 李建东 黄松等(28)
关于对压缩空气储能与电站锅炉耦合运行系统的研究……………余水龙(33)
绍兴某燃机电厂二期扩建项目的可行性分析……………杨振 段慧青(37)
卧式电袋复合除尘器技术在半干法脱硫系统中的应用…张芳 庄原发(41)

风能发电

风电机组传动链轴承布置类型分析……………张斯翔 董元元 胡宗邱等(45)
基于人工智能的风电叶片破损识别及破损面积计算的算法设计
……………刘平 黄小波 张沛等(47)

核能发电

大型整体式核能发电机定子机座焊接制造工艺技术
……………林松 范平 吴雄斌等(51)
核电厂氢冷发电机气密试验的影响因素分析…陈年时 杨博文 余前军等(56)
钠冷快堆蒸汽发生器腔室电加热设计……………古莉 刘艳芳 郭正荣等(60)

水力发电

大型抽水蓄能完全向心塔形磁极装配质量提升…王嫦美 杨悦伟 张翔(64)

其他

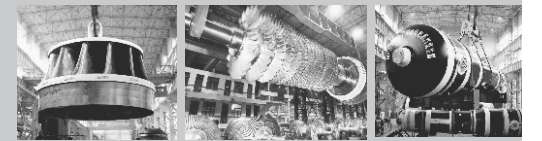
调质钢晶粒度检测方法的研发……………王洪涛 王海沧 张娟等(67)
基于一种实用型的分布式多能互补电站的应用……………周翔(70)
降低高纯锑中Na、Si杂质含量工艺研究……………张程 雷聪 雷云棣等(76)
中美规范荷载效应组合对比研究……………李翔 高玲 陈健陵(80)
金峰水库大坝坝坡稳定分析研究……………廖大勇 初伟 许刚(85)
简讯……………(10)(69)(79)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*21*2022-03

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2022-9-25 Vol.36 No.3
(Quarterly, since 1987)



CONTENTS

BASIC RESEARCH

Latest Technological Developments of Energy Storage Batteries……………
……………YANG Yuchi,ZHANG Yuan (1)
Discussion on the Application of Plasma Treatment Technology for Hazardous Waste
……………HU Chunyun,JIANG Taibo (5)
Research Progress on Batch Scheduling Optimization of Flexible Job Shop Problem
……………SHI Zhiyuan,YAN Fuqian,ZHANG Jian,et al (11)
Research on Intelligent Nesting Algorithm of Serpentine Tube Spare Parts using
Integer Linear Optimization……………LI Yong,YIN Qingwen,WANG Chuan,et al (15)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Research on the Influence of the Burn Out Air on Nitrogen Oxide Emission in CFB
Boiler……………ZHOU Xu,LI Weicheng,ZHOU Qi,et al (20)
Research on the Forming Process of Large G115 Steel Elbows……………
……………LU Hong,ZHANG Jun,GONG Xuelian (24)
Analysis of Extraction Steam Heating Supply Retrofit Methods and Pipeline Layout
……………WEI Lijun,LI Jiandong,HUANG Song,et al (28)
A Study of Air Pressing Energy Storage and Boiler Couple System… YU Shuilong (33)
Feasibility Analysis of Phase II Expansion Project of A Gas Turbine Plant in Shaoxing
……………YANG Zhen,DUAN Huiqing (37)
Horizontal Electrostatic-fabric Integrated Precipitator in Semi-dry Desulfurization
System……………ZHANG Fang,ZHUANG Yuanfa (41)

WIND POWER

Analysis on Bearing Arrangement Type of Wind Turbine Drive Chain……………
……………ZHANG Sixiang,DONG Yuanyuan,HU Zongqiu,et al (45)
Algorithm Design of Wind power Blade Damage Identification and Damage Area Calculation
Based on Artificial Intelligence……………LIU Ping,HUANG Xiaobo,ZHANG Pei,et al (47)

NUCLEAR POWER

Welding Manufacture Technology of Stator Frame of Monolithic Nuclear Power Generator
……………LIN Song,FAN Ping,WU Xiongbin,et al (51)
Analysis of Influencing Factors of Hydrogen Cooled Generator Airtight Testing Nuclear
Power Plant……………CHEN Nianshi,YANG Bowen,YU Qianjun,et al (56)
Electric Heating Scheme Design of Plenum in Sodium-cooled Fast Reactor Steam
Generator……………GU Li,LIU Yanfang,GUO Zhengrong,et al (60)

HYDRO POWER

The Assembly Quality Improvement of Large-scale Pumped Storage Centripetal Tower
Magnetic Poles……………WANG Changmei,YANG Yuwei,ZHANG Xiang (64)

MISCELLANEOUS

Research and Development of Grain Size Detection Method for Quenched and Tempered
Steel……………WANG Hongtao, WANG Hailun, ZHANG Juan, et al (67)
One of The Practicable Application on Distributed Hybrid Power Plant … ZHOU Xiang (70)
Research on Reducing the Content of Na and Si Impurities in High Purity Antimony
……………ZHANG Cheng, LEI Cong, LEI Yundi, et al (76)
Comparison of Load Combinations Between China and the United States Standard…
……………LI Xiang, GAO Ling, CHEN Jianling (80)
Analysis of Dam Slope Stability of Jinfeng Reservoir Dam……………
……………LIAO Dayong, CHU Wei, XU Gang (85)
NEWS IN BRIEF……………(10)(69)(79)

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 Xiaoquan, 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.)

储能电池技术发展研究浅析

杨于驰 张媛

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 随着全球新能源大规模装机及对能源消纳和电力供需求的不不断提高, 电化学储能应用日益增多, 在电化学储能系统中, 电池技术是最核心的环节, 也是产业链中技术壁垒最高的环节。目前主流的电化学储能技术是锂离子电池, 但锂资源存量、安全性及使用寿命等问题限制了其进一步发展, 仅依靠锂离子电池已不能满足新型电力系统的储能需求。电池技术在迭代发展, 未来在储能领域将呈现多种储能技术并存的现状, 并依据各自特点应用于特定的储能场景。本文讨论了锂离子电池、钠离子电池、钠硫电池、全钒液流电池的技术特点, 进一步分析了不同电池技术的应用场景, 为未来储能端技术路线选择提供支撑。

关键词: 电池储能; 锂离子电池; 钠离子电池; 钠硫电池; 全钒液流电池

中图分类号: TM912

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0001-04

Latest Technological Developments of Energy Storage Batteries

YANG Yuchi, ZHANG Yuan

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

Abstract: With the rapid development of renewable energy, the electrical power system typically suffers from the energy consumption and power supply and demand, which drives the development of electrochemical energy storage. The battery performance directly determines the electrochemical energy storage efficiency. In terms of reserves, safety and life performance, lithium-ion battery cannot require the demand of the new electrical power system. In the future, various batteries with designed and tunable properties together serve the needs for energy storage. Here, we provide an overview of lithium-ion battery, sodium-ion battery, sodium sulfur battery, and all vanadium redox flow battery, supporting the new development of batteries in the electrical power system.

Key words: energy storage battery; lithium-ion battery; sodium-ion battery; sodium sulfur battery; all-vanadium flow battery

作为国民经济发展的基础, 电力行业是实现我国“双碳”目标的主力军, 目前我国已经明确构建以新能源为主体的新型电力系统, 电力系统朝着低碳化、绿色化、智能化方向发展。储能是实现发电端与用电端功率解耦的必要条件, 是发展新型电力系统的核心要素。其可充可放的运行特性能有效解决新能源发电不稳定性对电力系统造成的影响, 也是支撑“源、网、荷”端互联、互通、互济的重要保障力量。

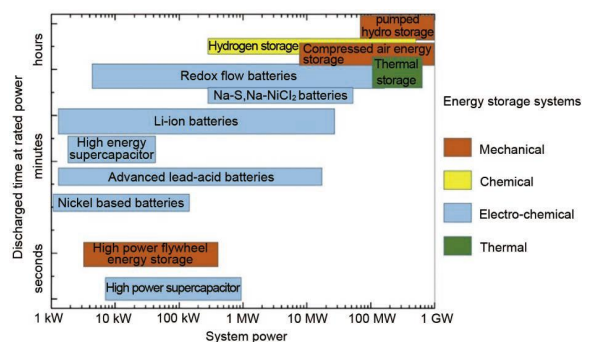


图1 不同储能技术的功率特性与能量特性对比^[1]

收稿日期: 2022-06-02

作者简介: 杨于驰 (1994—), 男, 2021年毕业于复旦大学高分子化学与物理专业, 博士。目前就职于东方电气集团科学技术研究院有限公司, 主要从事储能、氢能等绿色低碳领域规划编制、产业研究及前沿技术追踪。

根据能源存储的方式，储能技术一般分为机械储能、电磁储能及电化学储能（图1）。近年来电化学储能技术飞速发展、度电成本持续走低、应用场景多点开花，电化学储能已经成为增长最快的储能技术，根据中关村储能产业技术联盟的统计，截至2020年底，全球电化学储能装机规模达到14.2 GW。电化学储能技术的核心是电池技术，对电池技术的深入研究，改善电池的性能，开发出低成本、长寿命、高效的电池，并按照特定场景合理定制不同的储能电池系统，能够有效促进电化学储能技术的发展，扩大其市场渗透率。

目前常用的电池技术包括锂/钠离子电池、高温钠硫电池、液流电池，它们在全球范围内都有MW级的装机规模^[2]。本文详细分析了近年来比较热门的电池技术，阐述不同电池的技术特点，并分析储能电池技术在细分市场上的未来发展方向。

1 电池技术类型

1.1 锂离子电池

锂离子电池是实现电子设备无线使用、摆脱传统化石能源的重要技术手段。在目前的电化学储能技术中，锂离子电池占据了主导地位，占据全球电化学储能装机规模的92%，是现阶段最重要的电化学储能技术。

锂离子电池是通过锂离子在正负电极之间反复脱嵌，从而在外电路形成电流的浓度差电池，常被成为“摇椅式电池”，如图2所示。常见的正极材料包括：磷酸铁锂、钴酸锂和三元正极材料；负极材料包括：石墨、钛酸锂、硅碳类材料^[3-4]。

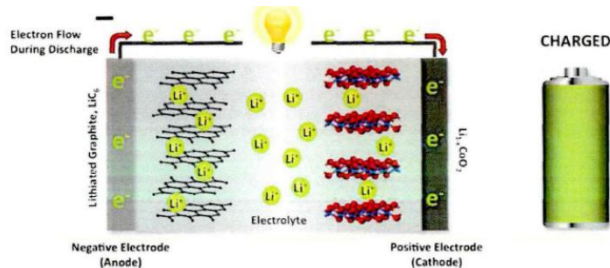


图2 锂离子电池的工作原理示意图^[5]

锂电池的优势在于：①具有较高的能量密度，磷酸铁锂电池的单体能量密度最高可达到210 Wh/kg，三元电池的单体能量密度则突破了300

Wh/kg；②充放电快，适合用于储能电站的调峰、调频；③能量转化效率高，可达到80~90%；④响应时间快速；⑤循环寿命已经实现万次突破（衰减斜率预测结果），宁德时代设计的福建晋江储能电站预计能够实现电池单体12 000次的长寿命循环。

锂离子电池在商业化使用过程中也面临着很多突出问题：①使用过程中存在安全隐患，无论是作为动力电池还是储能电池，锂离子电池爆炸或着火的现象频发；②锂资源的储量有限。锂资源在地壳中的含量仅占0.006 5%，目前的锂资源无法支撑未来汽车电气化和电化学储能产业的蓬勃发展。

1.2 钠离子电池

钠离子电池作为一种二次电池，与锂离子电池的工作原理类似，依靠钠离子在正负极之间来回穿梭工作，因而钠离子电池同锂离子电池一样被称作“摇椅式电池”。由于钠离子半径（0.102 nm）比锂离子（0.076 nm）大，对正负极材料的配位数、晶格常数、晶体结构等会产生比较大影响，在电极材料的选择上需要注意。常见的钠离子电池正极材料包括：层状氧化物、隧道型氧化物、普鲁士蓝类化合物、聚阴离子型化合物。负极材料包括：硬碳等碳基材料、钛基嵌入型材料、有机类负极材料及合金及转化类负极材料。

与锂离子电池相比，钠离子电池最大的特点是：①钠资源丰富，全球的钠含量为2.75%，远高于锂（0.006 5%）；②成本低。钠离子电池的电极原材料和集流体（正负极均可使用铝）的成本低，使得钠离子电池的理论制造成本为0.55元/Wh，随着产能的扩大和工艺的改进，其电芯成本有望降至0.2~0.3元/Wh，远低于锂离子电池、高温钠硫电池和全钒液流电池的制造成本；③安全性好。对比锂离子电池，钠离子电池充放电过程中安全性更高，高低温性能保持率高，在-20℃下使用仍然有90%的容量保持^[6-8]。

钠离子电池和锂离子电池的技术和生产制造路线相似，能够很好地借鉴当前锂离子电池的生产制造工艺，容量较高（略低于磷酸铁锂电池），钠资源储量丰富，是未来极具有发展潜力和市场价值的电池技术。目前以宁德时代、中科海钠为代表的电池公司均聚焦于钠离子电池技术研发。在未来钠离子电池有望部分替代锂离子电池，应用于低速交

通、储能电站中。

1.3 高温钠硫电池

高温钠硫电池作为一种重要的储能技术，适用于大规模固定式储能，目前装机量占全球电化学储能市场的 3.6%，主要技术由日本 NGK 公司掌握，国内上海电气钠硫储能技术公司和东方电气集团公司也有一定的技术储备。然而其安全问题一直倍受关注，成为制约其产业大规模发展的关键要素。

高温钠硫电池是由熔融电极和固体电解质组成，负极活性物质为熔融金属钠，正极活性物质为液态硫和多硫化钠熔盐， β 型 Al_2O_3 同时作为固体电解质，其最大的特点是正负极是以液体的形式进行电化学反应的。高温钠硫电池的工作原理如图 3 所示，高温钠硫电池固体电解质的工作温度在 $300\sim 350^\circ\text{C}$ ，钠与硫电极均呈液态，在放电过程中电子通过外电路由负极到正极， Na^+ 则通过 β 型 Al_2O_3 固体电解质从正极迁移到负极与 S^{2-} 结合形成多硫化钠产物，在充电时电极反应与放电相反。

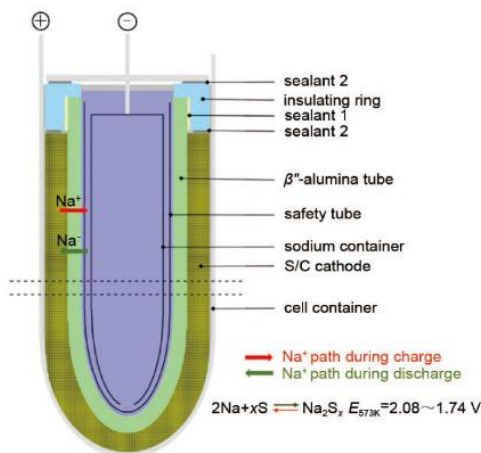


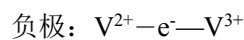
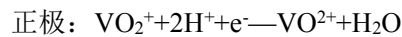
图 3 钠硫电池的结构和工作原理示意图^[1]

高温钠硫电池的优势在于：①资源丰富（钠和硫的储量丰富）；②充放电寿命长；③能量密度高，在大规模发电侧储能领域具有商业化和可持续发展潜力。但高温钠硫电池工作温度过高（ $300\sim 350^\circ\text{C}$ ），存在严重的安全隐患，限制了其大规模产业发展。目前高温钠硫电池的生产制造集中主要集中在日本，由于其安全性问题没有得到有效解决^[1,9]，在全球范围内尚未产生规模化效应。

1.4 全钒液流电池

全钒液流电池（VRB）通过不同价态的钒离子

相互转化实现电能的储存与释放，电解液是水相体系，是唯一使用同种元素组成的水系电池系统。与传统二次电池不同，全钒液流电池反应过程不涉及相变，其工作原理图如图 4 所示，正极存储 $\text{V}^{5+}/\text{V}^{4+}$ 的硫酸水溶液，负极存储 $\text{V}^{3+}/\text{V}^{2+}$ 的硫酸水溶液。通过磁力泵将电解液从储罐输送到电堆中，不同价态的钒离子组分会在电极表面发生氧化还原反应，完成电化学反应后再由磁力泵输送回储罐中。充电过程，正极的 V^{4+} 转变为 V^{5+} ，负极的 V^{3+} 转变为 V^{2+} ，同时释放出 H^+ ，放电过程与之相反。其电极反应机理如下式（1）：



（1）因此其容量取决于所使用的电解液浓度和体积，其功率由电池的电极面积和数量决定。

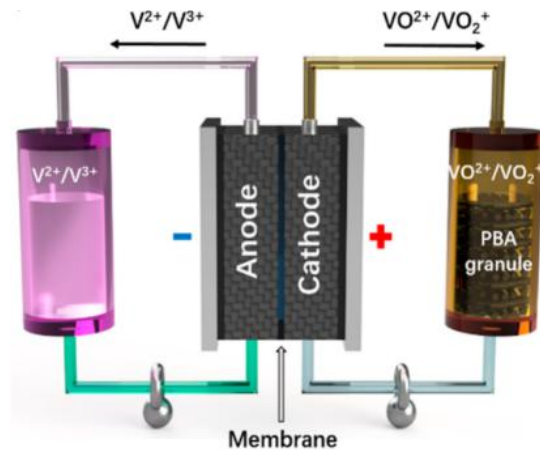


图 4 全钒液流电池的的结构和工作原理示意图^[10]

全钒液流电池具有以下优势：①安全环保，全钒液流电池的活性物质是含有钒离子的稀硫酸水溶液，无有机物质，电池故障时不易发生爆炸和燃烧；同时钒电解液也可以循环利用；②循环寿命长。电池充放电循环次数在 15 000 次以上，使用寿命在 15~20 年，高于锂离子电池；③能量转换效率高，充放电特性好^[11]；④全钒液流电池可深度放电（100%充放电），能耐受大电流充放，适合大电流快速充放电；通过更换电解液能实现电池的“即时充电”，具备快速响应的特性；⑤储能容量大，储能容量为数百千瓦时至数百兆瓦时，适合大容量固定储能。

全钒液流电池的突出问题是：①制造成本过高，

依据大连融科公司统计,钒液流电池的制造成本在4 000元/kWh左右,阻碍钒电池的推广普及;②体积庞大、不易搬运,相同储能容量下,全钒液流电池沉重、庞大,不易搬运,不适宜用于电动汽车等便捷式交通设备,只能应用于大规模固定储能;③对环境温度要求苛刻,全钒液流电池的工作温度在0~45℃,不适合在极端环境中使用;⑤正极极板易

报废,寿命不超过两年,维修成本高^[12];⑥比能量低,难以进一步提高。钒电池的质量比能量仅是锂电或高温钠硫电池的1/3~1/2。

2 不同电池特性总结

电化学储能应用场景高度依赖于电池的技术特性,针对于上述几种常见的电池技术,分别分析了其成本、性能及潜在应用场景,总结在下表1中。

表1 储能电池技术对比

相关参数	锂离子电池	钠离子电池	高温钠硫电池	全钒液流电池
地壳丰度(%)	锂 0.0065	钠 2.75	钠 2.75	钒 0.02
能量密度(Wh/kg)	160~300	120~160	150~240	15~40
工作温度(℃)	-20~60	-40~80	300~350	0~45
安全性	一般	优	差,安全隐患大	极优
寿命(年)	5~10	5~10	10~15	10~20
制造成本(元/Wh)	约 0.6~1.0	约 0.5	2.2~3	3~3.2
应用端	动力汽车、消费电子、储能	低速交通、储能	发电侧大规模储能	大规模长时储能

3 结语

作为新兴产业,储能正处于政策积极引导、技术不断迭代、市场逐渐成熟的阶段,面临着多重机遇和挑战。一方面,储能是构建灵活电源的关键,在新型电力系统和“双碳”目标下将迎来重大发展;另一方面,目前储能电池技术在成本、安全性、性能、标准体系建设等方面还有待进一步提升。

“十四五”期间,电化学储能技术仍然将以锂离子电池为主。随着锂资源的逐步消耗,钠离子电池的低成本、安全性和丰富存量等特征日益凸显,性能不断优化,未来钠离子电池在储能领域会迎来更大的发展。此外,随着大电网对于长时储能的需求逐步显现,具有超长寿命的液流电池等新型长时储能技术也将在特定领域中发挥其重要价值。电池技术不断进步、应用场景不断丰富,未来储能电池技术必将进入百花齐放的多元发展时代,要能够充分发挥储能市场对资源的调配作用,使各种电池技术依据特点统筹发展。

参考文献

[1] 胡英瑛, 吴相伟, 温兆银. 储能钠硫电池的工程化研究进展与展望——提高电池安全性的材料与结构设计[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3):781-798

[2] 李先锋, 张洪章, 郑琼等. 能源革命中的电化学储能技术. 低碳多能融合发展, 2019, 34(4), 443-449

[3] Etacheri V, Marom R, Elazari R, et al. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review[J]. Energy Environ. Sci., 2011,4:3243-3262

[4] 曾令杰, 杨轲, 廖小珍等. 低温用锂离子电池正负极材料研究进展[J]. 电源技术, 2011, 35(12):1596-1598

[5] M.M. Thackeray, C. Wolverton, E.D. Isaacs. Electrical energy storage for transportation-approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries [J]. Energy Environ. Sci., 2012,5(7):7854-7863

[6] 叶佳佳, 胡成. 钠离子电池在电网储能领域的应用前景展望[J]. 山东电力技术, 2021, 48(2):7-10

[7] 曹余良. 钠离子电池机遇与挑战[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3), 757-761

[8] 容晓晖, 陆雅翔, 戚兴国等. 钠离子电池: 从基础研究到工程化探索[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2), 517-522

[9] 陈福平, 曾乐才. 钠硫电池安全性影响因素分析[J]. 上海电气技术, 2021, 14(1), 58-62

[10] Yuanhang Cheng, Xun Wang, Songpeng Huang, et al. Redox targeting-based vanadium redox-flow[J]. ACS Energy Lett., 2019, 4: 3028-3035

[11] 王晓雨, 张宇, 李颖, 张华民. 全钒液流电池技术与产业发展状况[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(5), 458-464

[12] 苏秀丽, 杨霖霖, 周禹, 林友斌, 余妹姝. 全钒液流电池电极研究进展[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1), 65-74

危险废物等离子体处理技术的应用研究

胡春云¹ 蒋太波²

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都 611731; 2.成都环服科技有限责任公司,成都 610213

摘要: 本文介绍了危险废物处置利用技术的应用现状,论述了等离子体处理技术的基本原理和系统组成,并重点分析了国内示范应用的等离子体处理技术案例,对其优缺点进行了比较,提出了等离子体处理技术工业化应用的难点、对策和建议。

关键词: 危险废物; 等离子体; 等离子体处理技术; 等离子体气化熔融一体炉

中图分类号: X327

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)03-0005-06

Discussion on the Application of Plasma Treatment Technology for Hazardous Waste

HU Chunyun¹,JIANG Taibo²

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

2. Chengdu Huanfu Technology Co., Ltd., 610213, Chengdu, China)

Abstract: The application status of hazardous waste disposal and utilization technology is introduced, and the basic principle and system composition of plasma treatment technology are discussed. This paper focuses on the analysis of the domestic demonstration application of plasma treatment technology cases, compares their advantages and disadvantages, and puts forward the difficulties, countermeasures and suggestions for the industrial application of plasma treatment technology.

Key words: hazardous waste; plasma; plasma treatment technology; plasma gasification and melting integrated furnace

我国危险废物处理包括无害化处置、资源化利用两个方面。目前无害化处置以焚烧和安全填埋为主;资源化利用主要集中在金属回收、废有机溶剂回收和废矿物油回收等细分种类。针对不同种类的废物,选择合适的技术工艺可以让废物得到更好地资源化再利用。

回转窑焚烧可以在一定程度上实现危险废物的减量化、无害化处理,但回转窑焚烧炉会产生大量的焚烧残渣和飞灰等二次危险废物,尚需进行进一步处置;同时回转窑焚烧过程会产生二噁英、重金属等二次环境污染。危险废物安全填埋会产生土壤和地下水污染。传统利用危险废物制取替代燃

料、替代原料的过程受限于转化率、产物质量要求和过程污染控制要求,会产生大量的二次危险废物。由此可见,传统危险废物处置和利用技术存在一定的应用局限,尚需进一步发展完善。

等离子体可将危险废物中的有机物转化为可燃性气体,可用于直接发电、燃烧后余热发电,可净化分离后制取氢气,可利用可燃性气体制取气体化学产品;无机物在高温下熔融造渣形成玻璃态熔渣,可直接用作路基材料或高值化建材应用;贵金属经熔融还原富集后实现资源回收利用。

等离子体法处理危险废物是国内外公认的先进处理技术,美国西屋、欧洲等离子体和英国

收稿日期: 2022-06-13

基金项目: 四川省自然科学基金项目: 城镇生活垃圾制氢技术开发; 项目编号: 2022NSFSC0024。

作者简介: 胡春云(1986—),男,2010年毕业于西安交通大学能源与动力工程系动力工程及工程热物理专业,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主要从事低碳与环保技术研发工作。

Tetronics 等企业已经实现了商业化运营。目前，直流非转移弧等离子体发生器已经完全实现国产化制造，中广核、光大环境、中国天楹等企业已经建成了多套危险废物等离子体处理装置，实现了工业化示范应用。

1 等离子体处理技术简介

等离子体是物质存在的一种状态，与固态、液态和气态并列，俗称“第四态”，是由大量相互作用但仍处在非束缚状态下的带电离子组成的宏观体系^[1]。等离子体中含有正负离子、电子、激发态原子分子、自由基等极活泼的化学反应物种，它的化学反应性质与固、液、气三态有本质的区别，特别突出的一点是等离子体化学反应的能量水平高^[2]。

等离子体处理是利用等离子体作为热处理化学反应的工艺条件、工艺过程控制参数和少量补充热源；等离子体作为一种物质能参与危险废物热处理化学反应，减少热处理化学反应所需空气或氧气用量，相对传统热化学处理而言可减少多余、过剩空气或氧气量带来的热损失；等离子体具有极强的化学反应活性，能降低热处理化学反应能级，提高其反应速率；等离子体作为一种高温、高能量密度的热源，可快速调节玻璃态熔渣的流动性，可提高贵金属熔炼效率。等离子体处理有别于传统焚烧过程，有机物在等离子体的高温作用下彻底分解，从根本上消除了二噁英合成的前提条件。

传统热化学处理受反应动力学局限，反应温度低，过程难以调控，处理不彻底。等离子体在处理高难度、复杂及特殊废物时，其技术先进性突显。因此，等离子体处理技术的工业化应用成为危险废物处置利用产业中具有广阔发展前景的热点领域。

目前，我国等离子体热化学处理尚无专项技术规范、污染控制标准可遵循。《危险废物焚烧污染控制标准》2020版规定，危险废物熔融、热解、气化等高温热处理设施的污染物排放限值，若无专项国家污染控制标准或者环境保护标准的，可参照本标准执行。因此，等离子体热化学处理成套技术装备的开发和工业化应用可参考此标准。按照危险废物焚烧污染控制标准，危险废物等离子体热化学处理装置由预处理进料系统、等离子热化学反应炉、

等离子体发生器系统、玻璃态熔渣利用系统、二燃室、余热锅炉（含 SNCR 脱硝）、余热发电机组、急冷塔、干法脱酸系统、布袋除尘器、湿法脱酸系统、供引风系统以及公辅系统组成。

2 国内等离子体处理技术应用

2.1 等离子体裂解炉技术处理化工危险废物

热解技术在现代环保产业中应用广泛，通常又被称为“裂解”或“热裂解”。我国危险废物等离子体处理技术应用始于等离子体裂解处理化工固体危险废物，中科院力学所与四川自贡晨光化工合作开发了处理多氯联苯等持久性有机污染物的等离子体裂解熔融炉。

等离子体裂解炉采用圆筒形立式炉，等离子体炬位于炉体顶部，等离子体射流垂直向下作用于炉内危险废物料层，有机物在等离子体轰击下发生复杂的化学反应而裂解，无机灰分在高温下熔融形成玻璃态熔渣；裂解气进入二燃室燃烧，燃烧尾气经急冷、脱酸和除尘净化后达标排放，熔渣经炉底出渣口流出。图1为自贡晨光等离子体裂解炉示意图。

由于该等离子体裂解技术的反应机理尚不明确，工业应用时干燥、热解、气化及燃烧过程存在工艺控制方面的缺陷，反应过程难以有效控制，裂解气体产物无法定向调控，工艺可靠性低。等离子体射流的一部分能量以热辐射的方式传递给炉体和裂解气，炉内热化学反应的热效率和处理效率不高。等离子体裂解熔融炉的处理能力受国产化等离子体炬的功率制约而难以放大。

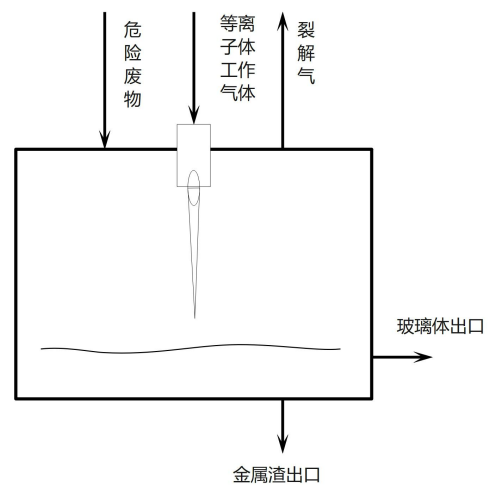


图1 等离子体裂解熔融炉示意图

2.2 等离子体熔融炉技术处理飞灰和焚烧残渣

等离子体熔融炉技术是指等离子体作高温、高能量密度的热源，为熔融炉提供高温、高能环境，物料进入后能快速升温熔化形成玻璃态熔渣；反应器通常采用圆筒形立式炉，反应器底部设置熔渣池。等离子体熔融炉技术根据等离子体发生器类型的不同，可分为等离子体炬熔融炉和石墨电极等离子弧熔融炉两种。等离子体熔融炉可处理垃圾焚烧飞灰、贵金属催化剂等无机固态危险废物。

江苏镇江 30 吨/天飞灰熔融项目、海安 40 吨/天飞灰熔融项目均采用图 2 所示石墨电极等离子弧熔融炉处理垃圾焚烧飞灰，江苏无锡 8 100 吨/年熔融项目、广州 1 万吨/年熔融项目均采用图 2 所示等离子体炬熔融炉处理危险废物焚烧残渣、飞灰和电镀污泥，目前四个项目均已建成投入商业运营。

石墨电极等离子弧的热转换效率高于等离子体炬，石墨电极采购成本低，石墨电极可在线自动续接，因此石墨电极等离子弧熔融炉的运行经济性更好，更适合贵金属回收、飞灰熔融制岩棉等高值化利用领域，具有一定的商业化应用前景。

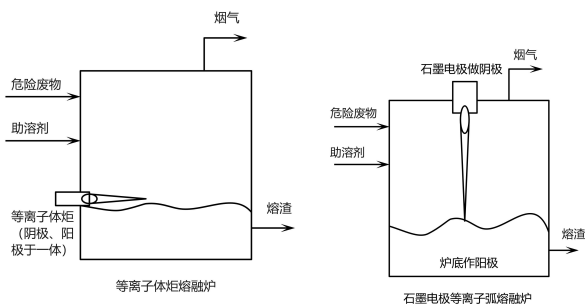


图 2 两种等离子体熔融炉示意图

2.3 等离子体气化熔融综合处理有机危险废物

2.3.1 固定床等离子体气化熔融一体炉

等离子体气化熔融一体炉是将废物普通气化和等离子体气化、熔融有机结合的一体式装置，主要选用空气作为直流等离子体炬的工作介质，空气等离子体作为气化反应的气化剂和主要工艺控制参数，从而实现高效快速气化。等离子体气化熔融一体炉常采用固定床作为炉体结构原型，等离子体炬安装在炉体等离子体气化反应段底部。图 3 为固定床等离子体气化熔融一体炉结构和反应过程示意图，一体炉分为气化均化段、物料床层反应段和熔渣池三部分，有机物在炉内依次经历干燥、热解、

普通气化、等离子体气化等阶段，有机物彻底转化为合成气，灰分熔融转化成玻璃态熔渣。

我国山东某石化企业已建成运行 75 吨/天的固定床等离子体气化熔融一体炉装置，用于处理企业内部产生的精馏残渣、废活性炭、油泥、废树脂及可燃废液等多种可燃危险废物。

固定床等离子体气化熔融一体炉处理多种类、复杂来源的危险废物时，废物普通气化反应过程受自身热解气化特性影响较大，小分子有机物的气化反应过程更快。因此，如何提高普通气化反应的工艺弹性和可靠性，从而改善和提高等离子体气化熔融一体炉的物料普适性，是一体炉技术亟待解决的问题。

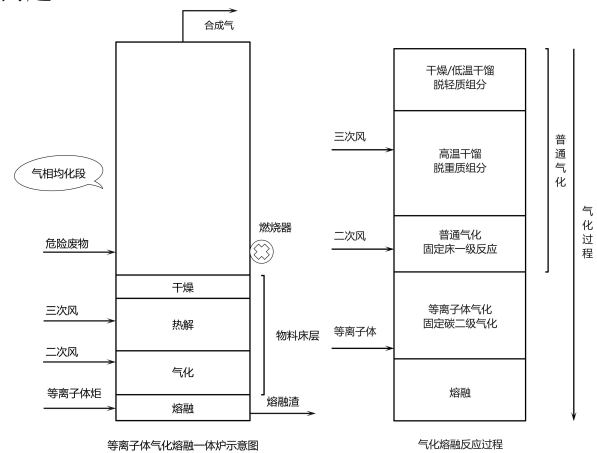


图 3 固定床等离子体气化熔融一体炉及反应过程示意图

2.3.2 等离子体气化熔融分体炉

等离子体气化熔融分体炉是指废物普通气化和等离子体熔融过程分别在两个反应器内单独进行，废物首先经过气化炉将有机物质转化为合成气，气化残渣经输送装置进入等离子体熔融炉实现熔融玻璃化处理，气化炉和熔融炉共用一套尾气净化装置。

江苏无锡某危险废物综合处理项目建设运营了两套等离子体气化熔融分体炉装置，气化炉采用流化床气化技术，设计处置能力 2 万吨/年，可处置 18 大类有机危险废物。广东东莞某危险废物综合处理项目建设运营了一套等离子体气化熔融分体炉装置，气化炉采用固定床气化技术，设计处置能力 0.99 万吨/年，可处置废有机溶剂与含有机溶剂废物、废矿物油与含矿物油废物、染料涂料废物、有机树脂类废物、表面处理废物及沾染性废物。

图 4 为江苏无锡项目流化床气化炉-等离子体

熔融分体炉装置示意图，多种类有机危险废物经破碎、混合均化后，由螺旋输送装置进入流化床气化炉，颗粒状危险废物在一定风速的气化风作用下形成流化态，颗粒状危险废物和气化风在炉内缺氧状态下气化。流化床气化炉产生的气化残渣经气化炉底部的水冷出渣装置收集，气化残渣在暂存过程中实现自然冷却。气化残渣暂存到一定数量后，经破碎、分选除铁预处理，由输送装置进入等离子体熔融炉实现玻璃化处理。

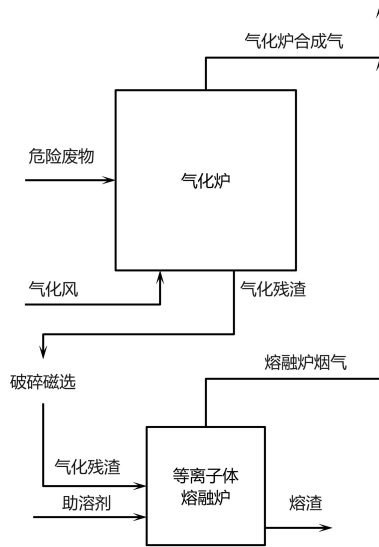


图4 流化床气化-等离子体熔融分体炉装置示意图

由于等离子体只作为熔融炉的高强度热源，不作为气化剂参与气化反应和气化工艺控制，因此等离子体熔融的综合热效率低，等离子体熔融炉序批式间歇运行的作业率低。同时，气化过程的工艺条件和参数波动会引起气化残渣的含碳量升高，甚至出现大分子有机物。气化过程的工艺波动会引起熔融炉的工艺模式和操作条件的剧烈变化，导致熔融过程偏离熔融工艺意图和要求。由此可见，危险废物综合处理模式下，分体炉在热效率、物料普适性和工艺可靠性等方面有待进一步提高。

2.4 无氧热解和等离子体熔融协同处置危险废物

广东某制造企业采用无氧热解炉和等离子体熔融炉协同处置技术，已建成一套5000吨/年的油漆渣、油泥、油棉纱和废油漆桶处理装置，工艺流程详见图5。

油漆渣、油泥、油棉纱和废油漆桶经破碎、混合均化后，由螺旋输送装置进入回转式无氧热解炉，有机物在间接加热的无氧热解炉内受热分解产

生热解气和热解残渣。热解残渣经无氧热解炉尾部的水冷出渣装置和磁选装置除铁后，由输送装置进入等离子体熔融炉实现玻璃化处理。热解气焚烧产生的热能回用于无氧热解炉，无氧热解炉产生的部分烟气循环部分烟气进入二燃室再次燃烧。等离子体熔融炉产生的烟气经二燃室再次燃烧后进入烟气净化系统处理。

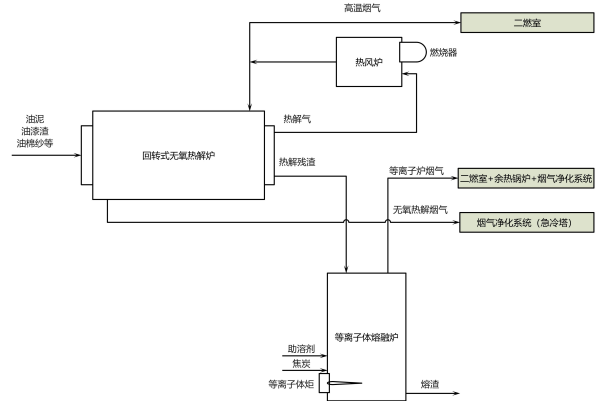


图5 无氧热解炉和等离子体熔融炉协同处置项目工艺流程图

无氧热解炉常用于废轮胎、废塑料、油泥等资源化利用领域，用于制取热解油、碳粉等产品。因此，无氧热解炉和等离子体熔融炉协同处置技术应优化应用场景，应调研和论证拟协同处理物料的热解特性和熔融资源化特性，才能实现协同价值最大化。

2.5 回转窑焚烧耦合等离子体熔融综合处置危险废物

目前，国内危险废物回转窑综合焚烧炉产生的灰渣量大，残渣的热灼减率高，稳定化固化填埋成本高。因此，依托现有回转窑焚烧炉，开发和应用在线实时的等离子体熔融耦合装置，使焚烧灰渣转变成玻璃态熔渣，降低焚烧综合运行成本、等离子体熔融投资和运行成本，正成为产业研究和工程应用的热点。

据了解，西安和佛山采用回转窑焚烧炉耦合等离子体熔融技术，分别建成运营了3万吨/年、1万吨/年的商业化装置。图6为回转窑焚烧炉耦合等离子体熔融的装置示意图，采取等离子体熔池取代回转窑焚烧炉尾部水封出渣机的方式，实现焚烧残渣的玻璃化处理。

多种类有机危险废物综合处理首先经历回转窑焚烧阶段，然后焚烧残渣从回转窑窑尾直接进入

等离子体熔池进行玻璃化处理。回转窑焚烧阶段的物料成分、工艺条件和参数波动会引起焚烧残渣含碳量升高，甚至出现大分子有机物。回转窑焚烧过程的工艺波动会引起耦合等离子熔融工艺模式和操作条件的剧烈变化，会导致熔融过程偏离工艺意图和要求。因此，回转窑焚烧炉耦合等离子体技术的机理和影响因素有待进一步研究，消除两者之间相互干扰的不利因素，才能有效提高系统的工艺可靠性。

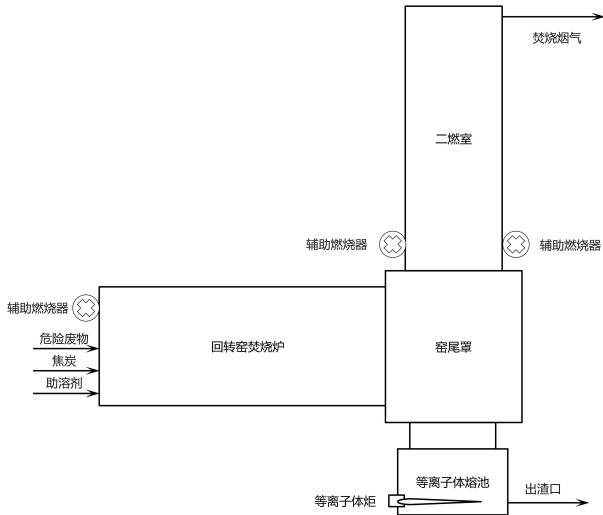


图 6 回转窑焚烧炉耦合等离子熔融装置示意图

2.6 其他等离子体处理技术

据了解，国内某公司正开展回转窑焚烧炉协同等离子体气化熔融一体炉处置的工程示范和运营探索，回转窑焚烧炉与等离子体气化熔融一体炉集中并列布置，两者共用废物预处理系统、烟气净化系统和公用工程，如此可实现两种窑炉的工艺集中运行管理，降低设备投资和运行成本。

《危险废物焚烧污染控制标准》2020 版规定，每台焚烧炉宜单独设置烟气净化装置。目前，危险废物等离子体处理尚无专项技术规范、污染控制标准可遵循。目前危险废物等离子体处理设施的建设项目环境影响评价、设计与施工、竣工验收、排污许可证申领及运行过程中的污染控制和环境管理只能借鉴和参考焚烧污染控制标准。因此，回转窑焚烧炉与等离子体气化熔融一体炉协同共用一套烟气净化系统，尚缺乏一定的政策依据，急需有关部门编制出台等危险废物离子体处理技术规范或污染控制标准。

3 国内等离子体处理技术的综合对比

国内已经工业化示范应用的等离子体处理技术或多或少存在电耗高、处理量小、工艺设备故障多、综合运行成本高的问题，表 1 对这些等离子体处理技术的优缺点进行了详细的比较。

表 1 国内等离子体处理技术的应用对比

序号	等离子技术	示范项目应用场景	能耗	可靠性	运行成本	缺点	优点	备注
1	裂解炉	氟化工废物处置	高	差	高	裂解过程的机理不明，裂解炉难以放大，工业化应用的经济性差。	适合低放射性废物处置、废化学武器销毁。	
2	熔融炉	垃圾焚烧飞灰玻璃化处理，危废焚烧灰渣和表面处理污泥玻璃化处理。	高	高	高	不适合焚烧灰渣的玻璃化处理，不适合一般污泥、粉尘、废渣的玻璃化处理。	贵金属催化剂冶炼回收的环境和经济效益显著。	
3	固定床气化熔融一体炉	炼化企业自建配套危险废物处理设施，以精馏残渣、废活性炭、油泥、废树脂、有机废液为主；第三方危险废物综合处置服务	适中	适中	适中	物料适应性不强，工艺和设备存在缺陷，有待进一步发展完善。	气化发电效率高，大型化工园区集中处理热电联产的经济效益可观。	应优化气化炉选型设计，增强物料的普适性，才能有效提高工艺的可靠性和经济性。

4	气化熔融分体炉	第三方危险废物综合处置服务	高	低	高	传统气化炉不适合危险废物综合处理,系统热效率低,等离子电耗高,生产作业率低。	应根据综合处物料的气化熔融特性,研究分体炉工艺反应过程和机理,优化分体炉选型、结构和工艺设计。
5	无氧热解协同熔融炉	制造企业自建配套危险废物处理设施,以油漆渣、油泥、油棉纱和废油漆桶为主	高	适中	高	无氧热解残渣的特性波动会导致等离子体熔融炉工况恶化,等离子熔融电耗高,烟气净化难以平衡。	适合特定有机类固体废物的资源化,需优化应用场景。应分别设置独立的烟气净化系统。
6	回转窑焚烧耦合熔融炉	第三方危险废物综合处置服务	适中	低	高	两者相互制约,工艺可靠性差,生产效率低。	投资小,综合运行成本高。适合处理焚烧特性稳定、单一来源的废物。
7	回转窑焚烧协同气化熔融一体炉	第三方危险废物综合处置服务	适中	适中	低	烟气净化难以平衡	投资小,运行成本低,集中管理,危险废物可分类分质处理,经济效益好。应分别设置独立的烟气净化系统。

4 结语

等离子体处理技术工业化应用的难点在于如何利用等离子体作为危险废物热处理化学反应的高活性物种,提高热处理化学反应速率,减少传统助燃剂、气化剂用量,降低烟气排放总量,而非简单地将其作为一种优质热源。其次,如何提高等离子体热处理反应炉的工艺可靠稳定性,也是决定等离子体处理技术经济性的关键。

综合分析国内等离子技术应用可知,固定床等离子体气化熔融一体炉和回转窑焚烧协同等离子体气化熔融炉的电耗、工艺可靠性和综合运行成本相对较好,具有较大的应用发展前景。但是,仍需加强核心反应器结构优化设计,充分发挥等离子体高反应活性的优势,增强物料的普适性;应借鉴类似热化学处理技术的成功应用经验,完善等离子体处

理工艺流程,提高系统的可靠稳定性。

因此,等离子体气化熔融一体炉技术应开展联合应用,与现有危险废物处置回转窑焚烧炉结合,对危险废物进行分类分质处理,充分发挥等离子体气化熔融在废转能、大型化应用方面的优势。其他等离子体处理技术,应根据不同地区、不同种类危险废物的热处理特性,优化应用场景,方能提高其技术经济性。

参考文献

- [1] 黄革,杨华雷,雷金林等. 等离子体技术在危险废物处理中的运用[J]. 环境科技, 2010, 23 (S1):40-42
- [2] 赵永峰,李清海,张衍国等. 湍流化床气化焚烧炉在造纸行业的应用探索[J]. 中国设备工程, 2020 (4):238-239
- [3] 吴向阳,仰榴青,储金字等. 低温等离子体处理废液技术[J]. 化工环保, 2002 (2):111-114

集团要闻

东方自控中标首个医药应用类洁净厂房自控工程项目

9月8日报道。近日,东方自控成功中标辽宁盘锦健凯自控工程项目,中标内容涵盖综合楼、研发中心、制造中心、环氧车间、危险品库等相关自控设备的供货、安装、调试等方面。辽宁盘锦健凯自控工程项目系医用药用聚乙二醇及其衍生物产业化与创新应用成果转化项目,该项目的成功中标,标志着东方自控在医用、药用洁净厂房领域迈出了坚实的一步,对进一步夯实洁净厂房建设基础、丰富洁净厂房产品线具有积极的推动作用。

来源:东方电气网

柔性作业车间分批调度问题优化研究进展

石致远^{1,2} 闫富乾² 张剑² 李晋航¹ 王立闻¹

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2.西南交通大学, 成都 610031

摘要: 为适应批量生产模式对车间调度的需求转变, 对柔性作业车间分批调度问题进行了综述与展望。首先从问题描述、求解策略两个方面对柔性作业车间分批调度问题进行介绍;接着从等量分批和柔性分批两种分批方式的角度综述了当前柔性作业车间分批调度问题在国内外的研究现状;最后提出了柔性作业车间分批调度问题尚需深入研究和完善的问题, 对未来研究工作提出了建议。

关键字: 柔性作业车间; 分批调度; 批量划分; 排序优化

中图分类号: TH165

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0011-04

Research Progress on Batch Scheduling Optimization of Flexible Job Shop Problem

SHI Zhiyuan^{1,2}, YAN Fuqian², ZHANG Jian², LI Jinghang¹, WANG Liwen¹

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

2. Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract: In order to adapt to the demand transformation of batch production mode for job shop scheduling, the batch scheduling problem of flexible job shop is summarized and prospected. firstly, introduces the flexible job shop batch scheduling problem from the two aspects of problem description and solution strategy; secondly, summarizes the current research status of flexible job shop batch scheduling problem at home and abroad from the perspective of equal batch and flexible batch; and finally puts forward the problems that need to be further studied and improved, Suggestions for future research work are put forward.

