

Research on the Integration of Heating Process and Equipment for Steam Generator Roll Plug in Nuclear Power Plants

Yujian Chen Long Chen Laizhan Sun Dongli Wang Xiaogang Zheng

CGNPC Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518100, China

Abstract

Currently, China's technology for removing the rolled plugs from the heat transfer tubes of nuclear power plant steam generators is relatively backward. To solve the problem of removing rolled plugs during the tube plugging process in nuclear power plants, especially the problem of removing plugs when the plugged heat transfer tubes need to be reused due to abnormalities during the plugging process or other reasons, this paper designs and develops the heating process and equipment for the rolled plugs of SG heat transfer tubes. Aiming at the pain points of low efficiency and easy damage to heat transfer tubes in traditional mechanical removal methods, this paper discusses in detail the optimization method of the heating process and the integrated design of the equipment, aiming to improve the efficiency and quality of plug removal, reduce damage to heat transfer tubes, and provide technical support for the safe operation and economic benefits of nuclear power plants.

Keywords

nuclear power; steam generator; roll expansion plug; Heating

核电厂蒸汽发生器辊胀堵头加热工艺与设备的研发

陈育坚 陈龙 孙来战 王东利 郑孝纲

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518100

摘要

目前国内对核电站蒸汽发生器传热管辊胀式堵头取出技术较为落后,为解决核电站堵管过程中辊胀式堵头取出难题,特别是在堵管实施过程中发生异常或因其他原因需要将堵管的传热管复用时取出堵头的问题,本文设计开发了SG传热管辊胀式堵头加热工艺与设备。针对传统机械取出方法效率低、易损伤传热管的痛点,本文详细探讨了加热工艺的优化方法和设备的集成设计,旨在提高堵头拆除效率和质量,减少对传热管的损伤,为核电站的安全运行和经济效益提供技术支持。

关键词

核电; 蒸汽发生器; 辊胀堵头; 加热

1 引言

在核电厂运行过程中伴随着应力腐蚀、机械损伤、磨损、疲劳等情况,蒸汽发生器传热管不可避免的会发生壁厚减薄甚至破损的现象,常采用辊胀式堵头对缺陷传热管进行堵管维修。^{[1][2]}如出现堵头安装不合格等异常情况,需要在不损伤传热管和管板表面的前提下对堵头进行拆除。^[3]辊胀式堵头可采用热缩方式进行拆除:先用电弧加热的方式对堵头内部进行加热,然后待其自然冷却,冷却过程中堵头产生径向和轴向收缩力并释放其与传热管贴合的应力,使其直径变小。基于上述原理研究堵头加热工艺的优化方法和设备的集成设计。

【作者简介】陈育坚(1991-),男,中国广东深圳人,工程师,本科,从事蒸汽发生器维修研究。

2 背景及现状

2.1 研究背景与意义

在核能领域,蒸汽发生器(Steam Generator,简称SG)作为核电站的关键设备之一,承担着一回路与二回路进行热能交换的任务,同时也是包容一回路强放射性物质的重要屏障。由于蒸汽发生器传热管长期处于高温、高压、高辐射和复杂化学环境中,容易出现缺陷和破损,导致放射性物质泄漏。一旦传热管出现破损,放射性物质将进入二回路系统,引发严重的放射性污染事故,导致停机停堆,给核电厂带来巨大的经济损失。为了确保蒸汽发生器的安全稳定运行,及时发现并处理传热管的缺陷至关重要。目前,中广核常用的堵管方法是机械辊胀式堵管。然而,堵头与传热管管壁之间的应力消除困难,导致堵头取出难度较大。若堵管实施过程中发生异常或因其他原因需要将堵管的传热管复用,就需要

拆除已安装的辊胀式堵头。为此,优化加热工艺,开发高效、可靠的加热设备,具有重要的现实意义。

2.2 国内外研究现状

2.2.1 国外研究现状

美国、法国等核电技术先进国家,凭借其深厚的技术积累和丰富的工程经验,在该领域处于领先地位。国外研发的堵头加热设备采用先进的感应加热技术,能够快速、精准地对堵头进行加热,具备高度自动化的控制系统,可实现远程操作和实时监控。

2.2.2 国内研究现状

国内在 SG 传热管辊胀式堵头加热取出工艺与设备集成研究方面起步相对较晚,当前处于空白阶段。针对国内该空白技术领域,中广核核电运营有限公司联合苏州热工研究院有限公司研发了一种以电弧加热式 SG 辊胀式堵头拆除工具,通过对基值转速、伸缩速、伸缩量和基值电流等工艺参数的优化,有效消除了辊胀式堵头与传热管管壁之间的应力,实现了堵头的整体取出。

2.3 研究目标与内容

本研究旨在通过对 SG 传热管辊胀式堵头加热工艺的深入探究与优化,结合先进的设备集成技术,开发出一套高效、稳定且可靠的堵头拆除系统。具体研究目标如下:

