

HPR1000 ZH-65 Steam Generator Key Manufacturing Process and Quality Control

Qing Tian

China Zhongyuan Engineering Corp., Shanghai, 200233, China

Abstract

HPR1000 is the third generation PWR technology with independent design and have entire intellectual property. ZH-65 steam generator which has high grade of safety and quality assurance level is the key equipment of reactor coolant system in HPR1000 nuclear power plant. Due to complicated structure, the manufacturing process of steam generator is difficult. Based on engineering experience, key process and quality control was introduced to provide reference for improvement.

Keywords

HPR1000; ZH-65; steam generator; manufacturing process; quality control

“华龙一号” ZH-65 型蒸汽发生器关键制造工艺及质量控制

田清

中国中原对外工程有限公司, 中国·上海 200233

摘要

“华龙一号”是中国自主设计的三代压水堆核电技术, 具有完全自主知识产权。蒸汽发生器是“华龙一号”核电机组反应堆冷却剂系统关键设备, 型号为 ZH-65, 其安全级别高、质保等级高, 而且结构复杂、制造工艺难度大。本文结合工程经验, 介绍了“华龙一号”蒸汽发生器的关键制造工艺及质量控制要点, 为核电蒸汽发生器及其它主设备制造工艺优化、产品质量提升提供经验借鉴。

关键词

华龙一号; ZH-65 型; 蒸汽发生器; 制造工艺; 质量控制

1 引言

“华龙一号”是中国自主设计的第三代压水堆核电技术, 具有完全自主知识产权, 是中国核电走出去战略的主打品牌。

每个机组设计有 3 个环路, 每个环路有 1 台蒸汽发生器, 型号为 ZH-65, 是核蒸汽供应系统的主要设备之一。其功能是将反应堆产生的裂变热量传递给二次侧给水, 产生饱和蒸汽, 推动汽轮机发电机发电。同时隔绝一回路放射性冷却剂与二回路给水。设计寿命 60 年, 属核安全一级, 质保一级设备^[1]。

蒸汽发生器总高约 21m, 总重约 370T, 结构复杂, 涉及多种焊接工艺以及精密机加、精密装配工艺, 制造难度大。与 CPR1000 蒸汽发生器相比, 换热效率更高、更安全; 与 AP1000 蒸汽发生器相比, 设计更成熟、蒸汽品质更高。本文结合某项目 ZH-65 型蒸汽发生器制造经验, 介绍了工艺流程、关键制造工艺和质量控制要点, 为类似产品制造和质量监督

提供借鉴。

2 制造工艺流程

根据产品结构特点, 将蒸汽发生器本体划分为三个主要组件: 下封头组件(水室封头、水室隔板)、下部组件(承压壳体、换热管束)、上部组件(承压壳体、汽水分离器和干燥器)。三个组件制造工序相对独立, 可单独进行生产组织。各组件的制造工艺流程见图 1 所示。

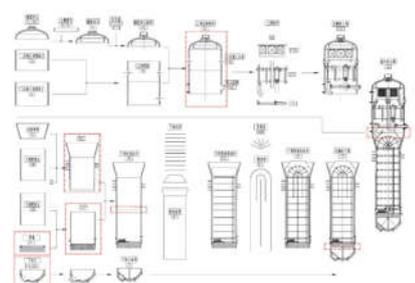


图 1 蒸汽发生器制造工艺流程

3 关键制造工艺及质量控制

“华龙一号”ZH-65型蒸汽发生器制造标准为RCC-M(2007版),中国近年来CPR1000及AP1000蒸汽发生器的制造,积累了大量工程经验,诸如承压焊缝焊接、安全端焊接、水室隔板焊接、管束组装等工艺均已较成熟。结合“华龙一号”ZH-65型蒸汽发生器结构特点、与上述堆型的差异,以及中国现有的工艺水平,下面介绍其关键制造工艺,包括:管板大面积镍基堆焊、管板深孔加工、管子管板封口焊、管子管板液压胀接、水平支连接板装焊。