Key words: flexible job-shop scheduling problem; batch scheduling; batch splitting; sorting optimization

在智能化车间构建及生产过程中, 为了提高经济效益, 需要对车间内的相关资源进行合理调度、调节和控制, 即为生产调度。随着自动化和信息化的深度融合, 涵盖制造工艺、管理科学、信息管理、自动化等多个学科的先进制造模式被剔除, 这些先进制造模式通过整合整个生产过程中的所以生产资源并将其合理分配以达到企业要求^[1]。而车间生产调度的作用就是为了合理分配车间资源以提高经济效益, 在满足车间约束的前提下达到最大的生产效益, 其中合理分配车间资源包括为工件安排合

理的生产调度方案, 为工序选择合理的加工机器方案, 因此无论制造模式如何发展, 车间生产调度仍然是其核心组成部分。

车间调度作为一项系统工程, 传统的研究问题主要分为流水车间调度问题(Flow-shop Scheduling Problem, FSSP)和作业车间调度问题(Job-shop Scheduling Problem, JSP), 大型发电装备的加工车间主要以离散制造模式为主, 属于作业车间调度问题, JSP问题可表达为多个产品在多台设备上加工, 每个产品有特定的工艺路线, 每个产品加工的

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 四川省重点研发项目: 大型复杂装备制造设计制造运维一体化工业互联网平台; 项目编号: 2021YFG0039。

作者简介: 石致远(1989—), 男, 2016年毕业于西南交通大学机械制造及其自动化专业, 硕士, 工程师。现在西南交通大学工程博士研究生在读, 就职于东方电气集团科学技术研究院有限公司主要从事智能制造系统规划及数字化车间建设相关工作。

顺序及每道工序的工时是确定的, 通过安排产品在每台设备上的加工顺序, 使得某个或多个指标最优。JSP 问题作为经典的调度问题之一, 已被证明为典型的非确定性多项式(Non-deterministic Polynomial, NP) 难题^[2]。作为作业车间调度问题的扩展, 柔性作业车间调度问题(Flexible Job-Shop Scheduling Problem, FJSP) 打破了 JSP 机器固化的约束, 更加符合实际生产需求, 是当前车间生产调度领域的重要研究方向^[3-5]。

然而 FJSP 的调度优化研究大多数是基于单件调度, 在实际生产过程中, 为提高产品质量和降低成本, 往往采用批量的生产模式^[6]。FJSP 虽然能以将某批产视作整体的方式对排序和机器选择等子问题进行求解, 但在批量生产中批次的划分、单批次下子批次的划分对完工时间等目标的优化影响较大, 为此 FJSP 被拓展为柔性作业车间分批调度问题(Flexible Job-Shop Batch Scheduling Problem, FJBSP), FJBSP 的优化研究对于指导实际生产、缩短工件完工时间、提高机床利用率、降低车间能耗等具有重大现实意义^[7]。近年来由于批量的生产模式愈发普遍, FJBSP 的相关研究也逐渐深入, 取得了较大进展, 形成了许多解决问题的方法和理论, 本文首先从问题描述和求解策略对柔性作业车间分批调度问题进行介绍, 接着根据分批方式的不同介绍国内外学者在柔性作业车间分批调度问题上的研究现状, 最后对柔性作业车间分批调度问题的研究发展趋势进行展望。

1 柔性作业车间分批调度问题

1.1 问题描述

柔性作业车间分批调度问题可以描述为有 N 类工件需要在 M 台机床上进行加工, 每类工件的数量为 R , 并且每类工件有多道工序, 能加工每道工序的机床有多台, 每道工序的加工时间随机床性能差异而不同, 每类工件可以分为多个子批在不同机床上加工, 各个子批量作为一个整体处理, 包括加工、转运等。最终的优化结果是在满足所有约束的条件下生成能指导实际生产的方案, 该方案能优化指定的目标函数, 如最大产能、设备利用率、在制品数量、生产成本等。

柔性作业车间分批调度问题在研究时, 需要满

足以下的假设和约束:

(1) 各机床在任一时刻只允许加工一个工件; 任何工件只有在上一道工序完成后才能进入下一道工序;

(2) 所有工件必须在紧前工序加工完成后才开始紧后工序的加工; 在同一时间内, 每台机床最多只能加工一个工件;

(3) 同类工件被分批后各批次下的工序没有紧前紧后工艺约束;

(4) 工序的加工时间确定; 工序开展过程中是连续状态, 即一旦开始不能中断, 只有当该工序全部被加工完成后, 才能加工另一批工件;

(5) 分批后的工件作为整体处理, 只有在该批所有工件被加工完成后才开始下批工件的加工;

(6) 在零时刻任意机器都可加工任意批次的任意工件;

(7) 分批约束, 即各类工件的子批数量之和应该等于该类工件的工件总数;

(8) 工艺约束, 即一个工件的紧后工序的开始加工时间应该要大于或等于紧前工序的加工结束时间。

1.2 求解策略

柔性作业车间分批调度问题根据问题特性可以分解为三个子问题: ① 各类工件分批方案的划分; ② 分批后子批工件工序加工顺序的确定; ③ 分批后子批工件工序加工机器的选择。

子问题 1 是柔性作业车间分批调度问题的特征, 即分批方案的求解, 其解决方案可分为等量分批和柔性分批。等量分批是指一类工件被分为数量相同的多个子批, 若工件数无法整除则由最后一批多出或缺少工件数, 这种分批方式操作简单, 求解效率高, 但由于子批数量被确定后, 各子批的批量即被固化, 会导致各子批批量无法根据机床负荷进行柔性调整, 从而导致解空间变小, 难以寻得最优解。柔性分批是指一类工件被分为具有柔性批量的多个子批, 这种分批方式能够根据机床负荷柔性调整各子批数量, 能够有效降低机床空闲等待时间, 平衡机床负荷, 缩短生产周期, 但这种方式由于解空间大, 会降低算法的搜索效率。

子问题 2 和子问题 3 的组合实为柔性作业车间调度问题, 即调度方案的求解, 而根据分批方案和

调度方案优化模式的不同,被分为集成优化和分层优化。集成优化是指采用集成化编码的思想将分批方案和调度方案集成优化,这种优化方式缺乏对调度方案的深度搜索,难以寻得调度方案的最优解。分层优化是先对工件的分批方案进行搜索,再去深度搜索各分批方案下的最优调度方案,但目前现有研究均为集成优化方式,尚未见有分层搜索优化的相关研究。

2 柔性作业车间分批调度问题研究现状

由于批量生产模式的普及,柔性作业车间分批调度问题引起了国内外学者的广泛关注,Low^[8]等首先通过仿真实验验证了工件通过分批处理,能有效减少机床的闲置等待时间,提高机床利用率,缩短工件最大完工时间。但针对如何对工件进行分批,以及如何确定子批数量并未给出成熟的解决方法。随着研究的深入,工件的分批方式可分为等量分批和柔性分批两种,本文将从这两个方面对国内外研究现状进行介绍。

2.1 等量分批

在国内研究方面,学者潘全科等^[9]首先以优先生产周期为目标,研究了多工艺路线的批量调度问题,提出了一种基于工序优先级的调度算法,得到了全局优化的批量调度算法。孙志峻等^[10]提出了一种将工件等量分批调度的遗传算法,使批次划分和子批的加工顺序能同时得到优化,并用仿真实验验证了算法的可行性。屈新怀等^[11]针对多目标柔性作业车间分批调度模型复杂的子批量工序排列,设计了基于工件、工序和批量的矩阵编码和解码方法,进而提出了种群多样性可控的粒子群分批调度算法,并通过算例验证了算法的有效性。曾强等^[12]针对多目标等量分批柔性作业车间调度问题,构建了一种以完工时间最短、生产成本最低为优化目标的多目标等量分批柔性调度集成优化模型,提出并设计了一种改进的非支配排序遗传算法对模型加以求解。徐本柱等^[13]针对柔性作业车间分批调度问题,用试探法进行批次划分,提出工序可并行的车间调度算法。黎英杰等^[14]针对多层级装配作业车间调度问题,基于等量分批策略提出了该类车间基于可行域搜索的遗传算法。

在国外研究方面,Wong等^[15]将装配关系和批

次分割问题考虑到作业车间调度问题中,以最大完工时间为优化目标,研究了批次流技术,并提出了混合遗传算法和混合粒子群算法来求解。Lei等^[16]考虑在一个具有一致子地段和运输的作业车间中的批量流问题,以最小化最大完工时间为目标函数,提出了一种改进的人工蜂群算法来求解。Buscher等^[17]针对作业车间调度问题中的批次流问题提出了整数规划公式,该公式描述了单个子批次的加工动态,同时能确定机器进度和子批次大小,但只适用于小规模实例。Zhao等^[18]以最小化最大完工时间为目标函数,研究了具有禁止间隔的替代机器上的批量拆分调度问题,并提出了基于差分进化和遗传算法的混合并行算法来求解。Alyne等^[19]通过提出了一种新的混合整数规划(MIP)公式,解决了水果、乳制品等生活中常见的批量调度问题。

2.2 柔性分批

在国内研究方面,白俊杰等^[20]为了解决多目标柔性作业车间分批调度问题,提出了一种基于粒子群算法的多目标柔性分批调度算法,提出了一种基于游标的柔性批量分割方法,并采用一种批量分隔与加工工序融合的编码方式,让分批方案与调度方法集成优化。王云等^[21]为了解决柔性作业车间中小批量工件的分批调度多目标问题,构建了以制造工期、加工成本、拖期惩罚、批次数量和机床总负荷为优化目标的柔性作业车间多目标调度模型,并应用改进的强度 Pareto 进化算法求解。王万良等^[22]提出了一种基于差分进化算法的多目标柔性批量调度算法,设计了基于关键路径的动态随机搜索和随机变异相结合的局部搜索策略。刘雪红等^[23]提出了一种基于改进候鸟算法的柔性作业车间分批调度问题,设计了精英分批策略和可行领域结构两种策略用于提高算法的搜索效率。王全武等^[24]在作业车间环境下根据加工过程中的机器负荷,采用可变分批方案提出非混排多处理机组合生产批量调度模型,并提出改进头脑风暴算法求解。

Chan和FTS等^[25]首先定义了批次拆分问题,并提出一种改进遗传算法来验证不同规模下的批次分割效果,结果表明分批技术能有效提高车间生产效率。Andrzej和Frank^[26]针对具有批量流和批量的柔性作业车间调度问题建立了数学模型,并提出一种两阶段优化算法来求解,实现了混合整数线性

规划、约束规划和基于图的综合模型。Soroush 等^[27]将多目标梅花鹿算法与并行非支配排序遗传算法 II 相结合,提出了一种混合多目标元启发式算法。Chen JC 和 Chen TL 等^[28]提出一个混合整数非线性规划模型,该模型能同时确定最优批次分割和批次分配决策,并提出一种自适应混合遗传算法解决带有批次分割的容量分配问题。

3 柔性作业车间分批调度研究存在的问题与展望

柔性作业车间分批调度问题经过近年来研究的不断深入,其理论与求解方法已经有了一定基础,但仍存在一定不足。

(1) 多数研究针对分批方案中的批次批量划分,仍然采用的是等量分批方式,这种分批方式首先由于各工件子批批量的固化会缩小分批方案的解空间,其次由于分批方案的缩小也会导致调度方案解空间的缩小,因此等量分批方式在全局范围内难以寻得较优解。而在柔性分批方式中,虽然该方式能够根据机器负荷柔性调整各子批批量,但是目前相关研究中批次批量的选择具有随机性,不具有方向性和指导性,需要进一步研究,如考虑用强化学习方法建立分批决策模型,形成更优的分批策略和机制。

(2) 由于柔性作业车间分批调度问题涉及到分批方案和调度方案的求解,目前研究皆是把二者采用集成化编码的思想进行集成优化,即更新分批方案的同时也更新调度方案,或者在单个分批方案下对调度方案进行小范围的局部搜索,这两种处理方案的搜索深度不够,难以寻得单分批方案下的最优调度方案,使优化陷入局部最优。后续研究可以考虑将分批方案和调度方案分层搜索,以此对各分批方案下的调度方案实现深度搜索。

(3) 如今随着节能减排政策的大力实施,能耗已经成为车间的重要指标,发展绿色制造、减少碳排放、实现碳中和是对企业的硬性要求。在作业车间调度问题中,已经有大量文献考虑能耗指标,提供的相关解决办法也为生产实际提供了指导,但在柔性作业车间分批调度问题的相关研究中暂未有文献涉及到能耗,后续研究应该针对柔性作业车

间分批调度问题的特性和车间时间生产过程中的机床能耗情况,建立起节能分批优化调度模型,为车间提供更有现实意义的指导。

参考文献

- [1] 罗哲,朱光宇. 车间调度问题研究现状与发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2020(23):123-124
- [2] 邱豪. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度研究[D]. 兰州理工大学, 2020
- [3] Zhan J, Deng T M, Jiang H F, et al. Bi-level dynamic scheduling architecture based on service unit digital twin agents[J]. Journal of Manufacturing Systems.2021(60):59-79
- [4] 罗焕,陈浩杰,宋小欣,张剑. 带有缓存约束的作业车间调度求解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10):2880-2888
- [5] Zhang J, Ding G F, Zou Y S, et al. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4):1809-1830
- [6] 吴秀丽,李苏剑,杜彦华. 柔性作业车间多品种小批量调度算法研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(04):424-429
- [7] 张静,王万良,徐新黎,王海燕. 基于改进粒子群算法求解柔性作业车间批量调度问题[J]. 控制与决策, 2012, 27(04):513-518
- [8] Low C Y, Hsu C M, Huang K I. Benefits of lot splitting in Job-Shop scheduling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(9/10):773-780.
- [9] 潘全科,朱剑英. 多工艺路线的批量生产调度优化[J].机械工程学报,2004,40(4):36-39.
- [10] 孙志峻,安进,黄卫清. 作业车间多工艺路线批量作业计划优化[J]. 中国机械工程, 2008, 19(2):183-187
- [11] 屈新怀,刘栋,丁必荣. 柔性作业车间分批调度的多样性可控粒子群优化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(01):121-130
- [12] 曾强,沈玲,杨育,宋红娜. 多目标等量分批柔性作业车间调度集成优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(16):237-243
- [13] 徐本柱,吉靖,费晓璐. 柔性作业车间中基于工序分批的调度问题与求解[J]. 中国机械工程, 2016, 27(23):3221-3229
- [14] 黎英杰,刘建军,陈庆新等. 多层级装配作业车间等量分批策略与调度算法[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2020-09-08:1-22
- [15] Wong T C, Ngan S C, A comparison of hybrid genetic algorithm and hybrid particle swarm optimization to minimize makespan for assembly job shop[J].Applied Soft SComputing, 2013, 13(3): 1391-1399

(下转第36页)

基于整数线性优化的蛇形管备料中心智能排料算法研究

李勇¹ 殷庆文¹ 王川² 缪玉鸿² 林瑞琦¹

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 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: 针对目前蛇形管生产过程中原料的高价值特性与高产量特点, 本文提出设计一套基于整数线性优化的蛇形管切割排料算法, 用于提高蛇形管生产的材料利用率。首先, 将蛇形管的切割问题建模成为一个整数优化问题; 其次根据零件和原料的长度和数量生成所有可能的切割模式; 然后将零件的数量约束、原料的数量约束作为整数规划的约束条件建立完整的整数线性规划模型; 最后采用整数线性规划方法求得最优解, 并将优化结果下达到企业的生产管理系统用于调度蛇形管的自动化生产。提高企业的生产效率的同时, 实现了绿色制造, 从而给企业生产带来巨大的经济效益。

关键词: 蛇形管排料; 整数线性规划; 绿色智造

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0015-05

Research on Intelligent Nesting Algorithm of Serpentine Tube Spare Parts using Integer Linear Optimization

LI Yong¹, YIN Qingwen¹, WANG Chuan², MIAO Yuhong², LIN Ruiqi¹

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

2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: In view of the high-value and high-yield characteristics of raw materials in the current serpentine tube production, a nesting algorithm based on integer linear programming which could raise the material utilization in the serpentine tube production is proposed. Firstly, the serpentine tube production problem is modeled as an integer linear optimization problem; Secondly, all possible cutting patterns are generated according to the length and quantity of parts and materials; Then, taking the quantity constraints of parts and raw materials as the constraints of integer linear programming, a complete integer linear programming model is established; Finally, an integer linear programming method is used to obtain the optimal solution, and the optimization result of the nesting algorithm is sent to the manufacturing execution systems of the enterprise for automatic intelligent production. While improving the production efficiency of enterprises, green manufacturing is realized, which brings huge economic benefits to the enterprises.

Key words: serpentine tube nesting problem; integer linear optimization; smart green manufacturing

在中国制造 2025 和双碳目标背景下, 发展资源节约型、环境友好型的智能制造业已成为紧迫要求。随着中国制造业的迅猛发展, 中国制造正在向节能环保、数字化、智能化的方向高速发展, 原来粗放型的企业生产模式已经无法满足日前高质量经济发展的需求。如何提高企业的数字化、智能化

水平, 实现绿色制造是当前企业需要解决的关键问题。

大型清洁高效电站锅炉核心承压蛇形管的制造是发电设备制造企业的一个关键环节。考虑到蛇形管原料的高价值特性以及蛇形管每年高产量的特点, 原材料利用率的小幅提升也能产生巨大的经

收稿日期: 2022-08-31

作者简介: 李勇 (1986—), 男, 2012 年毕业于西安交通大学机械工程专业, 硕士, 工程师。现就职于东方电气集团科学技术研究院有限公司主要从事智能制造系统解决方案、生产运营管理平台研发及数字化车间建设相关工作。

经济效益。因此如何在生成过程中提高原料的利用率是实现大型能源装备绿色制造的关键因素。然而由于生产蛇形管的原料具有多品种、多规格等特点，因此其排料优化是一个非常复杂的优化过程。研究表明：蛇形管的切割排料问题是一个 NP 难问题，其求解的复杂度随待切割蛇形管零件的数量增加而急剧地增大。因此，如何设计一套满足企业生产要求的蛇形管切割排料算法，并建设一套绿色数字化生产线，将排料算法优化的结果下达至企业制造管理系统用于调度生产是能源制造企业亟需解决的关键问题。

通常排料问题可以按照工件的维度分为：一维排料问题，二维排料问题以及三维排料问题。蛇形管的排料问题属于一维排料问题，通常采用整数线性规划的方法进行求解。常见的线性规划求解方法包括：分支定界法^[1-3]、切平面法^[4]、列生成法^[5]、基于模板的方法^[6-8]等。此类问题的求解通常是将约束条件进行松弛得到对应的线性规划问题，然后分别利用广度优先、深度优先等搜索算法得到整数规划下的最优解。由于需要对可行解进行搜索，因此随着问题规模的扩大，问题求解的时间也越长。

排料问题的另一类求解方法则是采用智能优化算法^[9-11]。智能优化算法是一种启发式优化算法，包括诸如蚁群算法、遗传算法^[12]、模拟退火法^[13]、禁忌搜索算法、粒子群算法^[14]等。此类方法通常将排料问题建模成为非线性优化问题，充分利用智能算法寻优的能力逼近排料问题的最优解。智能算法的优势在于可以适用于高维问题，并快速地得到一组可行解，然后通过不断优化迭代得到更好的次优解。因此在很多对于最优性要求不是特别严格的场景中，具有广泛的应用。而智能优化算法的不足之处在于无法得到最优解。

近几年，随着机器学习技术的迅猛发展，基于神经网络的人工智能算法也在排料问题上取得了不少的进展^[15]。基于机器学习的方法通过其强大的特征学习能力，将最优的模式从复杂的模式中选取出来，降低优化算法的维度^[16]。同时机器学习的方法还可以利用其鲁棒性适用于具有随机特性的切割排料问题^[17]。相关文献表明，基于机器学习的优化算法相对于传统的优化算法，其性能具有质的飞跃，求解速度和求得的最优解相对于传统方法高出

一个或多个数量级。

在实际生产过程中，以原材料自身的价值进行计算，材料利用率每提升 0.1 个百分点，一年可以节约近百万元的材料损耗，对大型发电企业而言，具有重要的意义。因此，本项目研究一种能够适应不同规格原料的一维排料优化算法，使得蛇形管生产过程中原料的利用率最大化，从而满足企业绿色制造的需求。

1 蛇形管备件中心绿色智能生产的整体设计

针对目前蛇形管车间存在的手工作业效率低下、设备间互联度较低、物料转运冗余，行车负荷较重，物料管理水平不高，生产均衡性不够等问题。本文提出了一种基于整数线性规划算法的蛇形管备件中心绿色数字化系统建设方案，其详细流程如图 1 所示。该数字化系统以蛇形管的切割排料算法为核心，以蛇形管设计图以及原材料的规格和数量为输入，通过优化算法自动生成生产的最优方案。将切割排料方案下达至蛇形管备料生产调度管理系统，通过数字化系统对管材原料进行自动锯切、加工坡口并去毛刺、对管端进行抛光并打上标识进行数字化管理。不同工序间通过自动上下料系统、翻料系统进行转运，实现蛇形管备件的全过程自动化。

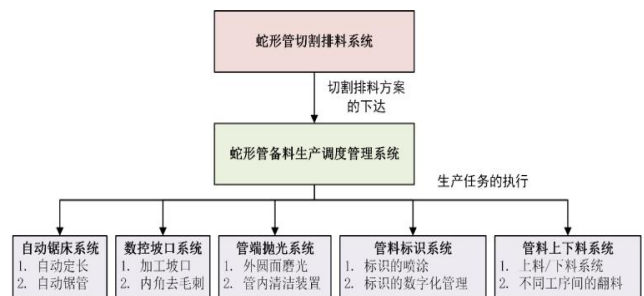


图 1 蛇形管备料中心的自动化建设方案

2 切割排料算法的研究

2.1 切割排料问题的描述

根据蛇形管图纸的设计要求，排料系统的输入为蛇形管需要的不同规格的管材长度以及对应的需求数量。令需求零件的长度为 l_i ，其对应的需求量为 d_i ，其中 i 为需求的零件编号，根据需求零件的总数可知： $i = 1, 2, \dots, M$ ，表示一共有 M 种不

同的零件规格需求。

排料算法的另一个输入为企业提供的不同规格的原料的长度和数量。令原料的长度为 L_j ，其对应的供给量为 D_j ，其中 j 为可以提供的不同规格的原料的编号，根据提供原料的规格的详细情况可知： $j = 1, 2, \dots, N$ ，表示一共有 N 种不同的原料规格需求。

因此蛇形管的排料优化算法就是需要求得如何从上述原料中切出全部的零件，并且使得剩余的原料数最少。问题的描述如图 2 所示。

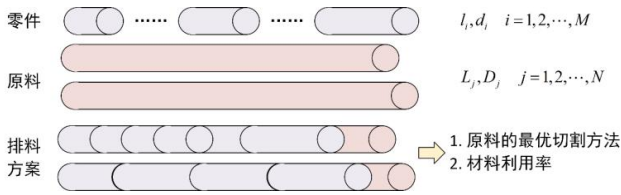


图 2 蛇形管切割排料模型

2.2 切割排料问题的数学模型

为了实现利用率最小，本项目将蛇形管的切割排料问题建模为一维材料的整数线性规划问题。首先根据原料的长度和零件的长度以及数量，生成所有可能的切割模式集合 $P = \{P_{jk}\}$ ，并定义模式参数 α_{ijk} 。其中，切割模式 P_{jk} 表示第 j 跟管料的第 k 种切割模式。由于每一种规格的原料可能存在不同数量的切割模式，因此定义 W_j 表示第 j 种规格的原料的所有切割模式数量，因此切割模式集合的大小可以表示为 $\sum_{j=1}^K W_j$ 。模式参数 α_{ijk} 表示：第 j 种原料的第 k 种模式中切割第 i 种零件的数量，因此第 j 种原料的第 k 种模式的切法可以用向量

$P_{jk} = [\alpha_{1jk}, \alpha_{2jk}, \dots, \alpha_{Mjk}]^T$ 来表示，因此每一种切割模式都需要满足以下的约束条件：

$$L_j \geq \sum_{i=1}^M l_i \times \alpha_{ijk} \quad (1)$$

上述约束表示，对于第 j 种原料的所有切割模式 k ，均需要满足所有切割的零件的总长小于原料

总长。

切割排料的优化目标为浪费的原材料数量最小，因此针对每一种原料的切割模式分别定义对应的损失量为：

$$trimloss_{jk} = L_j - \sum_{i=1}^M l_i \times \alpha_{ijk} \quad (2)$$

假设对于第 j 种原料的所有切割模式 k 需要切割 x_{jk} 根，则切割排料算法的优化目标就是使得所有的原料的损失量最小。因此完整的切割排料算法可以表示为求解以下优化条件

$$\min \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{W_j} trimloss_{jk} \quad (3)$$

并且满足约束条件

$$\begin{cases} L_j \geq \sum_{i=1}^M l_i \times \alpha_{ijk} & j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, W_j \\ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{W_j} \alpha_{ijk} x_{jk} \geq d_i & i=1, 2, \dots, M \\ \sum_{j=1}^{W_j} x_{jk} \leq D_k & j=1, 2, \dots, N \\ x_{jk} \in N, x_{jk} \geq 0 & j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, W_j \end{cases} \quad (4)$$

其中公式中的约束条件 1 表示：原料的每一种切割模式所切割的所有零件总长应当小于等于该原料的原长；约束条件 2 表示：所有原料切割下来的第 i 种零件的数量应当大于等于该零件的需求数量；约束条件 3 表示：对于每 j 种原料，其所有切割模式的用量之和应当小于该原料的供给数量；约束条件 4 表示：所有的切割模式的数量应当为正整数。因此，蛇形管的排料问题可以表示成为满足约束条件，且使得最优条件最小的整数线性规划的问题。

2.3 排料问题的求解

为了实现企业的自动化，首先通过数字化的备料中心，将原料的数据输入排料系统的运行库；其

次通过备料中心与企业 ERP 系统的连接,获取本次生产所需的零件的长度和数量需求;通过将两者数据自动导入排料规划系统,根据上述建立的具有约束条件的整数线性规划问题,采用基于 or-tools 整数线性规划优化工具求解最佳的切割排料方案。最终得到原料利用率最高的切割方案,并将该方案下达至企业制造管理系统用于生产的执行。由于企业实现了蛇形管备料中心的自动化,因此上述优化的结果可以自动化、数字化的完成,从而极大地提高了企业的生产效率。

3 切割排料算法的仿真实验结果

为了验证本项目所提出的切割排料优化算法的有效性,本文随机生成了以下具有 10 种不同规格和需求的零件,以及 5 中不同规格和数量的原料案例,如表 1 所示。其中左侧为零件的需求,右侧为原料的供给。调用本文所提出的整数线性优化算法对上述案例进行切割排料优化。

表 1 切割优化问题

			长度			数量		
零件	长度	数量	原料	长度	数量	原料	长度	数量
零件 1	2482	7	原料 1	9651	1			
零件 2	1823	8	原料 2	9642	15			
零件 3	1547	13	原料 3	10221	3			
零件 4	2824	19	原料 4	10763	9			
零件 5	1391	3	原料 5	9414	4			
零件 6	1961	24						
零件 7	2792	20						
零件 8	1837	11						
零件 9	1729	5						
零件 10	1927	25						

计算得到的最优排料结果如表 2 所示。其中每一行均为一种已知原料的切割模式,切割方式对应不同的零件长度以及在该模式下的切割数量。切割数量表示该切割模式应当执行的次数。

表 2 切割排料的结果

原料长度	切割方式	切割数量
1 9642	1*2482 1*1547 2*2792	4
2 9642	2*1961 1*1837 2*1927	9
3 10221	1*1823 3*2792	1

4	10221	3*2824 1*1729	2
5	10763	1*1823 1*1547 2*2824 1*1729	3
6	10763	1*2482 1*1547 1*2824 1*1961 1*1927	3
7	10763	1*1823 1*1391 2*2792 1*1927	1
8	10763	1*1391 2*2792 1*1837 1*1927	2
9	9414	1*1823 1*2824 1*1961 1*2792	3
10	9414	3*1547 1*2824 1*1927	1

通过数据分析可知:上述案例中,原料的利用率为:99.758%,求解时间 7.704 08 s,可以满足企业的生产要求。

为了进一步验证本文提出的基于整数线性规划的排料优化算法对于一般案例的有效性。本文根据企业的生产数据的特点,采用随机的方法生成了 100 组案例。其中零件的长度范围为 [1200,3000],需求量的范围 [1,30],原料的长度范围为 [9000,11000],供应量的范围为 [1,20]。问题中实际提供的原料总长度约为零件需求总长度的 1.1 倍。本文提出的切割排料优化算法的计算结果如下所示:

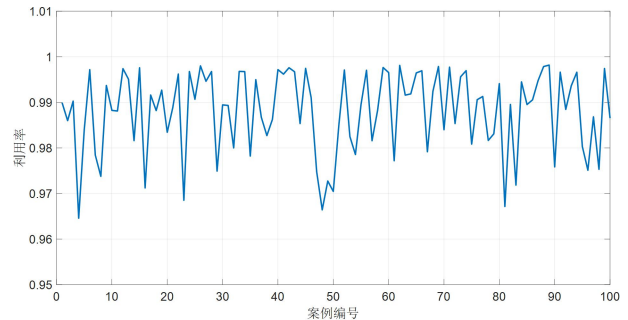


图 3 基于随机案例的优化结果

由于最优结果与优化问题自身相关,因此不同案例之间的材料利用率不能直接进行比较,这里仅比较其均值。上述 100 组随机案例中,有 21 组在 60s 内返回最优值,其他案例均返回了问题的可行解。这是由于蛇形管的排料问题本质上属于 NP-难问题,由于本随机案例的零件和原材料种类较多,因此求解难度较大。然而从结果依然可以看出:上述案例中的可行解均有较高的材料利用率,基本上能够满足企业的需求。统计分析得到:100 组随机案例中的平均材料利用率为 98.8%,最高的材料利用率为 99.8%,最低的材料利用率为 96.5%。虽然并非所有的 100 组随机案例均在给定的求解时间 60 s

内返回最优值,但是其平均材料利用率已经较好的满足了企业的需求,同时大大减少了用于排料的工人的工时。在实际应用过程中,如果遇到了求解时间过长等问题,可以通过将蛇形管的切割排料问题分割成多个小问题单独求解。在保障了企业需求的材料利用率的同时,大大地提高优化算法的计算速度。

4 结语

大型清洁高效电站锅炉核心承压蛇形管的制造不仅需要自动化生产线,而且需要智能的大脑。本文针对蛇形管原料的高价值特性以及蛇形管每年高产量的特点,从生产的绿色制造理念出发,提出了一种基于整数线性优化的蛇形管备件切割排料算法,通过最小化原材料的损耗来实现蛇形管生产的原料利用率最大。实验结果表明:本项目所提出的切割排料算法能够高速高效地获得蛇形管的切割排料方案,对于不同的案例均能得到较好的结果。通过将生成的排料方案发送到企业的生产管理系统,并自动化地安排生产,极大地提高企业的生产效率的同时,实现了绿色制造,从而给企业生产带来巨大的经济效益。此类问题的解决对于提高材料利用率,降低生产成本,提高产品竞争力,实现节能减排绿色生产具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] DELL'AMICO M, FURINI F, IORI M. A branch-and-price algorithm for the temporal bin packing problem. *Computers & Operations Research*, 2020, 114: 104825
- [2] WEI L, LUO Z, BALDACCINI R, 等. A New Branch-and-Price-and-Cut Algorithm for One-Dimensional Bin-Packing Problems. *INFORMS Journal on Computing*, 2020, 32(2): 428-443
- [3] ALVES C, VALÉRIO DE CARVALHO J M. A stabilized branch-and-price-and-cut algorithm for the multiple length cutting stock problem. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(4): 1315-1328
- [4] BELOV G, SCHEITHAUER G. A cutting plane algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with multiple stock lengths. *European Journal of Operational Research*, 2002, 141(2): 274-294
- [5] FURINI F, MALAGUTI E, MEDINA DURÁN R, 等. A column generation heuristic for the two-dimensional two-staged guillotine cutting stock problem with multiple stock size. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(1): 251-260
- [6] SULIMAN S M A. Pattern generating procedure for the cutting stock problem. *International Journal of Production Economics*, 2001, 74(1-3): 293-301
- [7] KOKTEN E S, SEL ?. A cutting stock problem in the wood products industry: a two - stage solution approach. *International Transactions in Operational Research*, 2022, 29(2): 879-907
- [8] CAMPELLO B S C, GHIDINI C T L S, AYRES A O C, 等. A residual recombination heuristic for one-dimensional cutting stock problems. *TOP*, 2021[2022-02-24]
- [9] JANS R, DEGRAEVE Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(3): 1855-1875
- [10] KALLRATH J, REBENNACK S, KALLRATH J, 等. Solving real-world cutting stock-problems in the paper industry: Mathematical approaches, experience and challenges. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(1): 374-389
- [11] SANTOS J L, SANTOS J, FERREIRA M J, 等. Application of the Two-Stage One-Dimensional Cutting Stock Problem in the Steel Industry//2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Cairns, QLD: IEEE, 2018: 683-690 [2022-02-24]
- [12] A genetic algorithm approach for the cutting stock problem. 10.
- [13] JAHROMI M H, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, MAKUI A, 等. Solving an one-dimensional cutting stock problem by simulated annealing and tabu search. *Journal of Industrial Engineering International*, 2012, 8(1): 24
- [14] JIANG J Q, XING X L, YANG X W, 等. A hybrid algorithm based on PSO and genetic operation and its applications for cutting stock problem//Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826): 卷 4. 2004: 2198-2201 卷 4
- [15] PRESTWICH S D, FAJEMISIN A O, CLIMENT L, 等. Solving a Hard Cutting Stock Problem by Machine Learning and Optimisation//APPICE A, RODRIGUES P P, SANTOS COSTA V, 等. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: 卷 9284*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 335-347 [2022-05-09]
- [16] GU S, HAO T. A pointer network based deep learning algorithm for 0-1 Knapsack Problem//2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI). 2018: 473-477
- [17] PITOMBEIRA-NETO A R, MURTA A H F. A reinforcement learning approach to the stochastic cutting stock problem. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2022, 10: 100027

CFB 锅炉燃尽风对氮氧化物排放影响研究

周旭^{1,2} 李维成^{1,2} 周棋^{1,2} 林山虎^{1,2} 韦耿^{1,2} 郭强^{1,2} 郑兴胜^{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: 针对循环流化床锅炉进一步降低氮氧化物排放的需求, 根据循环流化床锅炉NO_x生成转化机理, 研究了床温、氧量、不同燃尽风率对NO_x的排放影响规律, 研究了燃尽风对CO排放及飞灰含碳量的影响, 结果表明: 燃尽风对降低循环流化床锅炉氮氧化物排放效果明显, 燃尽风比例由0%增加至16%, NO_x排放值由137 mg/Nm³降为70 mg/Nm³; 燃尽风在CFB锅炉出现氧量波动时维持氮氧化物的排放稳定性具有积极的作用, 论证了燃尽风技术应用于CFB锅炉低排放性能上具有一定的优势。

关键词: 氮氧化物; 燃尽风; 流化床锅炉

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0020-04

Research on the Influence of the Burn Out Air on Nitrogen Oxide Emission in CFB Boiler

ZHOU Xu^{1,2}, LI Weicheng^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2}, LIN Shanhu^{1,2}, WEI Geng^{1,2},
GUO Qiang^{1,2}, ZHENG Xingsheng^{1,2}

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

2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: Due to the need of circulating fluidized bed (CFB) boiler to further reduce NO_x emission, According to the formation and transformation mechanism of NO_x in CFB boiler. The effects of bed temperature, oxygen content and burn out air rate on NO_x emissions were studied, The effects of burnout air on CO emission and carbon content of fly ash were studied. The results show that burning out air has a significant effect on reducing NO_x emission of CFB boiler. When the ratio of exhausted air increased from 0 % to 16 %, and NO_x emission value decreased from 137 mg/Nm³ to 70 mg/Nm³. Burn out air plays a positive role in maintaining the stability of NO_x emission when the oxygen content of CFB boiler fluctuates, It is demonstrated that the burnout air technology has certain advantages in low emission performance of CFB boiler.