优化加热工艺参数:通过控制变量法和正交试验法,研究基值转速、伸缩速、伸缩量和基值电流等参数对堵头与传热管管壁之间应力消除效果的影响规律,确定最佳的加热工艺参数组合。

集成高效稳定的设备:基于优化后的加热工艺,设计和研发高度集成化的加热设备,包括焊接执行机构、焊接控制系统、监视单元和定位平台单元。

协同优化工艺与设备:实现加热工艺与设备的深度协同优化,建立工艺与设备的联合调试机制,提高堵头拆除的整体效率和质量。

3 SG 传热管辊胀式堵头概述

3.1 SG 传热管工作原理与结构特点

蒸汽发生器作为核电站的核心设备,其传热管的工作原理基于热交换的基本原理。一回路冷却剂在反应堆中吸收核裂变产生的热量,以高温高压的状态进入蒸汽发生器,通过传热管将热量传递给二回路水,使其转化为蒸汽,驱动汽轮机发电。传热管材料通常选用耐腐蚀、耐高温且具有良好机械性能的合金,如 Alloy 690,能够在高温、高压和强辐射环境下保持稳定的性能。

传热管的管径一般在 16-19mm 之间,壁厚约为 1-1.5mm。传热管在管板上的排布方式主要有正方形和菱形两种,正方形排布方式结构规整、易于加工和安装,而菱形排布则在相同的管板面积上布置更多的传热管,提高了设备的紧凑性和传热效率。

3.2 堵头拆除对加热工艺的要求

在拆除 SG 传热管辊胀式堵头时,加热工艺起着至关重

要的作用。加热均匀性是关键要素之一,若加热不均匀,会导致堵头局部应力集中,增加拆除难度。温度控制精度也是不可或缺的要求,精确控制加热温度,既能有效消除应力,又不会对传热管和管板造成损伤。加热效率同样不容忽视,快速、高效地拆除堵头,能够缩短维修时间,减少经济损失。保护传热管和管板不受损伤是根本要求,确保加热过程不会改变材料的微观结构,影响其性能。

4 现有加热工艺分析

4.1 传统加热工艺介绍

传统加热工艺主要包括电阻加热和感应加热。电阻加热通过电阻丝产生热量,加热均匀性较好,但加热速度较慢。感应加热利用交变磁场产生感应电流,加热速度快,但加热均匀性较差。这两种加热方式在实际应用中各有优缺点,需要进一步优化。

4.2 现有加热工艺存在的问题

传统加热工艺在实际应用中存在加热不均匀、温度控制不稳定和加热时间较长等问题。电阻加热由于电阻丝分布不均,导致堵头受热不均,部分区域温度过高,出现变形或破裂。感应加热虽然加热速度快,但由于磁场分布不均,同样会导致受热不均。此外,传统加热工艺的温度控制精度不高,容易对传热管和管板造成损伤,延长了加热时间,增加了维修成本。

5 加热工艺优化研究

5.1 优化目标与思路

本研究旨在提高加热均匀性、缩短加热时间和降低能耗。采用电磁感应加热与电阻加热相结合的复合加热方式,以及模糊自适应 PID 控制算法,优化加热工艺参数,提高加热效果和工作效率。

5.2 基于控制变量法的单因素试验

通过控制变量法,分别研究基值转速、伸缩速、伸缩量和基值电流对堵头加热效果的影响。试验结果表明,基值转速对受热均匀性影响显著,伸缩速影响加热效率,伸缩量影响加热区域,基值电流影响加热功率。具体如下:

基值转速: 35RPM 时受热均匀性最佳。

伸缩速: 2mm/s 时加热效果和效率最佳。

伸缩量: 34mm 时加热区域覆盖整个有效区域。

基值电流: 65A 时加热功率适中,避免了过热和加热不足的问题。

5.3 优化后加热工艺的验证

通过优化后的加热工艺参数,对 10 个堵头样本进行了拆除试验。试验结果显示,优化后的加热工艺能够显著提高堵头拆除的效率和质量,堵头表面温度差异控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,堵头取出成功率 100%,对传热管的损伤程度极小。与传统加热工艺相比,优化后的工艺在加热均匀性和堵头取出情况等方面均取得了显著的改善。

为了更直观地展示优化前后加热工艺的效果差异,将

优化前和优化后的试验数据进行了对比,具体如下表所示:

6 设备集成设计

6.1 设备集成的总体架构

本研究开发了一套高度集成化的 SG 传热管辊胀式堵头加热设备,采用模块化设计理念,将焊接控制单元、焊枪执行单元、定位平台单元和监视单元有机整合。各单元之间通过标准化接口进行连接和通信,实现了设备的高效运行和灵活控制。