3.1 管板大面积镍基堆焊

3.1.1 技术难点

管板母材为18MND5低合金钢锻件,厚度为600mm,直径约3m,一次侧表面堆焊6mm的690镍基合金。

由于18MND5低合金钢碳当量相对较高,热影响区具有较高的淬硬倾向,极易产生冷裂纹。而且690镍基合金焊接具有较高的热裂纹敏感性,再加之表面张力大,润湿性及流动性较差,堆焊层易产生热裂纹、未熔合、气孔等缺陷。

3.1.2 工艺措施

目前核电管板堆焊主流工艺包括:钨极惰性气体保护焊和带极埋弧自动焊^[2]。前者虽具有热输入小、焊接变形小、产生缺陷概率低等优点,但焊丝直径小,生产效率低。为此,中国制造厂仍采用经典的带极埋弧自动焊工艺,通过如下措施,仍获得了较高的焊接质量。

- (1) 选用供货业绩良好的进口焊材,并针对焊接特性,提高个别性能指标要求;
- (2) 除了侧弯、化学分析、金相、硬度及晶间腐蚀试验,开展不同深度母材及堆焊层热影响区评估试验,优化焊接工艺参数;
- (3) 使用电加热取代火焰加热,保证管板在预热、焊接、后热过程中温度场分布均匀;
- (4) 建立管板堆焊清洁区,有效控制粉尘等异物对焊接熔池的侵扰。

通过上述工艺措施的实施,某项目两个机组6支管板堆焊层PT和UT均一次合格。管板变形也得到了有效控制,一次侧母材最大凸起量不超过0.8mm。

3.2 管板深孔加工

3.2.1 技术难点

ZH-65型蒸汽发生器管板孔尺寸及形位公差见图2所示,呈三角形布置,孔区有效厚度为608mm。

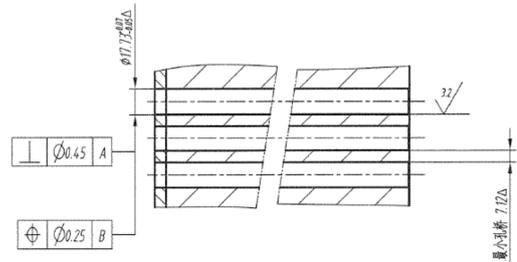


图2 管板孔尺寸技术要求

为保证管孔质量和加工效率,各制造厂均采用较为成熟的多轴数控BTA深孔加工工艺^[3-4](如图3所示),管孔精度均可保证。但是为了降低制造成本,每支BTA钻头的打孔数量有所提高,导致管孔内壁沟槽缺陷出现频率增加,典型缺陷见图4所示。

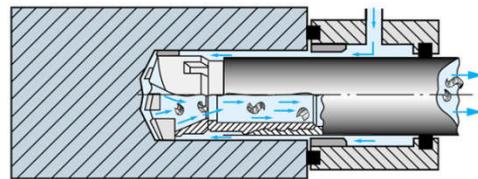


图3 BTA内排屑钻孔工艺



图4 管孔内壁沟槽

3.2.2 工艺措施

产生沟槽可能的原因:在切削过程中,与刀具切削刃接触的切屑由于摩擦力影响,流动速度相对减慢,形成“滞留层”。当摩擦力大到一定程度,“滞留层”中的一些材料会粘附在切削刃上形成积屑瘤,与管孔内壁挤压、摩擦,产生环状沟槽缺陷。

针对上述原因分析,制定如下工艺措施:(1) 试验确定最优的切削参数,延长刀具切削寿命;(2) 针对管板不同区域调整进给量和转速(如进、出管板位置);(3) 监测切屑

成型状况,保证产出C型碎屑;(4)监测切削油压力,保证排屑顺畅;(5)增加钻头检查频率,如超过磨损极限及时更换;(6)管板钻孔后进行100%目视检查,如有缺陷,及早发现和处理。