Key words: NO_x; burn out air; CFB boiler

随着我国环境保护形势的日益严峻, 氮氧化物作为主要的大气污染物受到了越来越严格的管控^[1-2]。循环流化床(CFB)锅炉作为目前商业化应用最成功的清洁煤燃烧技术之一, 具有煤种适应性好、负荷调节性能优良、灰渣便于综合利用等优势, 因此得以在我国劣质煤利用领域大规模推广^[3-4]。同时, CFB 锅炉由于燃烧温度低、炉内还原性气氛较强等

特点, 具有 NO_x 排放低的先天优势, 但面对新的 NO_x 国家排放标准, 因此如何进一步控制循环流化床锅炉 NO_x 的原始排放显得尤为重要。

本文在 3 MW CFB 燃烧试验台上开展了降低 NO_x 排放浓度的试验研究, 分析了床温、不同燃尽风比例、氧量等参数对锅炉 NO_x 排放浓度的影响, 同时分析了不同燃尽风比例工况下, 氧量发生变化

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 周旭 (1986—), 男, 2010年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业, 硕士, 高级工程师。现从事电站锅炉清洁燃烧和性能优化等方面工作。

时对锅炉 NO_x 排放稳定性的影响,对比了不同燃尽风比例工况下,飞灰含碳量的变化情况,可为 CFB 锅炉降低氮氧化物排放设计提供参考。

1 试验平台介绍

本试验研究在东方锅炉清洁高效燃烧技术试验中心 3MW CFB 燃烧试验台上开展。试验台简图如图 1 所示,燃烧室高度为 24.5 m,炉膛截面尺寸 0.9m×1.1m,采用平衡通风、M 型布置,试验台配备有煤破碎系统、送风系统、循环冷却水系统、引风除尘系统、DCS 控制系统及 ABB 在线烟气分析仪。试验二次风使用单层二次风,距布风板高度为 4.9 m,从二次风母管引一根燃尽风管至炉膛顶部作为燃尽风使用,燃尽风口距布风板高度分别为 19.4 m、22.4 m,分离器进口烟道中心线距布风板高度为 23.4 m。

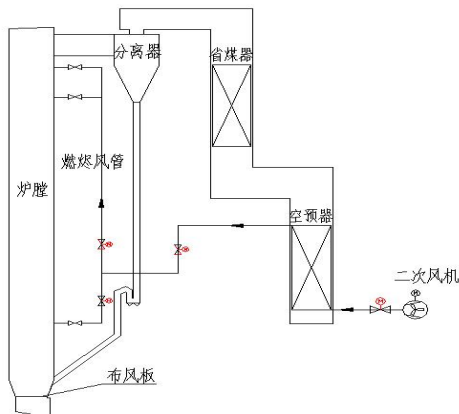


图 1 试验台简图

2 反应机理

煤中的 N 元素在燃烧过程中发生复杂的转化液演变,最终产生氮氧化物来源于燃料中挥发分 N 和焦炭 N^[5-8]。由前期研究燃料氮迁移规律可以得出,挥发分 N 首先生成 HCN 和 NH₃,当燃料处于循环流化床锅炉燃烧温度和燃烧环境时,挥发分中的大多数 HCN 首先生成中间产物 NCO,然后 NCO 再与 NO 反应最终转化为 N₂O,而 NH₃ 则大多数转化为 NO^[9-10]。通过循环流化床锅炉炉膛不同标高处烟气成分测试表明,在循环流化床锅炉中,NO 在炉底位置浓度非常大,随着烟气的上升,NO 又被大量分解,最终烟气的 NO 要比锅炉密相区少得多

^[11-14]。因为 NO 的生成与燃烧氧量成正相关的关系,因此综合考虑进一步降低 NO 排放,需对整个炉膛的过量空气系数加以控制^[15]。

3 试验数据分析

本文重点介绍床温、氧量及不同燃尽风比例对氮氧化物排放的影响规律,从而分析燃尽风在实际工程中应用的可行性,文中所有排放值均为折算至烟气含氧量 6.0%对应排放值。试验煤质资料如表 1 所示:

表 1 试验煤质分析

项目	符号	单位	报告值
全水分	M_t	%	92
空气干燥基水分	M_{ad}	%	5.63
收到基灰分	A_{ar}	%	33.20
收到基挥发分	V_{ar}	%	27.44
干燥无灰基挥发分	V_{daf}	%	47.66
固定碳	FC_{ar}	%	30.14
收到基高位发热量	$Q_{gr,v,ar}$	MJ/kg	17.84
收到基低位发热量	$Q_{net,v,ar}$	MJ/kg	16.99
收到基碳	C_{ar}	%	42.95
收到基氢	H_{ar}	%	3.10
收到基氮	N_{ar}	%	0.86
收到基氧	O_{ar}	%	9.27
全硫	$S_{t,ar}$	%	1.40

3.1 燃尽风率对氮氧化物排放的影响

图 2 示出了不同燃尽风率 NO_x 及 CO 的变化规律,试验主要控制参数一次风比例 55%、床温 880℃、氧量 3.2%,试验过程中维持一次风量、氧量不变,增加燃尽风比例的同时减少二次风量,燃尽风比例变化范围为 0%~16%。由图可以看出,在试验燃尽风比例变化范围内,随着燃尽风比例的增加 NO_x 呈现降低的趋势,CO 排放值在燃尽风比例小于 10%工况时也无明显增加,燃尽风比例由 10%增加至 16%,CO 排放值由 84 mg/Nm³ 增加至 145 mg/Nm³。燃尽风比例为 0 时,NO_x 排放值为 137 mg/Nm³,当燃尽风比例增大至 10.0%时,NO_x 排放值降为 102 mg/Nm³,当燃尽风比例增大至

16.0 %时, NO_x 排放值降为 70 mg/Nm³。

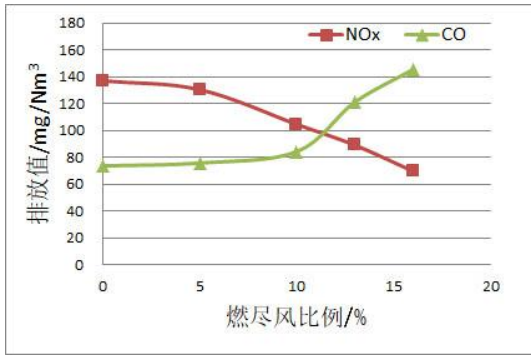


图2 不同燃尽风比例对污染物排放的影响

图3为不同燃尽风工况对NO_x减排比例的影响曲线,以未开燃尽风工况为基准,燃尽风比例为10%时,NO_x减排比例分别为25.5%,燃尽风比例为16%时,NO_x减排比例为49.1%。可以看出,燃尽风在循环流化床锅炉NO_x原始排放控制方面意义重大。

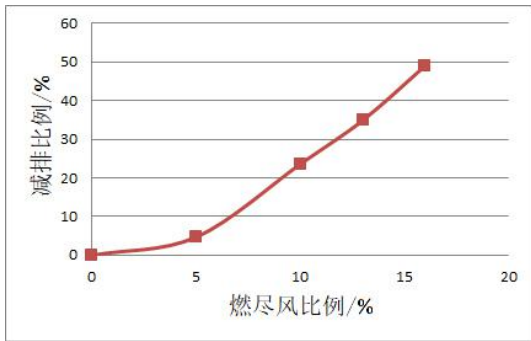


图3 不同燃尽风比例对减排比例的影响

3.2 氧量对氮氧化物排放的影响

图4示出了无燃尽风工况氧量对排放的影响,试验主要参数一次风比例55%、床温910℃,由图可以看出在氧量3.5%以下时,NO_x排放值均随着氧量的增长变化不明显,但随着氧量从3.5%增加至5.5%,则NO_x排放值随着氧量的增加明显增大,因炉膛温度整体水平较高,CO排放值随氧量升高无明显变化。

当氧量为2.5%时,NO_x排放值分别为121 mg/Nm³,当氧量为3.5%时,NO_x排放值分别为138 mg/Nm³,当氧量增加至5.5%时,NO_x排放值高达211 mg/Nm³。以氧量2.5%为基准,当氧量为3.5%时,NO_x排放值增加比例分别为14.4%,当氧量为5.5%时,NO_x排放值增加比例分别为74.7%。

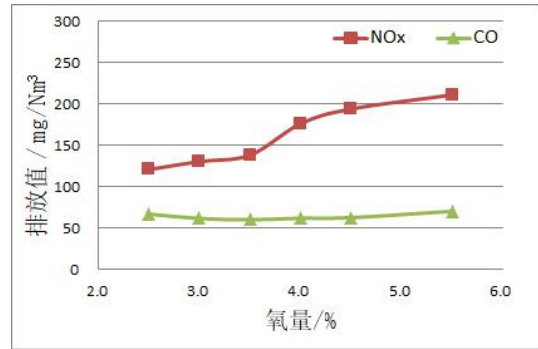


图4 无燃尽风工况氧量对排放的影响

图5示出了16%燃尽风工况氧量对排放的影响,试验主要参数一次风比例55%、床温880℃,与无燃尽风工况相比NO_x排放值变化趋势类似,但排放绝对值较小,由图可以看出在氧量3.5%以下时,NO_x排放值均随着氧量的增长没有明显变化,随着氧量从3.5%增加至4.5%,NO_x排放值随着氧量的增加也呈现升高的趋势。

当氧量为2.0%时,NO_x排放值为78 mg/Nm³,当氧量为3.5%时,NO_x排放值分别为77 mg/Nm³,当氧量增加至4.5%时,NO_x排放值为120 mg/Nm³。以氧量2.0%为基准,当氧量为4.5%时,NO_x排放值增加比例分别为53.8%。受燃尽风影响,燃烧推迟,在氧量3.5%以下时CO排放值为128 mg/Nm³左右,随着氧量从3.5%增加至4.5%,CO排放值降低为85 mg/Nm³。

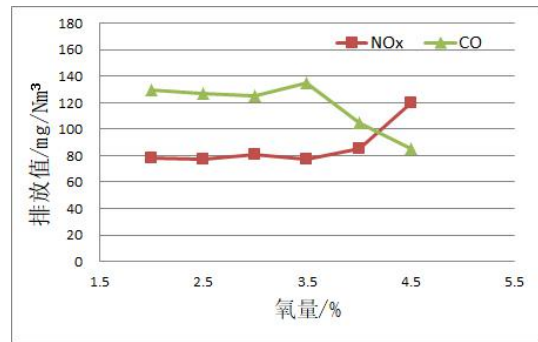


图5 16%燃尽风工况氧量对排放的影响

3.3 不同燃尽风率对NO_x排放稳定性的影响

图6示出了不同燃尽风比例工况,NO_x排放值随氧量变化的对比曲线,由图可以看出,各氧量工况下,16%燃尽风比例NO_x排放值最低、10%燃尽风比例NO_x排放值次之、而无燃尽风工况NO_x排放值最高,同时随着氧量的增加,16%燃尽风比例和10%燃尽风比例工况NO_x排放值更稳定,随

着氧量的增加幅度更小, 排放绝对值也更低。因此当 CFB 锅炉设计燃尽风时, 当实际炉运行出现断煤、调整负荷、风量波动等导致氧量波动时, 更容易维持 NO_x 排放的稳定性, 更有利于机组达到超净排放。

当氧量从 2.5 % 增加至 4.5 %, 无燃尽风工况 NO_x 排放值从 121 mg/Nm³ 增加至 194 mg/Nm³; 10 % 燃尽风比例工况 NO_x 排放值从 94 mg/Nm³ 增加至 120 mg/Nm³; 16 % 燃尽风比例工况 NO_x 排放值从 77 mg/Nm³ 增加至 120 mg/Nm³。因此 CFB 锅炉设计一定的燃尽风比例, 有利于降低 NO_x 的排放, 也有利于氧量波动时 NO_x 排放的稳定性。

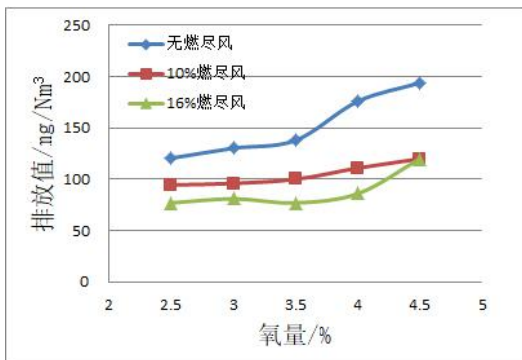


图 6 不同燃尽风率对 NO_x 排放稳定性的影响

3.4 燃尽风对飞灰含碳量的影响

图 7 示出了各工况飞灰含碳量对比情况, 工况 1 燃尽风率 10 %、工况 2 燃尽风率 16 %、工况 3~5 为未投燃尽风工况, 一级灰为锅炉出口旋风分离器灰样、二级灰为布袋除尘器灰样、等速灰为试验过程中尾部烟道飞灰等速取样器取灰样。由图可以看出, 燃尽风的投入对锅炉燃烧效率影响不大, 未造成飞灰含碳量的明显增加。

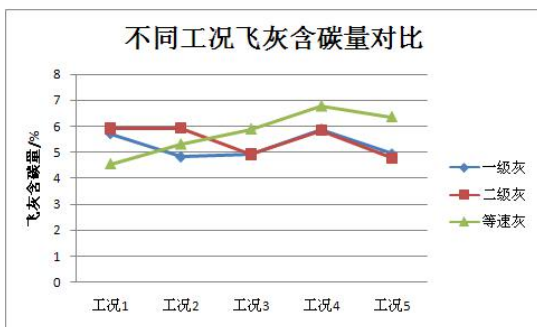


图 7 燃尽风对飞灰含碳量的影响

4 结语

(1) 随着燃尽风比例的增加 NO_x 排放均呈现降低的趋势, 燃尽风比例为 10 % 时, NO_x 减排比

例分别为 25.5 %, 燃尽风比例为 16 % 时, NO_x 减排比例分别为 49.1 %, 因此燃尽风在循环流化床锅炉 NO_x 原始排放控制方面意义重大。

(2) 氧量 3.5 % 以下时, NO_x 排放值均随着氧量的增长变化不明显, 但氧量超过 3.5 % 时, 则 NO_x 排放值随着氧量的增加明显增大。

(3) 10 % 和 16 % 燃尽风比例工况 NO_x 排放值更稳定, 随着氧量的增加 NO_x 增加幅度更小, 排放绝对值也更低, 因此 CFB 锅炉设计一定的燃尽风比例, 有利于降低 NO_x 的排放, 也有利于氧量波动时 NO_x 排放的稳定性。

(4) 燃尽风率 15 % 以下时, 对锅炉燃烧效率影响不大, 飞灰含碳量未明显升高。

参考文献

- [1] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏等. 循环流化床燃烧发展现状 & 前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1):1-13
- [2] LYNGFELT A, MANDL E, LECKNE B Reversed air staging method for reduction of N₂O emissions from fluidized bed combustion of coal[J]. Fuel, 1998, 77(9):953-959
- [3] 梁建红, 黄中. 循环流化床锅炉降低 NO_x 排放浓度试验与优化改造研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(2):55-59
- [4] 马辉, 赵俊平, 张小东. 优化二次风布置降低 NO_x 排放浓度[J]. 电站系统工程, 2015, 31(1):71-72
- [5] 袁建伟, 冯波, 蔡学军等. 流化床煤燃烧过程中 N₂O 的生成与分解机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4):1-7
- [6] 吴波, 庄亚辉. N₂O 直接分解催化剂的研究进展[J]. 环境科学进展, 1997, 5(5):2-15
- [7] 周浩生, 陆继东, 周璇. 燃煤流化床燃烧过程 Fe 及其氧化物在 CO 作用下对 N₂O/NO 转化成 N₂ 的机理[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1):44-47
- [8] 陶炎鑫, 於俊杰, 刘长春等. Co-Mg/Al 类水滑石衍生复合氧化物上 N₂O 催化分解[J]. 物理化学学报, 2007, 3(2):162-168
- [9] 侯祥松, 张海, 岳光溪. 循环灰对 N₂O 热分解催化作用的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3):303-307
- [10] 沈伯雄, 姚强, 刘德昌. 流化床中煤和生物质混烧 N₂O 和 NO_x 排放规律研究[J]. 电站系统工程, 2002, 18(2):51-52
- [11] 金保升, 董长青, 仲兆平等. 城市生活垃圾与煤循环流化床混烧 N₂O 排放规律研究[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(3):44-47
- [12] 周浩生, 陆继东, 周璇等. 流化床燃煤过程降低 N₂O 排放措施评述[J]. 热能动力工程, 2000, 15(85):1-3
- [13] 张磊, 杨学民, 谢建军. 循环流化床燃煤过程 NO_x 和 N₂O 产生-控制研究进展[J]. 过程工程学报, 2006, (6):1004-1010
- [14] 王金枝, 肖明. 循环流化床锅炉脱硝机理及 NO_x 排放控制[J]. 2004, 20(1):22-23
- [15] 殷立宝, 阎维平, 叶学民等. CFB 锅炉燃烧中 N₂O 的生成机理与减排控制[J]. 锅炉制造, 2003(1):7-9

大型 G115 钢弯头成型工艺研究

卢洪 张俊 龚雪莲

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘要: 本文主要阐述了大型G115钢弯头中频感应加热弯管和热挤压成型两种工艺方法, 并进行两种工艺方法的试验验证, 摸索出了G115钢热成型控制温度及热处理工艺, 具有了高等级参数锅炉制造的技术储备。

关键字: G115 钢; 热加工成型; 工艺

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0024-04

Research on the Forming Process of Large G115 Steel Elbows

LU Hong, ZHANG Jun, GONG Xuelian

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: This paper mainly expounds the formation of the large G115 steel elbows by, respectively, medium frequency induction heating process and hot extrusion forming process. The control temperatures and the heat treatment process adequate for G115 steel elbow formation are identified through tests of the two process methods, ensuring the technology preparation for the manufacturing of boilers with high-grade parameters.

Key words: G115 steel; hot working forming; process

随着国家政策以实现碳达峰、碳中和的重大战略目标转移, 发展高参数的锅炉机组是当前燃煤机组建设的发展方向, 目前, 投入商业运行的超超临界机组在主蒸汽管道和高温集箱上均采用P92 钢, 已将P92 钢用至性能极限, 发展更高参数的630 °C超超临界机组锅炉必须采用抗蠕变断裂性能和抗蒸汽氧化性能更为优异的新型耐热钢。

G115 钢是由钢铁研究总院和宝钢共同研发的具有自主知识产权的9Cr3W3Co 型耐热钢, 具有优异的620 °C ~ 650 °C温度区间组织稳定性能, 650 °C温度下其持久强度是P92 钢的1.5倍, 因此G115 钢是630 °C左右主汽管道和高温再热管道的最佳选择。

本文针对管道中G115钢大型弯头的成型工艺进行研究, 摸索出G115钢弯头的两种制造方法, 一种为中频感应加热弯管, 另一种为弯头热挤压成型。

1 中频感应加热弯管

G115 钢大弯曲角度弯头需要采用中频感应加热推弯的方式, 一般来说需要满足弯曲半径 $R \geq 3D$ (D 为弯头直径)。根据国标 GB/T16507 的要求, 需进行弯管工艺评定, 选取评定材料为 G115 大口径管, 规格 $D530 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$, 弯曲半径为 1 800 mm, 弯曲角度 60°, 展开长度为 4 028 mm, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 G115 钢的化学成分

C	Si	Mn	Cr	Co	W	V	Nb	Cu	B	N	Fe
0.097	0.31	0.43	9.11	2.98	2.67	0.18	0.66	0.85	0.013	0.000 8	Bal

收稿日期: 2022-04-12

作者简介: 卢洪 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 就职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司工艺研发部, 主要从事锅炉、压力容器、产品工艺技术与研究、自动化设备集成与应用工作。

1.1 弯管工艺流程

根据 G115 钢的特性，制定相应弯管工艺评定的工艺流程，具体见图 1。参照 SA-335P91 的加热温度并根据 G115 的材料特性，最终中频感应加热

温度选用 1 000 ℃~1 060 ℃进行验证，始弯温度 1 050 ℃，终弯温度 900 ℃。冷却方式选用强制风冷，弯制速度保证弯制温度到位并均匀加热，见图 2。

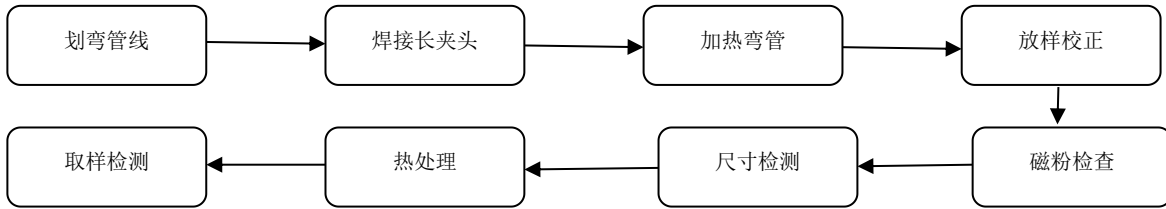


图 1 G115 钢中频弯管工艺流程



图 2 G115 钢加热弯制图

1.2 热处理工艺

G115 钢大管中频加热弯管后，需进行正（淬）火和回火热处理。参照 G115 钢的轧制温度，最终选定正（淬）火温度 1070±15 ℃，保温 150+15 min，风冷，550 ℃以上升温速度≤150 ℃/h。淬火热处

理时，弯管装在并排布置的两个支座上或单个平支座上，需要支撑平稳，并在弯管直段及弯曲区域（约 30 度处）各装一支测温热电偶，保温时间从控温热电偶全部到 1 060 ℃开始算起。

回火温度 780±15 ℃，保温 300+15 min，采用空冷，300 ℃以上升温速度≤150 ℃/h。回火热处理时，弯管装在并排布置的两个支座上或单个平支座上，需要支撑平稳，并在弯管直段及弯曲区域（约 30 度处）各装一支测温热电偶，保温时间测、控温热电偶中最短时间计算。

1.3 外观质量检查

G115 钢弯管后检测减薄率、弯头内外侧最小壁厚、弯头圆度、弯曲角度偏差及表面质量。具体数据见表 2 所示。

表 2 G115 钢 D530 mm×115 mm;R1800 弯管外形尺寸

壁厚测量值		不圆度测量值				
		允许值 (%) : ≤ allowed				
弯管前壁厚 S_0						
断面位置		0°	22.5°	45°	67.5°	90°
外侧壁厚 a		108	107.2	108.5	107	107
内侧壁厚 b		114.7	114.5	114.5	114.8	114.5
D_{min} 测量值		533	533	533	534	533

D_{max} 测量值	535	535	535	535	535
圆度 u (%) ($u = (D_{max} - D_{min}) / D_W \times 100\%$)	0.38	0.38	0.38	0.19	0.38
减薄率 b (%) ($w = (S_0 - a) / S_0 \times 100\%$)	6	6.7	5.6	7	7
线轮廓度 δ	115				

1.4 力学性能试验

G115 钢大口径管采用中频感应加热弯曲 60°后，在 0°、30°处切取管环，进行室温拉伸、高温拉伸、冲击、硬度和金相检验，具体见表 3~6。

表 3 室温拉伸结果

名称	位置	项目	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A(%)	Z(%)
		标准要求	≥480	≥660	≥16 (横向)	-
G115 钢弯管试样	0°	1/4T 值	554/547	696/690	26.0/24.0	71/75
		1/2T 值	570/544	707/687	24.0/24.0	66/66
	30°	1/4T 值	570/558	709/701	26.0/25.5	70/66
		1/2T 值	577/564	707/703	25.5/24.0	70/70

表 4 短时高温拉伸结果

名称	位置	项目	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A(%)	Z(%)
G115 钢弯管试样	0°	1/4T 值 650 °C	280/282	294/298	20.0/21.0	81/82
		1/2T 值 650 °C	287/280	300/295	36.0/33.0	85/84
	30°	1/4T 值 650 °C	304/300	319/315	21.5/22.0	81/82
		1/2T 值 650 °C	293/284	307/302	23.0/23.0	82/81

表 5 冲击试验结果

名称	位置	项目	温度(°C)	冲击吸收能量 KV2(J)
		标准要求	室温	≥27 (横向)
G115 钢弯管试样	0°	1/4T 值	20 °C	86/24/36
		1/2T 值	20 °C	22/31/46
	30°	1/4T 值	20 °C	23/45/38
		1/2T 值	20 °C	37/20/38

表 6 硬度检测结果

名称	位置	全截面硬度 HBW2.5/157.5(外→内)
		标准要求 (195~250HBW)
G115 钢弯管试样	0°	222 220 223 221 221 220 220 221 221 222
	30°	223 218 220 219 218 226 223 219 225 219 220 222 219 220

1.5 金相特征

以 15°增厚侧 1/4T 处为例，切取试样进行金相分析。组织为回火马氏体（与供货态差异不明显），见图 3~图 4。

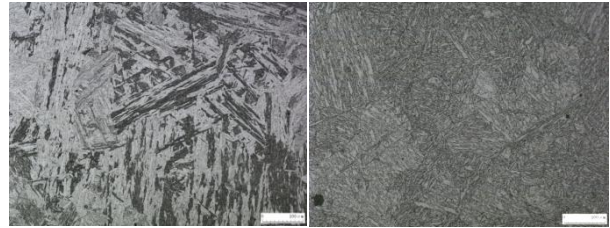


图 3 化学腐蚀 (200×) 图 4 电解腐蚀 (200×)

1.6 数据分析

(1) G115 钢中频加热弯管，各项外观质量数据良好，包括减薄率、圆度等数据优于标准要求，外观成型较好，G115 钢具有良好的弯管加工性。

(2) 弯管力学性能试样，各项力学性能室温拉伸、高温拉伸、冲击、硬度数据都满足标准要求。

(3) 完成了 G115 大管的弯管试验，摸索出了 G115 大管中频弯管的各项参数，为 G115 管道制造积累了经验。

2 G115 压制弯头

管道转角部分需要小弯曲半径的弯头，一般来说需要满足弯曲半径 $R=D$ (D 为弯头直径) 的弯头，这类弯头只能采用压制的方式制造。选用 90°弯头 $D508 \times 90$ mm，材质 G115 进行试验，见图 5。压制弯头毛坯选用规格 $D560 \times 100$ mm，材质 G115。

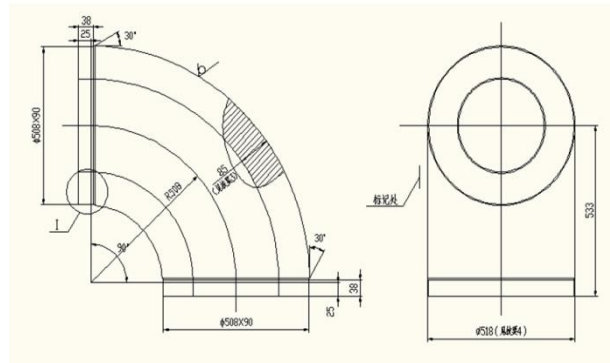


图 5 G115 钢压制弯头

2.1 工艺流程

根据 G115 钢的特性，制定相应的压制弯头工艺流程，具体见图 6。参照 SA-335P91 的压制温度

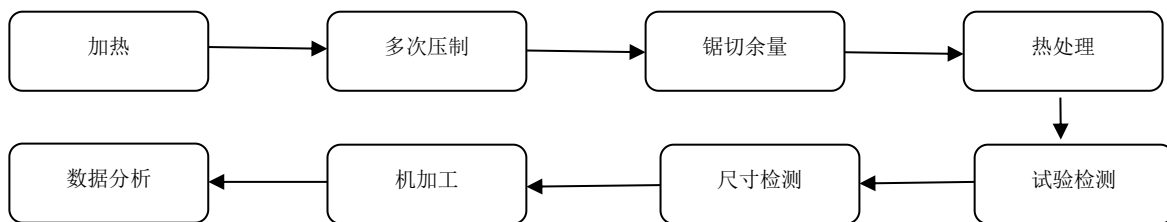


图 6 G115 钢压制弯头工艺流程

2.2 工艺流程

根据 G115 钢的特性，压制分为 5 道，先将加热到位的毛坯排扁，第一次压制，然后再排扁，进行第二次压制，最后进行一道整形，就能够压制出成型尺寸到位的弯头，见图 7。



图 7 G115 弯头压制及成品

2.3 检测及数据分析

为了摸索 G115 钢的最佳热处理规范，进行了 A、B 两种方案。A 方案：正火+回火。B 方案：淬火+回火。热处理后，分别对两种方案的试样进行分别取样，进行力学性能试验见表 7~8。G115 压制弯头试验的各项性能数据，满足标准要求，达到了验证制造工艺的目的。

表 7 力学性能试验数据

试验编号	试验温度 (°C)	位置	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	断后伸长率 A (%)	破坏特征和位置
A1	20	T/4	519	678	25.0	/
A2	20	T/2	529	682	25.0	/
B1	20	T/4	521	676	23.0	/
B2	20	T/2	497	668	21.5	/
A1	650	T/4	267	278	34.0	/
A2	650	T/2	260	280	38.0	/
B1	650	T/4	265	271	33.0	/
B2	650	T/2	262	281	37.0	/

并根据 G115 的材料特性，最终选定加热压制温度 1 000 °C~1 060 °C，最低始压温度 950 °C，终压温度 870 °C，冷却方式选用强制风冷。

表 8 冲击试验

尺寸 (mm) : 10×10			缺口类型: KV2		
试验编号	试验温度 (°C)	位置	冲击吸收能量	侧膨胀值	纤维断面率
A1	20	T/4	130/73/116	/	/
A2	20	T/2	93/81/118	/	/
B1	20	T/4	118/111/86	/	/
B2	20	T/2	96/106/118	/	/

2.4 数据分析

从 A、B 两种试样的检测结果中可以看出，两种热处理方案的试样都是合格的，都满足产品的性能要求。但是，从结果中可以看出，淬火+回火热处理方案的试样，性能更好。对于正火+回火的方案，需考虑采取风冷的方式。

3 结语

(1) G115 钢弯头的成型制造技术，根据弯曲半径的大小选择不同的工艺，一般来说，当弯曲半径 $R \geq 3D$ (D 为弯头直径) 时，选用中频加热弯管工艺；当弯曲半径 $R = D$ 时，选用加热挤压成型工艺。

(2) G115 钢经过热加工后，采取合理的热处理工艺恢复材料性能，最终试样与原材料供货态差异不明显，G115 钢具有良好的热加工性能。

(3) 掌握了 G115 钢弯头成型的两种制造工艺，摸索出了 G115 钢热成型温度及变形率控制方法，弯管工艺评定的各项检测数据优于国家标准，多次压制的弯头通过两种热处理方案对比分析，采取淬火+回火热处理的方式性能更优。

(4) G115 钢弯头的制造工艺试验验证，掌握了 630°C 超超临界机组锅炉主再蒸汽管道的制造工艺，具有了高等级参数锅炉制造的技术储备。

(下转第 55 页)

供热抽汽改造方式及管道布置分析

魏丽君 李建东 黄松 王娟

东方电气(成都)工程设计咨询有限公司, 成都 611731

摘要: 近几年随着火电机组供热和深度调峰需求的提出,具备条件的现役火电机组,因厂制宜地陆续开始实施供热改造,以提高能源综合利用效率,完成节能减排的目标。目前国内300 MW及以上容量机组供热改造多采用打孔抽汽供热改造、低压缸切缸改造技术,本文对上述两种抽汽改造方案的异同,以及抽汽管道的布置方案进行分析讨论,以期能为后续改造项目提供参考。

关键词: 供热改造; 低压缸零出力; 抽汽管道; 补偿器

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)03-0028-05

Analysis of Extraction Steam Heating Supply Retrofit Methods and Pipeline Layout

WEI Lijun, LI Jiandong, HUANG Song, WANG Juan

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

Abstract: In recent years, with the demand of heating and deep-peak regulation of thermal power units, qualified thermal power units have begun to carry out heating retrofit according to plant conditions, in order to improve the comprehensive utilization efficiency of energy and achieve the goal of energy conservation and emission reduction. At present, the heating retrofit of 300 MW and above capacity units in China mostly adopts the technology of drilling steam extraction heating retrofit and low-pressure cylinder cutting cylinder retrofit. This paper analyzes and discusses the similarities and differences between the above two kinds retrofit technologies and the layout of steam extraction pipeline, in order to provide reference for the subsequent projects.

Key words: heating retrofit; lower pressure cylinder zero output; extraction piping; expansion

十三五期间,为了解决三北地区供电和供热的矛盾,国家发改委、环保部和能源局发布《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》,制定出“积极发展热电联产、淘汰落后产能、加快现役机组改造升级”一系列因厂制宜的行动计划,其中特别指出可对纯凝机组进行供热改造,兼具纯凝发电和热电联产两用功能。

2020年9月,习近平总书记在联合国大会一般性辩论上宣布中国将力争2030年前二氧化碳排放

达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和(简称30.60战略目标),煤电进一步成为十四五国家节能减排工作的重点管控行业。国家发改委与能源局在发改运行[2021]1519号“全国煤电机组改造升级的通知”中进一步指出:对具备供热条件且运行未满15年的在役纯凝发电机组纯凝机组开展供热改造,在落实热负荷需求的前提下,“十四五”期间改造规模力争达到5000万千瓦。

随着节能减排政策的相继发布,促使火电企业

收稿日期: 2022-02-14

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,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。

在不增加燃煤及排放基础上，对原机组进行供热抽汽改造：原纯凝机组进行抽汽供热改造；原热电联产机组进行供热扩容改造，以提高机组供热能力和供热期深度调峰能力（电出力调节能力），即能源综合利用效率，实现热电解耦。因机组类型及原厂条件不同，供热改造实施方案也有所不同，目前主要有打孔抽汽供热改造技术、低压缸零出力（切除低压缸）技术、机组旁路供热技术、高背压供热改造技术、光轴供热改造技术等。

杨沛豪等^[1-3]对目前可行的改造技术路线进行了概述，奚守谱^[4]则基于经济性、项目投资、可靠性、设备维护、运行灵活性以及改造工期等方面，得出低压缸零出力供热改造相较光轴改造方案，具有机组供热能力大、运行方式灵活、运行维护费用及工作量较低的优势。

居文平、吕凯等人对高中压缸旁路供热、储热供热、电极锅炉、低压缸零出力供热四种热电解耦技术进行了对比^[5]，同样得出了低压缸零出力改造方案及运行维护费用小，运行经济性高的结论。

东方汽轮机刘勇等人^[6]，依托华能上安电厂的改造实例，分析了东汽机型零出力运行时的特性，经过供热期的运行，证明改造方案稳定可靠。目前，300 MW 及以上容量机组供热改造方案中以低压缸零出力、打孔抽汽供热改造技术实施较多，本文将以前已实施改造项目为例，对供热抽汽改造设计要点进行分析总结，以期能为后续相关改造项目提供参考。

1 抽汽供热改造技术方案

1.1 打孔抽汽供热改造

打孔抽汽供热技术，适用于纯凝和供热火电机组改造。对于调整抽汽，相比于在汽缸缸体上开新孔抽汽方案，在中、低压缸连通管上开孔更易于实施。后者通过在连通管上打孔（或局部更换为异径三通）的方式抽汽，外接高温蒸汽供热管道至热网，用于居民供暖或工业用汽。此技术不仅可用于供热

机组扩大供热量，还可将纯凝机组改造为热电联产机组，降低发电煤耗，增加发电企业非电收益，经济、环保、社会效益显著。该方案前期在 200 MW 及 300 MW 纯凝机组供热改造中应用较多。

表 1 不同容量纯凝机组供热改造的典型抽汽参数^[7]

项目	单位	200 MW	200 MW	300 MW	600 MW
		两排汽	三排汽	两排汽	四排汽
压力	MPa	0.3	0.245	0.85/0.5*	1.1
温度	℃	270	245	335	360

注：*标记为东方机型某项目改造参数。

打孔抽汽技术的蒸汽品质和供汽量取决于发电机组的容量大小及发电负荷，热量调整受到一定限制，运行中能在一定程度上实现热电解耦，调峰灵活性稍差。该方案对于抽汽参数相对较高的 600 MW 及以上机组而言，存在着一定的能源浪费。

1.2 低压缸零出力供热改造

低压缸零出力供热改造即低压缸切缸技术，是在打孔抽汽技术上继续深挖供热能力而来。不同的是，低压缸切缸运行期间，需要采用完全密封的液压蝶阀切除低压缸原进汽管进汽，新增中压排汽与低压进汽管间旁路，仅通入少量（约 20 t/h）的冷却蒸汽，用于带走切除低压缸进汽后低压转子转动产生的鼓风热量，其余排汽进入供热管网，在打孔抽汽基础上，大幅提高了机组供热能力。

低压缸切缸改造中，除了中低压缸连通管（包含供热蝶阀）进行改造外，还需要对机组真空系统、低压缸喷水系统、控制系统实施因厂制宜的改造，并且对低压缸末几级叶片及轮缘强度进行核算，采取更换末级叶片或对末级叶片喷涂升级的措施，以满足低压缸切缸工况下的腐蚀要求。冬季供暖时，通过关闭蝶阀切断通往低压缸蒸汽，直接从连通管抽汽供热，低压缸仅通入少量蒸汽作为冷却蒸汽；夏季蝶阀开启，恢复至纯凝机组工况，灵活性较高。

表 2 300 MW/600 MW 机组供热改造的典型抽汽参数

项目	单位	300 MW	300 MW	660 MW 四
		（纯凝）	（供热）	排汽（纯凝）
压力	MPa	0.6	0.98	0.5
温度	℃	296	350	350

注：表 2 参数选自部分东方汽轮机已实施改造机组。

与改造前纯凝方式相比，两种抽汽方式都将原低压缸进汽直接用于供热，实现了纯凝工况和供热工况的灵活转换，提高了机组供热能力的同时减小了冷源损失，降低了机组发电煤耗（视原机组技术及供热量不同，有10~70 g/kWh不同程度的降低），有利于提高企业的市场竞争力；在供热量不变的情况下，可以降低机组发电功率，在低负荷下能实现深度调峰，一定程度上实现热电解耦。

2 抽汽供热管道系统及布置

2.1 抽汽供热管道系统设置

在上述两种抽汽供热改造的系统设计中，中排至低压缸进口的冷却蒸汽旁路，视选用打孔抽汽或切缸技术中抽汽量的不同而存在差异，抽汽供热管道上的设置则大同小异。该管路上自汽机侧至供热网，依次装设有抽汽逆止阀、快关阀、隔离阀，安

全阀位置可根据现场实际布局确认合理的位置。其中，供热逆止阀是为防止机组压力降低时，抽汽管道内容积流量倒流入中压缸而引起机组超速；抽汽快关阀可防止通向热网首站的供热抽汽管道内压力突然降低时，机组内蒸汽大量泄漏引发的危险；电动隔离阀是供热抽汽管道的总阀门，采暖季辅助调节热网进汽量，非采暖季用以隔离发电机组和热网系统。安全阀可防止极端情况下，中低压缸连管内压力升高，中压缸出现超压的危险。

对于进行抽汽供热改造的机组，管系走向及阀门布置受限于运转层的已有设备设施及运转层结构条件，因此安全阀的数量和位置^[8]、疏水点的设置需要视场地具体条件确定，本文不对安全阀及管道的疏水设置做讨论，仅以已实施的某600 MW等级四缸四排汽机组为例，将抽汽管道的系统设置简化为图1所示：

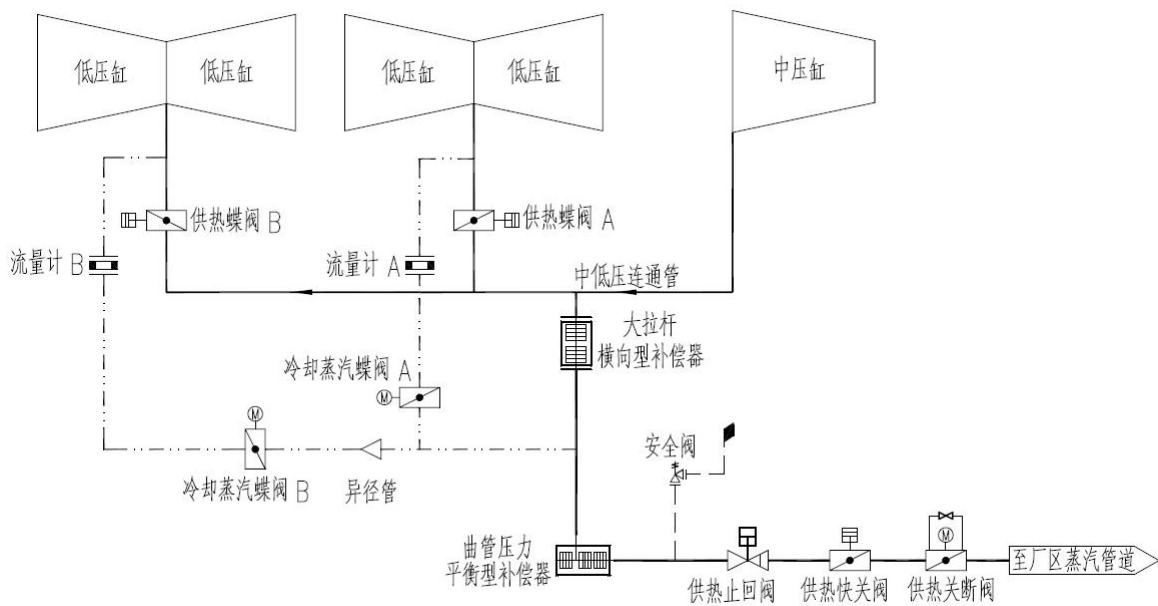


图1 600 MW 等级机组供热改造系统设置

2.2 抽汽供热管道布置要求

新增抽汽供热管道管径规格较大（通常为DN1000~1200），相应的阀门尺寸及重量也较大，根据国内300 MW~600 MW等级机组常规厂房布置，中间层很难有足够的空间可利用，改造方案中多将三道阀门放置于运转层上，便于阀门支撑和运维操作，且改造施工也相对集中。为了避免过多的

占用运转层通行、维护空间，实际改造项目中多采用曲管压力平衡型补偿器来实现抽汽供热管道的空间90°转向，使阀门组能靠近且平行于A轴布置，满足阀门组维护及运转层通行需求的同时，更好的吸收抽汽管道的三向位移。

除了布置美观，操作方便的问题外，新增的抽汽供热管道还需要对连通管及汽机产生较小的接

口推力、推力矩，因此管系需有较优的应力分布；但抽汽供热管道直径大，弯曲半径大，在有限的空间里很难实现管系的自补偿，阀门组前仅设一个曲管补偿器不足以实现管道完全的热补偿和应力需求，因此在连通管抽汽口（或异径三通）处建议另设置一个波纹补偿器，吸收抽汽口热位移的同时，减小抽汽供热管道对连通管、汽机的推力。目前常用的补偿器有大拉杆横向型补偿器和曲管压力平衡型补偿器、球型补偿器。

2.3 抽汽供热管道布置形式对比

以某实际改造项目中的抽汽供热管道参数及布置为例，联通管抽汽口至供热母管固定点分界处的管道走向见图 2。

有关应力计算管系中补偿器的建模方式，cii^[9]中提供了 3 种不同的方式，本文采用复杂模型进行模拟，即在补偿器的两端端板处分别设置 4 根刚性件及附加约束，来模拟真实的补偿器设置。

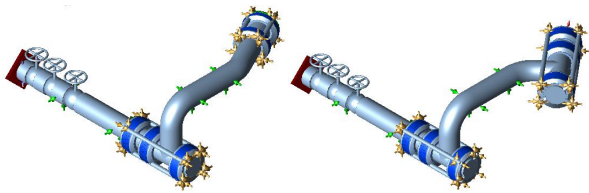


图 2 600 MW 等级机组抽汽供热管路布置

本文将模拟连通管接口处分别采用大拉杆横向型补偿器和曲管压力平衡型补偿器两种情况，假定大拉杆补偿器和曲管补偿器的整体横向刚度相等，各段刚性件重量则根据 D-GD2000 样本中的补偿器整体重量进行分配。

在本文的计算模型中，抽汽接口至转向曲管补偿器之间设置两个 X 向限位支架，曲管补偿器至供热母管分界固定点之间设置两个 Y 向限位支架。大部分已改造机组实际在抽汽接口至转向曲管补偿器之间架空管段会设置 1~2 个支架，如布置受限，仅能设置一个支点时，可能会由于曲管补偿器重量的影响，架空处的支点存在脱空问题，因此需要注意支点的设置位置。

根据某改造项目的抽汽参数，本文模拟的抽汽管道计算温度为 350 °C，计算压力 0.6 MPa(g)，管道安装后采用无损检测方式，即不考虑水压试验荷载。因管道尺寸较大，摩擦系数按 0.1 计入支吊架水平力中。在上述条件下，根据图 2 的计算模型，对两种布置不同的抽汽管道进行冷态（SUS）及工作态（OPE）工况进行分析计算，计算结果见表 3：

表 3 两种抽汽管道布置方式计算结果

对比工况	力/力矩	1 GUIDE	2 GUIDE	3 GUIDE	4 GUIDE	5 ANC	抽汽口		
冷态 SUS	FX N	58	-180	15	5	-41 015	4		
	FY N	0	-4	20	5	43 338	-8		
	大拉杆	FZ N	-23 335	-73 505	-30 520	-73 715	-86 500	-15 732	
	+曲管	MX N.M	0	0	0	0	-36 635	-32 940	
		MY N.M	0	0	0	0	81 640	-17 735	
		MZ N.M	0	0	0	0	161 780	1	
	曲管	FX N	-2 210	7 440	-502	-176	-45 512	-152	
		FY N	0	-191	16	6	43 338	181	
		FZ N	-54 385	-57 380	-28 880	-72 340	-85 960	-13 735	
		+曲管	MX N.M	0	0	0	0	-35 080	-36 565
			MY N.M	0	0	0	0	81 385	60 035
			MZ N.M	0	0	0	0	161 780	-1

		FX N	-4 935	27 925	3 125	7 385	-69 771	-4 835	
		FY N	0	-11 430	-456	226	43 290	11 185	
	大拉杆	FZ N	-10 295	-86 360	-30 775	-73 605	-86 525	-15 755	
	+曲管	MX N.M	0	0	0	0	-36 280	-67 000	
		MY N.M	0	0	0	0	81 650	-75 810	
		MZ N.M	0	0	0	0	161 765	-1 265	
热态 OPE		FX N	-951	23 380	2 920	7 220	-70 150	-3 558	
		FY N	0	-4 618	-302	155	43 305	4 400	
		FZ N	-65 240	-46 185	-29 185	-72 210	-85 990	-13 870	
		+曲管	MX N.M	0	0	0	0	-34 806	-45
			MY N.M	0	0	0	0	81 395	16 345
			MZ N.M	0	0	0	0	161 770	105

根据两种不同补偿器设置方式的计算结果,可以看出双曲管补偿方案对汽机侧产生的推力及推力矩更小,连通管邻近的2个支架荷载分布也更均匀。由于曲管整体结构偏长,在同压力等级、相近横向补偿量下,其长度大约是大拉杆补偿器长度的2倍,整体重量也更重,因此冷态时对汽机侧接口产生的弯矩较大。另外从机组改造费用及检修因素来考虑,较大的结构尺寸,使得曲管的设备采购成本相对较高,安装维护相对较困难。

3 结语

(1)300~600 MW 容量纯凝机组和供热机组可通过打孔抽汽技术、低压缸零出力技术实现热电联供或扩大供热。两种改造技术都能在一定程度实现热电解耦,但零出力改造能够供热最大化,实现较深的深度调峰。改造前,除确定供热参数外,还要结合当地的热负荷需求及机组运行状况,选择适合本厂节能提效的改造方式。

(2)打孔抽汽供热改造与低压缸零出力改造,除是否设置冷却蒸汽旁路的区别外,抽汽供热管道设置要求及布置形式相同。零出力改造下还需要对低压通流部件、喷水系统、控制系统、真空系统等进行相应校核或改造。

(3)对于抽汽供热管道补偿器设置方式的选择,除了需要考虑运转层支撑荷载分布、接口推力(及推力矩)合理外,还需要考虑改造投资及后期

运维成本等因素。根据国内300~600 MW 机组厂房设计特点,采用运转层集中布置抽汽管道及阀组时,缸侧采用大拉杆补偿器的方案较为经济。

(4)抽汽管道支吊架的设置数量及位置,因机组基座尺寸及运转层结构的不同而不同。若厂房内架空段布置较短,仅能设置1个支架,此时支点的位置需要尽量靠近重力平衡点,避免发生脱空现象。

参考文献

- [1] 杨沛豪,刘向辰,蔺健,兀鹏越,寇水潮. 燃煤火电机组灵活性改造技术路线综述[C]. 全国火电机组灵活性改造技术交流研讨会论文集,2018:73-78
- [2] 刘刚. 火电机组灵活性改造技术路线研究[J]. 电站系统工程,2018,34(1):12-15
- [3] 付怀仁,宋春节,丛春华. 燃煤电厂供热改造技术浅析[J]. 区域供热,2019(2):74-78
- [4] 奚守谱. 光轴和切缸改造技术在供热机组的应用[J]. 设备管理与维修,2018(17):105-107
- [5] 居文平,吕凯,马汀山,杨荣祖,谷伟伟. 供热机组热电解耦技术对比[J]. 热力发电,2018,47(9):115-121
- [6] 刘勇,刘涛,李鹏. 330MW 东方汽轮机低压缸零出力改造案例研究[J]. 机电工程技术,2019,48(9):237-242
- [7] 张启林,杨雁,叶东平. 大型凝汽机组供热改造的相关供热系统及布置[J]. 机械工程师,2011(7):69-71
- [8] 李利凯,刘轶斌. 300MW 供热机组采暖抽汽管道安全阀布置型式比较[J]. 能源与节能,2012(5):64-65+81
- [9] COADE, Inc. CAESAR II Applications Guide, 2001 [Z]

关于对压缩空气储能与电站锅炉耦合运行系统的研究

余水龙

东方电气集团国际合作有限公司，成都 611731

摘要：本文提出压缩空气储能系统与电站锅炉系统耦合运行的设想，可有效解决压缩空气储能效率不高的问题，该系统还能充分吸纳新能源所发出的电能，削峰填谷，为电网稳定运行提供坚强支撑。

关键词：压缩空气；储能；压缩空气储能；耦合

中图分类号：TK02

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）03-0033-04

A Study of Air Pressing Energy Storage and Boiler Couple System

YU Shuilong

(Dongfang Electric International Corporation, 611731, Chengdu China)

Abstract: This article creatively proposes a coupling system of compressed air energy storage with power station boilers, which effectively solves the problem of low efficiency, it could help the grid to absorb the electricity fully generated by new energy sources and it can be used for peak shaving and valleys filling, and the grid runs more reliably.