6.2 关键部件设计与选型

焊枪设计与选型:焊枪采用小孔径设计,耐高温、耐腐蚀的钨极作为电极材料,具备高频起弧功能,能够快速、稳定地引弧。搭载前端宏观定位相机,确保焊枪与堵头的精确同心。

定位平台设计与选型:定位平台采用双气动内胀定位机构,具备高精度的定位能力,定位误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。配置把手和可扩展接口,便于搬运和与堵管操作平台连接。

监视摄像头设计与选型:采用高清、耐高温、耐腐蚀的摄像头,具备自动对焦和图像增强功能,能够实时传输图像到上位机进行处理和显示。监视单元具备强大的数据库管理功能,能够存储和分析焊接过程中的各种数据。

6.3 控制系统设计与实现

控制系统以高性能的工业控制器为核心,采用西门子 S7-1500 系列 PLC,具备强大的运算能力和丰富的接口。数据采集卡采用研华 ADAM-4017+,传感器选用 K 型热电偶和霍尔电流传感器,执行器包括电机驱动器和电磁阀。通过 PID 控制算法和远程操作手柄,实现了对加热过程的全面、精确控制。故障报警功能能够及时发现并处理异常情况,提高设备的安全性和可靠性。

6.4 设备集成的优势与创新点

设备集成设计提高了操作的便利性和自动化程度,具备高精度的温度控制和实时监测功能。快速接头和防误操作设计提高了设备的可靠性和安全性。搭载前端宏观定位相机,提高了设备的可视化程度和操作的准确性。在实际应用中,该设备能够显著提高堵头拆除的效率和质量,减少对传热管的损伤,降低维修成本。

7 加热工艺与设备集成的协同优化

7.1 工艺与设备的相互影响分析

加热工艺参数与设备性能之间存在紧密的相互影响。基值电流对设备的加热功率和稳定性影响最大,伸缩速和基值转速影响设备的运动部件和加热均匀性。焊枪和定位平台的性能对加热工艺的实施效果也有重要影响。通过优化工艺参数和设备性能,可以实现加热过程的高效、稳定和可靠。

7.2 基于协同优化的参数调整

在调整加热工艺参数时,需结合设备的性能特点和限制。例如,基值电流的选择需考虑焊接电源的输出能力和稳定性,伸缩速需考虑设备运动部件的承受能力。在调整设备

控制参数时,需满足加热工艺的要求,如焊枪位置调节机构的精度和定位平台的定位精度。通过这种基于协同优化的参数调整方法,可以实现加热工艺与设备的深度融合,提高堵头拆除的整体效率和质量。

7.3 协同优化后的性能测试与验证

通过协同优化后的加热工艺与设备集成系统,进行了严格的性能测试与验证。结果显示,优化后的系统在堵头拆除效率、加热均匀性和设备稳定性等方面均取得了显著的提升。堵头拆除时间从原来的 30-40 分钟缩短至 10-15 分钟,加热均匀性显著提高,堵头表面温度差异控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内,设备连续运行 100 次以上未出现故障。在实际应用中,该系统能够显著缩短维修时间,降低维修成本,提高核电厂的经济效益和安全性。

8 结论与展望

8.1 研究成果总结

本研究通过优化 SG 传热管辊胀式堵头加热工艺参数和设备集成设计,显著提高了堵头拆除的效率和质量。优化后的加热工艺参数组合为基值转速 35RPM、伸缩速 2mm/s、伸缩量 34mm、基值电流 65A。设备集成设计实现了高度协同化,具备高精度的温度控制和实时监测功能。在实际应用中,该系统能够显著缩短维修时间,降低维修成本,提高核电厂的经济效益和安全性。

8.2 研究的局限性

尽管本研究取得了显著成果,但仍存在一些局限性。实验条件的限制使得未能全面考虑所有可能影响加热效果的因素,实验样本数量有限,对特殊情况和极端工况的研究不够深入。设备的便携性和小型化仍有待提高,维护和保养也存在一定的难度。加热工艺与设备集成的协同优化方面,系统自适应能力还有待提升。

8.3 结语

未来研究可以从以下方向展开:

加热工艺优化:拓展研究范围,全面考虑更多复杂因素对加热效果的影响,建立更加完善的加热工艺模型。

设备集成:提高设备的便携性和小型化,优化设备结构设计,加强设备的维护和保养研究。

协同优化:引入先进的控制算法和智能决策技术,提高系统的自适应能力,实现加热工艺参数的智能化优化。

通过这些研究,将进一步推动 SG 传热管辊胀式堵头加热工艺与设备集成技术的发展,为核电站的安全稳定运行提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 吴小飞.核电厂蒸汽发生器维修工艺[J].设备管理与维修,2018,(10):73-75.
- [2] 丁训慎.核电站蒸汽发生器的修理[J].设备管理与维修,2002,(01):10-11.
- [3] 程檀.蒸汽发生器传热管机械堵头的安装及拆除[J].设备管理与维修,2020,(21):124-126.