3.3 管子管板封口焊

3.3.1 技术难点

管子管板焊缝是分隔蒸汽发生器一次侧和二次侧的承压边界,在蒸汽发生器整体水压试验以及产品运行过程中发生的泄漏,大部分与管子管板焊缝质量有关。

由于封口焊属于全位置焊接,受重力影响,焊接熔池在各象限点上的形态不同,诸如保护气体、脉冲频率、钨极转速等参数,都对焊缝质量有一定影响^[5]。

而且ZH-65型蒸汽发生器与CPR1000相比,管板堆焊层由600升级为690镍基合金,焊接难度增大^[6]。与AP1000相比,单个焊喉尺寸更加严格,而且增加了平均焊喉尺寸要求和抽样RT检测要求,工艺难度更大。

3.3.2 工艺措施

在保证焊缝成型的前提下,试验分析焊接电流、焊接速度变化对焊缝成形和焊喉尺寸的影响,试验分析钨极与芯杆之间距离对焊缝成形和焊喉尺寸的影响,优化工艺参数。

通过大量的工艺参数调试和对比试验,摸索不同种类保护气体、单道焊接工艺参数匹配,以满足焊喉平均值要求,降低缺陷率。

通过一系列工艺优化,每台蒸汽发生器管子管板焊缝成型良好(见图5所示),氦检漏合格率均超过99.9%,且水压试验均无泄露,应用效果良好。



图5 管子管板焊缝外观形貌

3.4 管子管板液压胀接

3.4.1 技术难点

液压胀接是蒸汽发生器管子管板连接的重要形式之一,ZH-65型蒸汽发生器的胀接结构见图6所示。与AP1000蒸

汽发生器相比,如下两项指标更加严格,工艺控制也更加困难:

- (1) 二次侧未胀合长度平均值与AP1000相同,但是最大值比AP1000小0.4mm;
- (2) 对于传热管的胀接残余应力提出了要求。

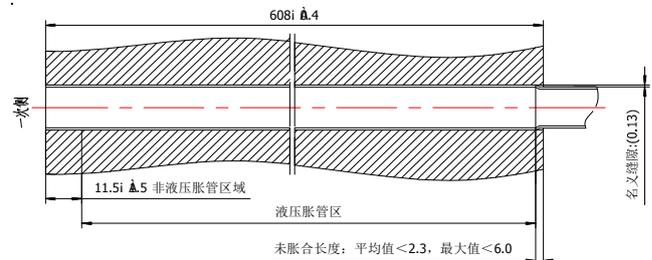


图6 ZH-65型蒸汽发生器管子-管板胀接结构

大量的核电站运行经验表明,管子管板胀接区域是蒸汽发生器事故多发区,而正是上述两项技术指标对蒸汽发生器长期运行安全影响最大^[7]。

3.4.2 工艺措施

针对胀接头的性能指标^[8]:拉脱力、间隙密封性能、胀接轮廓、未胀合长度和胀接残余应力,优化胀接工艺参数开发流程。

首先建立胀接压力与胀接拉脱力的关系(曲线如图7所示);然后选取满足拉脱力的最小胀接压力开展间隙密封试验,初步验证胀接参数;最后通过胀接接头的残余应力试验,评估胀接参数的可靠性。应用此方法开发的工艺参数,胀接接头各项性能均满足设计要求,而且成本低、周期短。

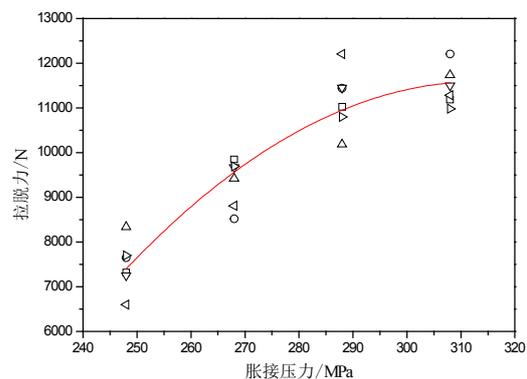


图7 拉脱力-胀接压力关系曲线

针对液压胀接的二次侧未胀合长度,通过胀管器的精确标定、液压胀枪的锁紧固定进行有效控制,尽可能减小并使其均匀。经统计,蒸汽发生器未胀合长度基本都分布在2.3mm的期望值附近,最大值也小于6mm的设计要求。