Key words: compressed air; energy storage; compressed air energy storage (CAES); coupling

2019年中国能源消费总量486 000.00万吨标准煤，其中煤炭消费总量280 422.00万吨标准煤，石油消费总量91 854.00万吨标准煤，天然气消费总量39 366.00万吨标准煤，水电、核电、风电消费总量74 358.00万吨标准煤^[1]。从数据来看化石能源占据能源消费总量的76.6%，其中煤炭占据57.7%。根据有关研究，2017年发现在长三角地区空气重污染物来源中电厂和其他工业燃烧设施分别贡献了约46%和45%的SO_x排放，以及59%和26%左右的NO_x排放。电厂及水泥建材+钢铁冶金等工艺过程贡献了约21%和57%的PM₁₀排放，以及28%和52%的PM_{2.5}排放^[2]，从中可以看出煤炭等化石燃料是主要的污染物排放源头。要控制大气污染，必须控制和减少煤炭等化石能

源的消耗，发展清洁的新能源、可再生能源是必由之路，特别是可再生能源中的太阳能与风能。

太阳能和风能最大的缺点是发电具有波动性和间歇性，严重受制于天气与日照情况，不能稳定输出，电网调度困难，弃风、弃光的情况时有发生。2019年，全国风电弃风电量169亿千瓦时，全国平均弃风率为4%；2019年，全国弃光电量46亿千瓦时，弃光率2%^[3]。众所周知储能技术是解决上述问题的有效手段。电能的大规模工业化存储是人类面临的一大难题，大规模储能方面，目前较为成熟的技术主要有抽水蓄能、蓄电池储能和压缩空气储能3种。抽水蓄能电站是一种很好的大量存储电能的方式，然而其建设严格受到地理条件限制，满足要求条件很少。蓄电池储能技术相对成熟，暂时在上述3种储能方式中电能

收稿日期：2022-03-03

作者简介：余水龙（1984—），男，2007年毕业于华中科技大学工程热物理专业，工学硕士，工程师。现在东方电气集团国际合作有限公司工作，主要从事市场和项目管理工作。

转换效率最高，但其工作寿命往往只有2~3年，更新换代成本高昂，且后期处理环境污染严重。相比之下，压缩空气储能系统的建设限制条件较少，对环境友好、综合效率较高，有望成为解决大规模新能源开发利用中诸多问题的最佳选择^[4]。

压缩空气储能主要分为非绝热式压缩空气储能、补燃式压缩空气储能、先进绝热式压缩空气储能(AA-CAES)。根据有关研究传统的压缩所空气储能系统效率为54%，而先进绝热空气储能系统效率可达70%^[5]；为了提高系统工作方式的灵活性，改善系统的效率和适应特殊用途，根据压缩空气储能系统是否同其它热力循环系统耦合，可以分为：①传统压缩空气储能系统；②压缩空气储能-燃气轮机耦合系统；③压缩空气储能-燃气蒸汽联合循环耦合系统；④压缩空气储能-内燃机耦合系统；⑤压缩空气储能-制冷循环耦合系统；⑥压缩空气储能-可再生能源耦合系统^[5]等，国外都已经做了相关研究，但是现阶段都是由于经济性原因，没有得到大规模的应用。张新敬等在文献^[5]中预测传统压缩空气储能系统将向压缩空气储能与其它类型电站（如燃气轮机和燃气蒸汽联合循环）耦合的方向发展，这样既可以提高系统的灵活性，又可提高整个系统的效率和经济性；压缩空气储能与可再生能源的耦合系统可以解决可再生能源的间断性和不稳定性问题，是提高风能、太阳能等可再生能源的容量因子和大规模利用可再生能源的迫切需要，将是压缩空气储能技术的近期主要发展方向。

从压缩储能系统发展来看，要提高压缩储能系统的储能效率，主要是要减少空气压缩与存储过程中的能量损失（主要是热量的损失）或者与其它热力系统循环耦合运行。为此本文创新提出了可再生能源压缩空气储能与电站锅炉耦合运行的新型热力系统，既满足新能源消纳，平滑电能输出；又能储存部分电力用于电网调峰；还能回收压缩空气的热量；最后回收锅炉烟气余热，提高整体热量利用率。

1 压缩空气储能与电站锅炉联合耦合运行原理

压缩过程：把太阳能、风能等发出的不稳定的电、和用电波谷时候的电能用来压缩空气，通过多级压缩，从而降低压缩气体功耗；压缩后高温高压气体进入空、空换热器，用来加热锅炉的一次进风，压缩空气等压冷却；把空气冷却到接近常温，充入储气罐中储存；

膨胀过程：压缩空气从储气罐中导入锅炉尾气的空、空换热器中加热，然后进入空气涡轮做工，回收锅炉尾气的余热；经过多级回热膨胀做工后，乏气排入大气。

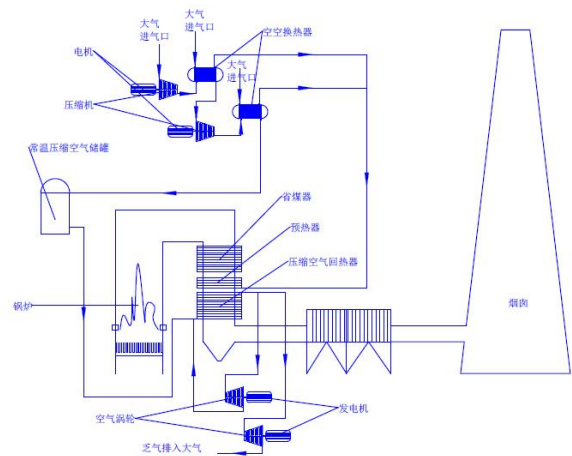


图1 锅炉与压缩空气储能耦合运行示意图

压缩机的电能由新能源电源提供，或者用电波谷时段进行气体压缩；多级压缩可以有效降低压缩空气的能耗，提高压缩空气的压力。压缩空气产生的热量通过空空换热器被锅炉的一次进风回收，压缩空气被冷却到常温后，可以显著提高压缩空气的存储量，降低了存储空间；配备足够的储气容量，以能满足系统的长期稳定运行；当电网负荷需求小时，通过压缩空气把能量储存起来；当电网负荷大时，加大空气涡轮的负荷，增加电力供给；既可以保证吸纳足够的新能源发出的不稳定的电能，还可以起到调峰作用，保证电网稳定。

2 压缩空气储能与电站锅炉耦合运行分析

2.1 能力守恒分析

2.2.1 稳态分析

(1) 压缩空气储能:

假设空气的初始状态为 T_0 、 P_0 ；假设空压机的电功率 P 。全部转化为空气的内能与压力能；经过压缩后空气状态 T_1 、 P_1 ；经过等压冷却到 T_0 、 P_1 ；压缩空气的热量用来加热锅炉的进风，锅炉进风常温、常压进气，吸收 Q_1 热量后，再进入锅炉空气预热器加热到预定温度进入炉膛燃烧。

(2) 压缩空气释能:

压缩空气导入到锅炉尾气加热器，吸收热量 Q_2 ，把储罐中的压缩空气从 T_0 、 P_1 加热到 T_2 、 P_1 ，经过空气涡轮带动发电机发电，产生电功率 P_1 。

在锅炉稳定运行过程中，不考虑损失，如果有 $Q_1=Q_2$ ，即储能系统运行与平衡状态，即可得 $T_1=T_2$ ，最终可以推出 $P_1=P_0$ 。

由于空气储能主要用于消纳新能源所发出的电，并且进行发挥对电网的调峰作用，主要运行于不平衡状态，大部分时间系统运行与储能或者释能状态。

2.2.2 储能状态:

当系统运行于储能状态时候，即 $Q_1>Q_2$ ，这必然对锅炉运行造成影响。极端情况，当空气涡轮不工作时， $Q_2=0$ ，锅炉尾气就可能超温排放，造成能量损失。

当压缩储能系统工作与储能状态时，也是电网电力供应富裕的时候，锅炉需要低负荷运行，可以减少燃料的投放量，同时需要省煤器因设计成具有变工况工作能力，尽量回收锅炉尾气中的余热。

通过压缩空气，把富余的电能储存于压缩空气中。

2.2.3 释能状态:

当储能运行于释能状态时，即 $Q_1<Q_2$ ，此时电网急需电力供应，为了保证锅炉烟气排放温度（过低影响后续尾气处理工艺与烟囱排放后气体的扩散），需要加大锅炉燃料投放，此时锅炉运行于满负荷状态。此时空气预热器也需要设计成适应变工况运行。

此时系统把储存与压缩空气中的转换成电能用于补充电网电力。

2.2 循环分析

压缩空气储能系统循环图如下图 2:

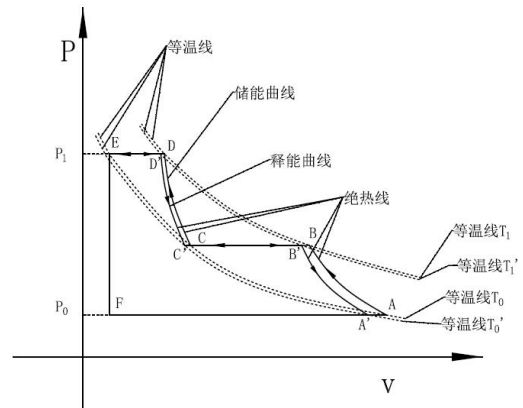


图 2 压缩空气储能循环曲线

压缩储能过程 A-B-C-D-E, 空气经过两次绝热压缩两次等压冷却，最后冷却到常温储存于储气罐中；膨胀发电过程 E-D'-C'-B'-A'最后恢复初始状态 A (P_0 , T_0)。完成一个循环，其中面积 ABCDEF 与 A'B'C'D'EF 的面积差（即刻面积 DD'C'C 与 BB'A'A 之和）为储能与释能之间的差值。

从循环曲线可以看出，发现回热温度 T_1' 对储能系统的系统的效率影响非常大。当回热温度 $T_1'<T_1$ 时，系统理论热效率小于 1；当 $T_1'=T_1$ 时，系统理论热效率等于 1；当 $T_1'>T_1$ 时，理论热效率大于 1，还可以回收锅炉的余热。

3 结语

从能量守恒和热力循环角度分析，系统是可以运行的。从系统的能量守恒角度分析，由于空气经过压缩后会产生高温，在没有很好的绝热措施下，热量将会向周围环境耗散，要想减少压缩空气储能系统的损失热量损失，最好的办法是对热量就行回收利用。锅炉进风温度为大气温度，正好可以用来回收压缩空气产生的高温，对热量进行有效的回收利用；由于我们压缩空气是常温储存，在进行膨胀做工之前，可以从锅炉尾气中吸收热量进行回热，回热后再经过空气涡轮膨胀做工，有效提高压缩空气膨胀做工的效率；压缩空气储能系统通过与锅炉的耦合运行，运行效率得到了大幅提高（理论上实际效率应该大于先进绝热系统效率 70%），另外通过调节空压机与空气涡轮的工作工况，可以完成对储气罐充、放气，从而达到储、释能的目的。

另外从压缩空气的热力循环系统图可以看出,首先为了提高压缩效率,最好采用中间冷却多级压缩的方式,可以显著降低压缩机电能的消耗;同时为了提高压缩空气的能量回用,采用多级回热的方式,提高热力系统的效率。另外,从热力循环图中可以看出回热温度对于热力效率影响非常大,当回热温度 $T_1' < T_1$ 时,系统理论热效率小于 1; 当 $T_1' = T_1$ 时,系统理论热效率等于 1; 当 $T_1' > T_1$ 时,理论热效率大于 1, 还可以回收锅炉的额外的余热。

上述分析都是基于理想化条件进行的,没有考虑到各种损失。实际耦合系统包含锅炉、空气压缩机、换热器、储气罐、空气回热器、空气涡轮发电机组等。过程有很多技术问题有待解决:

- (1) 现在压缩机效率还有待提高,需要开发先进的绝热压缩机,并且减少漏气损失。
- (2) 新设计空、空换热器,回收压缩空气热量。
- (3) 开发大容量的常温恒压储气罐。
- (4) 锅炉重新设计满足变工况运行的省煤器、空气预热器与回热器。

(5) 高效空气涡轮发电机组。

(6) 还有锅炉-压缩空气储能的耦合运行控制,等技术难题。

但是毫无疑问,空气储能是潜力最大的储能技术,空气作为循环介质非常容易获得,是比抽水蓄能还便捷的储能技术。上述提出的锅炉-压缩空气储能系统耦合运行系统,能有效克服单一压缩空气储能运行效率低的问题。

参考文献

[1] 国家统计局[DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A070B&sj=2019>

[2] 黄成, 陈长虹, 李莉等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1858-1871

[3] 国家能源局 [DB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm, 王俊杰

[4] 陈来军, 梅生伟等. 面向智能电网的大规模压缩空气储能技术[J]. 2014, 33 (6) : 1-6

[5] 张新敬, 陈海生, 刘金超等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40

(上接第 14 页)

[16] Lei D, Guo X. scheduling job shop with lot streaming and transportation through a modified artificial bee colony[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(16): 4930-4941.

[17] BUSCHER U. SHEN I An integer programming formulation for the lot streaming problem in a job shop environment with setups [C]//Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. long Kong International Association of Engineers, 2011:1343-1348

[18] Zhao Y W. Wang H Y. Xu X L. et al. A new hybrid parallel algorithm for consistent-sized batch splitting job shop scheduling on alternative machines with forbidden intervals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. 48(9/10/11/12):1091-1105

[19] Alyne T, Deisemara F, Reinaldo M. Formulation and MIP-heuristics for the lot sizing and scheduling problem with temporal cleanings[J]. Computers and Chemical Engineering, 2020, 142

[20] 白俊杰, 龚毅光, 王牛生, 唐敦兵. 多目标柔性作业车间分批优化调度[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2):396-403

[21] 王云, 冯毅雄, 谭建荣等. 柔性作业车间分批调度多目标优化方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2011, 45(4):719-726

[22] 王万良, 范丽霞, 徐新黎, 赵燕伟, 张静. 多目标差分进化算法求解柔性作业车间批量调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10):2481-2492

[23] 刘雪红, 段程, 王磊. 基于改进候鸟算法的柔性作业车间分批调度问题[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-18[2022-03-12]

[24] 王全武, 徐震浩, 顾幸生. 基于头脑风暴算法的多处理机组合生产批量调度问题[J/OL]. 华东理工大学学报(自然科学版): 1-11[2022-03-12]

[25] Chan F T S, Wang T C, Chan L Y. Lot splitting under different Job Shop conditions[C]//Proceedings of 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington, D. C. USA: IEEE, 2007: 4722-4728. [26]

[27] Andrzej B and Frank W. Flexible job shop scheduling with lot streaming and subplot size optimization [J]. International Journal of Production Research, 2018,56(19):6391-6411

[28] Chen J C, Chen T L, Hung H C. Capacity allocation with lot splitting in photolithography area using hybrid genetic algorithm based on self-tuning strategy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 148:106656

绍兴某燃机电厂二期扩建项目的可行性分析

杨振 段慧青

东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 本文分析了大型燃气-蒸汽联合循环发电机组对区域内社会用电需求起到的重要支撑作用, 通过技术、经济、环境等方面详细介绍了本扩建机组项目采用H级燃气-蒸汽联合循环发电的优势, 以及需要关注的风险事项, 为后续燃机工程提供参考。

关键词: H级燃气-蒸汽联合循环发电; 区域内社会用电; 风险点

中图分类号: TM621

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0037-04

Feasibility Analysis of Phase II Expansion Project of A Gas Turbine Plant in Shaoxing

YANG Zhen, DUAN Huiqing

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

Abstract: This paper analyzes the important supporting role of large-scale gas steam combined cycle generator units on the social power demand in the region, and introduces in detail the advantages of H-class gas steam combined cycle power generation in the expansion unit project and the risks that need to be paid attention to from the aspects of technology, economy and environment, so as to provide reference for subsequent gas turbine projects.

Key words: H-class gas steam combined cycle power generation; social power demand in the region; risk point

采用燃气—蒸汽联合循环机组发电是目前商用天然气发电技术中效率最高、大气污染物排放最少、环保设备投资最低的技术之一。燃机电厂以用地少、建设周期短、启动运行时间快速、负荷调节及时、排放污染小等显著优势, 越来越成为供热用户、调峰电站、热电联产机组的优选, 燃气电厂可避免大功率远距离输送, 提高电网运行的经济性, 确保该区域安全、可靠供电。尤其是在我国提出的二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和“双碳”目标下, 各省在社会用电及减排双重压力下, 十四五期间发展天然气调峰发电是其不可忽视的重要措施^[1-2]。

1 项目背景

作为在浙江电网中, 绍兴电网是重要组成部分

之一, 是贯穿东西和南北的重要枢纽。至 2019 年底, 绍兴网内拥有中型电厂 2 座, 即曹娥江电厂装机容量为 82.8 万千瓦, 大唐绍兴江滨电厂装机容量为 90.4 万千瓦; 有非统调 6 000 千瓦及以上水、火(热)电厂总装机容量共计 87.705 万千瓦, 其中水电 2.075 万千瓦, 火电 81.85 万千瓦, 其它发电装机容量 3.78 万千瓦; 非统调 6 000 千瓦以下水、火(热)电厂总装机容量共计 109.249 万千瓦, 其中水电 13.081 万千瓦, 火电 3.155 万千瓦, 其它发电装机容量 93.013 万千瓦。

2019 年全市最高供电负荷为 828 万千瓦, 同比增长 7.45 %。按照浙江省电力需求测算, “十四五”期间若仅考虑已获得国家发改委同意开展前期工作的电源(包含本工程), 到 2025 年, 绍兴电网预计缺口最大约 742 万千瓦。

收稿日期: 2021-11-11

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。

“十三五”中后期，浙江省已开始出现电力缺口且逐年增大，而绍兴北部区域用电需求增长迅速，预计“十四五”及以后，绍兴电网的电力缺口继续加大，而目前该区域主力发电厂仅有大唐绍兴江滨燃气电厂一期工程 2×40 万千瓦和曹娥江电厂 2×30+4×5 万千瓦机组，随着城镇化建设的加快、人民生活水平的提高及国家对物权和土地的保护，外来电力通道路径走廊实施越加困难，因此在负荷中心就地扩建燃气发电机组，一方面近期可以满足绍兴电网的用电需求，另一方面可以为浙江电网提供调峰能力^[3]。

2 项目建设规划

近年来，虽然发电设备建设容量较多，但仍无法满足浙江电网对电力负荷的增长需求，随着电力需求的持续快速增长，近几年浙江省的电力缺口仍将大幅上升。

该电厂考虑二期扩建拟选用 2 套先进高效的 H 级燃气一蒸汽循环机组，单套额定工况出力：731 MW，联合循环的效率可达 64 %，而项目位于绍兴市负荷中心，建成后可以满足区域用电的需求，并缓和浙江省电网的缺电状况，提高电网运行的稳定性、经济性。

3 项目亮点及经济性分析

3.1 项目建设亮点

本工程为扩建工程，而电厂一期工程建设时全厂已按两期共 4 台机组进行了规划，工艺系统可充分利用一期原有设备设施，降低工程造价，扩建条件优越，主要体现在以下方面：

(1) 建设场地为工业园区地块，厂址的建设场地条件良好。

(2) 厂址区域地质构造稳定，适宜扩建。

(3) 电厂外送线路进行改造，不再新建独立的配电装置，本期的 2 台发电机接入一期 220 kV 配电装置预留接口，无需扩建出线间隔。

(4) 工业水补给水取自开发区工业配水，备用水为工业园区自来水，其水质和供水保证率满足要求。

(5) 一期天然气管道已为二期工程预留了进

厂母管的接口，扩建工程只需从位于厂区围墙内的进厂天然气管道处引接即可。

(6) 现有除盐水系统可以满足 4 台机组的除盐水耗量，本期不需要扩建锅炉补给水处理系统设施。

(7) 原有供氢站可满足全部 4 台氢冷发电机的充氢要求，本期不需要扩建供氢站设施。

(8) 新增工业废水，纳入一期化水处理车间外的再生废水池内，经 PH 调整后排至市政污水管网，不需要新增工业废水处理设备。

(9) 水厂供给的工业水达到了电厂工业水的水质要求，本工程厂区不需要设置水预处理系统。

(10) 原补给水管道的补水能力满足本工程扩建后的用水量，不需要扩建厂外补给水管道。

(11) 原工业水泵容量可满足一期工程及扩建工程用水量及水压的要求，原工业水泵容量不需增设。

(12) 生活水采用园区的市政自来水，同时作为一期工程和扩建工程的备用水源。

(13) 扩建工程无需新建消防水池，一期消防水泵供水能力可满足全厂消防用水要求。

3.2 投资估算与财务分析

依据国家发改委、建设部 2006 年 7 月颁发的《建设项目经济评价方法与参数》(第三版)及火力发电工程经济评价导则(DL/T5435-2009)，并采用中国电力工程顾问有限公司主编的《火电工程经济评价软件》及配套的使用解释规定对本次工程进行经济效益分析。

3.2.1 初始数据

(1) 第一台机按建设期 19 个月，2023 年 9 月完工；第二台机按建设期 22 个月，2023 年 12 月完工。项目运营期 20 年，静态投资年度投资比例如表 1：

表 1 静态投资年度投资比例

	第 1 年	第 2 年	合计
投资比例 (%)	55	45	100%
注资比例 (%)	55	45	100%

(2) 本项目考虑资本金和贷款比例 30 %：70 %，贷款利率按 4.9 %考虑，还款期按照 15 年，宽限期 2 年，本息等额还款，短期贷款贷和流动资

金贷款利率按 4.35 %计。

表 2 初始数据

序号	名称	单位	数量
1	开工日期	年/月/日	2022.2(预估)
2	建设期	月	19个月(1#机) 22个月(2#机)
3	运营期	年	20
4	资本金比例	%	30
5	贷款利率	%	4.9
6	还款期	年	15
7	折旧年限	年	15
8	年利用小时数	小时	4 500
9	定员	人	51
10	人工工资(含福利)	万元/年	8
11	保险费率	%	0.25
12	材料费	元/MWh	8
13	其他费用	元/MWh	12
14	脱硝剂耗量		0
15	脱硝剂单价		0
16	修理费	%	3.5
17	水费(含税)	元/t	1.15
18	耗水量	万吨/年	640
19	发电标气耗(考虑10%气耗余量)	Nm ³ /MWh	167.66×1.1
20	厂用电率	%	1.933
21	所得税率	%	25
22	法定公积金	%	10
23	基准收益率	%	7

3.2.2 评价结果

(1) 按煤电机组超低排放电价 0.425 3 /kWh, 设定所得税前项目投资内部收益率为 9 %, 按电厂年运行 4 500 小时进行气价反测。

表 3 财务评价指标一览表

气价(含税)	元/Nm ³	1.707
总投资收益率	%	5.76
资本金净利润率	%	10.48
融资前分析		
投资回收期(税前)	年	10.70
项目投资内部收益率(税前)	%	9.00
净现值(税前)	万元	402 610
项目投资内部收益率(税后)	%	7.31
投资回收期(税后)	年	11.82
净现值(税后)	万元	6 336
融资后分析		
项目资本金内部收益率	%	13.21
投资回收期	年	8.37
净现值	万元	43 102
注资方内部收益率	%	7.58
投资回收期	年	17.29
净现值	万元	6 480

3.2.3 敏感性分析

考虑到项目建设、生产过程中的一些不确定因素,对总投资、发电量单因素对电价的敏感性分析。

(1) 对总投资、发电量、燃料价格、电价按 ±20 %变化范围,计算在年利用小时数为 4 500 小时,当气价为 1.707 元/Nm³,相应内部收益率的变化幅度,敏感性分析表如下表 4:

表 4 敏感性分析表

不确定因素	变化率 (%)	项目投资(税前)		
		内部收益率	内部收益率变化率	敏感度系数
基本方案	0.00	9.00	0.00	0.00
总投资	-20.00	12.56	39.48	-1.97
	-15.00	11.56	28.40	-1.89
	-10.00	10.64	18.20	-1.82
	-5.00	9.79	8.77	-1.75
	5.00	8.26	-8.19	-1.64
	10.00	7.57	-15.87	-1.59
发电量	15.00	6.92	-23.10	-1.54
	20.00	6.31	-29.93	-1.50
	-20.00	5.62	-37.60	1.88
	-15.00	6.52	-27.62	1.84
	-10.00	7.38	-18.07	1.81
	-5.00	8.20	-8.88	1.78
燃料价格	5.00	9.77	8.59	1.72
	10.00	10.53	16.94	1.69
	15.00	11.26	25.05	1.67
	20.00	11.97	32.95	1.65
	-20.00	23.19	157.63	-7.88
	-15.00	19.90	121.06	-8.07
电价	-10.00	16.48	83.12	-8.31
	-5.00	12.89	43.15	-8.63
	5.00	4.63	-48.59	-9.72
	10.00	-0.70	-107.77	-10.78
	15.00	-8.41	-193.41	-12.89
	20.00	-24.22	-369.02	-18.45

从敏感性分析可见,燃料价格和电价对项目投资(税前)内部收益率较为敏感。

3.2.4 经济效益分析结论

通过以上财务分析, H 级机组在按照项目投资(税前)内部收益率为 9 %的情况下反算气价得出,

含税气价为 1.707 元/Nm³, 若要提高项目经济效益, 则需要控制项目投资、提高发电量或者降低燃料价格。

4 项目风险分析

4.1 市场风险分析

针对市场风险, 以天然气价格、电价和投资投入作为项目财务评价的敏感性分析因素, 对本工程的经济收益进行了敏感性分析, 通过对比发现天然气价格对电价的敏感度最高。目前国际、的国内市场天然气价格一直居高并持续上涨, 因此天然气价格的不断上涨将成为该工程后续面临的最大的市场风险。

4.2 政策风险分析

本项目采用天然气发电, 属清洁能源, 以实现国内生产总值能源消耗和主要污染物排放总量降低为目标, 促进国家电力行业节能减排降耗, 主设备从选型和配置均按照最大限度地提高了调峰能力, 符合国家对产业政策及电网调峰的需求, 属大容量、高参数、高灵活性的节能环保项目^[4]。随着国内电力管理体制的不断深化改革, 仍存在一些不确定的政策风险, 如节能调度、竞价上网、等管理政策变化, 会导致电厂的利润大幅下降, 拟建电厂业主可通过技术手段提高机组运行效率和机组设备的寿命, 从而提高抗风险能力。随着国家环保政策日趋完善, 将导致业主方增加环保投入类似政策风险需国家配以相应政策才能解决。

该工程拟选用 700 MW 级燃气-蒸汽联合循环机组, 具有占地小、建设期短、节能、高效、低耗、机组启动快、等优点。

综上, 本项目的建设完全符合国家对能源产业的需求, 基本不存在政策方面的风险。

4.3 经济影响分析

该工程规划为调峰项目, 是为缓解浙江及绍兴地区电网的调峰紧张状况, 改善当地大气环境质量, 节约能源非常必要。

本项目的建设符合国家和地方对节能减排的政策和环保政策, 工程建设完成后将有效减少或替代同等容量的燃煤锅炉, 明显改善当地的环境状况。

本次工程机组投运后, 可带动其他行业的发展, 促进绍兴市及浙江省的 GDP 快速发展, 为构建和

谐社会作出贡献。

该项目所用燃料由浙江省统一调配, 现阶段燃气价格暂按浙江省现行电厂的供气价格预估, 燃料价格约 2.31 元/Nm³ (含税), 鉴于浙江省天然气管网及 LNG 接收站的规划建设, 燃气供需可能会造成燃料价格波动, 燃料供应价格直接导致发电成本变化, 因此提前与天然气供气方签订长期供气协议、通过优化设计减少工程投资和降低运营成本, 从而提高项目的抗风险能力^[5-8]。

4.4 社会影响分析

该工程的建设将使浙江及绍兴地区电网具备更强的调峰能力, 为当地经济的蓬勃发展提供强有力的电力支持, 同时也有助于缓解浙江省与绍兴市“十四五”期间的缺电局面。该机组容量相对浙江电网占比较小, 但对本地的经济发展作用巨大, 若机组在运行中发生类似事故或维修启停时, 电网可通过调配负荷实现安全运行不受影响, 也不存在产业安全性问题。

另项目厂址的选择对区域稳定性和场地稳定性也不存在影响问题, 该项目的厂址场地、供热系统、接入系统、天然气等均已落实, 拆迁与移民安置均已得到妥善处置, 基本没有社会化问题和社会风险。

5 结语

本文从技术、经济等方面分析了该扩建工程, 通过分析得出: 该扩建工程是符合国家产业结构调整政策的, 可有效地提高能源利用效率, 保护生态环境, 有利于建设资源节约型和环境友好型国策的贯彻实施, 不仅可以缓和浙江省电网的缺电状况, 提高区域电网运行的稳定性、经济性, 而且工程处于负荷中心, 可以满足当地用电的需求, 也能够缓解浙江省环保压力, 既有利于区域发展的公共利益, 又有利于构建和谐、落实以人为本的科学发展观, 对社会安全、稳定、和谐、可持续发展具有极其重要的意义。

参考文献

- [1] 国旭涛, 黄晓宇, 章康等. 我国天然气发电发展现状与价格情况研究[J]. 浙江电力. 2020, 39(9):109-117

(下转第 44 页)

卧式电袋复合除尘器技术在半干法脱硫系统中的应用

张芳 庄原发

东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：针对我国烟尘排放标准日趋严格的现状，本文对半干法脱硫系统配置卧式电袋复合除尘器技术进行了论述，并给出了应用实例的运行数据，为半干法脱硫系统配置除尘器技术的选择提供了参考和帮助。

关键词：卧式电袋除尘器；半干法脱硫；除尘

中图分类号：X773

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）03-0041-04

Horizontal Electrostatic-fabric Integrated Precipitator in Semi-dry Desulfurization System

ZHANG Fang, ZHUANG Yuanfa

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

Abstract: In view of the increasingly strict smoke and dust emission standards in China, horizontal electrostatic-fabric integrated precipitator in semi-dry desulfurization system is discussed, and the operation data of application examples are given, which provides reference and help for the selection of dust collector technology in semi-dry desulfurization system.

Key words: horizontal electrostatic-fabric integrated precipitator; semi-dry desulfurization; dedusting

我国燃煤机组容量巨大，其烟气粉尘排放是大气粉尘的主要来源之一。随着我国PM_{2.5}治理压力的骤然增加，相关部门提出了超低排放的概念，将粉尘排放浓度标准进一步提高至10 mg/Nm³。为了满足越来越严格的烟尘排放标准，燃煤电厂的除尘技术也在逐步发展。由早期的旋风除尘器发展为静电除尘器、布袋除尘器、电袋复合除尘器。电袋复合除尘器结合了静电除尘器和布袋除尘器的优点，除尘效率不易受煤种、烟气工况、飞灰特性影响，排放浓度可以长期高效、稳定在30 mg/Nm³以下。与纯布袋除尘器相比，在运行过程中电袋复合除尘器可以保持较低的运行阻力。

电袋复合除尘器根据布置形式分为袋区滤袋垂直布置的立式电袋复合除尘器和袋区滤袋水平布置的卧式电袋复合除尘器。卧式电袋复合除尘器

大部分用于煤粉炉预热器之后、湿法脱硫系统之前，或流化床炉预热器之后，除尘器处理烟气中粉尘浓度为10~70 g/Nm³，且为干态粉尘。在配置CFB-FGD半干法脱硫的燃煤电厂中，大部分配套采用布袋除尘器，配套采用卧式电袋复合除尘器的较少。

本文对某350 MW循环流化床锅炉发电厂CFB-FGD半干法脱硫系统配置卧式电袋复合除尘器项目进行介绍。

1 半干法电袋除尘技术简介

1.1 半干法CFB-FGD烟气脱硫原理

CFB-FGD是由德国Lurgi公司最早开发的循环流化床烟气脱硫技术。该工艺系统主要包括脱硫剂的制备系统、反应塔、除尘器、脱硫剂再循环系统

收稿日期：2021-12-17

作者简介：张芳（1980—），女，2002年毕业于陕西理工学院建筑工程专业，学士，高级工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司环保新能源工程公司工作，从事烟气脱硝、除尘研发设计。

以及仪表控制系统等部分,其工艺流程如图1所示。

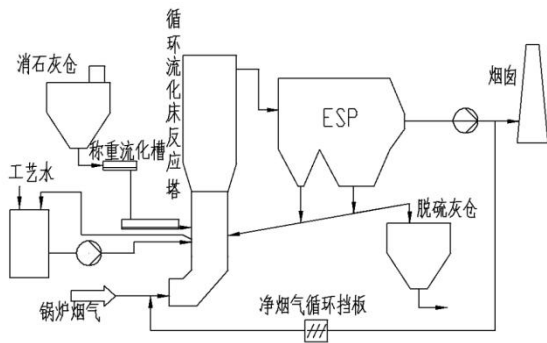


图1 CFB-FGD 工艺示意图

锅炉空预器出口烟气通过反应塔底部的文丘里管加速从而使反应塔内的固相颗粒悬浮起来,由于气流的作用,气固两相产生激烈的湍动混合并充分接触,在上升的过程中,不断形成絮状物向下返回,而絮状物在激烈湍动中又不断解体重新被气流提升,使得气固两相间的滑落速度高达单颗粒滑落速度的数十倍^[1]。反应塔顶部结构的惯性分离进一步强化了絮状物的返回,提高了反应塔内颗粒的床层密度及Ca/S比。这种循环流化床内气固两相流机制,极大地强化了气固相间的传质与传热,为实现高的脱硫率提供了根本的保证。

在文丘里的出口扩管段设置喷水装置,喷入的雾化水以激烈湍动的、具有巨大表面积的颗粒作为载体,在塔内得到及时充分的蒸发,保证了进入后续除尘器中的灰具有良好的流动性即不黏附结块。雾化水一方面增湿了颗粒表面,另一方面使烟温降低至高于烟气露点10~25℃左右,使得SO₂与Ca(OH)₂的反应转化为可以瞬间完成的离子型反应。吸收剂、循环脱硫灰在文丘里段以上的塔内进行充分反应,烟气中大部分SO₂、重金属与几乎全部的SO₃被去除,并生成副产物CaSO₃·1/2H₂O和CaSO₄·1/2H₂O等。

脱硫后的含尘烟气从反应塔顶部侧向排出,转向向下进入电袋除尘器。经电袋除尘器捕集下来的脱硫灰,大部分通过脱硫灰循环系统返回反应塔继续参加反应,多余的脱硫灰则通过气力输送系统送至脱硫灰仓。经除尘后的净烟气经引风机排入烟囱。

进入半干法脱硫系统的烟气经过反应塔内的气、固、液三相反应后,出口粉尘浓度可达~1 000 g/m³。与常规燃煤锅炉的原烟气相比,半干法脱硫

后的烟气在成分、温度、湿度、粉尘浓度等发生了变化,主要有:

(1) 粉尘浓度高:为了满足半干法脱硫需要,循环流化床反应塔的颗粒浓度为下大上小,吸收塔的出口含尘浓度为~1 000 g/m³,是常规燃煤锅炉原烟气的几十倍。

(2) 压力波动大:在半干法脱硫反应塔建床前后,以及半干法脱硫反应塔在不同锅炉负荷下的运行期间,床压的变化较大,造成除尘器入口压力波动也较大。

(3) 湿度大:由于半干法脱硫过程中需要喷入一定的雾化水,使烟气的湿度加大,对常规燃煤锅炉原烟气湿度由常规的5%~7%增加到10%~12%。

(4) 运行烟温低:为达到尽可能高的脱硫效率,需将半干法脱硫反应塔的出口烟温尽量靠近露点温度,一般将该烟温控制在露点温度以上10~25℃,即烟气温度为70~90℃左右,低于常规燃煤锅炉的原烟气温度。

1.2 卧式电袋复合除尘器原理

电除尘是高压静电除尘的简称。当含尘烟气通过高压静电场时,通过负高压电极放电使烟气气体产生电离,气体电离产生的大量电子粘附在粉尘上使粉尘荷电,荷电尘粒在电场力作用下向集尘极运动并沉积在集尘极上,当集尘极上的粉尘达到一定厚度时通过振打等方式使附着在集尘极的灰尘落入灰斗中排出。

袋式除尘器是利用由过滤介质制成袋状或筒状过滤元件来捕集含尘气体中粉尘的除尘设备。其过滤机理主要是利用纤维层及一次粉尘层对尘粒进行捕集,将尘粒从气体中分离。

电袋复合式除尘器有机结合了静电除尘和过滤除尘两种原理,充分应用两种除尘技术的各自优势,形成了电袋复合除尘一种独特的除尘机理。在这种新型除尘器中,首先应用静电除尘原理使粉尘预荷电并收集下大部分粉尘,荷电粉尘改变了粉尘的过滤特性;然后应用过滤除尘原理,实现稳定的低浓度排放。

卧式电袋复合除尘器袋区滤袋采用竖直布置的电袋除尘器不同,袋区采用水平卧式布置。

该除尘器与立式布袋除尘器相比具有节约空

间、阻力小、清灰周期长等技术特点，具体如下：

(1) 节约空间：袋区采取卧式布置方式，根据项目情况可在高度方向上增加布袋数量，可节约布置空间。

(2) 在运行过程中电袋复合除尘器可以保持较低的运行阻力。其原理是通过前级电除尘区捕集80%~90%的烟气粉尘，再经后级滤袋过滤区捕集剩余的少量粉尘。同时，利用通过前级电场区产生的荷电粉尘，可有效改善沉积在滤袋表面粉尘层的过滤特性，使滤袋的透气性能、清灰性能得到大幅改善，从而达到低阻高效收尘的效果。

(3) 袋区采用水平卧式布置，烟气穿过上游电场除尘区后无需经过转向即可直接水平进入袋区，流场相对均匀、总体阻力小。

(4) 滤袋长度短，不采用压缩空气清灰，而是经由清灰风机引入过滤后的洁净烟气进行脉动弱清灰，避免产生凝露问题。

(5) 清灰周期及清灰压力均低于常规立式的布袋除尘器，减少了布袋的损耗，延长布袋使用寿命。

2 半干法脱硫配置卧式电袋复合除尘器的技术特点

根据 CFB-FGD 半干法脱硫后的烟气特点，配套的卧式电袋复合除尘器采取以下技术措施：

(1) 针对烟气含尘浓度很高的难点，电袋除尘器采用多种形式组合，在烟气进入除尘器后依次进入惯性除尘区、电除尘区和袋除尘区。除尘器内烟气系统流程为：携带脱硫灰的烟气从脱硫反应塔出口向下进入除尘器惯性除尘区后改变流向，烟气中粗颗粒受惯性力影响直接沉降至灰斗；经过惯性除尘区捕集粗颗粒粉尘后的烟气水平进入电除尘区，高压电场电离空气产生电子，烟气中大量粉尘荷电后聚集至阴/阳极板被击打落入除尘灰斗；含少量粉尘烟气进入滤袋区，在袋区选取合理的过滤风速并选用新工艺的滤袋，通过滤袋过滤后完成烟气净化过程。净烟气经引风机至烟囱排出。

在电场区前设置惯性除尘区，以起到预除尘及保护后方电除尘区的作用（降低后方电除尘区的运行压力，提高电除尘区的运行效率）。惯性除尘主要是利用百叶窗系统使气流改变方向，利用烟气中

尘粒的惯性力或与百叶窗碰撞，使大颗粒与烟气分离。同时由于烟气从进口罩进入惯性除尘区后，烟气流速较低，重力沉降的效果较为明显，从而通过重力沉降将烟气中的大颗粒分离。

(2) 针对因运行烟温低（70~90℃）、烟气湿度大，灰斗内灰的流动性将变差的难点，在灰斗设计时，与一般的除尘器灰斗设计相比，特别考虑如下两点：A、灰斗倾斜角度不宜小于65°；B、灰斗设置加热器，且布置的范围宜大于灰斗高料位。

(3) 针对烟气压力波动大，除尘器的强度设计应考虑最大压力的影响。为了结构安全，除尘器按各个载荷的危险组合进行强度设计。

3 工程实例

某发电厂 350 MW 机组采用半干法脱硫装置，每台半干法脱硫反应塔配套设置 2 台卧式电袋除尘器，卧式电袋除尘器布置在半干法脱硫反应塔与引风机之间，与半干法脱硫装置一体化布置。

3.1 除尘器设计条件

除尘器设计参数见表 1。

表 1 除尘器设计烟气条件

项目	数值
入口烟气量 (Nm ³ /h (湿基, 实际氧))	1 170 000
入口烟气温度 (°C)	≤80
入口烟气含尘浓度 (g/Nm ³ (6%O ₂ 干))	1 000
入口烟气 SO ₂ 浓度 (mg/Nm ³ (6%O ₂ 干))	≤35
入口烟气 NO _x 浓度 (mg/Nm ³ (6%O ₂ 干))	≤50
出口烟气含尘浓度 (mg/Nm ³ (6%O ₂ 干))	≤5
电袋除尘器的压降 (Pa)	≤1 200

3.2 除尘器设计技术参数

主要设计技术参数见表 2。

表 2 电袋除尘器主要技术参数

项目	数值
处理烟气量 (Nm ³ /h (湿基, 实际氧))	1 170 000
除尘器烟气温度 (°C)	80
电袋除尘器的压降 (Pa)	≤1 200
除尘器出口烟气含尘浓度(mg/Nm ³ (6%O ₂ 干))	≤5
电场数量 (个)	8
电源类型	高频电源
电源规格	72 kV/1.4 A
电场区烟气速度 (m/s)	不大于 0.9

项目	数值
滤袋形式	扁平短滤袋
滤袋材料	PPS+ PTFE 覆膜
滤袋数量(条)	~14 500
过滤风速(m/min)	不大于 0.9

3.3 关键技术

3.3.1 惯性区设计

(1) 工程为解决烟气含尘浓度高,对惯性区除尘效率进行试验,根据工程经验及实际试验数据,确定惯性除尘区域的结构及除尘效率。

(2) 除尘器惯性区设置百叶窗和振打装置。半干法脱硫后的灰尘由于烟气湿度及可能有吸潮物质的原因,粉尘粘性较大。灰尘极有可能沾附在除尘器电室入口的百叶窗叶片上,堵塞百叶窗。为防止百叶窗堵塞,经过试验研究,选取合理的叶片间距,且设置百叶窗增设振打清灰系统,振打方式为侧部振打。

3.3.2 灰斗

采取船型灰斗结构,灰斗倾斜角度为 66°。灰斗设置高高、高、低和低低料位装置用于检测灰位,为保证排灰顺畅灰斗设置气动锤。

为防止灰斗结露,灰斗外壁设置蒸汽加热装置及电加热板,保持灰斗壁温 110℃ 以上,蒸汽加热盘管设置范围至于高高料位以上。

3.3.3 清灰系统

反吹清灰系统利用布袋除尘过滤后的洁净烟气流脉动反吹清灰。在除尘器出口烟道上设置反吹风进口的取风点,清灰风机工作后气流从清灰风机的进口进入反吹管道,通过脉动使气流产生气团,进入除尘器内移动气箱,经气箱对气流气团分流,在传动电机的带动下依次对滤袋进行吹扫清灰。清灰压力约为 10 kPa。

反吹清灰系统设计可采用“定时”“定阻”“手

动”三种工作方式任意选择,即可以选其一或其中两个,也支持同时运行这三种工作方式。

3.3.4 滤袋

滤袋滤料的涂层工艺及方式为基布与面层针刺之后,进行 PTFE 乳液浸渍,再进行 PTFE 加厚多孔膜热覆。

滤料耐高温要求正常连续运行温度不低于 160℃,瞬时最高温度 190℃。

4 结语

该项目卧式电袋复合除尘器除尘效果稳定,排放浓度可以得到有效控制,性能指标优,粉尘排放浓度可达到小于 5 mg/Nm³。与纯布袋除尘器相比,在运行过程中保持较低的运行阻力,反吹能耗明显较低,且卧式布置方式,可减少占地面积。

该项目的卧式电袋复合除尘器具有处理烟气量大、脱硫灰粉尘浓度高、烟气湿度大、烟气压力波动范围大的特点,通过对除尘器入口烟气流场、除尘器惯性区除尘效率的研究,解决了处理烟气量大、粉尘浓度高问题;通过对除尘器灰斗结构及加热方式的研究解决脱硫灰粉尘浓度高、湿度大问题。

参考文献

- [1] 林晓芬,林卫华. 循环流化床烟气脱硫技术简介[J]. 广东化工, 2017, 44(22):116-117
- [2] 杨学军,钟婷娜. 超净排放中半干法脱硫配套布袋除尘器的优化[J]. 华电技术, 2016, 38(9):8-9+22+77
- [3] 曲鹏. 电袋复合除尘器的研究进展及其在燃煤电厂中的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2019, 29(3):47-49

(上接第 40 页)

- [2] 张一瑄. “双碳”目标下我国天然气发电的展望[J]. 环境与生活, 2021, (8):54-55+58
- [3] 刘志坦,李玉刚,杨光俊等. 低碳转型背景下我国气电产业发展路径[J]. 天然气工业, 2021, 41(6):152-161
- [4] 王文飞. 浅析发展天然气发电对促进生态城市建设的意义[J]. 能源科技, 2020, 18(10):91-94
- [5] 王文飞,刘志坦. 我国两部制电价制度对天然气发电企业盈利

能力的影响[J]. 天然气工业, 2020, 40(7):138-145

- [6] 赵岩. “十四五”天然气发电发展与竞争路径建议[J]. 中国电力企业管理, 2020, (31):39-41
- [7] 麻永宏. 200 MW 级联合循环机组扩建工程项目前评估[D]. 华北电力大学, 2012
- [8] 肖印强. 天津陈塘庄电厂煤改气搬迁工程方案设计与可行性分析[D]. 天津大学, 2012

风电机组传动链轴承布置类型分析

张斯翔¹ 董元元² 胡宗邱¹ 赵伟² 郭旺¹

1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610000; 2. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 风电机组机型主要是高速型式(双馈、高速永磁)、半直驱、直驱3种不同的类型, 区别主要是传动链的设计不同, 本文主要介绍了几种传动链的布置型式, 各种型式的优缺点, 可提供风电机组的设计选型参考。

关键词: 传动链; 轴承布置

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)03-0045-02

Analysis on Bearing Arrangement Type of Wind Turbine Drive Chain

ZHANG Sixiang¹, DONG Yuanyuan², HU Zongqiu¹, ZHAO Wei², GUO Wang¹

(1. China Three Gorges Construction Engineering (Group) Co., Ltd., 610000, Chengdu, China;

2. Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: There are three types of wind turbines: high-speed type (doubly fed, high-speed permanent magnet), semi direct drive and direct drive. The difference is mainly the design of transmission chain. This paper mainly introduces several layout types of transmission chain, the advantages and disadvantages of various types, which can provide reference for design and type selection on wind turbine.

Key words: transmission chain; bearing arrangement

风电机组传动链设计是风电机组系统设计的重要组成部分。传动链是风电机组风能转换成电能的重要的传动机构, 不同的类型有不同的优缺点, 适应不同的设计^[1]。对于目前风电机组主要的型式, 有双馈(高速永磁)、半直驱、直驱3种。

双馈(高速永磁)是传动链带高速齿轮箱的型式, 半直驱是指传动链带中速齿轮箱的型式, 直驱指传动链不带齿轮箱, 风轮直接与电机连接的型式^[2], 3种类型主要区别在有无齿轮箱、齿轮箱速比大小、电机型式, 本文不对总体方案进行讨论, 仅对传动链中的轴承布置型式进行分析介绍。

0.75~2 MW 级别的风电机组上, 采用单轴承及齿轮箱两个支撑的3点支撑型式(图1), 因成本较低, 在小兆瓦级别风电机组上大量应用。

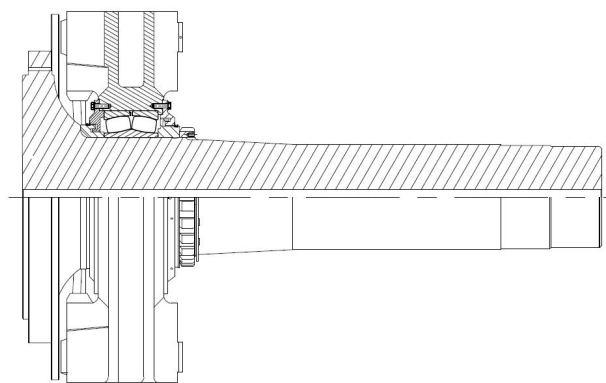


图1 单调心滚子轴承3点支撑型式

此种型式轴承采用调心滚子轴承安装在单个轴承座中, 优点为具有很强的径向承载能力, 可承

1 轴承布置介绍

1.1 单调心滚子轴承3点支撑型式

使用调心滚子单轴承方案一般应用在

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目。

作者简介: 张斯翔(1990—), 男, 硕士, 工程师, 参与三峡集团与东方风电10MW海上风电机组联合研制与示范应用项目工作。

受双向轴向载荷，调心滚子轴承可补偿轴承内外圈位置偏差，装配简单，因仅有一个轴承，轴承成本低。缺点为齿轮箱轴承需要承受一部分风力载荷，增加了齿轮箱故障率。

1.2 双列圆锥滚子单轴承方案

采用双列圆锥滚子单轴承在直驱机组中应用较多，此方案相对两个单列轴承而言，成本相对较低（图2）。

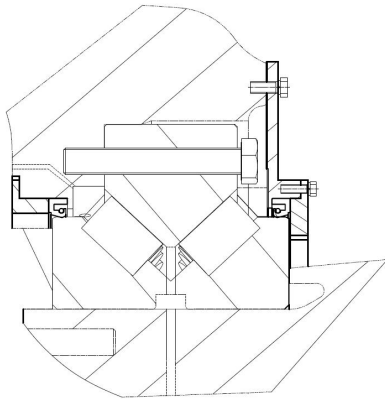


图2 双列圆锥滚子单轴承方案

双列圆锥滚子轴承优点为一个主轴承承受所有的载荷和力矩，可减少零部件的数量，如果设计合理，能够减少整机的重量；轴承出厂时已预设好初始游隙，无需装配时调整游隙；负的工作游隙，可保证很好刚度和精确的轴向定位，装配简单。缺点为轴承径向尺寸大，成本相对调心滚子轴承来说比较高。

1.3 两个调心滚子轴承独立轴承座型式

这是双馈机型比较经典的型式，布置形式采用两点支撑轴承布置，两个轴承承担了传动链的重量，并传递载荷，传动链比较平衡，并能进行轴向调节，在3 MW以下很多机型都采用了这种型式（图3）。

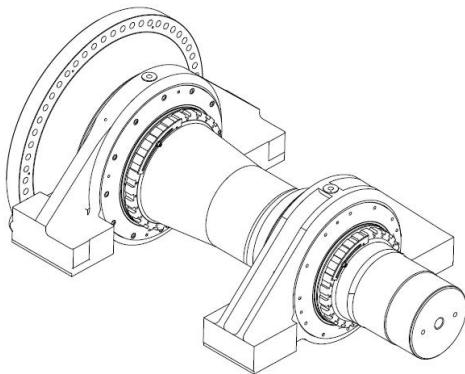


图3 两个调心滚子轴承布置型式

这种型式的优点是有很强的径向承载能力，可承受双向轴向载荷，可补偿两轴承座装配误差和主轴挠曲变形；这种轴承有很多年的成熟的应用经验，成本比较低。缺点为定位轴承轴向游隙大，轴向导向性不好，轴系窜动大^[3]。

1.4 双列圆锥滚子轴承和圆柱滚子轴承布置方案

这种型式是两个轴承共用一个轴承座，也是双轴承支撑，应用在带齿轮箱的传动链当中，目前应用很少（图4）。

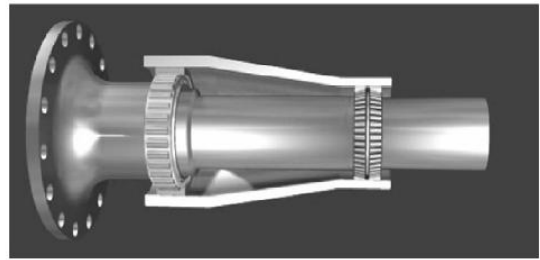


图4 双列圆锥滚子轴承和圆柱滚子轴承布置型式

这种型式方案优点为轴承座一次加工完成，轴承位置偏差小；双列圆锥滚子轴承做定位轴承，圆柱滚子轴承为浮动轴承，可补偿主轴的热膨胀；双列TRB出厂预设好初始游隙，一般采用负的工作游隙，可保证很好刚度和精确的轴向定位。缺点为轴承布置成本高，加工精度要求高。

1.5 两个单列圆锥滚子轴承共用轴承座型式

这种型式是也是两个轴承共用一个轴承座，应用在带齿轮箱的传动链当中，也应用在直驱方案中，目前大型的风电机组应用较多（图5）。

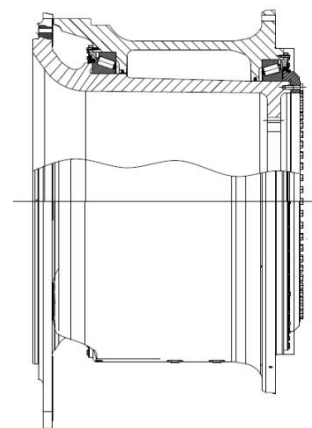


图5 两个单列圆锥滚子轴承布置型式

这种型式方案优点为轴承座和方案1.2一样，一次加工完成，轴承位置偏差小，轴承装配游隙调

（下转第63页）

基于人工智能的风电叶片破损识别及破损面积计算的算法设计

刘平¹ 黄小波¹ 张沛² 陈瑾娟¹ 莫堃² 汪俊¹ 何婷¹

1. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 针对风电工程中对设备保持措施中叶片破损区域的监控与识别, 本文提出了一种基于YOLO神经网络识别算法以实现航拍图片中的风场中的风机叶片破损区域进行自动识别。本文还配套设计了另外一种基于传统计算机视觉算法的破损面积提取和计算算法。通过本文提出的算法可以实现对风机叶片破损区域及其变化智能化、自动化的识别、跟踪及管理。文中算法已进行了测试实验, 实验结果表明了算法具有有效性和精确性。

关键词: 人工智能; 风电叶片; 破损识别; 破损面积; 算法

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0047-04

Algorithm Design of Wind Power Blade Damage Identification and Damage Area Calculation Based on Artificial Intelligence

LIU Ping¹, HUANG Xiaobo¹, ZHANG Pei², CHEN Jinjuan¹, MO Kun², WANG Jun¹, HE Ting¹

(1. Dongfang Electric Wind Power Co.,Ltd.,618000, Deyang, Sichuan, China;

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

Abstract: For monitoring and identification of the wind turbine blade damaged areas in equipment maintenance measures of the wind power projects, one kind of recognition algorithm based on YOLO neural network is proposed to automatically identifies the wind turbine blade damaged areas by the aerial photos of the wind field. Another kind of algorithm which is based on traditional computer vision algorithms has been designed to match the before one to extract and calculate the damaged areas of the wind turbine blade. The algorithms proposed in this paper can intelligently and automatically identify, track and manage the damaged areas and their changes of the wind turbine blade. The proposed algorithms also have been tested, the experimental results showed that the designed algorithms are effective and accurate.

Key words: artificial intelligence; wind turbine blades; damage identification; damage area; algorithm

近些年, 人工智能已成为学术界和各行业的一个热点。经过不断的高速发展, 人工智能已经实现了在传统的图像、视频、人脸识别、语音识别、医疗、交通等领域的落地, 并迅速向人机对话、文本处理、游戏、自然语言理解、感情计算等方面渗透, 还在安防、物流、无人驾驶等多个行业中发挥了重要的作用。而在无人机航拍监测风场领域, 针对无人机航拍图片人工目译方式的低效性, 以及人工智

能和图像处理技术在航拍和遥感领域中的不断应用, 可以利用人工智能和图像识别算法技术更高效地解决和弥补风电建设工程中标地物自动释译以及计算相关参数, 如叶片识别以及破损面积计算等问题。因此本文将会针对风电工程中最典型的叶片识别及破损面积计算问题, 采用神经网络进行智能识别并进一步设计一种破损面积测算的算法来解决人工估算破损面积不准确的问题。

收稿日期: 2022-01-13

作者简介: 刘平 (1974—), 男, 毕业于哈尔滨工程大学, 本科, 高级工程师。现从事风电设计及数字化工作。

黄小波 (1979—), 男, 毕业于兰州理工大学, 本科, 高级工程师。现从事标准化设计及数字化工作。

1 数据获取与预处理

无人机巡检拍摄时，为了避免在极端天气情况或者其他情况的影响下，垂直坠机对风机造成破坏，无人机需要离风机边线保持一定距离；同时为了避免线路电磁场对无人机的干扰以及获取更广阔的拍摄角度，无人机需要与风机保持一定的垂直距离，以此保证巡检安全；为了保证拍摄图像的高质量，例如光照、曝光度等，在巡检时也需要考虑天气因素。通过无人机控制软件规划巡检路线、飞行高度、拍摄视角以及拍摄点位等参数后，进行自动巡检拍摄。我们从中选取了所有包含风机的图像以及一部分包含破损的图像共 1 千张。在一次巡检过程中，无人机拍摄的图像数据量很大，有时会达到 TB 级别，因此需要对目标的风机数据区域做数据增强，从而实现在满足神经网络训练的前提下尽量减少图片数据量。本研究过程中我们采用的数据增强的具体方法有以下几种：① 对图片进行一定比例的缩放；② 对图片进行随机位置的截取；③ 对图片进行随机的水平和垂直翻转；④ 对图片进行随机角度的旋转；⑤ 对图片进行亮度、对比度和颜色的随机变化；⑥ 对图片进行随机添加噪声。通过这些数据增强方法我们总共得到了 1 万张的图像数据^[1]。

2 基于 YOLO-v4 算法的神经网络识别架构

YOLO (You Only Look Once)，顾名思义就是只看一次，把目标区域预测和目标类别预测合二为一，将目标检测任务看作目标区域预测和类别预测的回归问题，该方法采用单个神经网络直接预测物品边界和类别概率，实现端到端的物品检测，因此识别性能有了很大提升，达到每秒 45 帧，而在快速 YOLO 中，可以达到每秒 155 帧。

本研究选择了 CSPDarknet53 骨干网络、SPP 额外模块、PANet 路径聚合 neck 和 YOLOv3 (基于锚的) head 作为 YOLOv4 的整体架构；使用的损失函数如下式 (1)：

$$loss(object) = loss_{location} + loss_{confidence} + loss_{class} \quad (1)$$

其中 $loss_{location}$ 是边框回归损失函数， $loss_{confidence}$ 是置信度损失函数， $loss_{class}$ 是分类损失函数。在 v4 中， $loss_{location}$ 使用了 ciou，其公式如下式 (2)，

$$1 - IOU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \frac{16}{\pi^4} \frac{\left(\arctan \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan \frac{w}{h}\right)^4}{1 - IOU + \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan \frac{w}{h}\right)^2} \quad (2)$$

ciou 在 iou 的基础上考虑了边框的重合度、中心距离以及高宽比的尺度信息。 $loss_{confidence}$ 采用交叉熵，分为两部分：obj 和 noobj，其中 noobj 的 loss 还增加了权重系数 λ ，这是为了减少 noobj 计算部分的贡献权重，它与 v3 版本中的一致，其公式如下式 (3)：

$$loss_{location} = - \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B W_{ij}^{obj} [\tilde{C}_i^j \log(C_i^j) + (1 - \tilde{C}_i^j) \log(1 - C_i^j)] - \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B (1 - W_{ij}^{obj}) [\tilde{C}_i^j \log(C_i^j) + (1 - \tilde{C}_i^j) \log(1 - C_i^j)] \quad (3)$$

其中 S^2 是输入图片的网格数，B 是网格中边框的数量， W_{ij}^{obj} 是一个对象的功能， λ_{noobj} 是重量参数。 $loss_{class}$ 采用交叉熵，当第 i 个网格的第 j 个锚框负责某一个真实目标时，那么这个锚框所产生的边框才会去计算分类损失函数，它与 v3 版本一样，其公式如下式 (4)：

$$loss_{confidence} = - \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B W_{ij}^{obj} \sum_{c=1}^C [\hat{p}_i^j(c) \log(p_i^j(c)) - (1 - \hat{p}_i^j(c)) \log(1 - \hat{p}_i^j(c))] \quad (4)$$

其中 $p_i^j(c)$ 和 $\hat{p}_i^j(c)$ 分别表示预测的可能性和真实的可能性^[2]。

3 破损面积提取及计算

本文所研究的内容可以分为两个部分，一是破损区域的提取，二是破损区域面积的计算。步骤如下：①训练 YOLO v4 神经网络模型；②输入图像；③YOLO v4 神经网络模型输出识别破损区域后的图像；④对输出结果图像进行灰度化处理；⑤对灰度化图像使用 Gaussian 滤波做平滑处理；⑥进行叶片轮毂提取；⑦对平滑后的图像进行灰度值直方图统计；⑧取灰度值直方图中高度第 2 第 3 的范围，并将其平均值作为前后景分割的阈值；⑨根据阈值将图像二值化；⑩对二值化图像先进行开操作再进行闭操作；⑪预设面积阈值，去除小杂点；⑫选取联通区域，计算联通区域的像素面积；⑬根据原始图像的比例尺信息，以此计算出破损面积^[3]。

在训练 YOLO v4 神经网络模型时，需要设置超参数，然后观察损失函数值的变化，其中包括根据训练损失值和验证损失值来判断参数是否适合，网络是否拟合，通过不断的训练，不断的修改参数，最终得到适合的网络模型。

在本研究中，根据项目特点为实现风电叶片破损识别及破损面积计算，需要进行如下的具体操作。

因后续不需要对彩色图像的 RGB 三个分量都进行处理，因此对输出结果图像进行灰度化处理，从而减少图像原始数据量，便于后续处理时计算量更少。

由于图像在采集、传输和转换过程中都容易受环境的影响，这在图像中就表现为噪点，这些噪点会致使图像质量降低或者干扰我们提取原本想要的图像信息，所以需要为灰度化图像使用 Gaussian 滤波做平滑处理技术来去除这些图像中的噪点干扰^[4]。

为了得到图像中某种灰度出现的频率，对平滑后的图像进行灰度值直方图的函数统计，从而获取某种灰度级的像素的个数。

根据灰度级对比关系将叶片包含破损的地方提取出来，得到叶片的灰度轮廓图，方便区分破损区与原始区阈值。

在一张叶片轮廓图中，叶片破损面积和原叶片在图片中的面积为除去白色占比最大。根据直方图出现频率第 2 和第 3 的范围的平均值作为阈值，就能在图像二值化后将其区分。

根据阈值将图像二值化，得到一张只有黑白两色的图像，这将使得图像中的数据量大为减少，从而更能凸显出破损的轮廓。

为了将两个相连接的物体分开，减少后续计算面积时的工作量，需要对二值化图像先进行开操作再进行闭操作，使得图片在不改变太多原来形状大小的前提下，消除一些小物体和填充一些瑕疵。

因为破损区域通常是连续接壤的，并且破损只有在一定面积后才具备影响，因此需要设置一个面积阈值，以便将特别细小的破损区域去掉。

选取图片联通区域，计算联通区域的像素面积，得到破损在本张图像中像素占比。

最后，根据原始图像的比例尺信息，以此计算出破损面积。

4 实验结果分析

实验采用的 1 万张图像数据，分为训练集 8 千张，验证集 1 千张，测试集 1 千张。网络训练次数设定为 26 000。在图 1 中可以看到，神经网络的 Loss 在训练过程，随着训练次数的增加不断降低。值得注意的是，我们最终选取的模型是训练了 10 000 次的模型，因为随着训练次数的不断提升，模型过拟合导致对于测试数据集里面的图像识别准确度下降。

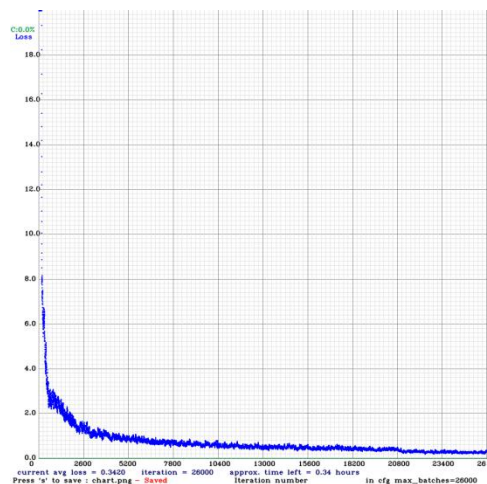


图 1 网络训练过程中的 loss 变化趋势

图2显示了测试集中的一张原始数据图片，图片中包含了1块破损目标。经过我们训练的神经网络之后，得到了如图3的识别结果。从图3中我们可以看到，训练的网络模型可以准确的识别到破损，并且针对这一输入图像达到了99%置信度的识别。经过1000张的测试集数据验证，本文中训练的模型识别精确度达到了85%。



图2 输入训练网络的原始输入

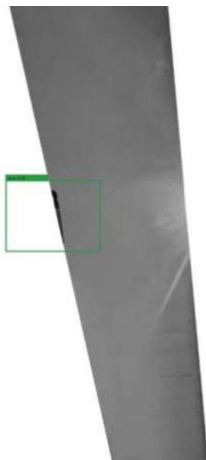


图3 通过训练网络后的识别结果

图4在图3的基础上，选取了二值化的阈值对灰度后的结果做了高斯平滑，二值化处理以及最大连通区域提取。由此得到了目标区域内实际的破损面积计算区域。经过与原图对比，其准确率达到95%以上，由此进一步证实了本文设计的破损区域提取算法的有效性和精确性。



图4 灰度化、平滑、二值化以及最大联通区域处理结果

5 结语

经过上述研究表明，通过YOLO v4神经网络模型能高效的识别出叶片破损面积，其识别率高达85%；通过设计的基于图像处理算法的破损提取算法能够有效计算出标注出的破损面积。相比于人工目译可更加高效、准确。

本次实验也可能存在一些问题，例如，YOLO v4模型算法在识别破损区域时，存在一定的泛化问题，在未来我们将继续完善神经网络模型以及面积计算算法，可能采用多网络模型融合的方法来进行进一步提升网络的精确度以及扩大数据集来提升网络的泛化性能。以此来作更深层次的研究，争取能够提供一种准确、高效的算法。

参考文献

- [1] 王丽云, 李艳, 汪禹芹. 基于对象变化矢量分析的检测方法研究[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 307-313
- [2] Gautam R, Panigrahi S. Image processing techniques and neural network models for predicting plant nitrate using aerial images[C]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003(2):1031-1036
- [3] Walter V. Object-based classification of remote sensing data for change detection [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 58(3-4):225-238
- [4] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A. (2016) You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection[C]. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:779-788

大型整体式核能发电机定子机座焊接制造工艺 技术

林松 范平 吴雄斌 钟磊 付永贵

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 中国核电经过几十年来的不断发展和积累, 目前国内投运核电机组49台, 总装机容量5 103万千瓦, 为世界之最。本文分析大型整体式定子机座的焊接结构特点, 依据国际和国内现行标准, 通过焊接制造工艺技术的进步和创新, 顺利完成了核电定子机座的制造, 并将所取得的工艺成果推广到其它热能发电机组的焊接制造过程中。

关键词: 核能发电机; 机座; 焊接; 定位筋; 质量控制

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0051-05

Welding Manufacture Technology of Stator Frame of Monolithic Nuclear Power Generator

LIN Song, FAN Ping, WU Xiongbn, ZHONG Lei, FU Yonggui

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

Abstract: At present, the number of nuclear power plants and the total installed capacity under construction has reached 49 and 51,030 MW respectively which is highest in the world, after decades of continuous development and accumulation of nuclear power in China. This paper analyzes the characteristics of welding structure and difficulties in manufacturing for stator frame of monolithic nuclear power generator. According to the current international and domestic standards for welding technicians, through progress and innovation of welding manufacture technology, has nuclear power product has been successfully manufactured, and the technological achievements is extended to the welding manufacturing process of other thermal power generating plants.

Key words: nuclear generator; stator frame; weld; locating bar; quality control

ACP1000 机组是具有完全自主知识产权的百万千瓦级三代压水堆核电机型。目前机型首台机组完成制造, 标志着中国东方电气集团核心企业--东方电机有限公司已实现高尖端的核能发电机产品自主设计、自主制造的目标。

与以往其它热能发电机组的定子机座相比, 该定子机座是目前体积最大、结构最复杂、质量要求最严格的。本文通过分析定子机座结构特点, 在工艺方法研究、论证和试验基础上, 开展了焊接工艺技术攻关, 主要包括: ①机座模块化焊接制造技术;

②气密焊缝质量控制技术; ③定位筋焊接变形尺寸精准控制技术。

这些技术的开发应用保证了定子机座的顺利制造, 并为批量化生产打下了坚实的基础。

1 整体式定子机座结构特点

整体式定子机座结构中机座与端罩为一个整体, 端罩成为了机座的一部分, 因此同等设计条件下较传统的三段式定子机座(端罩+机座+端罩)要

收稿日期: 2021-08-30

作者简介: 林松 (1989—), 男, 2011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。现在东方电气集团东方电机有限公司工艺部工作, 主要从事焊接工艺。

更长、更复杂。ACP1000 核电机座长超 12.3 m，外圆直径超 4.6 m，共 20 层环板，外形尺寸为现有机座之最、结构复杂程度为现有机座之最。

由于整体式机座内部不止设计了定子铁心，传统设计上在端罩内实现的定子出线、转子出线等功能也包含在机座中，因此机座定位筋不再贯穿机座通长，而是只分布在中间部分环板上，如图 1 所示。

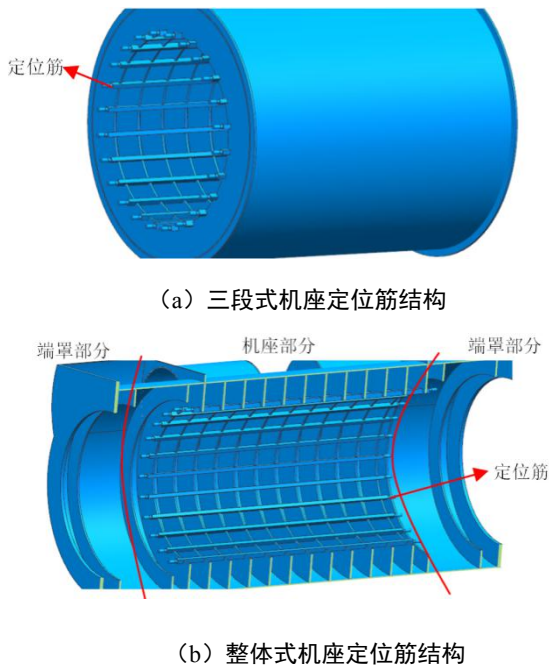


图1 定位筋结构

2 定子机座焊接技术

定子机座由于其超大的尺寸和复杂的结构，焊接制造时存在高空作业时间长、起吊翻身次数多、制造难度大、制造周期长的问题。通过模块化焊接制造技术可以有效解决上述问题。

采用圆筒形外置风道的设计导致气密焊缝总量增加，机体外露焊缝的交汇点多，对焊缝耐泄漏的质量控制比较困难，为此研究气密焊缝的质量控制技术。

整体式机座定位筋装焊时，由于机座超长，定位筋基准划线精度下降，且划线的基准在端板上，并非在定位筋装焊的环板上，致使划线精度进一步降低，同时超长定位筋焊接变形控制难度大。为解决定位筋尺寸控制问题，开发了定位筋尺寸精准控制技术。

2.1 机座模块化焊接制造技术

效仿大型船舶的制造方案，将定子机座从结构上进行工艺拆分，先以四个单元模块分别完成焊接制造后再组合成两个单元模块，最后再进行整体组装，如图 2 所示。这种模块化的制造方案不仅可以降低制造难度，有利于从工艺上对装焊尺寸进行精准控制，还可以通过多个模块并行制造的方式缩短直线周期，减少对大型平台、起吊设备等资源的长时间占用，减少高空作业，提高生产效率。

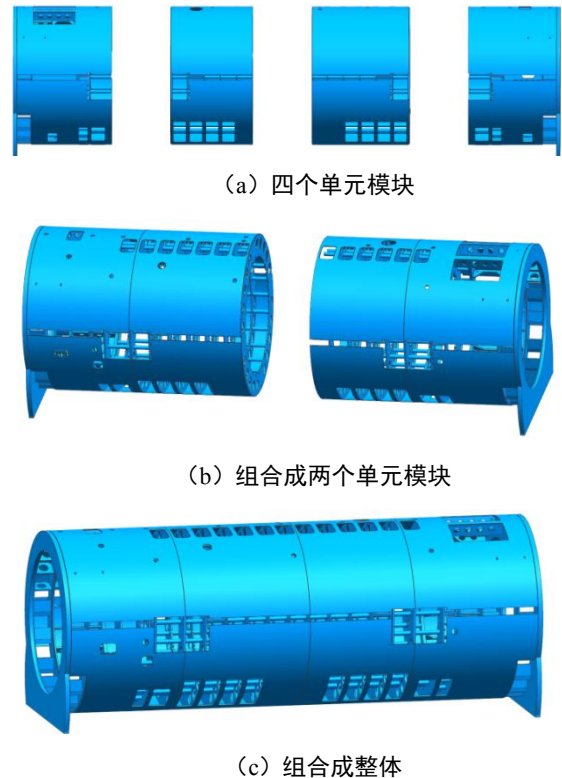


图2 模块化制造示意图

2.2 气密焊缝质量控制技术

整体式定子机座气密焊缝的结构特点一是圆筒形，二是外置风道。

针对规则的圆环形焊缝和轴向平直态焊缝，从提高焊缝质量稳定性的角度出发，选用了自动埋弧焊技术。埋弧焊的优点如下：①埋弧焊所用的焊接电流大，生产效率高；②焊接质量好。埋弧焊因为熔渣的保护，减少了焊缝中产生气孔、裂纹的可能性；因为焊剂的冶金过渡，可以调整焊缝化学成分，提高力学性能；埋弧焊自动化后，焊接工艺参数稳定，焊缝成形好；③劳动条件好。埋弧焊弧光不外漏，没有辐射，自动化的焊接方法减轻作业强度。

在进行了相应的工艺试验后，最终选定的焊接材料是 M-12K 焊丝+S717 焊剂。

针对不规则的外置风道气密焊缝，采用半自动气体保护完成焊接，通常多层多道焊出现的焊接缺陷都是在焊缝的接头部位，所以将每一段焊缝的接头都执行尾部清除、头部覆盖的工艺来消除焊缝缺陷密集部位的存在，如图3所示。

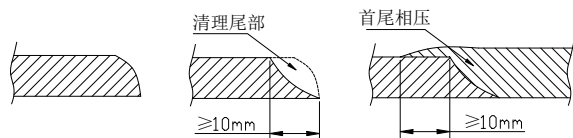


图3 焊缝接头相接示意图

对于机座上的各种丁字形的交叉焊缝，采用交汇处焊缝预清除的工艺，确保各条焊缝的互不干涉，提高焊缝质量及稳定性，如图4所示。

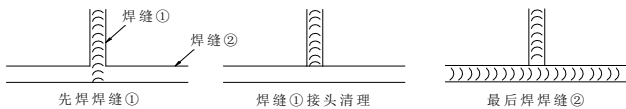


图4 丁字形交叉焊缝的处理示意图

上述工艺措施在 ACP1000 定子机座上实施，并全面推广至端罩、端盖、出线罩等核能发电机的焊接部件制造中，全面保证了焊缝质量。

2.3 定位筋尺寸精准控制技术

内循环风道的设计理论是由高速运转的转子把四周冷却器产生的负压冷氢气带入铁芯内部，此时的氢气为正压，将定心铁芯冷却后，通过定子机座环板组成的各个风道再次进入冷却器完成内部循环。其中定子铁芯与环板的间隙是保证所有机座安全运行的重要尺寸，如图5所示。如果间隙小于设计值，由于定子铁芯在运转过程中发热膨胀，就可能与机座环板内圆接触，导致绝缘受到挤压、磨损，就会出现局部过热，甚至会导致铁芯的局部烧损，严重影响机组的安全运行。

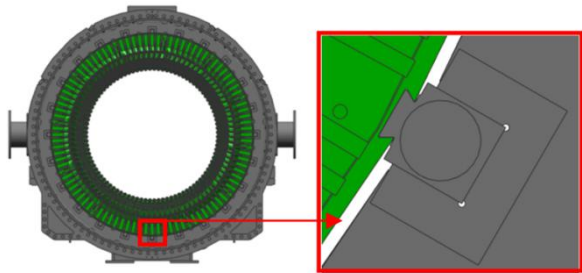


图5 定子铁心与机座环板间隙

定子铁心与机座环板的实际间隙值在装焊和加工的全序都是不能直接测量的非显性要求，只有

在铁心装配时才会呈现，所以一旦出现超差而需要修配环板的内圆以满足间隙要求值时，就会导致整个定子铁心的安装工作陷入停顿，甚至严重到将安装的铁心全部拆除进行返修。所以在定子机座完成了壳体的装焊之后，其内腔的24根定位筋的装焊是整个定子机座焊接作业的核心工序，面对整体式机座全新的结构，在国内、外都无此类机型，无法获得可借鉴的生产信息的情况下，焊接工艺必须实现技术上的突破。

定位筋装焊是要以毛坯件/半毛坯件的焊接过程实现结构件加工尺寸公差等级的要求，故如何精准控制定位筋装焊尺寸是定子机座焊接的重点。

所谓精准二字，与全面质量管理所追求的核心是一样的，那就是适度，这个适度即为后序的需求。所以，定位筋的精准装焊目的是把控好本序和后序的偏差，在工艺上制定有针对性的预防措施，实现既不增加制造难度和成本又能满足使用。

定位筋尺寸控制技术具体包括：①定位筋空间位置的精准确定；②定位筋托块反变形量的精准确定；③定位筋焊接热输入的精准控制；④定位筋映射式基准转移技术。

2.3.1 定位筋空间位置的精准确定

要精准确定定位筋的空间位置，首先须实现安装定位筋基准的转移。由于结构限制，整体式机座定位筋装配划线不能像传统机座一样将基准线划在两端板上。整体式机座在传统划线的基础上，将机座的加工基准由端板转移至定位筋装配环板上，如图6所示，保证定位筋基准与机座加工基准一致。

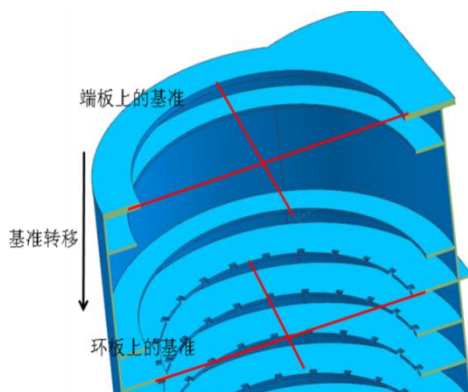
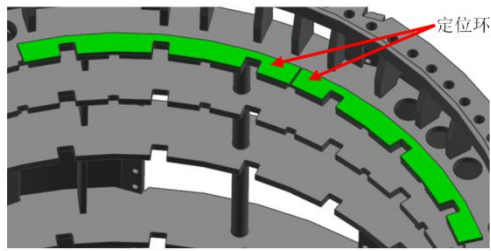


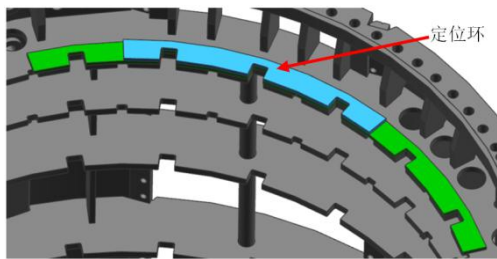
图6 定位筋安装基准转移

确定了正确的空间基准后，以专用工具替代传统的手工划线方式，设计了定位环模块，将定位环

模块放置在环板上的转移基准上。环板上多个定位环模块组成整圆，复查相邻定位环的位置，来实现定位筋安装的空间位置正确性，如图7所示。



(a) 定位环在机座环板上的组圆



(b) 相邻定位环相对位置检查

图7 定位环使用示意图

2.3.2 定位筋托块反变形量的精准确定

如图8所示,由于定位筋并不与环板直接相连,而是靠托块过渡后才与环板焊接在一起,所以必须预先进行托块与环板的焊接,托块的焊接形式为三方角焊,其两侧焊量互相拘束,焊缝收缩带来的变化可不考虑,径向方向为单侧,所以必须考虑径向方向的焊缝收缩变化。

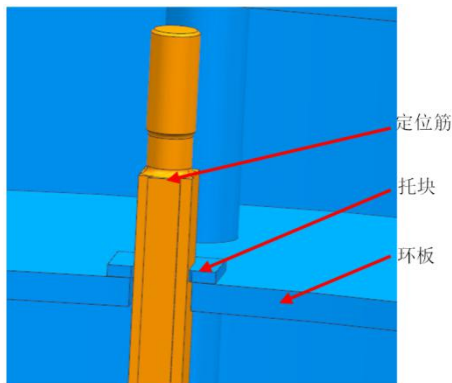


图8 定位筋与托块

对于无坡口的单面角焊可以按T形接头横向收缩的关系曲线进行近似计算,如图9所示^[1]。托块板厚为16 mm,按近似计算其焊缝收缩量为0.8 mm。

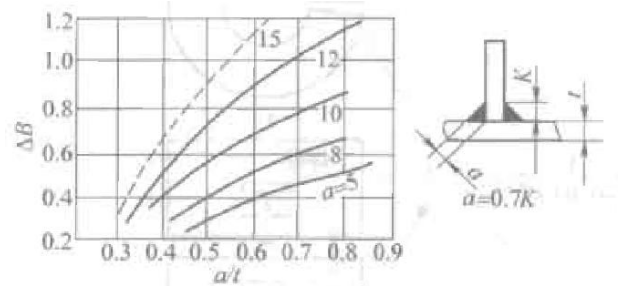


图9 T形接头横向收缩的关系曲线

必须明确,只有在拘束条件与假设相似时,经验数据的预估值才有参考意义。因此将焊接顺序设定为先径向向后两侧,在此条件下将两端头的托块都向内圆方向R装小1 mm,以消除托块焊缝变形带来的影响。

2.3.3 定位筋焊接热输入的精准控制

在实现定位筋的精准安装后,为减小定位筋焊接变形,保证焊后定位筋的空间位置不发生大的变化,在工艺上不仅需要采用对称、交错分段焊的常规焊接技术,更重要的是对焊接热输入进行精细控制。

引起焊接应力与变形的内在和外因素很多,但追本溯源,焊接的热量输入才是根本性因素。所以降低热输入是减小焊接变形的根本措施。与ASME、GB其它标准不同,核能发电机焊接所遵循的ISO标准,定子机座和定位筋母材有冲击和硬度要求,也就对焊接热输入同时有上、下限的要求。最高热输入影响材料的冲击性能,最低热输入影响材料的硬度。因此,在满足焊缝机械性能的前提下,依据工艺评定试验数据,统计出电流、电压、焊接速度以及热输入的范围,再将热输入最大的立焊和热输入最小的横焊的焊接参数分开为两个独立的模块,采取求极值和拟合的方法,得到立焊和横焊两种不同焊接位置下的焊接电流、电压、速度取值区间。实际生产时,只要焊接电流、电压、焊接速度在这个区间之内,加以合理的焊接顺序就能够保证定位筋的焊后最终尺寸。

2.3.4 定位筋映射式基准转移技术

定位筋装配是以定位环确定的定位筋位置为基准进行操作的,但定位环所确定的位置是定位筋未加工的鸽尾段,而后续加工鸽尾是以24根定位筋端部螺纹段中心点构成的节圆为基准进行的。在焊接前定位筋螺纹段(两端)与未加工的鸽尾段节

圆是同心的，由于螺纹段距离环板有约 300 mm 的距离，属于焊接部件的自由端，在焊接过程中就必然有变形，使得原本同心的三个节圆偏离。传统的定位筋螺纹段位置检查仅检查了单端螺纹段的节圆，并没有验证两端螺纹段与鸽尾段的节圆是否同心，致使下序划线时屡屡出现已检验合格的定位筋仍需要矫形、定位筋矫正合格后但风道间隙又不满足要求的情况。

为做到焊接过程中难以实现的定位筋各段同心验证，特开发映射式基准转移技术。通过此工艺，将非显性的风道间隙尺寸要求转变为具有可操作性的定量化要求。映射式基准转移技术逻辑图 10 所示。

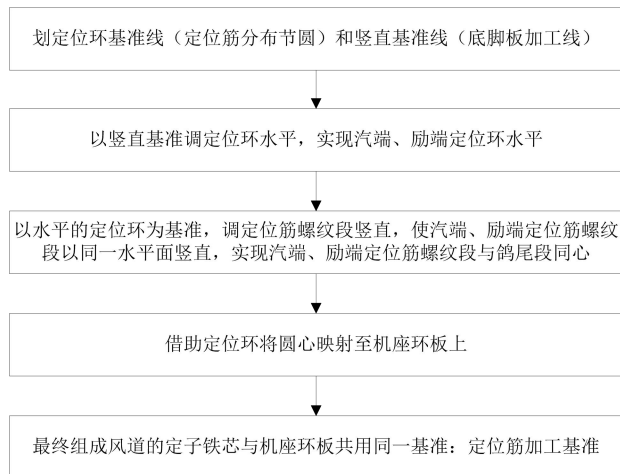


图 10 映射式基准转移技术逻辑

在完成定子机座和定位筋的精准装焊后，根据映射式基准转移技术逻辑，复原划线时所划的定位筋分布节圆，依据该节圆，借助定位环复核环板内圆尺寸，如图 11 所示。定位环内圆尺寸比环板内圆尺寸小，以定位环内圆为基准，拉竖直线，检查环板内圆与竖直线的距离，即可将定位筋的加工基准映射至机座环板上，使构成内循环风道间隙的机座环板与定子铁芯共用同一个基准（定位筋加工基

准），如此就能够在焊接序完成运行安全间隙的最终保证。

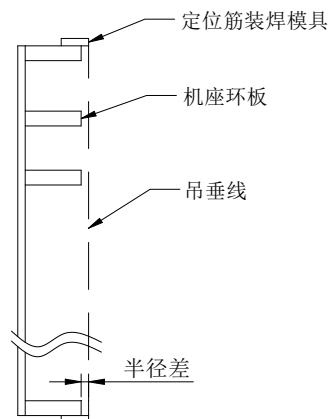


图 11 定位环复核环板内圆尺寸示意图

正是因为定位筋装焊有了完善的精准控制技术的综合实施，最终 ACP1000 整体式定子机座的 24 根 8m 长的定位筋在焊接完成后尺寸偏差 ≤ 1.5 mm，已达到了目前毛坯件焊接尺寸控制的极致。

3 结语

ACP1000 整体式定子机座焊接作业的顺利完工，实现了焊接技术在核能发电机制造过程中应用层面上的进步，解决了制约生产进度的技术瓶颈，同时起到了以点带面的作用，使得整个国产化核能发电机组的焊接生产更加的有序、规范，更加符合批量化生产的要求。为中国核电走出去，全方位参与国际竞争做出了贡献。

参考文献

[1] 王文先, 王东坡, 齐芳娟. 焊接结构 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012

技术研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(S1):109-113
 [2] 梁宝琦, 孙嘉欣, 程义等. G115钢650℃时效的组织与性能研究[J]. 锅炉制造, 2021(5):45-48+60
 [3] 翟国丽. 新型马氏体耐热钢 G115 的高温组织演变研究 [J]. 宝钢技术, 2021 (3) : 34-39

(上接第 27 页)

参考文献

[1] 乔加飞, 王斌, 陈寅彪等. 630℃高效超超临界二次再热机组关键

核电厂氢冷发电机气密试验的影响因素分析

陈年时 杨博文 余前军 李旭宁 翁云峰 朱珂皓 田露

中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300

摘要: 气密试验是验证氢冷发电机内部严密性重要手段, 在发电机完成解体检修后, 必须通过气密性验证后方可投入使用。本文通过分析影响气密试验的各个因素, 提出相应的对策以及处理方式, 并提出了积极的优化措施, 为发电机密封性检查的顺利开展以及漏点检查消除提供有效的参考价值, 从而减少因气密试验不合格造成的机组大修关键路径的延迟, 为国内同类型机组的安全稳定运行提供了有利的保障。

关键词: 氢冷; 气密性; 漏点消除

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0056-04

Analysis of Influencing Factors of Hydrogen Cooled Generator Airtight Testing Nuclear Power Plant

CHEN Nianshi, YANG Bowen, YU Qianjun, LI Xuning, WENG Yunfeng, ZHU Kehao, TIAN Lu

(CNNO, 314300, Haiyan, Zhejiang, China)

Abstract: Air tightness test is an important means to verify the internal tightness of hydrogen cooled generator. After the generator is disassembled and repaired, it must pass serious air tightness before it can be put into use. Based on the analysis of various factors affecting air test, putting forward the corresponding countermeasure and approach, and raising the optimization measures actively, generator sealing inspection is carried out smoothly and leakage eliminating provides effective reference value, thereby reduces the delay which due to overhaul key the path is not qualified by air tight test, and provides a guarantee for the safe and stable operation of unit.

Key words: hydrogen cooled; airtight; leakage eliminating

国内核电厂M310堆型的汽轮发电机组(以下简称发电机)一般采用氢冷却方式, 以闭式循环方式在内部作强制循环, 使发电机铁芯和转子绕组得到冷却。为了获得更加有效的冷却效果, 发电机中的氢气是加压状态, 考虑氢气的易燃易爆性, 因此对发电机的密封性有着很高的要求。氢冷发电机在完成解体检修后, 都需要对发电机本体以及氢气相关系统进行一次气密性试验。工艺上一般采用压缩空气或氟利昂等来代替氢气做发电机气密试验, 其验收标准是按照氢气泄漏量所对应的空气或氟利昂等泄漏量并结合氢气和空气的性质(依据JB/T

6227-2005标准)作转换所得。

国内核电厂汽轮发电机在气密试验过程中遇到的主要问题是漏点分析和处理, 反复查找泄漏点导致了大量的重复工作, 直接影响机组检修主线进度, 本文就影响发电机气密试验结果的几个重要因素进行了探讨, 并提出相应的优化建议。

1 气密试验过程及遇到的问题

试验前将与试验不相关的管道阀门隔离关闭, 密封油系统保证运行正常, 压缩空气保证符合要求, 氢气系统设备和管道回装完毕并验收合格, 定子冷

收稿日期: 2022-04-26

作者简介: 陈年时(1987—), 男, 2009年毕业于合肥工业大学机械专业, 学士学位, 高级工程师。现任中核核电运行管理有限公司维修二处机械科管理组组长, 主要从事转机设备检修工作。

却水系统处在停止运行状态，氢气冷却器进出口阀门在全关状态。待上述准备工作完成后，将三通阀置于允许压缩空气进入的位置，充入 1 bar 的压缩空气，用检漏液将能检测到的漏点都消除之后，按要求对发电机氢气系统充入压缩空气继续升压至 3 bar 左右。当系统压力达到 3 000 kPa，开始进行发电机气密试验的保压试验。按要求保压 24 小时后，用以下公式（1）进行计算，并判断发电机气密试验是否合格（保压过程中亦可进行计算，检测系统内的压降是否过大）。

$$\Delta P = \frac{24}{D} * \left[\frac{(P_i + Pat_{mi}) * 273}{273 + T_i} - \frac{(P_f + Pat_{mf}) * 273}{273 + T_f} \right] \quad (1)$$

其中：ΔP: 24 小时泄漏压降 (mbar)

P_i: 初始相对压力 (mbar)

P_f: 最终相对压力 (mbar)

T_i: 初始平均气体温度 (°C)

T_f: 最终平均气体温度 (°C)

Pat_{mi}: 初始大气压力 (mbar)

Pat_{mf}: 最终大气压力 (mbar)

D: 试验持续时间 (小时)

试验合格的条件为试验 24 小时后的计算泄漏值 ΔP 小于 20 mbar，即表明发电机本体及其氢气相关系统密封性满足运行要求。

对于系统内的初始相对压力和最终相对压力，在主控室和就地都有监测和显示，试验过程中安排相关人员每两个小时进行一次记录，当压力下降过快时，主控需调出压降趋势图查看，并进行系统查漏。系统内的初始平均气体温度和最终平均气体温度通过监测氢气冷却器进出口温度并取其所有探头的平均值得到。

以国内某核电厂 1 号机组首修后进行气密试验为例，保压开始后，值班人员对整个系统的压降每隔两小时记录，11 月 29 日 8:00，系统压力降低到 295.1 kPa，调出主控监测数据曲线发现压降过快，按照保压开始的当天 20:00 到第二天 8:00 计算，系统内相对压降达到 7.8 kPa（趋势见下图 1，温度监测采用氢冷器进出口温度的平均值作为参考，具体变化见下表 1）。通过公式（1）计算得出 24 小时压降 ΔP=95.6 mbar，远大于要求值 20 mbar。由此得

出结论：系统内气体的压力下降过快，系统或设备存在较大漏点，需安排人员进行漏点全面排查。



图 1 气密试验压力温度趋势图

表 1 氢冷器进出口温度记录表

	1#入	1#出	2#入	2#出	3#入	3#出	4#入	4#出	平均温 度
20:00	13.9	13.7	13.1	13.2	13.0	13.1	13.1	12.8	13.2
8:00	11.9	11.4	11.2	11.0	11.2	10.9	11.2	10.8	11.2

对 1#机组发电机完成了所有漏点的查找和消除工作后，重新进行 24 小时的保压试验，最终 24 小时保压试验中系统压降无变化（24 小时内系统内压降保持为 301 kPa），系统温度下降 0.1°C（从平均温度 14.6°C 下降到 14.5°C）。代入计算公式（1），最终的计算结果 ΔP=3.97 mbar，远小于 20 mbar 的标准值，说明本次气密试验结果合格，发电机密封性满足运行要求。

尽管最终气密试验的结果满足运行要求，但是整个试验过程花费了过多的人力物力，整个试验从开始到结束耗时 6 天，远远超过了原计划时间。

2 影响气密性的因素

根据气密试验的公式可知，影响气密试验的因素有发电机内部气体压力、气体温度和当地大气压。初始大气压力和最终大气压力在同一地区，为了方便计算（极端天气情况除外），本试验统一用标准大气压（101.325 kPa）来计算。故影响气密试验的主要因素为发电机内部压力。而内部压力主要由气体泄漏、密封油系统、温度变化三个因素构成，下面从以上三个因素来全面分析其如何对气密试验的结果产生影响。

2.1 气体泄漏影响

根据发电机本体以及发电机氢气相关系统的

结构和布置推断,影响发电机内部气体泄漏主要有以下几个方面:检修或部件质量造成的外漏和阀门的内漏。

2.1.1 检修或部件质量

查漏过程中发现的外漏的漏点大部分都是由密封面、密封垫片、密封胶或本体缺陷导致的气体泄露。主要体现在以下几个方面的,需引起检修人员高度重视。

(1) 发电机本体机壳或氢气系统相关管道焊接质量不良,存在沙眼或夹渣,导致氢气外漏;

(2) 发电机端盖和本体的结合面作为密封边界,其水平和垂直面通过密封胶进行密封,若结合面接触不良,便会有氢气泄漏的风险;

(3) 密封瓦水平接合面接触不良,或密封瓦座与端盖的垂直接合面存在密封胶条质量不良、弹性与压缩量不够、密封胶涂抹不规范等便会导致氢气从发电机内部泄漏到空气侧。

(4) 氢气冷却器作为氢气漏点最多的设备,其结合面的每个螺丝、每个密封框及每根换热管都有漏氢的可能,因此每次解体检修需重点检查,并单独进行水压试验或涡流检测,并确保合格。

2.1.2 阀门内漏

由于气密试验的系统状态与运行期间的部分阀门的状态不一致,例如氢气纯度检漏阀在运行期间要求有一定的开度,用于在线检测发电机氢气系统的氢气纯度。而在气密试验过程中,根据相关行业标准计算要求,不允许打开系统内任何有可能导致气体外漏的阀门。故需要在发电机的气密试验规程中明确此类阀门的开度,确保气密试验的条件满足设计要求。

另外,在气密试验过程中,球阀轻微动作导致关闭不严、球阀手柄装反或阀门本身内漏等情况造成的压力下降在实际试验过程中也有发生,同样需要引起重视。

2.2 发电机密封油系统

密封油氢侧回油管线与发电机内部相通,管线泄露(包括氢侧回油的浮子油箱泄露或故障),都会导致发电机内部气体的泄露。故发电机气密试验查漏时,对此部分的密封油系统管线需要重点和仔细查找。

密封瓦与转子间隙的间隙超标,都会对密封油

流量造成影响,进而影响密封边界。根据厂家标准,氢侧间隙控制在 0.11~0.15 mm,空侧间隙控制在 0.04~0.08 mm。密封油流经密封环间隙对发电机进行密封,但是部分气体会融入到密封油内,造成气体的损失,流量越大(间隙增大同样会造成流量的变大),对气体溶解的越多。溶于油中的气体体积可按以下公式 2 与公式 3 进行计算:

$$V_0 = \frac{V_G}{V_L} \times \frac{273.15}{T} \quad (2)$$

$$\Delta V_H = 1.44 \times pqV_0 \quad (3)$$

式中: P —机内绝对压力(MPa),发电机机内压力加上当地大气压的值;

q —氢侧密封油总回油量(L/min),变量,通过回油管流量计监测;

V_0 —气体溶解度(%),变量,为在一定温度和标准压力条件下单位体积溶剂所溶解的气体量(换算到标准温度和压力条件下);

上述公式(2)表明了气体溶解度受系统压力和温度影响,根据等容吸收压强原理,气体在液相溶解过程中,将导致密闭空间内气相分压逐渐降低,最终压力稳定不变,溶解达到平衡状态,此时的溶解度即为该温度和压力条件下的平衡溶解度。因此试验过程中除了考虑温度的波动,还需要关注密封油与气体的压差是否保持一致。油氢压差阀的作用是用来平衡密封油和发电机内部的压力,保证密封油压高于发电机内部气体压力,一般氢侧油压比气压高 35~55 kPa 左右(不考虑液位差)。如果油氢压差阀故障,压差无法调节,可能会导致发电机内部气体沿着密封瓦和转子间的间隙漏到空侧,造成发电机内部压力降低。相反,如果密封油压过大,则有可能造成密封油进入发电机体内,造成发电机故障。

另外根据公式(3),可判断当汽轮发电机组盘车之后,气密试验气体的泄漏量将大于发电机静止的状态。我厂发电机在做气密试验过程中,根据厂家建议发电机一直处于静止状态,减小因盘车造成系统压力下降的可能影响。

因此,在发电机静止状态且密封瓦间隙严格控制在标准范围内的情况下,在密封油和内部气体压力压差平衡后,系统本身的温度和压力扰动对气体

溶解度的影响一般不会造成系统压降的明显变化。

2.3 气体温度影响

根据计算公式,可知气密试验与温度有关。在试验过程中系统加热器和冷却器未投入,气体温度只与环境温度有关,因此不会因人为因素或系统其它部件而产生影响。环境温度一天当中随时间的不同有很大的变化,读数误差、仪表精度误差及电机内气体平均温度误差没有特别的方法去除,所以短时间内试验会因偏差的累积而造成试验结果失真。还有人认为,发电机温度的测点为氢冷器进出口温度测点的温度,温度测点设置在发电机内部,跟环境温度的影响不大。但实际上,传感器温度和如此庞大的发电机体内气体温度还是有一定的误差,需要试验人员关注。

3 优化措施

针对发电机气密试验中发现问题以及处理情况,建议采取以下几点优化措施,提高气密试验的效率和查漏的准确性、真实性。

(1) 发电机气密试验受很多检修环节的影响,如发电机本体、密封油系统、发电机冷却水系统、氢气供应系统、发电机引出线装置等。建议从施工组织、管理、人力资源等各个方面进行充分考虑,并对气密试验进行专项策划,确保相关工作的有序、高效完成;

(2) 建议发电机气密试验整体保压之前,针对部分区域全面查漏改为分片查漏。对于容易发生氢气泄露的设备或管线,进行精确、专项检查,特别是在大修过程中,进行了技改、维修的设备以及气体控制柜,设为重点关注区域或设备,完成漏点排查和消除后,再对发电机本体和氢气相关系统进行整体气密试验;

(3) 传统的气密试验外漏检漏方式是用检漏液针对所有存在可能漏点的位置进行喷涂检查。建议在用传统的方式对发电机焊缝、端盖、密封盖板、

法兰结合面、阀门等部位进行粗略检查完成之后,若仍有漏点未发现,则采用更加精确的方式进行查漏,按照每立方加40克左右的氢气的要求进行充气。同时采购专业的氢气检漏仪,对发电机本体、系统、管线等进行查漏,如有必要,则需调高检漏仪的灵敏度,直到漏点发现为止。

(4) 严格控制密封瓦间隙,确保密封油系统压力和流量满足系统要求十分必要,因为油系统压力过小,气体并从密封瓦外漏到空气侧,流量太大会导致气体溶解到密封油系统中,造成泄漏量增大。

(5) 气密试验采用4个氢冷器进出口温度的平均值作为发电机内气体温度,尽量减小因温度影响发电机气密试验的结果,同时将影响温度的变化的其它因素控制,如加热器、冷却器等,在试验过程中状态保持一致。

4 结语

发电机气密性的完好作为发电机解体检修验收的一个前提条件,它关系到后续发电机的安全和稳定运行,故气密试验合格对发电机乃至整个电站都十分重要。本文针对发电机组气密性试验中的共性问题,分析了影响气密试验的几个关键因素,结合理论计算结果,提出了提高气密试验准确性的优化措施,为国内同类型氢冷发电机气密试验提供一个经验积累和参考。

参考文献

- [1] 张丽萍,汪斌.提高氢冷发电机气密试验真实性的探讨[C].2007云南电力技术论坛论文集,2007:475-478
- [2] 孔令军,岳啸鸣.氢冷发电机漏氢分析及防范措施[J].河北电力技术,2011:30(6):35-37
- [3] 王永恒.氢气在柴油中平衡溶解度的研究[D].华东理工大学,2016

欢迎投稿, 欢迎订阅!

钠冷快堆蒸汽发生器腔室电加热设计

古莉 刘艳芳 郭正荣 杨洋 王晓丁

东方电气股份有限公司, 成都 611731

摘要: 钠冷快堆启堆工况下, 蒸汽发生器腔室内蒸汽温度短时间内由250 °C上升到480 °C, 因腔室壁厚较大, 存在一定热惰性, 导致腔室内外壁间形成较大的温度梯度, 从而引起很大的热应力。同理, 在停堆阶段, 腔室又会产生一个方向相反的热应力, 该循环的二次应力作用易导致腔室发生蠕变棘轮失效或蠕变疲劳失效。为了降低启堆过程中腔室产生的热应力, 可在腔室外壁面设置电加热装置, 使外壁面与内壁面同步升温。通过合理的电加热功率设计, 使得腔室最大热应力降低了约60%, 提高了蒸汽发生器安全性。

关键词: 钠冷快堆; 蒸汽发生器; 腔室; 热应力; 电加热

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0060-04

Electric Heating Scheme Design of Plenum in Sodium-cooled Fast Reactor Steam Generator

GU Li, LIU Yanfang, GUO Zhengrong, YANG Yang, WANG Xiaoding

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

Abstract: During the start-up condition of the sodium-cooled fast reactor, the steam temperature in the plenum of the steam generator rises from 250 °C to 480 °C in a short time. Due to the large wall thickness of the plenum, there is a certain thermal inertia, which leads to a large temperature gradient between the inner and outer walls of the plenum, thus causing great thermal stress. In the same way, during the shutdown condition, the plenum produces a thermal stress in the opposite direction, and the circular secondary stress easily leads to creep ratchet failure or creep fatigue failure in the plenum. In order to reduce the thermal stress produced by the plenum during the start-up process, an electric heating device is set up on the outer wall surface of the plenum to make the outer wall surface and the inner wall surface heat up synchronously. Through reasonable electric heating power design, the maximum thermal stress is reduced by about 60 %, which greatly improves the safety of steam generator.

Key words: SFR; steam generator; plenum; thermal stress; electric heating

钠冷快堆属于第四代核电堆型, 是我国发展第四代先进核能系统的主力堆型, 也是中国核能技术实现闭式燃料循环和可持续发展的重要战略选择^[1]。蒸汽发生器是钠冷快堆最为关键的设备之一, 其功能是实现二回路(高温液态钠)和三回路(高温高压水/水蒸气)之间的换热, 使三回路的水经过预热、

蒸发和过热, 产生规定参数的过热蒸汽。蒸汽发生器也是高温液态钠和水/水蒸气的实体隔离屏障, 具有保持压力边界, 避免出现钠水反应的安全功能。

钠冷快堆蒸汽发生器为立式布置的直流式换热器, 结构如图1所示。

收稿日期: 2021-11-10

作者简介: 古莉(1985—), 女, 2008年毕业于重庆大学热能与动力工程专业, 学士, 高级工程师。就职于东方电气股份有限公司核设备设计所, 主要从事核能设备设计相关工作。

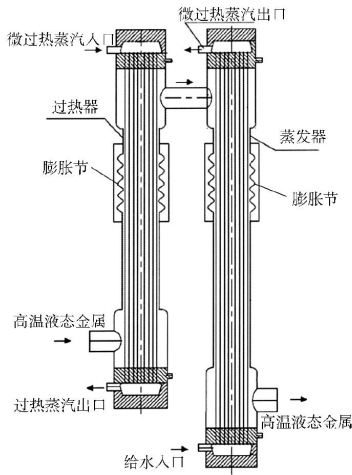


图1 蒸汽发生器结构示意图

蒸汽发生器腔室结构剖面图如图2所示。

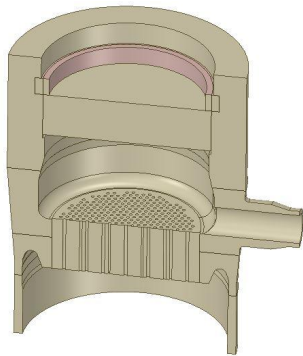


图2 蒸汽发生器腔室结构示意图

由于腔室壁面厚度较大，在升温工况与降温工况均存在一定热惰性，即设备启停过程中，流体温度随时间变化时，设备中邻近流体的部位响应快，远离流体的部位响应慢。将导致腔室热应力在一个循环内产生反向的情况，从而引起很大的二次应力范围，可能导致腔室应变变形及蠕变疲劳不满足规范要求^[2]。1/8腔室模型在冷启动工况及停堆工况下温度场计算结果如图3所示。

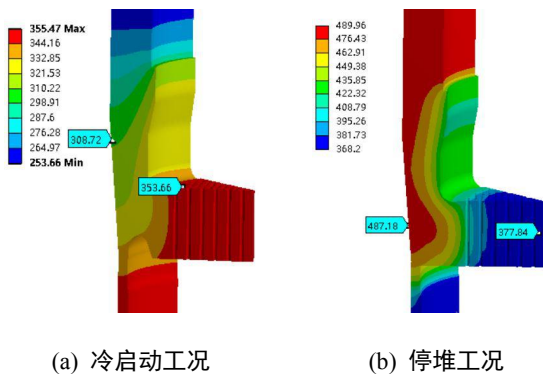


图3 管板及腔室温度场

为解决上述问题，经试算、评定和对比分析，找出了3种有效措施：①在水侧腔室添加热屏蔽板；②从反应堆系统控制出发，降低温度变化速率；③在腔室外壁设置电加热装置。

其中方案③效果最显著。本文通过合理的电加热功率设计，使得腔室最大热应力降低了约60%，极大的提高了蒸汽发生器安全性。

1 功率设计

1.1 初始电加热功率计算

1.1.1 计算原则

水侧腔室的电加热丝需单独控制，除在设备预热阶段运行外，还需在启堆初期运行。其中设备预热用于将腔室从室温加热至200~250℃；启堆初期升温功率计算是指是指在启堆初期(0~11790s/3.275h)将腔室壳体从250℃加热到330℃，利用在腔室外壁设置的电加热来加热腔室，减少水侧腔室的温度梯度，降低二次应力。加热应遵循渐进加热的原则，严格控制其加热功率和温升速率。水侧腔室的初始加热功率计算通过公式计算得到。

1.1.2 计算输入

(1)水侧腔室的材料为SA-336M Gr.F22 Cl.1，材料性能见表1。

表1 腔室材料性能

温度 ℃	密度ρ kg/m ³	热传导系 数K W/(m·℃)	比热容C _p J/(kg·℃)
40	7750	36.4	456
100	7750	36.9	483
150	7750	37.1	501
175	7750	37.2	510
200	7750	37.2	519
225	7750	37.2	529
250	7750	37.1	538
275	7750	36.9	547
300	7750	36.7	558
325	7750	36.5	569
350	7750	36.2	580

(2)水侧腔室体积V=0.0928 m³，表面积S=0.64 m²，温升值Δt=80℃，温度升高时间t=11790 s。

1.1.3 计算过程^[3]

水侧腔室加热量Q:

$$Q = C_p \cdot m \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中:

Q : 升温中水侧腔室吸热量 (J);

C_p : 水侧腔室加热平均温度 (290 °C) 下比热容 (J/kg·°C);

m : 水侧腔室质量 (kg)。

计算得到热量 $Q=31\ 851\ 930\ J$ 。

水侧腔室加热功率 P :

$$P = Q/t \quad (2)$$

计算得到电加热功率 $P=2\ 702\ W$ 。

水侧腔室平均热流密度:

$$HF = P/S \quad (3)$$

计算得到热流密度值 $HF=4\ 222\ W/m^2$

1.2 启堆过程功率设计

1.2.1 计算方法

采用商用有限元分析软件 ANSYS Workbench, 先对水侧腔室进行温度场分析, 然后将温度场计算结果作为输入导入应力场分析模块计算腔室热应力, 针对热应力计算结果开展电加热功率的设计。

1.2.2 几何模型及边界条件

(1) 在建立三维几何模型时, 考虑设备整体结构的对称性, 换热管布置形式, 建立 1/8 对称几何模型如图 4 所示。

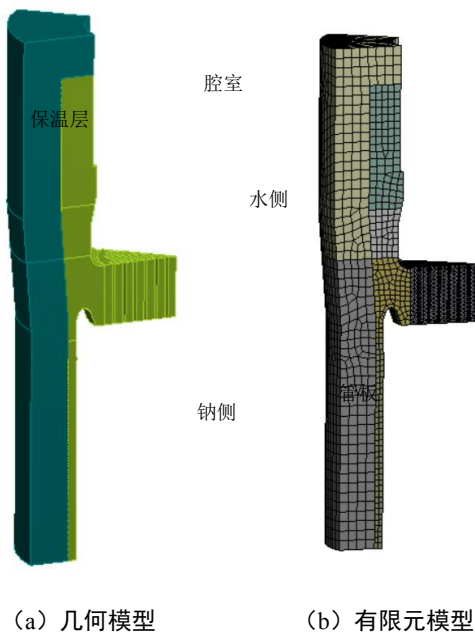


图 4 腔室 1/8 模型

(2) 在水侧腔室内表面施加水侧温度载荷 (图

4)和对流换热系数,初始电加热功率值取 $HF=4\ 222\ W/m^2$, 保温层采用纳米气凝胶材料, 厚度 200 mm, 性能如表 2 所示, 保温层外表面换热系数为 $8.141\ W/(m^2 \cdot K)$, 环境温度 30 °C。水侧腔室材料性能见表 1。

表 2 纳米气凝胶材料性能

温度 °C	密度 ρ kg/m ³	热传导系数 K W/(m·°C)	比热容 C_p J/(kg·°C)
100	200	0.021	501.6
200	200	0.026	501.6
300	200	0.035	501.6
400	200	0.045	501.6
500	200	0.068	501.6

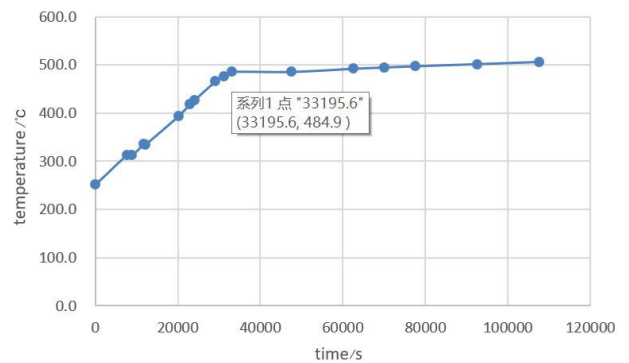


图 5 冷启动工况水温

1.2.3 计算结果

经过电加热功率调整→温度场→热应力→电加热功率调整不断迭代、优化, 得到较优的功率方案如图 5 所示。

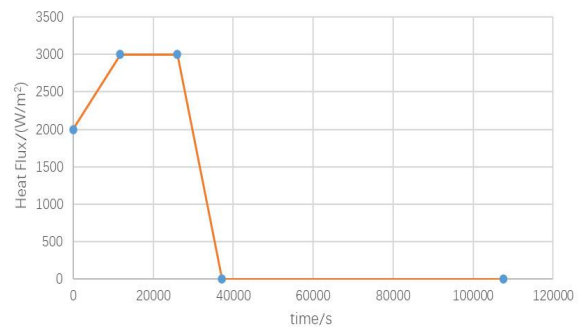


图 6 电加热设计热流密度

此功率下， $t=15\ 265\ s$ 时刻点（内外壁温差最大）腔室应力强度见图7（b），水侧腔室最大热应力从198 MPa降低至73 MPa，可见电加热对腔室热应力缓解有很明显的效果。

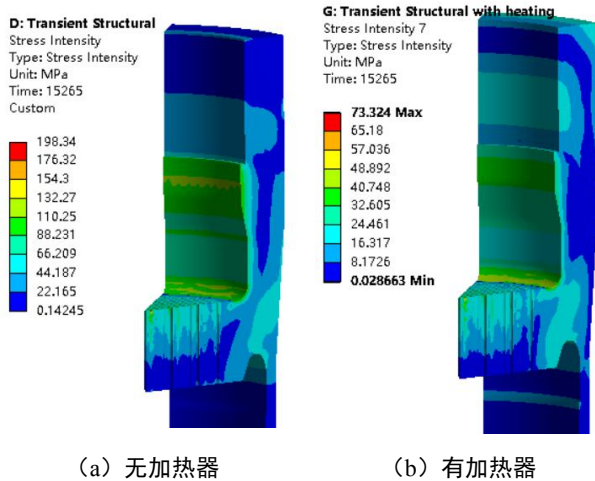


图7 热应力对比

（上接第46页）

整到接近零游隙，可保证很好刚度和精确的轴向定位；缺点是安装时需要调整轴向游隙，对安装精度要求较高，需要很有经验的安装工人，对部件加工精度要求高。

2 轴承布置应用选型介绍

对于方案1.1，成本低，1.5 MW级别及以下的机组因载荷小，基本使用该方案。对于方案1.2，在直驱机组中使用量很大，直驱机组轴承安装在电机内，单轴承方案一是成本相对较低，而且制造电机轴向尺寸不会太大，电机成本也相应要低。对于方案1.3，2 MW~3 MW级别使用量比较大，该方案有效降低了齿轮箱的载荷，齿轮箱仅仅承受扭矩，降低齿轮箱的故障率。对于方案1.4，因成本高，使用量极少。对于方案1.5，在超大风电机组中使用较多，特别是8 MW级别以上，因轴承本身尺寸限制，超大兆瓦级别风电机组，如果使用单轴

2 结语

钠冷快堆蒸汽发生器外壁设置了电加热丝用于启堆之前的设备预热，将水侧腔室外的电加热丝独立控制是合理、安全、可行的。在设备启堆过程中运行电加热丝加热水侧腔室外壁可减小腔室内外界温差从而有效减缓热应力，通过合理的电加热功率设计使得水侧腔室热应力值降低了约60%。

参考文献

- [1] 徐铄, 杨红义. 钠冷快堆及其安全特性[J]. 物理, 2016, 45(9): 561-568
- [2] ASME B&PVC SECTION III Rules for Construction of Nuclear Facility Components Division 1 - Subsection NH Class 1 Components in Elevated Temperature Service [S]. 2015
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006

承，外径尺寸将会超大，一是加工难度大，试验成本也很高，所以两个单列轴承就是最好的选择。

3 结语

本文介绍了风电机组传动链的五种方案并对其特点进行了分析，在具体的机组设计中，传动链选型需要根据实际情况来进行设计，需要考虑整体方案、相关零部件的加工制造难度，整体的成本、安装运输维护种种因素，需要综合情况进行设计，需要根据具体的设计、生产情况进行选型。

参考文献

- [1] 成大先. 机械设计手册[M], 化学工业出版社, 2017
- [2] Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition 2010[Z], Germanischer Lloyd Hamburg, 2010
- [3] 王奉涛, 苏文胜. 滚动轴承故障诊断与寿命预测[M], 科学出版社, 2018

大型抽水蓄能完全向心塔形磁极装配质量提升

王嫦美 杨悦伟 张翔

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 大型抽水蓄能机组具有转速快、制造精度高、运行情况复杂的特点, 磁极采用完全向心的塔形结构可消除侧边拉力, 其制造与装配的高标准给传统工艺带来前所未有的挑战。本文通过对某大型磁极的问题处理及过程控制, 提出有效工艺方案, 使磁极装配间隙降低, 质量得到持续提升和明显改观。

关键词: 大型抽水蓄能; 向心塔形磁极; 装配间隙; 质量提升

中图分类号: TV743; TV734

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0064-03

The Assembly Quality Improvement of Large-scale Pumped Storage Centripetal Tower Magnetic Poles

WANG Changmei, YANG Yuewei, ZHANG Xiang

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

Abstract: Large-scale pumped storage units have the characteristics of fast speed, high manufacturing accuracy, and complex operating conditions. The magnetic pole adopts a centripetal tower structure to eliminate side tension. The high standards of manufacturing and assembly bring unprecedented challenges to the traditional process. For the problem handling and process control of a large magnetic pole, an effective process plan is proposed to reduce the magnetic pole assembly gap, and the quality is continuously improved and significantly changed.

Key words: large pumped storage unit; centripetal tower pole; assembly clearance; quality improvement

水轮发电机磁极是关乎机组安全运行的核心部件。磁极线圈绕包在磁极铁芯周边, 当磁极装配挂在磁轭外缘随主轴一起转动时, 离心力作用于磁极线圈, 由于线圈平行于磁极铁芯侧边放置, 而常规磁极的两侧边与向心方向存在夹角, 此时离心力会在与侧边相垂直的方向产生向外的分力, 若拉力较大且长期运行时, 可能导致线圈开匝、翻边甚至脱落^[1]。

大型抽水蓄能机组转速高、磁极个数少、单个磁极重量大、正反转交替进行, 铁芯侧边与离心力夹角加大, 从而促使分力变强, 拉力双向交变施加在线圈上, 对装配极具破坏力^[2]。为改变现状, 曾将抽水蓄能机组磁极改为准塔形结构, 但未能从根

本上消除侧边拉力, 有些电站因类似磁极结构问题, 曾造成定子扫膛或整台机组报废的严重教训。采用完全向心的塔形磁极结构, 消除了侧边分力, 不用毛毡调节来减小装配间隙, 而是靠提高制造精度来保证磁极直线段间隙, 代表了今后抽水蓄能机组磁极的应用方向。

1 水发磁极结构演变

水轮发电机磁极结构设计主要受转速影响, 当转速在 300 r/min 以下, 一般采用常规磁极, 铁芯设置 1~3 个 T 尾, 极身与端部中心线平行, 与向心方向存在夹角, 线圈所受离心力存在向外拉伸的侧边分力; 檐部与极身垂直, 挂极后外缘呈多边形。采

收稿日期: 2021-11-23

作者简介: 王嫦美 (1987—), 女, 2013 年毕业于燕山大学机械电子工程专业, 工学硕士, 工程师。现在东方电气东方电机工艺部从事水轮发电机工艺工作。

用矩形磁极结构制造难度和成本小，由于转速慢，侧边分力及近圆外形对发电机安全运行影响小，通常应用在常规水轮发电机，如图1所示。

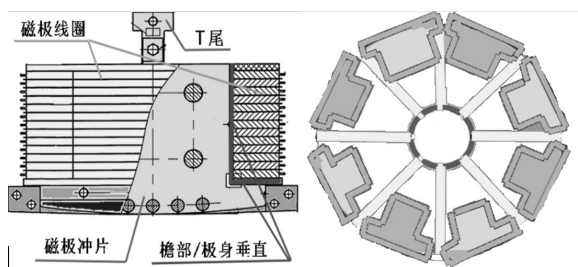


图1 常规矩形磁极装配结构

大型抽水蓄能机组，转速快的同时，磁极个数少，单个磁极重量大，T尾个数多，准塔形磁极是其过渡结构，采用向心式磁极线圈，磁极压板檐部为向心结构，制造难度增大，挂级后外缘呈圆柱形，由于极身平行于中心线，线圈所受离心力与极身存在夹角，故尚未消除侧边分力，如图2所示。

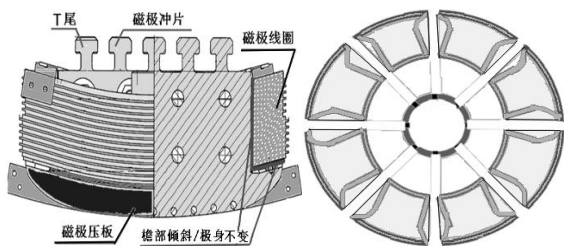


图2 准向心塔形磁极装配结构

完全向心塔形磁极，其极身沿向心方向倾斜，消除了侧边拉力，极身与檐部垂直，挂级后呈正圆结构，全方位提升了安全稳定性。小型塔形磁极多常见于500 r/min以上的悬式机组，可加毛毡调节装配间隙，制造工艺较为简单；而转速在425 r/min以上大型抽水蓄能机组，压板等厚重部件的外形趋于复杂，且不允许加毛毡来调节装配间隙，因此必须靠提升制造精度来保证，通常应用在高水头抽水蓄能机组，如图3所示。

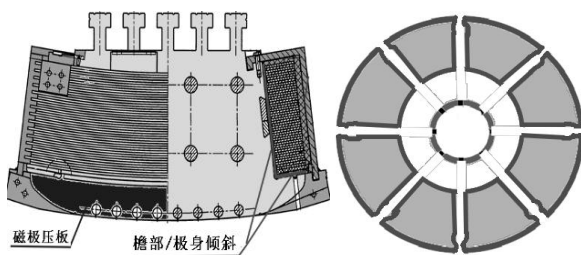


图3 完全向心塔形磁极装配结构特点

2 控制完全向心塔形磁极端部间隙

2.1 现状描述

大型抽水蓄能机组完全向心塔形磁极结构复杂，制造难度大，磁极线圈和磁极铁芯之间极易产生间隙。为控制安全风险，设计要求间隙应 $\leq 1\text{ mm}/300\text{ mm}$ 长，且不允许加垫毛毡调节。我公司通过调整磁极线圈外形、托板厚度尺寸、铁芯平直度后，使磁极直线段间隙能够达到装配要求。但通过全范围塞检，发现磁极两端头间隙仍然超标，特别是磁极压板两侧间隙，局部甚至达到2 mm左右，如图4所示。

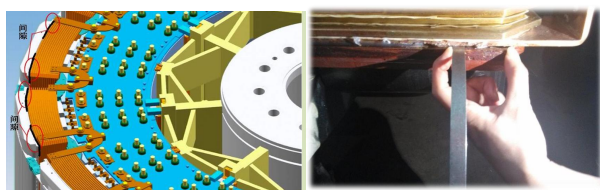


图4 大型向心塔形磁极装配端部间隙超差

2.2 原因分析

将磁极线圈与磁极铁芯拆开，将磁极铁芯放置在平台上，用平尺和角尺进行检测，粗略估算两端头的磁极压板檐部尺寸不足。将磁极压板运送到三维数控测量中心进行精确检测，确定檐部肩点的实际值与理论值至少相差0.5 mm，如图5所示。经分析，由于磁极压板檐部加工尺寸存在问题，使压板檐部平面低于铁芯，最终导致端部装配间隙变大。

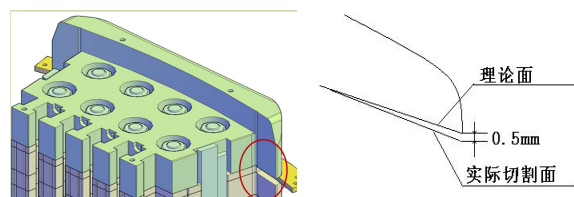


图5 磁极压板檐部加工精度不足

2.3 制造难点

磁极压板为完全向心结构，极身两侧面不平行，常规机床加工难度大，在加工过程中需更换多个设备，加工基准在加工过程中消失，对局部尺寸精度造成不可控影响；压板檐部面积较大且带有弧度，常规直径的铣刀存在接刀纹路，打磨处理虽保证了表面光洁度，但削薄了檐部的厚度；磁极压板檐部厚度及平面度难以直接测量，产生漏检现象；

2.4 改进提升

(1) 加工工艺创新

为确保加工精度达标、克服单一基准面难以贯穿于整个加工过程，结合需求将基准面增加至三个：T尾底面找正带、两侧向心面找正带、檐部直线段找正带。为避免因在不同设备上加工找正带而产生累积误差，全部基准面均在数控龙门铣床上一次性产出。



图6 确保磁极压板加工基准的一致性

为提高加工效率，减少磁极压板的设备占用并新提胎具：厚度较大的极身两侧及檐部直线段，先在数控龙门铣床上进行竖直方向加工；精度高的极身侧面及檐部直线段，转至卧式加工中心从水平方向进刀；提制一个带倾角的铣胎以供铣床使用，提制一个平面型铣胎以供卧式加工中心使用，如图6所示。



图7 提制两套专用磁极压板铣胎

为提高磁极压板加工质量，取消磁极压板檐部打磨工序，全部用数控加工过程来保证：磁极压板锻件材料偏硬，为克服加工时出现台阶或颤纹，铣刀盘从D80增加到D100，同时加大了刀柄的直径；增加多层铣削数控程序，开发三维软件模拟檐部复杂空间曲面的铣削过程，验证通过后大批量投入生产，如图7所示。

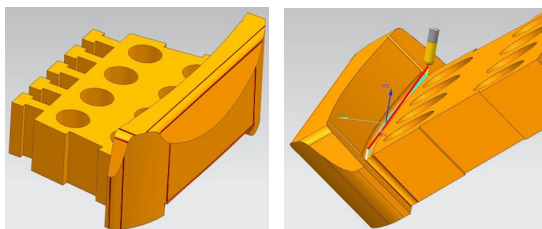


图8 大型向心塔形磁极压板加工三维仿真

(2) 检查方式创新

为确保制造结果的精准度，改用三维测量机对首件磁极压板檐部等进行全方位检测，如图9所示，满足图纸要求则证明改进方案有效，以便投入量产。为提高后续磁极压板的检测效率，磁极冲片三维检测合格后，利用磁极冲片的轮廓线与磁极压板进行对比，无误后结合磁极端部装配间隙的大小判断加工质量的高低：1 mm厚塞尺、300 mm宽度不入则为达标。

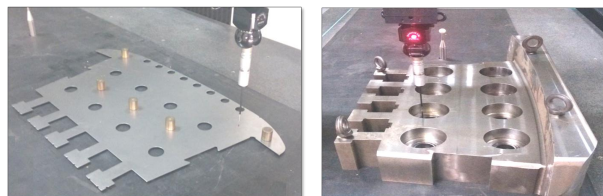


图9 大型向心塔形磁极压板加工三维仿真

(3) 装配效果提升

以某在制大型抽水蓄能机组完全向心塔形磁极为例，推行了磁极压板加工和磁极装配的过程质量控制卡，首件试制达标后，将磁极压板加工永久列为精密加工范畴。

用塞尺检查12件磁极装配的端部间隙，其中1#磁极一端间隙1 mm、长度范围40 mm；5#磁极一端间隙0.8 mm、长度范围70 mm；其余10件磁极全部0.5 mm塞尺、100 mm范围不入。

由此可见，80%左右的完全向心塔形磁极的端部间隙已控制在0.5 mm/100 mm范围内，装配效果得到进一步提升，磁极外观质量得到明显改善，业主见证满意，如图10所示。

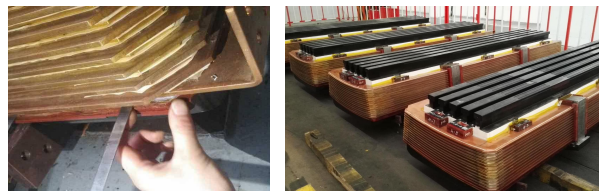


图10 大型向心塔形磁极装配间隙达标

3 结语

本文针对某大型抽水蓄能向心塔形磁极的端部间隙不受控问题开展了原因分析和措施改进，制定了有效合理的工艺方案使磁极压板一次加工合

(下转第75页)

调质钢晶粒度检测方法的研发

王洪涛 王海沧 张娟 刘盛波

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: 本文是针对调质钢晶界难以腐蚀, 晶粒度难以准确测量而研发的一种检测方法。根据金属学原理, 金属材料在低于临界点 Ac_1 温度热处理, 实际晶粒大小不会发生变化; 同时, 在非保护气氛炉里热处理, 往往会伴随表面氧化脱碳。利用脱碳法可以得到清晰的调质钢实际晶界, 便于晶粒度的准确测定。试验结果表明: 利用试样表面脱碳方法, 用 4% 硝酸酒精溶液就可以腐蚀出真实、清晰、完整的实际晶粒度; 操作过程简单, 无环境污染。本方法已经在检测中使用, 效果良好。而且实验表明, 钢材在低于 Ac_1 的温度热处理后, 晶粒大小不会发生变化。

关键词: 调质钢; 晶粒度; Ac_1 ; 脱碳

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0067-03

Research and Development of Grain Size Detection Method for Quenched and Tempered Steel

WANG Hongtao, WANG Hailun, ZHANG Juan, LIU Shengbo

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

Abstract: This paper is a detection method developed for quenched and tempered steel, which is difficult to corrode the grain boundaries and difficult to accurately measure the grain size. According to the principle of metallurgy, the actual grain size will not change when the metal material is heated at a temperature lower than the critical point Ac_1 ; at the same time, heat treatment in a non-protective atmosphere furnace is often accompanied by surface oxidation and decarburization. The actual grain boundaries of quenched and tempered steel can be obtained clearly by the decarburization method, which facilitates the accurate measurement of grain size. The test results show that the real, clear and complete grain boundaries can be obtained by the decarburization method on the surface of the sample, and 4% nitric acid alcohol can corrode. The operation process is simpler, and there is no environmental pollution. This method has been used in the detection, and the effect is good. Experiments show that the grain size of the 20 steel sample after heat treatment at a temperature lower than Ac_1 does not change.

Key words: quenched and tempered steel; grain size; Ac_1 ; decarbonization

调质钢是指中碳优质碳素结构钢和合金结构钢, 淬火+高温回火处理(即调质), 金相显微组织一般为回火索氏体, 有良好强度、塑性和韧性, 优良的综合力学性能, 广泛用于制造汽车、机床、航天和核电等行业, 需要承受多种工作载荷和受力比较复杂的零件。

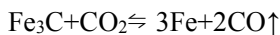
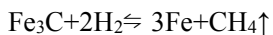
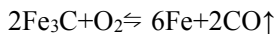
通常情况下在常温下使用的金属材料, 晶粒越细, 强度、硬度越高, 塑性、韧性也越好; 但也不是越细越好, 不同的使用背景条件需要将晶粒大小控制在合理的范围。因此, 许多相关的技术规范都对晶粒度级别指标规定要求范围, 可见测量钢的晶粒度具有十分必要性。然而, 对于经

收稿日期: 2022-06-22

作者简介: 王洪涛 (1975—), 女, 1996年毕业于四川轻化工大学锅炉专业, 现在东方电气(广州)重型机器有限公司质量检验部从事理化检测工作。

调质处理的钢，得到的组织是回火索氏体即铁素体基体上分布着碳化物（包括渗碳体）球粒的复相组织^[1]，由此可见铁素体基体晶粒大小即是回火索氏体晶粒的大小。回火索氏体腐蚀难度大，目前在行业内唯一采用的苦味酸溶液腐蚀晶界，但苦味酸已被国家列为易爆危险药品，严格控制产销，无法采购使用。所以为了测量调质钢组织晶粒度我们研发了一种新型的检测手段。

根据金属学原理，金属材料在低于临界点 A_{c1} 温度加热，保温，组织无相变，晶粒大小不会发生变化；同时非保护气氛炉里热处理，往往会伴随表面氧化脱碳。脱碳的过程就是钢中碳在高温下与氢或氧发生作用生成甲烷或一氧化碳。其化学方程式如下：



脱碳是扩散作用的结果，脱碳时一方面是氧向钢内扩散；另一方面钢中的碳向外扩散^[2]，一般氧化脱碳反应从 250 °C 就已开始^[3]。

利用低于临界点 A_{c1} 温度脱碳现象，可以得到清晰的调质钢实际晶界，这是因为回火索氏体的基本特征为：铁素体基体上分布细小颗粒状碳化物；脱碳是在高温下金属表面的碳元素与氢或氧发生作用生成甲烷或一氧化碳的扩散掉^[2]，索氏体失去细小碳化物只保留了铁素体基体，同时在低于临界点 A_{c1} 温度热处理，晶粒大小不会发生变化，所以就可以测量到实际索氏体晶粒度。

1 实验方案确定

经过反复多次实验得到方案为：将待测试样表面细磨后，放入普通热处理炉加热至低于钢临界点 A_{c1} 温度下（此次实验选用低于 A_{c1} 临界点下限值 20 °C 左右），保温 70 min（碳钢可适当缩短），试样表面回火索氏体中的碳化物被氧化扩散掉，而铁素体基体保留不变；空冷到室温后，打磨抛光试样表面，用 4 % 硝酸酒精腐蚀后，得到清晰完

整的索氏体（铁素体基体）实际晶界，即可在金相显微镜下按相关标准进行晶粒度观测或拍照后测量。

2 运用实例

用材质为 20Cr1Mo1VTiB 调质态的试样为例，具体实验为：

(1) 试样未处理前，经打磨抛光后，用 4 % 硝酸酒精侵蚀，在金相显微镜下观测，组织为回火索氏体，但难以观测到晶界，见图 1。

(2) 经查工艺参数，20Cr1Mo1VTiB 的 A_{c1} 为 800~810 °C^[4]，脱碳采用将试样加热到 780 °C，保温 70 min，空冷至室温后打磨抛光后，用 4 % 硝酸酒精侵蚀；在金相显微镜下观测，脱碳后的索氏体晶界（铁素体基体）清晰完整，按 GB/T6394 《金属平均晶粒度测定方法》的方法进行检测，晶粒度为 7.5 级，见图 2。

按相关标准规定的方法进行晶粒度检测，检测结果真实有效，具有重现性。

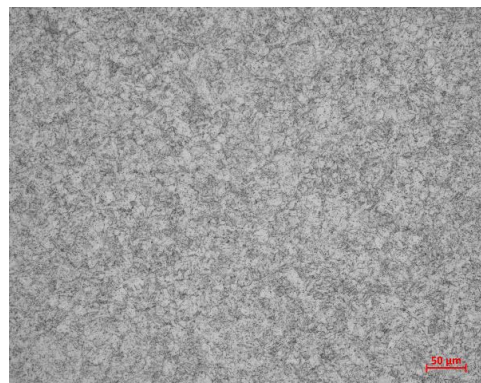


图 1 20Cr1Mo1VTiB 调质态 200X

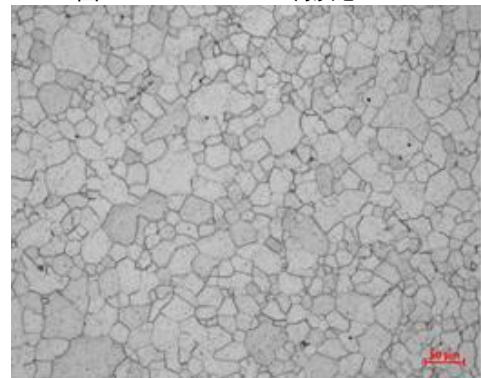


图 2 20Cr1Mo1VTiB 调质态+脱碳 200X

3 验证实验

验证实验是为了确定低于临界点 A_{c1} 温度热处理后，实际晶粒大小不会发生变化。但是由于调质钢晶粒度目前难以测量，因此采用正火加回火态的 20 钢原材料做验证实验，因为正火加回火态 20 钢原材料，组织为铁素体加珠光体，晶界易腐蚀、晶粒度易测量，方便测量脱碳前后晶粒度对比。验证实验采用与调质钢相同的表面脱碳方案，即低于 20 钢的 A_{c1} 温度热处理，测量脱碳前后的晶粒度，如晶粒度一致，就能确定低于临界点 A_{c1} 温度热处理，晶粒大小不会发生变化。具体实验为：

(1) 原材料试样表面直接打磨抛光，用 4% 硝酸酒精腐蚀后，按 GB/T6394《金属平均晶粒度测定方法》的方法进行检测，晶粒度为 9 级，见图 3。

(2) 经查工艺参数，20 钢的 A_{c1} 为 $735\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]，试样脱碳采用 $715\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 1 小时，空冷到室温。打磨抛光试样表面，用 4% 硝酸酒精腐蚀后；在金相显微镜下观测，脱碳后的组织为铁素体，按 GB/T6394《金属平均晶粒度测定方法》的方法进行检测，结果为 9 级，见图 4。

验证实验结果说明，20 钢试样脱碳前后的晶粒度均为 9 级，20 钢试样经过低于 A_{c1} 的热处理晶粒大小没有发生变化。

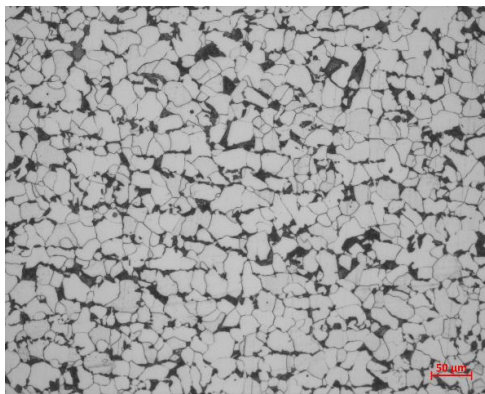


图 3 20G 正火+回火态 200X

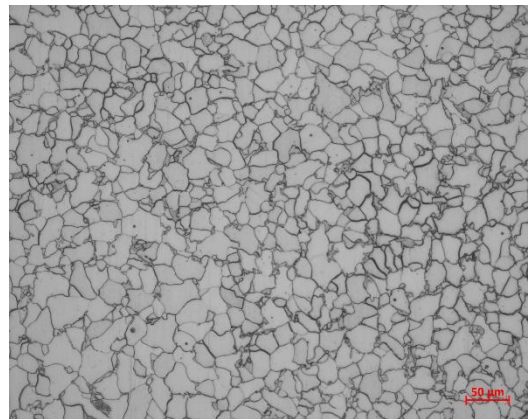


图 4 20G 正火+回火态+脱碳 200X

4 结语

本研发解决了调质钢回火索氏体晶界难以显示的问题，采用本方法即试样表面脱碳处理后，用 4% 硝酸酒精溶液就可以腐蚀出调质钢回火索氏体清晰完整的实际晶粒度，晶粒度评定结果真实有效。本方法已经在工业检测中使用，效果良好。

实验证明，20 钢试样低于 A_{c1} 的温度热处理，晶粒大小没有发生变化。

本检测方法已申请专利，专利号为 202111019122.1

参考文献

- [1] 李雪峰, 王春芬, 王嘉敏. 回火马氏体与回火索氏体辨析[J]. 热处理, 2012, 27 (4): 12-16
- [2] 耿赛晓. 加热工艺对高碳钢 65Mn 脱碳行为的影响 [J]. 河北冶金, 2013 (11): 8-12
- [3] 张志杰, 臧震. 硅钢脱碳工艺研究[J]. 科技情报开发与经济, 2004 (6): 162-163
- [4] 万嘉礼. 机电工程金属材料手册[M]. 上海科学技术出版社
- [5] 杨满, 刘朝雷. 热处理工艺参数手册[M]. 机械工业出版社. 2020

集团要闻

东方氢能汽车落地甘肃庆阳

8 月 17 日报道。近日，东方氢能与华能甘肃公司、甘肃庆阳市政府氢能产业合作协议在庆阳市签订。三方约定充分依托庆阳资源优势，以氢能公交车示范应用为起点，不断拓展氢能在庆阳市的应用场景，率先把庆阳建设成绿色氢能应用城市。

来源：东方电气公众微信号

基于一种实用型的分布式柴光互补电站的应用

周翔

东方电气集团国际合作有限公司，成都 611731

摘要：随着在第 75 届联合国大会上，中国对于“碳中和”目标的提出和承诺，相关新能源产业再次迎来了迅速发展的机遇。对传统能源的装机限制或者进行配置改造成为一种实现碳中和目标的路径之一。本文通过在非洲执行的一种性价比较高的分布式多能互补电站的实际应用案例，为解决现有传统能源能耗缺陷或者偏远地区电力获取困难的问题，提供了一个可供参考和借鉴的成功实践。

关键词：分布式；柴光互补；孤网运行；投资成本

中图分类号：TM732

文献标识码：A

文章编号：1001-9006（2022）03-0070-06

One of the Practicable Application on Distributed Hybrid Power Plant

ZHOU Xiang

(Dongfang Electric International Corporation, 611731, Chengdu, China)

Abstract: With China's proposal and commitment to the goal of "carbon neutrality" at the 75th United Nations General Assembly, the relevant renewable industry once again ushered in opportunities for rapid development. Restricting the installed capacity or carrying out system configuration transformation on traditional energy sector has become one of the possible ways to achieve the goal of carbon neutrality. This article provides a successful reference practice with distributed and hybrid solution, which has implemented in one of country of Africa and has been proven cost-effectively for solving the existing traditional energy consumption problems and the electricity accessing in remote areas.

Key words: distributed; engine-solar hybrid; isolated operation mode; investment cost

位于非洲西南部的某国，以盛产石油而在上世纪末获得了难得的黄金发展期，人口和用电需求也在这一时期得到了长足的发展。但是随着石油价格腰斩，该国经济在本世纪之初遭到重创。由于人口和用电负荷继续惯性增长，根据测算，到 2025 年该国的用电需求量将达到 7.2 GW^[1]，除了大力建设大型电站设施外，加大国家主干电网的覆盖面积也迫在眉睫，但这需要大量的资金来支撑。与此同时，大量世代生活在边远地区的传统部落，不愿抛弃故土，到周边的城市生活，因此该国的水利与能源部专门组建了农网司，来负责该类地区庞大的用电需求。根据该司的规划，通过与附近的国家电网

连接，将可满足 173 个社区（约占总人口 5%）的用电需求，而通过离网式分布式电站系统可以为 532 个社区（约占总人口 15%）的民众供应电力^[2]。本文中所描述的电站项目共包含了十数座离网式分布电站及其配套输电设施的建设，其中就包括了多座柴光互补电站和纯柴油机发电项目，本文仅对柴光互补电站进行介绍和说明。

1 项目的优势和特点

本项目除了充分发挥了分布式电站的优势外，还具备如下的特点：

收稿日期：2021-11-17

作者简介：周翔（1985—），男，2012年毕业于上海交通大学动力机械及工程专业，工学硕士，工程师。现在东方电气集团国际合作有限公司工作，主要从事市场和项目管理工作。

(1) 项目建设周期短

一般情况下，设计+采购+制造约3个月，海路运输+清关约2个月，土建施工考虑与其他活动并行约2个月，安装调试3个月，整个项目工期最快6~7个月即可建成。

(2) 节约燃料消耗量及降低维护费用

相比同等规模的纯柴油电站，柴光互补电站白天光伏发电可减少柴油消耗量和柴油发电机组投运数量，从而降低燃料成本和维护费用。

(3) 减少 CO₂ 等气体及粉尘排放

相比同等规模的柴油电站或其他化石燃料电站，柴光互补电站白天光伏发电可减少 CO₂、SO₂ 和 NO_x 等气体及粉尘排放量。

(4) 降低弃光率

相比同等规模的光伏电站，柴光互补电站可通过柴油发电机组承担主电源的负荷调节和组网功能，使光伏在孤网运行模式下得到稳定的电力输出，从而降低弃光率。

(5) 减少初始投资成本

以位于本项目中部的一座5 MW 柴光互补电站为例。通过 PVSYST 计算显示，该地区全年光照水平比较平均，每月平均日光伏峰值发电小时数基本都大于5小时，其中最少为3月份的5.26小时、最多为9月份的5.99小时，平均值为5.61小时。以此进行推算，在光伏不限功率的前提下，该电站每天光伏部分可发约9 MWh 的电力。因此安装一套存储所有光伏电力的磷酸铁锂电池系统，按电站设计年限25年考虑，其投资成本约2700万元人民币^[3]。而储能系统所储存的电量，用该项目中1台750 kW 的柴发发电，便可以完全替代。考虑到该电站场址的实际外部负荷与故障检修率等因素，即使冗余配置2台柴油机初始投资成本也不超过储能系统的1/3，因此相对电化学储能设施来说，极大的减少了初始投资成本。

(6) 配置灵活多变，较强的适应能力

项目充分结合利用该国的日照资源，输电线路的近远期规划以及每个场址的实际用电负荷进行将多个电站分为3类电站群（表1）：

表1 电站配置分类情况表

分类	配置	电网负荷	特点
电站群1	1.0 MW PV +1.5 MW DG	200~500 kW	光照辐射强度小，负荷小，产油区，油气资源丰富。
电站群2	2.0 MW PV +3.0 MW DG	600~900 kW	光照辐射强度大，光资源丰富，负荷一般，运输方便，经济发展潜力大，附近有待开发矿区；
电站群3	2.0 MW PV +3.0 MW DG	1 000~1 500 kW	光照辐射强度较大，负荷大，位于边远地区运输较困难，无功负荷较大，需要利用柴发本身具备的一定无功平衡能力。

2 电站的主要配置

本文主要以建设在该国中部的一个5 MW 柴光互补电站作为模型，对该类电站的内部主要配置进行说明。



图1 电站建成后全景

该电站是该国第一个，除电气采用国际 IEC 标准外，其余设计，土建、安装等，全部采用中国标准进行建造的现代化电站设施。电站整体占地合理，且在设计上保留了可以扩建的可能性。充分的利用地形，让场内在雨季期间，也能顺利的排水而不会出现堵积现象。由于光伏区域野草最高高度不超过10 cm，满足光伏运行安全要求^[4]，因此光伏区域主体采用了保留原生植被的原则，以防止雨季期间雨水对当地泥土的冲刷和腐蚀。光伏基础采用钢管桩的形式，既保证了工期，也对当地的生态起到了保护作用。

电站内部所有系统及设备，除高压开关柜因受运输尺寸的限制，其余全部采用集装箱预制结构或者撬装结构，将大量的现场安装和调试工程量放到了工厂内，减少了现场的土建工程量，使质量和工

期都得到极大的保证。同时也使电站整体外观看上去，更加的简约化和智能化，电站建成后的全景视

图，如图1所示。

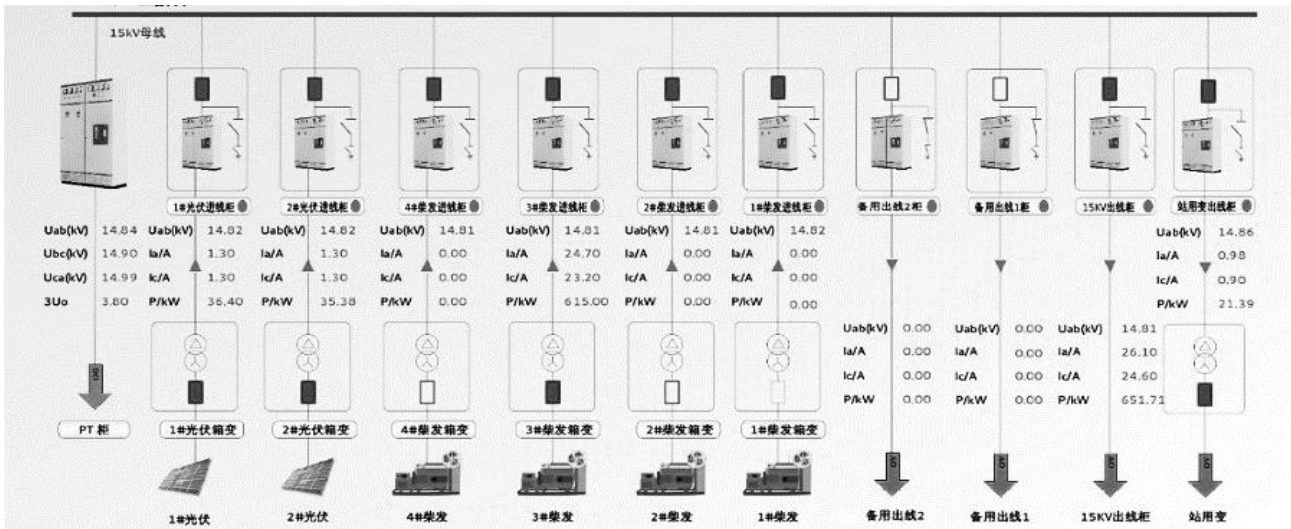


图2 电站主线图

根据图2所示,该系统主要是由4台800kW(主用功率)柴油机,2个1000kW的光伏阵列,以及3路线(1用2备)组成。光伏逆变器,柴发控制器都各自装配了同期装置,能使各个电源单元在能量管理系统的管理下,实现无缝衔接的切换过程。同时在开关柜也设立外网同期装备,使电站在后期具备并网的能力。

除此之外,电站根据当地的法律法规和油质标准,安装了消防报警系统,水消防和水喷淋系统,油净化和水净化系统。并根据电站周边负荷大小和燃油运输周期,建设了储油设施等^[5]。

3 电站控制策略

电站控制策略的主要目的就是充分利用现有电站的发电能力,用最经济,最稳定的方式跟踪外部负荷,不断调整电站柴油发电和光伏发电量的输出比例,从而满足外部负荷的要求。由于该方案在孤网状态下必须至少保证一台柴油机作为主电源以建立外网频率,所以需要在尽可能多的情况下使用光伏发电,以节省燃油消耗,如图3所示,电力供给来源图片中的核心,就是理论上光伏对外部电力负荷的供给电量总额。

在具体的控制方法上,根据不同站点的负荷复杂情况和运维人员的水平,主要可以通过人工操作

控制和微电网自动调节两种方式。两种方式都是通过具备综合能源控制功能的监控系统,根据光伏系统发电量及站内外用电负荷用电量情况,实时将柴油发电机系统需发电能指令传送至柴油发电机就地控制屏。也能根据站内外用电负荷情况,向光伏系统逆变控制箱发送功率控制指令。

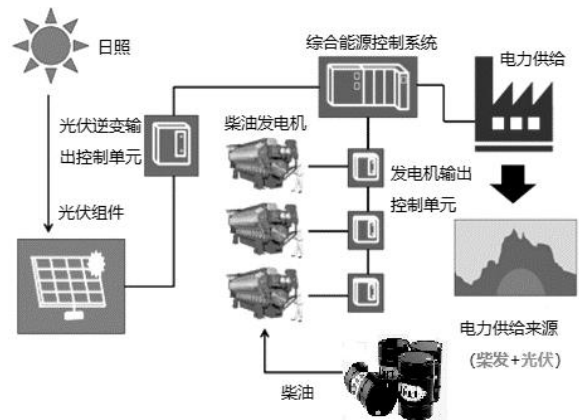


图3 柴光互补电站的工作原理拓扑图

3.1 人工操作控制

操作员根据自身经验的预判,如节假日负荷波动,外网故障,大功率设备启机等突发情况,可对需要控制的电气设备进行人工控制操作。综合能源控制系统应具有操作监护功能,允许监护人员在不同的操作员站上实施监护,避免误操作。在该种控制模式下,光伏的输出比往往根据长期的运行经验,

控制在某一固定数值，而多余的负荷承载及其变化，全部都由柴油机承担。

3.2 微电网自动调节控制

孤岛运行方式下，微网综合能源控制系统主要运行“离网经济及稳定控制”控制策略：

(1) 离网经济运行控制

监控及综合能源控制系统主要根据柴油发电机发电功率大小，自动控制柴发投退，达到发电机运行的经济性：①当柴油发电机发电功率小于其经济运行区间时，综合能源控制系统将控制退出一套柴发，将剩下的柴油发电机组出口功率重新恢复至其经济运行区间内；②当柴油发电机组发电功率大于经济运行区间，此时综合能源控制系统将自动投入一套柴发。

(2) 离网稳定控制

当光伏快速下跌或上升、柴油发电机备用容量充足的情况下，主要由柴油发电机完成孤网系统的

一次和二次调节，待系统重新稳定后各台柴发的控制器会按照额定容量比例自动分担功率。微网监控及综合能源控制系统不对其进行干预性控制。

当微网系统由于光伏快速下跌、柴油发电机备用容量不能满足负荷需求时，电网将出现频率快速下跌，此时主要利用出线保护测控装置的低周减载保护功率快速切除出线负荷。等备用柴油发电机投入并网后，再重新投入出线开关。

当光伏发电功率大于负荷需求时，将导致柴油发电机逆功率运行，此时综合能源控制系统将启动切光、限光控制，及时消除柴油发电机逆功率运行的情况，避免柴油发电机的损坏。

4 项目运行实际效果及分析

为了验证系统的可靠性和控制策略的有效性，本文特对该电站某一天的典型工况进行数据采样。经过数据分析和整理之后，得到如下图4的曲线：

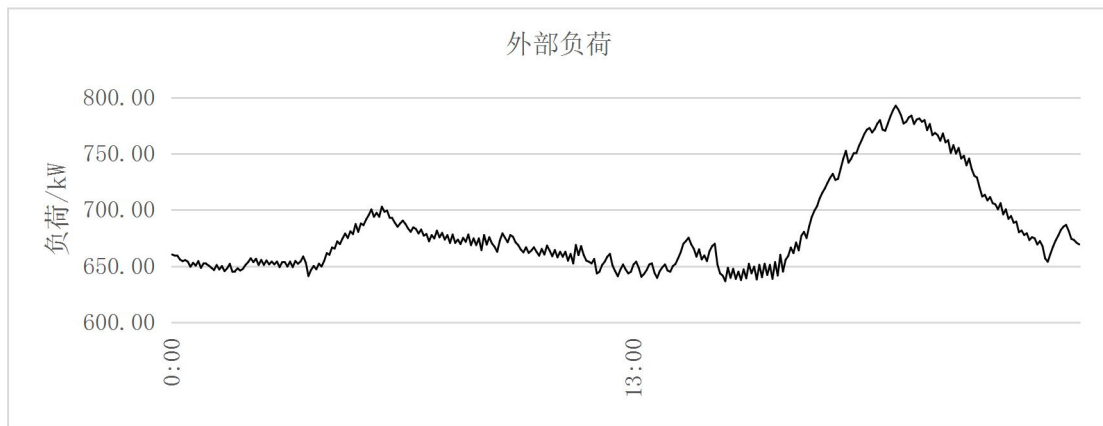


图4 电站日负荷曲线

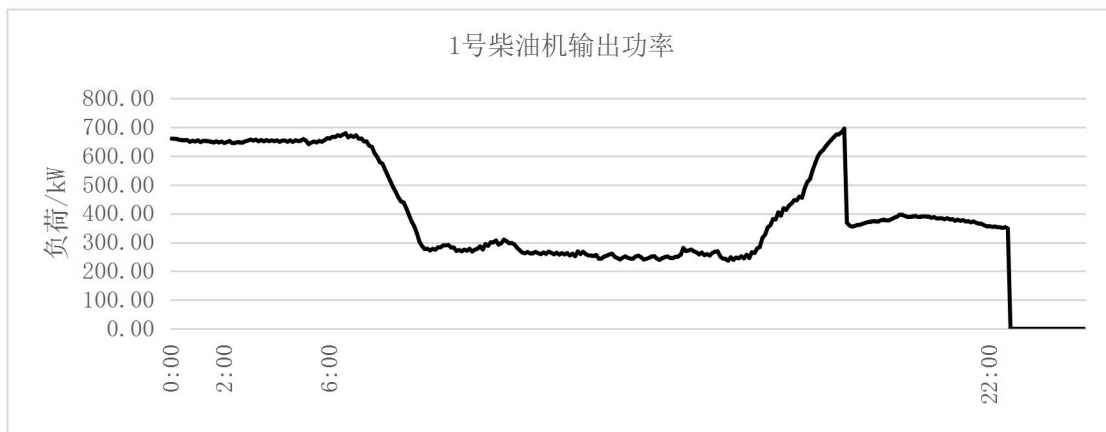


图5 柴发(1#)日负荷曲线



图6 柴发(2#)日负荷曲线

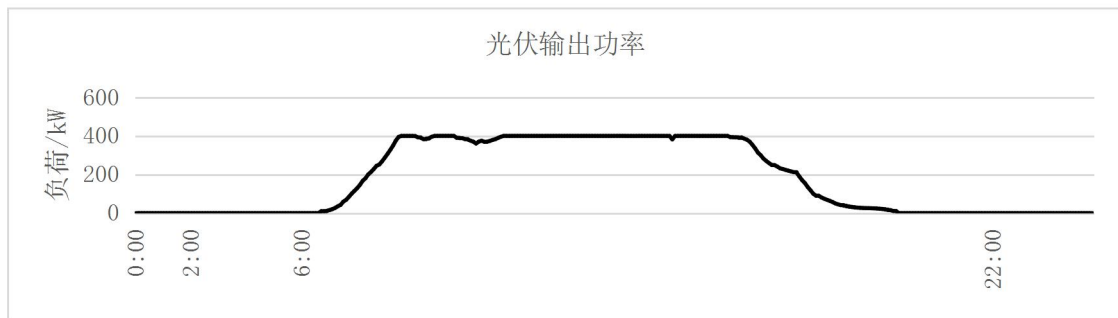


图7 伏输出曲线

从功率曲线及其变化中可以看出，以柴油机为主网的混合能源系统具有较高的稳定性和负荷调节能力。图5和图6的柴油机在整个运行期间都保持在柴油机的经济运行区间内（240 kW~700 kW）^[6]，且由于夜间负荷逐步下降，两台柴油机顺利完成了轮换，使各台柴油机之间保持较小的工作时间差距，减少了柴油机的机械疲劳程度，提高了机组使用寿命^[7]。

同时为了保证柴发运行在经济区间内，且防止

在负荷突然变化的情况下产生逆功率现象，手动将光伏的输出比控制在20%左右。如图7所示，由于该地区光照条件较好，在早上8点左右，光伏输出便达到设定的限制值400 kW，且一直保持到下午3点。

为了能更加直观的展现柴油机和光伏的功率输出，在响应外部负荷过程中的变化趋势，将图4~图7结合到一张图中，如下图8所示。

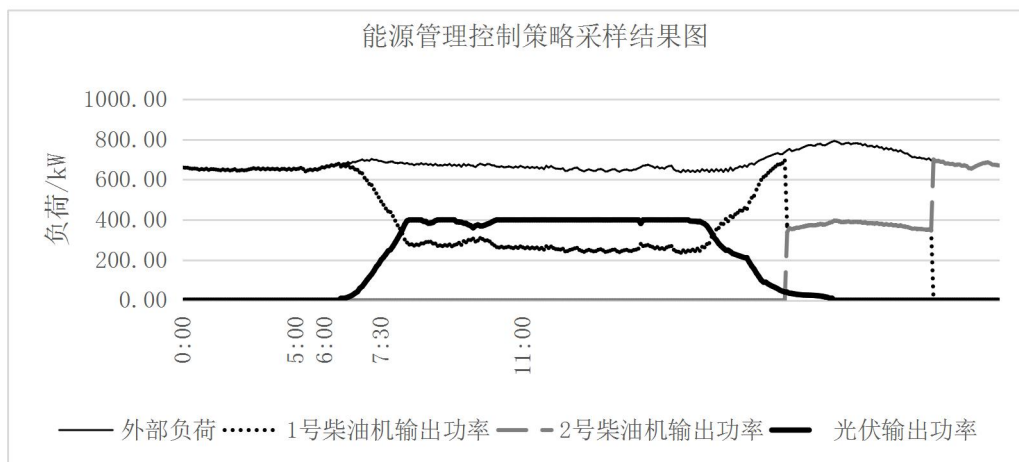


图8.能源管理策略采样综合曲线表

5 存在的问题及改进建议

(1) 前期调研不足

项目的设计上由于缺少当地前期真实的负荷数据,造成部分电站设计的发电量远远大于或者是小于当地的负荷需求,从而造成了资源的浪费或者提高了额外的运维成本。因此,对于分布式电站的设计,前期的设计输入资料非常关键,直接决定了电站各个设备的配置方案。

(2) 光伏利用率偏低

该项目中的很多电站,都存在光伏利用率不足的现象。其主要原因是因为:外界负荷率偏低,从而需要舍弃掉光伏电量,而保证柴发出力的经济性。但是这些电站大都处于光照条件非常好的地区,光伏满发出力时间都大于5个小时。因此,建议某些电站或在今后的类似方案中增加部分储能系统,配合光伏发电。为了能减少投资储能设施增加的初始投资成本,在这种系统中,储能电池的主要作用仅建立主网频率和在柴发启动过程中起到稳定出线电压的作用,而电力供给则主要由光伏(白天+晴天)和柴发(夜晚+阴雨天)提供。

(3) 当地业主的运维能力不足

由于当地缺少合格的技术工人,且高等教育的普及程度偏低,对该类型的新电站不能充分理解其工作原理,因此操作上无法根据现场的实际情况进行应急处理,造成电站因故障停机的时间较长和机率较高。建议在以后的类似项目中,能尽量的简化系统设置,并同时为业主提供长期的运维或者运维指导服务。

(上接第66页)

格,攻克了向心塔形磁极难解决的端部间隙控制难题,证明磁极压板加工精度的提升能明显降低磁极端部的间隙,将该部件列为精密加工范畴后,能大幅减小侧边分力的不良影响,为东方电机精品制造打下了良好的基础,为高水头抽水蓄能机组的安全运行提供了有效保证。

6 结语

非洲大部区域都位于光照条件较好的地区,同时也是电力可用率较低的地区,因此光伏等新能源技术在非洲有极大的发展潜力。在当前兴起的各种新能源系统中,单一能源由于其本身的局限性,如水力发电则每年都会面临旱雨季交替的问题,因此混合互补能源系统可以充分发挥各自的优势,来相互弥补各自的不足。同时又要意识到,每一个不同的场地,都会有不同的情况,因此在设计该类型电站的前期,一定要尽量做好相应的调研,只有这样才能找到一种相对合理且符合当地事实条件的能源解决方案。

参考文献

- [1] MINEA WORK GROUP. Atlas And National Strategy for New Renewable Energies [M]. Angola, Republic of Angola Ministry of Energy and Water, ISBN 978-989-97416-5-2
- [2] Euclides de Brito. O Setor Elétrico De Angola E Os Desafios Para Aumentar O Acesso À Eletricidade A Um Número Crescente Da População [J]. Universidade Catolica De Angola, Centro De Estudos E Investigacao Cientifica, Relatorio Ennergia Em Angola, 2018/2019, Capítulo 6. ISBN 9613/2000,112-154
- [3] 文军, 刘楠, 裴杰等. 储能技术全生命周期度电成本分析[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 24-29
- [4] GB 50797-2012, 光伏发电站设计规范[S]
- [5] 刘泽鑫. 柴油机+光伏混合动力发电系统 [J]. 东方电气评论, 2021, 35(2):66-69
- [6] 广西顶博电力设备制造有限公司. 柴油发电机低负荷运行发电机的3个危险信号[R/OL]. [2021-08-11], <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707793841845017906&wfr=spider&for=pc>.
- [7] 郭一平. 高强度柴油机活塞多轴机械疲劳寿命预测方法研究[D]. 山西太原: 中北大学, 2012

参考文献

- [1] 蒋家声. 大型水轮发电机用塔形向心磁极线圈[J]. 东方电机, 1997(4):48-52
- [2] 赵贵前, 郝国文. 抽水蓄能机组发电电动机磁极线圈位移的分析与监造[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(2):71-73

降低高纯锑中 Na、Si 杂质含量工艺研究

张程 雷聪 雷云棣 蒋杰昌 杨武勇

峨嵋半导体材料研究所, 四川 峨眉山 614200

摘要: 工业锑经过氯化、精馏、三氯化锑氢气还原、真空蒸馏制备的7N高纯锑中Na、Si杂质元素含量不稳定, 通过高纯锑拉晶提纯工艺、氢化工艺研究, 控制直拉温度 $670\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 直拉速度12 mm/h, 可进一步降低杂质Si元素含量至 $<0.005\text{ ppm}$; 控制氢化温度 $820\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 氢化时间12 h, 可进一步降低杂质Na元素含量至 $<0.005\text{ ppm}$ 。

关键词: 高纯锑; 直拉提纯; 氢化工艺

中图分类号: TF818

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0076-04

Research on Reducing the Content of Na and Si Impurities in High Purity Antimony

ZHANG Cheng, LEI Cong, LEI Yundi, JIANG Jiechang, YANG Wuyong

(Emei Semiconductor Material Institute, 614200, Emeishan, Sichuan, China)

Abstract: The content of Na and Si impurities in 7N high-purity antimony produced by chlorination, rectification, hydrogen reduction of antimony trichloride and vacuum distillation are unstable. Via the study of Czochralski purification process and hydrogenation process, the content of Si can be further reduced to $< 0.005\text{ ppm}$ by controlling the Czochralski temperature at $670\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the Czochralski speed at 12mm/h; the content of Na can be further reduced to $< 0.005\text{ ppm}$ by controlling the hydrogenation temperature at $820\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the hydrogenation time at 12h.

Key words: high purity antimony; czochralski purification; hydrogenation process

锑是元素周期表中第V主族元素, 是一种介于金属和半导体之间的半金属元素, 化学性质比较稳定。我国锑储量居世界首位, 但绝大多数属于纯度较低的粗锑。许多国家进口我国的粗锑, 经过深加工后又返销到我国。高纯锑(5N-7N)是制备化合物半导体晶体和外延片的关键基础材料, 可制备锑化铟、锑化镓、锑化铝等化合物半导体材料^[1], 可作为半导体硅、锗等的掺杂剂^[2]。高纯锑在电子、能源、制冷等行业具有广阔的发展应用前景。

高纯锑材料是红外探测器材料生产不可或缺的部分, 同时也是先进半导体技术发展中的关键材料, 随着我国半导体行业技术的快速发展, 对高纯锑材料的纯度要求越来越高。例如在2021年最新修订的国家标准《高纯锑》(GB/T 10117-2021)中,

6N高纯锑化学成分要求增加了Al、B、Ca、Ga、Na、Sn杂质元素含量控制上限值, 并将As、Au、Pb杂质含量控制上限值分别从0.3 ppm, 0.03 ppm, 0.03 ppm降低至0.1 ppm, 0.01 ppm, 0.02 ppm。主要是由于掺锑的N型硅单晶生长过程中, B、Ga等杂质元素含量过高易造成单晶硅反型; 锑中的重金属杂质元素As、Al、Ca、Na会影响锑化物晶体的电学参数和器件性能, 其次很多关键元器件分子束外延生长镀膜所用的高纯锑材料, 高纯锑中杂质元素也会影响器件性能。

近几年来, 有色冶金技术不断得到发展, 高纯锑的制备方法很多, 目前国内高纯锑的主流制备方法包括: 氯化-精馏-还原法(化学法)、真空蒸馏-区域熔炼法(物理法); 采用物理法制备高纯锑工

收稿日期: 2022-03-17

作者简介: 张程(1988年—), 男, 2011年毕业于西南大学材料科学与工程学院材料物理专业, 本科, 工程师。现在东方电气(乐山)峨嵋高纯材料有限公司技术研发部从事高纯材料工艺技术研发工作。

艺相对简单，但对于降低杂质 As 含量有一定局限性，制备的高纯铈纯度仅能达到 6N。采用化学法制备的高纯铈纯度可达到 7N，但由于受到工艺条件的制约，化学法制备的高纯铈中 Na、Si 杂质含量不稳定，高纯铈的应用受到一定限制，影响了后端产业链的发展，本文在化学法制备高纯铈的基础上，通过高纯铈直拉提纯、氯化工艺研究，进一步降低高纯铈中 Na、Si 杂质元素含量。

1 实验部分

1.1 直拉提纯工艺

实验目的：

表 1 某些杂质元素在铈中的分配系数

分配系数 K	As	Sn	Bi	Pb	Cu	Ag	Ni	Ga	Si	In	Fe	Mg	Al	Se	Na
理论值	0.64	0.3	0.2	0.06	0.02	0.01	0.02	<0.1	<0.1	<0.1	0.03	0.03	0.06	<0.5	<0.1
有效值	0.8	0.59	0.52	0.33	0.13	0.1	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-

实验材料：7N 铈料（Si 含量 0.08 ppm，Na 含量 0.03 ppm，其余杂质含量达到 GDMS 检测下限）、99.999 %氩气、石英坩埚。

实验设备：铈直拉炉。

实验过程：将上述 7N 铈料作为铈直拉提纯实验原料，每次直拉提纯实验称取 1.5 kg 铈料装入石英坩埚，抽真空后，用高纯氩气置换，再抽真空至系统真空度小于 1 Pa，再次充高纯氩气至 0.2 MPa（金属铈属于易挥发物质。不同温度下，铈的饱和蒸汽压计算结果如图 1 所示，需充入高纯氩气，炉内保持一定压力抑制铈挥发）。用石墨电阻加热，将装在高纯石英坩埚中的铈料熔化，待降温至引晶温度时将籽晶插入熔体表面进行熔接引晶，同时转动籽晶并反转坩埚，籽晶缓慢向上提升，进行引晶、放肩、转肩、等径生长等过程。

结果与讨论：

（1）直拉温度对提纯效果的影响

在高纯铈的直拉提纯过程中，理论上物料的温度越高，越有利于主金属中杂质元素的扩散，提纯效果越好。研究过程中投料量一定，直拉速度 12 mm/h 固定不变，在不同温度条件下开展直拉提纯工艺研究，分别对实验后的铈锭取样采用 GDMS

经过氯化-精馏-三氯化铈氢气还原、真空蒸馏制备的高纯铈中 Na、Si 杂质元素偏高，其它杂质元素含量都达到 GDMS 检测下限。需要研究化学和物理相结合的提纯工艺，进一步降低高纯铈中 Na、Si 杂质元素。直拉提纯是利用杂质的分凝效应来实现提纯效果，理论上分凝系数（或称分配系数）小于 1 的杂质在拉晶坩埚底料中富集，通过拉晶工艺可将该部分杂质分离，分配系数数值越小，分离效果越好。查询相关文献显示，铈中杂质元素分配系数 K 值如表 1 所示^[3]。从表中可以看出，Na、Si 杂质元素在主体铈中的分配系数 K 值 < 0.1。因此可采用直拉提纯工艺对此类杂质进一步提纯。

分析，实验结果如表 2 所示。

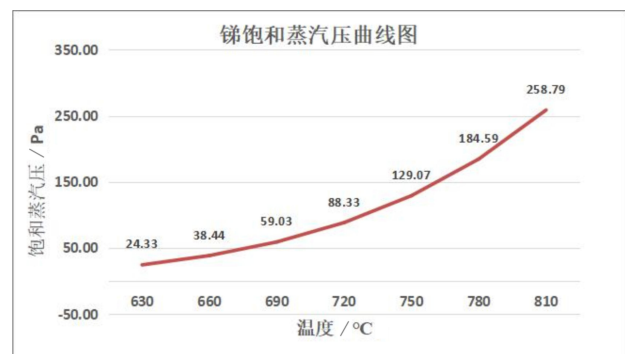


图 1 铈饱和蒸汽压随温度变化趋势图

表 2 不同直拉温度下铈中杂质含量

直拉温度 / °C	直拉提纯后杂质含量/ppm	过程现象观察
650	Na	-
	Si	-
660	Na	0.1
	Si	0.008
670	Na	0.02
	Si	<0.005
680	Na	0.03
	Si	<0.005

观察视镜有挥发物，不利于观察炉内情况

(2) 直拉速度对提纯效果的影响

在铈的直拉提纯过程中，理论上直拉速度越慢，越有利于主金属中杂质元素的扩散，提纯效果越好。研究过程中投料量一定，恒定直拉温度在 670 °C ± 5 °C，在不同直拉速度条件下开展直拉提纯实验，分别对实验后的铈锭取样采用 GDMS 分析，实验结果如表 3 所示。

表 3 不同直拉速度下铈中杂质含量

直拉速度/mm/h	直拉提纯后 杂质含量/ppm	
6	Na	0.03
	Si	<0.005
12	Na	0.02
	Si	<0.005
18	Na	0.05
	Si	0.02

从实验结果看，在直拉速度不变的条件下，随着温度升高，有利于铈中杂质元素扩散，提纯效果也较好。但铈的挥发量也逐渐增加，不利于直拉工艺的进行。在直拉温度恒定的条件下，随着直拉速度的增加，直拉效率越高，但提纯效果较差。综合直拉过程中除杂效果和直拉效率，在高纯铈直拉提纯过程中，直拉温度 670 °C ± 5 °C，直拉速度 12 mm/h 较为合理。

在高纯铈提纯工艺过程中，采用直拉提纯工艺技术，能有效的降低铈中杂质 Si 元素含量。但铈中杂质 Na 含量基本无变化，采用直拉提纯难以降低其含量。原因探讨如下：①通过查询相关资料，氯氧铈在碱性条件下可制备得到铈酸钠^[4]，在三氯化铈还原时，少量三氯化铈水解（或潮解）后进程氯氧铈，再与环境或水中 Na 元素形成了铈酸钠。铈酸钠的熔点 1 200 °C。在高纯铈的直拉提纯过程铈酸钠主要以固态形式存在，虽然 Na 元素在铈中的分配系数 < 0.1，但铈中的 Na 元素主要是以铈酸钠存在，而铈酸钠不遵循这个分配系数；②采用的合金系不同，实际分配系数与理论分配系数也会有较大的差异。

1.2 氢化工艺

实验目的：经过氯化-精馏-还原、真空蒸馏、直拉提纯制备的高纯铈，除 Na 杂质元素偏高外，

其他杂质元素含量基本达到 GDMS 检测下限。经过多批次数据检测统计，其中的杂质 Na 含量波动较大。氢化工艺研究主要目的是降低铈中 Na 杂质元素含量。

实验材料：直拉提纯后的 7N 铈料、99.999 % 氢气、石英舟、氢化石英管。

实验设备：卧室氢化炉。

实验过程：将直拉提纯后的 7N 铈料作为氢化实验原料，每次氢化实验称取 2 kg 7N 铈料装入石英舟并放入氢化炉，装料后需通氢气 8 h 后（氢气流量 0.4 L/min~0.6 L/min）开启氢化炉加热，使高纯铈在熔融状态下进行通氢氢化实验。

结果与讨论：

(1) 氢化温度对杂质含量的影响

研究过程中氢化时间 12 h 保持不变，在不同温度条件下开展实验，实验效果如表 4 所示，从实验结果看，氢化时间不变，随着温度升高，Na 元素含量逐渐降低，但主体铈损耗也随之增加。综合考虑，高纯铈氢化温度 820 °C ± 5 °C 较为合理。

表 4 不同氢化温度杂质含量及挥发量

氢化温度 /°C	直拉提纯后 Na 元素含量 /ppm	铈挥发量 /g	损耗率 /%
780	0.03	45	2.25
800	0.01	55	2.75
820	<0.005	61	3.05
840	<0.005	92	4.60

(2) 氢化时间对杂质含量的影响

研究过程中恒定氢化温度 820 °C ± 5 °C，在不同氢化时间条件下开展实验，实验效果如表 5 所示，从实验结果看，温度不变，随着氢化时间增加，Na 元素含量逐渐降低，但主体铈损耗也随之增加。综合考虑，高纯铈氢化恒温时间 12h 较为合理。

表 5 不同氢化时间杂质含量及挥发量

氢化时间/h	直拉提纯后 Na 元素含量/ppm	铈挥发量/g	损耗率/%
8	0.08	53	2.65
12	<0.005	61	3.05
18	<0.005	118	5.90

采用氢化工艺技术，能有效降低高纯铈中 Na 元素含量（Na 元素含量 < 0.005 ppm）。分析原因主要为铈酸钠在氢气氛围及高温条件下，其中的铈酸钠被还原为氢氧化钠和铈，氢氧化钠的密度为 2.12 g/cm³，低于铈密度 6.697 g/cm³，熔融氢氧化钠在熔融铈液中浮在铈液表面，且氢氧化钠在高温下可挥发（739 °C 时饱和蒸气压为 130 Pa），因此，在氢化过程中以气体的形式挥发至尾气中。

2 结语

工业铈经过氯化、精馏、三氯化铈氢气还原、真空蒸馏制备的 7N 高纯铈中 Na、Si 杂质元素含量不稳定，可通过拉晶提纯工艺可进一步降低杂质 Si 元素含量至 < 0.005 ppm。虽然 Na 元素在铈中的分配系数 < 0.1，分析高纯铈中 Na 元素主要是以铈酸

钠存在，拉晶提纯难以降低杂质 Na 元素含量。通过氢化工艺可进一步降低杂质 Na 元素含量至 < 0.005 ppm。

参考文献

- [1] 李晓霞. InSb 薄膜的制备及其在光电探测器中的应用[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020
- [2] 李学洋, 林作亮, 米家蓉等. 超高纯铈多晶材料制备工艺方法研究[J]. 云南冶金, 2020, 49(1): 56-60
- [3] 黄占超. 金属铈真空提纯及高纯铈的制备研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004
- [4] 黄兴远, 张军. 氧化回流一步法制备铈酸钠的工艺研究[C]. 有色金属工业科技创新——中国有色金属学会第七届学术年会论文集, 2008:400-404

集团要闻

东方电气首个综合智慧能源示范项目在酒泉成功投运

8月31日报道。东方电气首个风光氢储综合能源示范基地项目一期 50 MW 光氢储多能互补项目在酒泉成功并网发电。项目依托东方电气集团产业优势，创新清洁能源开发利用模式，通过新能源+电解水制氢+储能技术，提高能源供应系统安全性和灵活性，实现可再生能源互联互通。项目一期预计年均发电 1.1 亿千瓦时，可节约标煤约 3 万吨，减排二氧化碳 8 万吨。

该项目位于甘肃省酒泉市肃州区东洞滩光伏示范园区，由东方电气集团投资建设，占地面积 1800 亩，核准装机容量为 50 兆瓦，由 16 个发电单元，超过 11 万块高效双面双玻组件组成。充分发挥了集团公司各单位在项目建设、智慧能源管理、储能及氢能设备方面的优势，配置 10 MW/20 MWh 高效锂电池储能及综合智慧能源管理平台、电解水制氢储氢加氢一体化系统，光伏、储能设备以及负载设备能够无差别对等互联，大幅提升可再生能源的消纳能力，在实现削峰填谷、出力平抑，缓解电网调峰压力的同时确保电网安全运行。

项目后续将构建起风、光、氢、储新能源产业化发展模式，为东方电气集团综合智慧能源产业的规模化发展提供运营数据验证平台，是先进制造业、互联网、能源生产、存储及传输深度融合的重要成果，对推动产业技术迭代、成果转化、数字化转型发展具有积极意义，将助力集团公司绿色低碳转型以及“双碳”目标实现。

来源：东方电气网

中美规范荷载效应组合对比研究

李翔^{1,2} 高玲^{1,2*} 陈健陵^{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: 对比中国标准GB 50068-2018建筑结构可靠性设计统一标准、GB50011-2010(2016年版)建筑抗震设计规范与美国标准ASCE7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures中关于荷载组合的异同, 为设计人员采用不同规范进行结构设计时就荷载组合方面提供参考与帮助。

关键词: 中国标准; 美国标准; 荷载组合

中图分类号: TU202

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2022)03-0080-05

Comparison of Load Combinations Between China and the United States Standard

LI Xiang^{1,2}, GAO Ling^{1,2*}, CHEN Jianling^{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: The similarities and differences in load combinations are compared on the Chinese standards GB 50068-2018, "Unified Standard for the Reliability Design of Building Structures" and GB50011-2010, "Seismic design code for buildings" (2016 edition) and the American standard ASCE7-16, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures". This paper presents helpful references for designers to use different specifications for structural design on the load combination.

Key words: Chinese standard; American standard; load combination

对于海外工程的结构设计, 有的工程会指定采用美国标准进行设计, 而美国标准中关于荷载组合的内容在 ASCE7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (以下简称为“美国标准”)中进行了规定, 本文就如何理解和应用该规范进行荷载组合设计, 进行了初步的研究。同时与中国标准 GB 50068-2018 建筑结构可靠性设计统一标准(以下简称为“中国标准”)、GB50011-2010(2016年版)建筑抗震设计

规范(以下简称为“中国抗规”)进行对比分析。

1 中国标准的荷载组合

依据标准: GB 50068-2018 建筑结构可靠性设计统一标准、GB50011-2010(2016年版)建筑抗震设计规范, 中国标准规定建筑设计应区分四种设计状况, 针对不同的设计工况, 根据需要分别采用三种极限状态设计, 且对不同的极限状态进行设计时, 应采用不同的作用组合, 详见下表 1:

收稿日期: 2021-11-23

作者简介: 李翔(1991—), 男, 2013年毕业于兰州理工大学土木工程专业, 现任东方锅炉股份有限公司技术创新中心研发设计员, 主要从事结构设计工作。

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创新中心研发设计员, 主要从事结构设计工作。通讯邮箱: dbcjszx-jg@dbc.com.cn。

表1 中国标准设计状况与极限状态

设计状况	极限状态					
	承载能力		正常使用		耐久性	
	设计 与否	作用 组合	设计 与否	作用 组合	设计 与否	作用 组合
持久	应设计	基本 组合	应设计	准永久 组合	宜设计	
短暂	应设计	基本 组合	根据需 要设计	标准组 合频遇 组合		
偶然	应设计	偶然 组合	可不 设计		可不 设计	
地震	应设计	地震 组合	根据需 要设计			

1.1 承载能力极限状态设计:

中国规范强度设计有两种方法,一是分项系数法,二是容许应力法。本文以分项系数法为例与美国标准进行对比。

1.1.1 验算

(1) 抗震验算:

$$S \leq R/\gamma_{RE} \quad (1)$$

(2) 结构或结构构件的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (2)$$

其中, γ_0 ——结构重要性系数,按中国标准表 8.2.8 采用; S_d ——作用组合的效应设计值; R_d ——结构或结构构件的抗力设计值; S ——结构构件内力组合的设计值; R ——结构构件承载力设计值;

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数,当仅计算竖向地震作用时,取 1.0。

1.1.2 符号说明:

$S_{G_{ik}}$ ——第 i 个永久作用标准值的效应。

S_{GE} ——重力荷载代表值的效应。

S_{Ehk}, S_{Evk} ——水平、竖向地震作用标准值的效应。

S_p ——预应力作用有关代表值的效应。

S_{Ad} ——偶然作用设计值的效应。

$S_{Q_{1k}}$ ——第 1 个可变作用标准值的效应。

$S_{Q_{jk}}$ ——第 j 个可变作用标准值的效应。

S_{wk} ——风荷载标准值的效应。

γ_{L1}, γ_{Lj} ——第 1 个和 j 个考虑结构设计使用年限的荷载调整系数,按中国标准表 8.2.10 采用。

$\psi_{cj}, \psi_{fj}, \psi_{qj}$ ——第 j 个可变荷载的组合值系数、频遇值系数及准永久值系数。

ψ_{f1}, ψ_{q1} ——第 1 个可变荷载的频遇值系数及准永久值系数。

ψ_w ——风荷载组合值系数。

1.1.3 中国标准荷载组合

表2 中国标准承载能力极限状态荷载组合

承载能力极限状态的 基本组合	承载能力极限状态的 偶然组合	承载能力极限状态的 地震组合
当作用效应对承载力不利时, $S_d = 1.3 \sum S_{G_{ik}} + 1.3 S_p + 1.5 \gamma_{L1} S_{Q_{1k}} + 1.5 \sum \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Q_{jk}}$		1) 仅计算水平地震作用 $S = \gamma_G S_{GE} + 1.3 S_{Ehk} + 1.4 \psi_w S_{wk}$
		2) 仅计算竖向地震作用 $S = \gamma_G S_{GE} + 1.3 S_{Evk} + 1.4 \psi_w S_{wk}$
	$S_d = S_{G_{ik}} + S_p + S_{Ad}$	3) 同时计算水平与竖向地震作用 (水平地震为主) $S = \gamma_G S_{GE} + 1.3 S_{Ehk} + 0.5 S_{Evk} + 1.4 \psi_w S_{wk}$
当作用效应对承载力有利时, $S_d = (\leq 1.0) S_{G_{ik}} + (\leq 1.0) S_p$	$+ \psi_{f1} (\text{或} \psi_{q1}) S_{Q_{1k}} + \sum \psi_{qj} S_{Q_{jk}}$	4) 同时计算水平与竖向地震作用 (竖向地震为主) $S = \gamma_G S_{GE} + 0.5 S_{Ehk} + 1.3 S_{Evk} + 1.4 \psi_w S_{wk}$

注: 1.对于地震组合,一般结构, ψ_w 取 0, 当风荷载起控制作用时, ψ_w 取 0.2。地震组合中,当重力荷载对承载能力不利时, γ_G 取 1.2, 有利时,不大于 1.0。

2.以上公式作用与作用效应按线性关系考虑。

1.2 正常使用极限状态荷载：

$$S_d \leq C \quad (3)$$

结构或结构构件按正常使用极限状态设计时，应符合下式（3）规定：

C——设计对变形、裂缝等规定的相应限值。
正常使用极限状态设计荷载组合详见下表 3：

表 3 中国标准正常使用极限状态荷载组合

正常使用极限状态的标准组合	正常使用极限状态的频遇组合	正常使用极限状态的准永久组合
$S_d = \sum S_{G_{ik}} + S_p + S_{Q_{1k}} + \sum \psi_{cj} S_{Q_{jk}}$	$S_d = \sum S_{G_{ik}} + S_p + \psi_{f1} S_{Q_{1k}} + \sum \psi_{qj} S_{Q_{jk}}$	$S_d = \sum S_{G_{ik}} + S_p + \sum \psi_{qj} S_{Q_{jk}}$

注:1. 以上公式作用与作用效应按线性关系考虑。

2 美国标准荷载及组合

标准名称：ASCE7-16《建筑物和其他结构的最小设计荷载和相关标准》

美国规范极限状态设计有两种，一种是强度设计极限状态(strength limit state)，一种是正常使用极限状态(serviceability limit state)。在规范正文中对强度设计极限状态进行了详细规定，对正常使用极限状态，在规范的附录 C 的条文说明中给出了设计指导。

2.1 荷载符号说明：

D—恒荷载；D_i—冰自重；L—活荷载；L_r—屋顶活荷载；S—雪荷载；R—雨荷载；F—流体荷载；F_a—洪水荷载；H—土压力，水压力以及材料堆积压力；T—自应变荷载；W—风荷载；E—地震作用；E_h—水平地震作用；E_{mh}—超强水平地震作用；E_v—竖直地震作用；A_k—偶然荷载；N—结构名义荷载。

2.2 美国标准荷载组合

美国规范强度设计有两种方法，一是荷载与抗力系数设计(LRFD)，二是容许应力设计(ASD)。

表 4 美国标准承载能力极限状态荷载组合

极限强度设计(LRFD)的荷载基本组合	容许应力设计(ASD)的荷载基本组合
(1) 1.4(D+F)	(1) (D+F)
(2) 1.2(D+F)+1.6L+0.5(L _r or S or R)	(2) (D+F)+L
(3) 1.2(D+F)+1.6(L _r or S or R)+(L or 0.5W)	(3) (D+F)+(L _r or S or R)
(4) 1.2(D+F)+1.0W+L+0.5(L _r or S or R)	(4) (D+F)+0.75L+0.75(L _r or S or R)
(5) 0.9D+1.0W	(5) (D+F)+0.6W
(6) 1.2(D+F)+E _v +E _h (E _{mh})+L+0.2S	(6) (D+F)+0.75L+0.75(0.6W)+0.75(L _r or S or R)
(7) 0.9(D+F)-E _v +E _h (E _{mh})	(7) 0.6D+0.6W
	(8) 1.0(D+F)+0.7E _v +0.7E _h (E _{mh})
	(9) 1.0(D+F)+0.525E _v +0.525E _h (E _{mh})+0.75L+0.75S
	(10) 0.6(D+F)-0.7E _v +0.7E _h (E _{mh})
极端工况的荷载组合（偶然组合）	
(0.9 or 1.2)D+A _k +0.5L+0.2S	
(0.9 or 1.2)D +0.5L+0.2(L _r or S or R)	
结构完整性的名义荷载组合	结构完整性的名义荷载组合
(1) 1.2D+1.0N+L+0.2S	(1) D+0.7N
(2) 0.9D+1.0N	(2) D+0.75(0.7N)+0.75L+0.75(L _r or S or R)
	(3) 0.6D+0.7N

2.2.1 承载能力极限状态荷载组合

值得注意的是, ASCE7 中对于不同的荷载组合, 在洪水区, 或者遭遇冰荷载时, 其组合需进行相应变换。荷载组合中有一些特殊情况, 设计时需注意。

2.2.2 正常使用极限状态荷载组合

美国标准中对于正常使用极限在附录 C 的条文说明中给出了建议组合。正常使用极限状态设计包括外观不良变形, 可修复裂缝, 内部损坏以及其它短期效应影响, 见下表右侧中的组合, 对于涉及蠕变、沉降或者类似长期或永久影响的正常使用极限状态, 见下表 5 左侧的组合。

表 5 美国标准正常使用极限状态荷载组合

长期效应 (对应于国 标持久设计状况)	短期效应 (国标的短暂设计状况)
D+0.5L	D+L
	D+0.5S
	D+0.5L+W _a

注: 附录 C 中的地图适用于正常使用极限状态, 不用于强度极限状态。由于风荷载的瞬态特性, 在分析蠕变或其它长期作用的影响时, 无需考虑风荷载。

3 中美标准荷载组合对比

3.1 极限状态对比

中国标准考虑到标准的可延续性, 同时与国际标准接轨, 引入了耐久性极限状态, 即规定了承载能力极限状态、正常使用极限状态和耐久性三种极限状态设计, 而美国标准中仅有强度极限状态和正常使用极限状态两种极限状态设计。以下为方便对比各分项系数, 采用美国标准的 LRFD 方法与中国标准进行对比。

3.2 承载能力极限状态设计

(1) 中美规范均采用基本组合、偶然组合以及地震组合进行设计, 美国还多了结构完整性设计的名义荷载组合。

(2) 基本组合中恒载的分项系数, 中国标准

最新版中未区分是由永久荷载或可变荷载控制, 而是统一取为 1.3, 对可变荷载分项系数, 取为 1.5。美国标准只有永久荷载时, 取 1.4, 其余取 1.2, 对楼面活荷载分项系数, 取 1.6。

(3) 偶然组合中的系数, 中国标准对于永久荷载取为 1.0, 偶然荷载取为 1.0, 美国标准, 规定永久荷载若对结构稳定有利取为 0.9, 其它情况取为 1.2, 偶然荷载系数同样取 1.0。且考虑了偶然荷载发生时以及偶然荷载发生后剩余承载力验算两种工况进行验算。且规定在遭遇偶然荷载作用时, 结构或结构构件需保持稳定, 任何考虑二阶效应的方法均是允许的。

(4) 地震组合, 中国标准规定当重力荷载对承载能力不利时, 取为 1.2, 有利时, 不大于 1.0, 对主要地震系数取 1.3。美国标准也区分恒荷载对承载能力不利时取 1.2, 有利时取 0.9。明显区别在于美国标准明确规定不考虑地震和风同时作用, 中国标准对于一般结构, 不考虑二者同时作用, 但对风荷载起控制作用的系数取 0.28。美国标准地震作用系数为 1.0, 因其已是设计值。

3.3 正常使用极限状态设计

中美标准对于正常使用极限状态, 均规定了对应于持久设计状况和短暂设计状况的荷载组合。

(1) 持久设计状况, 中国标准采用作用的准永久组合, 永久荷载分项系数取 1.0, 可变荷载取准永久组合。美国标准永久荷载分项系数也取 1.0, 屋面活荷载分项系数取 0.5。

(2) 对于短暂设计状况, 中国标准采用标准或频遇组合, 对永久荷载系数取 1.0, 对可变荷载分别取对应的标准值、频遇值或准永久值。美国标准永久荷载分项系数均为 1.0。

3.4 实际应用对比

下表以中国标准中承载能力极限状态基本组合及美国标准中 LRFD 组合为例, 且二者均考虑恒荷载不利的情况, 应用对比如下表 6:

表 6 承载能力极限状态荷载组合

标准	中国	美国	备注
仅恒载	1.3D	1.4D	
恒载加活载	1.3D+1.5L	1.2D+1.6L	
考虑风荷载	1.3D+1.05L+1.5W	1.2D+1.0L+1.0W	
考虑地震效应	1.2D+0.84L+1.3Eh+0.5Ev +0.28W	1.2D+L +Ev+Eh	美国标准明确了风与地震不同时组合, 而中国规范对风荷载起控制作用的建筑, 需同时组合。

- 结论: 1. 仅考虑恒荷载时, 美国规范取值大于中国, 且恒载组合值是中国标准的 1.08 倍。
 2. 考虑恒荷载与活荷载组合时, 中国标准恒荷载组合系数大于美国, 而美国标准活荷载系数大于中国, 即当恒荷载为主时, 根据中国标准算得的组合值大于美国规范, 当活荷载为主时, 根据美国规范算得的组合值大于中国标准。
 3. 考虑风荷载时, 无论恒荷载还是活荷载、风荷载, 中国标准系数均大于美国标准。但因美国标准风荷载计算方法与中国不同, 实际工程中需根据具体参数进行相应计算。
 4. 地震效应参与时, 中美标准的恒荷载系数取值相同, 均为 1.2, 但活荷载系数略有区别, 美国组合中地震效应系数之所以是 1, 因为其地震效应值已经是设计值。而中国标准的地震效应值为标准值。

表 7 正常使用极限状态荷载组合

标准	中国		美国		
	持久设计状况 (准永久组合)	短暂设计状况(标准组合)	短暂设计状况(频遇组合)	长期效应组合	短期效应组合
仅恒载	1.0D	1.0D	1.0D	1.0D	1.0D
恒载加活载	1.0D+0.6L	1.0D+1.0L	1.0D+0.7L	1.0D+0.5L	1.0D+1.0L
考虑风荷载		1.0D+0.7L+1.0W	1.0D+0.7L		1.0D+0.5L+W _s
		1.0D+1.0L+0.6W	1.0D+0.6L+0.4W		
考虑地震效应		1.0D+0.7L+1.0E		不考虑	不考虑

- 结论: 1. 组合中的恒荷载, 美国规范与中国标准相同, 均为 1.0。
 2. 活荷载的组合值系数, 对于长期效应, 中国标准为 0.6, 美国为 0.5, 中国标准略大于美国标准。对于短期效应, 中国标准根据标准与频遇组合不同, 采取不同的组合系数, 而美国采取 1.0 或 0.5。
 3. 考虑风荷载时, 中国标准对于风荷载组合值系数取 0.6, 频遇值系数取 0.4, 准永久值系数取 0, 而美国规范取 1.0。
 4. 地震效应参与时, 中国标准需考虑地震效应标准组合, 而美国标准不考虑。

4 结语

(1) 美国规范验算承载能力极限状态的基本组合时, 采用了 LRFD 和 ASD 两种设计方法, 而中国标准对于结构或构件的破坏或过度变形的承载力设计采用分项系数法, 对地基破坏或过度变形, 也可采用容许应力法。美国标准承载能力极限状态设计考虑结构完整性的名义荷载组合, 而中国标准未考虑。

(2) 地震组合设计, 中国规范直接给出了 1.3 和 0.5 的分项系数, 而美国规范因采用的是地震设计值, 所以系数取的是 1.0。美国规范对于可变荷载, 未规定标准值、组合值、频遇值或准永久值, 但在其荷载组合中予以体现。

(3) 美国标准规定地震与风不同时组合, 并考虑超强地震, 中国标准对于风荷载起控制作用时, 风与地震同时组合。

(4) 中国标准中荷载效应考虑结构重要性系数及设计使用年限的荷载调整系数, 而美国标准无此系数。

参考文献

- [1] GB 50068-2018, 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 中国建筑工业出版社, 2018, 北京
 [2] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范 (2016 年版)[S]. 中国建筑工业出版社, 2016, 北京
 [3] ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures[S]

欢迎投稿, 欢迎订阅!

金峰水库大坝坝坡稳定分析研究

廖大勇¹ 初伟² 许刚¹

1.四川省水利水电勘测设计研究院有限公司, 成都 610072; 2.东方电气集团东方汽轮机有限公司 四川 德阳 618000

摘要: 金峰水库大坝坝型为碾压式沥青混凝土心墙石渣坝, 最大坝高89 m, 全断面采用软岩料填筑, 在目前存在的大坝工程中极为少见。为验证大坝计算选用参数的合理性, 通过数次试验验证, 获得了真实准确的计算参数。为分析坝坡各工况下的安全稳定, 通过计算获得不同工况下稳定和非稳定渗流场, 然后在对应工况渗流场的基础上采用极限平衡法中的Morgenstern-price法开展坝坡稳定计算。引入渗流场的坝坡稳定计算, 能更好反映坝体工程在各种工况下的实际状态, 为工程建设提供有效的技术依据。

关键词: 金峰水库; 碾压式沥青混凝土心墙石渣坝; 软岩料筑坝; 稳定计算

中图分类号: TV642

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2022) 03-0085-04

Analysis of Dam Slope Stability of Jinfeng Reservoir Dam

LIAO Dayong¹, CHU Wei², XU Gang¹

(1. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute Co., Ltd., 610072, Chengdu, China;

2. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The dam type of Jinfeng reservoir is a rolled asphalt concrete core rock-debris dam. The maximum height is 89 m, and the full section is filled with soft rock material, which is extremely rare in the existing dam projects. In order to verify the rationality of the parameters selected in the calculation of the dam design, the real and accurate calculation parameters are obtained through several tests. In order to analyse the safety and stability of dam slope under various working conditions, the steady and unsteady seepage fields under different working conditions are obtained by calculations, and then the Morgenstern-price method in limit equilibrium method is used to carry out the stability calculation of dam slope on the basis of the seepage field of the corresponding working conditions. The stability calculation of dam slope with seepage field better reflects the actual state of the dam under various working conditions, and provides an effective technical basic for the construction of the project.

Key words: Jinfeng reservoir; rolled asphalt concrete core rock-debris dam; soft rock material for damming; stability calculation

金峰水库地处低山丘陵区, 水库总库容 0.98 亿 m³, 库址位于四川省绵阳市盐亭县金安乡西北 1.5 km 西河支流凤鸣河上源王家沟。金峰水库校核洪水水位 EL.475.45 m, 设计洪水位和正常蓄水位相同为 EL.475.00 m, 死水位 EL.445.00 m。金峰水库大坝坝型为碾压式沥青混凝土心墙石渣坝, 全断面采

用软岩料填筑, 大坝最大坝高 89 m, 坝顶高程 EL.477 m, 坝顶长度 455 m, 坝顶宽度 8 m, 大坝的建筑物级别为 2 级。大坝最大坝高处横剖面图如图 1 所示。

收稿日期: 2022-08-17

作者简介: 廖大勇 (1976—), 男, 1999 年毕业于武汉水利电力大学水力发电工程专业, 学士, 高级工程师。现任职于四川省水利水电勘测设计研究院有限公司, 主要从事研究水工结构设计方向工作。

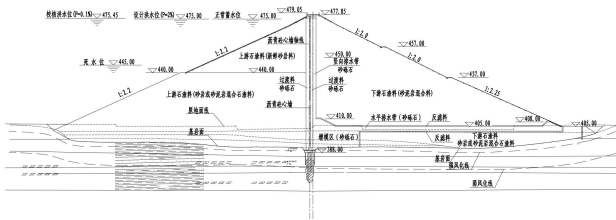


图1 金峰水库大坝最大坝高处横剖面图

水库大坝坝体填筑材料分区如图1所示,坝体从上游到下游依次为:上游石渣料区(新鲜砂岩料、砂岩或砂泥岩混合石渣料)、上游过渡料区(砂砾石料),心墙区(沥青混凝土料)、下游过渡料区(砂砾石料)、竖向排水带(砂砾石料)、下游石渣料区(砂岩或砂泥岩混合石渣料)及水平排水带(砂砾石料)等。金峰水库石渣料场砂泥岩互层分布,砂岩、砂泥岩混合石渣料属于软岩~极软岩料。金峰水库大坝全断面采用软岩料填筑,在国内已建成的工程中极为少见^[1]。

1 计算方法和模型

1.1 计算方法

计算程序采用河海大学水工结构有限元分析系统(AutoBank 7.7)。计算碾压式沥青混凝土心墙石渣坝在施工期、渗流稳定期及库水位下降期间的坝体稳定性变化情况。

根据《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2020)的规定,在坝坡稳定计算中,采用的是极限平衡法中的Morgenstern-price法^[2-6]。在稳定计算过程中,首先对大坝各工况下的渗流的渗流情况进行分析,得到各种情况下的渗流场水头分布;然后将渗流场输入到坝坡稳定性计算中。在计算软件中用条分法计算坝坡的稳定安全系数^[5-6]。

金峰水库大坝筑坝材料主要为无粘性材料,材料的抗剪强度均采用有效应力法如式(1):

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

式中, τ 土体抗剪强度; c' 、 ϕ' 为有效应力抗剪强度指标; σ' 法向有效应力。

1.2 计算模型与边界条件

根据规范需计算4种工况:

- (1) 竣工期上、下游坝坡(非常运用条件I)。
- (2) 稳定渗流期的上、下游坝坡(正常运用

条件)。

(3) 水库水位降落期的上游坝坡(正常运用条件)。

(4) 正常运用遇地震的上、下游坝坡(非常运用条件II)。

金峰水库设置了汛限水位,水库设计洪水位与正常蓄水位相同,由水库运行条件可知,库水位由正常水位 EL.475 m 消落到死水位 EL.445 m,最快消落时间为 785 小时(32.7 天);金峰水库水库区地震基本烈度为 VI 度,可不进行抗震计算,所以在本计算中不再考虑情况 4。

经试算库水位下降到死水位时为上游坝坡稳定最不利的情况(水库水位下降对下游坝坡稳定无影响)。

计算模型选取高程 EL.346 m 为零势能面,基岩厚度取 44 m (0.5 倍坝高),对应上游正常蓄水位(设计洪水位)为 129 m,上游校核洪水位为 129.45 m,上游死水位位 99 m;下游水位均为 59 m。碾压式沥青混凝土心墙石渣坝坝体典型横剖面坝坡稳定计算模型如图 2 所示。

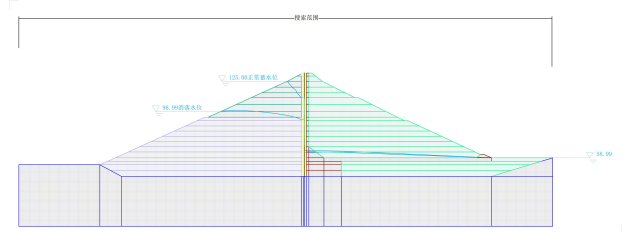


图2 碾压式沥青混凝土心墙坝典型横剖面坝坡稳定计算模型

2 填料计算参数选取

金峰水库采用全断面软岩石渣料筑坝,石渣料开采于大坝左岸库区的炮台咀料场,大坝填筑石渣料以砂岩料为主,局部部位采用砂泥岩混合石渣料填筑。根据钻孔岩心取样试验,砂岩块体密度为 1.90~2.17 g/cm³,孔隙率 18~28%,饱和抗压强度平均值为 11.6~15.5 MPa,软化系数 0.44~0.56,属软岩~较软岩;粉砂质泥岩块体密度 2.30 g/cm³,孔隙率 14.5%,饱和抗压强度平均值为 3.7 MPa,属极软岩。

基于岩石天然孔隙率较大,坝壳料设计按照压实度进行碾压指标控制。可研及初设阶段设计从炮

台组料场取料进行室内试验，根据试验成果进行坝坡稳定计算；施工图阶段根据现场碾压试验进行现场取样进行室内试验，设计对坝坡稳定进行了验证；大坝碾压填筑阶段，项目业主委托我院水电科研所作为第三方检测单位对大坝上下游坝壳料每 15 m 高程左右进行现场取样试验，设计再次根据试验成果进行了复核，本文计算选用了现场检测试验参数如表 1 所列，进行坝坡稳定计算^[1-4]。

表 1 坝体抗剪强度参数值

坝料	干密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	含水率 (%)	饱和 密度 (g/cm ³)	渗透系数 (cm/s)	抗剪强度指标等		
						方法	C (MPa)	φ (度)
上游 石渣料	1.98	26.3		2.24	5×10 ⁻⁵	CD	0.020	33.0
						CU	0.020	31.0
下游 石渣料	2.02	24.54		2.26	5×10 ⁻⁵	CD	0.020	31.0
						CU	0.020	30.0
垫层 过渡料	2.27		3.2	2.34	1.0×10 ⁻³	CD	0.030	37.0
						CU	0.030	35.0
砂卵 石排水料	2.32		3.3	2.40	1.0×10 ⁻²	CD	0.030	36.0
						CU	0.030	35.0
沥青 混凝土	2.40			2.40	1.0×10 ⁻⁸	CD	0.2375	33.4

3 计算结果及分析

3.1 坝坡稳定计算结果

3.1.1 工况一：完建时

在不考虑水库蓄水情况，选取大坝施工已到达坝顶时，对坝坡稳定进行计算。坝体上、下游最危险滑移面如图 3 所示。

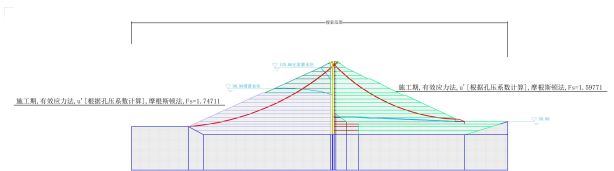


图 3 完建时坝体上、下游最危险滑移面

3.1.2 工况二：正常运行期

通过相关计算，可得到正常运行期（正常蓄水位/设计洪水位工况下）的饱和和稳定渗流场分布。然后在该渗流场条件下，进行坝坡稳定计算。坝体上

下游最危险滑移面如图 4 所示。

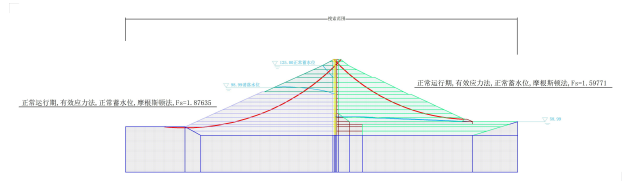


图 4 正常运行期坝体上、下游最危险滑移面

3.1.3 工况三：水库水位下降期（非稳定渗流期）

通过相关计算，可得到水库水位下降工况下的饱和和非稳定渗流场分布。然后在该渗流场条件下，进行坝坡稳定计算。坝体上游最危险滑移面如图 5 所示。

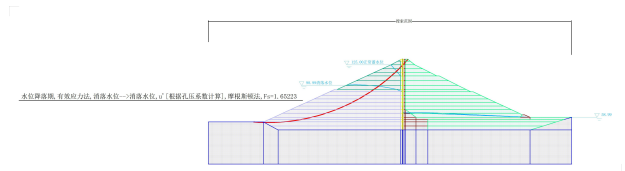


图 5 水库水位下降期坝体上、下游最危险滑移面

3.2 计算结果分析

(1) 计算表明心墙坝的坝坡稳定情况符合一般规律，上、下游坝坡的抗滑稳定安全系数均满足规范要求，不会发生失稳破坏。水库水位下降至死水位附近时上游坝坡稳定系数最低，各工况坝坡稳定安全系数如表 2 所示。

表 2 各工况坝坡稳定安全系数

计算方法	位置	施工期 工况	正常蓄水 位工况	水位下 降工况
有效应力法	上游坝坡稳定 安全系数	1.75	1.88	1.65
有效应力法	下游坝坡稳定 安全系数	1.60	1.60	
	允许安全系数	1.25	1.35	1.35

(2) 完建工况属于非常运用条件 I，正常蓄水位工况、死水位工况及库水位下降工况属于正常运用条件，两种条件最小安全系数分别为 1.25 和 1.35，计算结果显示均满足规范要求。

(3) 库水位下降工况下（水在死水位附近），水库水位由正常水位 475 m 消落到死水位 445 m，消落时间分别为 785 小时，水库水位为正常降落，该工况为上游坝坡控制工况，上游坝坡稳定安全系数为 1.65，满足规范要求。

4 结语

(1) 本工程为全断面软岩料筑坝, 筑坝材料主要为砂岩、及砂泥岩混合料, 材料抗剪强度参数 ϕ 较一般的硬岩料偏低, 参数 C 较一般的硬岩料偏高, 因此各工况最危险滑弧深度较硬岩筑坝略深。

(2) 金峰水库坝坡坡比在软岩石渣料填筑的土石坝中属于偏陡, 本工程设计提供了严格的控制指标, 通过反复的现场取样试验及室内试验, 获得了真实准确的计算参数, 对坝坡设计进行了反复验证。金峰水库目前已蓄水 80 m, 根据监测数据分析, 坝体渗流及坝体沉降满足要求, 金峰水库软岩筑坝的成功, 为国内采用类似材料填筑的土石坝设计提供了可资借鉴的经验。

参考文献

- [1] 高希章,孙陶.沥青混凝土心墙坝筑坝料与心墙合理模量比研究[J]. 四川水利, 2016, 37(1):14-17+39
- [2] 四川省武都引水二期灌区工程初设设计阶段金峰水库工程筑坝料试验研究报告[R]. 四川省水利水电勘测设计研究院, T2012-001
- [3] 四川省武都引水二期工程金峰水库工程筑坝料碾试验碾压层(体)试样室内物理力学性质试验研究报告[R]. 四川省水利水电勘测设计研究院, YT2015-003
- [4] 金峰水库大坝石渣填筑代表性大样物理力学性质试验报告[R]. 四川省水利水电勘测设计研究院, BT2020-035
- [5] SL 501-2010, 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]
- [6] SL 274-2020, 碾压式土石坝设计规范[S]

集团要闻

东方汽轮机建设的全球首个二氧化碳+飞轮储能示范项目成功竣工

8月25日上午, 东方汽轮机厂区项目现场, 随着压缩机启动, 稳步提升至额定转速, 二氧化碳气体从巨大的柔性气仓中被抽取并压缩。至此, 全球首个二氧化碳+飞轮储能示范项目成功竣工、呈现世界, 标志着我国这一新型储能技术实现了工程应用的巨大飞跃。

全球首个二氧化碳+飞轮储能示范项目, 是2022世界清洁能源大会示范应用场景之一, 由东方电气集团东方汽轮机有限公司、百穰新能源科技(深圳)有限公司、西安交通大学能源与动力工程学院、北京泓慧国际能源技术发展有限公司共同打造。项目占地 18 000 m², 约为两个半足球场大小, 储能规模 10 MW/20 MWh, 能在 2 小时内存满 2 万度电, 是全球单机功率最大, 储能容量最大的二氧化碳储能项目, 也是全球首个二氧化碳+飞轮储能综合能源站。

项目各合作方依托十余年积累的新材料及系统设计集成经验、新型能源系统和二氧化碳动力装备方面的研发及工程应用经验、国内首套满负荷运行的超临界二氧化碳系统压缩机/透平等关键动力设备的成功研制经验, 在热力系统集成及优化、透平设备研制、经济性设计等方面取得了一系列研究成果, 突破了储能系统及动力装备的多项核心技术, 具有完全自主知识产权, 项目的建成, 将进一步加快我国新型电力系统构建的步伐, 助力我国新型储能技术走在世界的前列。

来源: 东方电气网

欢迎投稿, 欢迎订阅!