3.5 水平支承连接板装焊

3.5.1 技术难点

水平支承连接板是华龙一号 ZH-65 型蒸汽发生器的特有结构。共设置 6 组连接板，在筒体外壁沿圆周方向布置，见图 8 所示。该结构与 CPR1000 蒸汽发生器环箍固定方式相比，更加安全可靠。该连接板结构与 EPR 蒸汽发生器类似，但其材质为 18MND5，与 EPR 的 P295GH 材质相比，淬硬倾向和冷裂纹敏感性更强。



图 8 水平支承连接管结构示意图

而且，水平支承连接板之间有严格的形位公差要求，见图 9 所示。需要制定合理的焊接、消应力热处理和机加顺序。

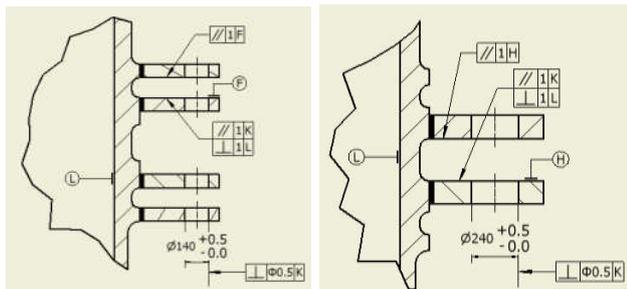


图 9 水平支承连接板形位公差

3.5.2 工艺措施

连接板采取整体锻件材料，在水平工位完成与筒体的装配点焊，然后旋转到竖直工位，通过特殊的机头进行自动焊接。通过双面坡口交替焊接，同时在筒体内部安装防变形支撑，实现变形的有效控制。

为了避免焊接机头与筒体上的凸台干涉，调整筒体凸台尺寸，设计成阶梯式坡口，如图 10 所示。

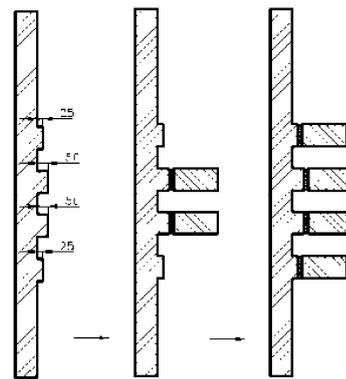


图 10 筒体与连接板对接坡口示意

设计合理的工艺顺序：焊接上部连接板根部焊道→翻身→焊接下部连接板根部焊道→焊接下部连接板 1/4 焊高→翻身→焊接上部连接板 1/4 焊高→焊接上部连接板 1/2 焊高→翻身→焊接下部连接板 1/2 焊高→继续焊接下部连接板至完成→翻身→焊接上部连接板至完成→机加清根（见图 11）→UT/RT→整体热处理→最终机加→UT/RT。

连接板焊缝成型质量良好，连接板位置尺寸及配合面形位公差均满足设计要求。



图 11 连接板机加清根

4 结语

针对“华龙一号”ZH-65 型蒸汽发生器结构特点，识别、分析了关键制造工艺和风险点，从工艺流程设计、工艺过程控制等方面解决了“华龙一号”蒸汽发生器特有的水平支承连接板装焊难题，优化了诸如管板大面积镍基堆焊、管板深孔加工、管子管板封口焊、管子管板液压胀接等关键工艺，大大提升了蒸汽发生器产品质量。为类似产品制造提供了经验借鉴，为蒸汽发生器产品质量监督提供了参考。

参考文献

- [1] 张富源, 吴琳, 何戈宁, 等. “华龙一号” ZH-65 型蒸汽发生器研发 [J]. 中国核电, 2017, 10(4): 494-498.
- [2] 李双燕. 核电设备蒸汽发生器四种管板镍基合金自动堆焊技术比较 [J]. 金属加工, 2017, (23-24): 8-11.
- [3] 李国骥. 大型管板组件的深孔加工 [J]. 压力容器, 2008, 25(11): 54-56.
- [4] 王鹏飞, 肖继明, 郑建明, 等. 深孔加工中 BTA 钻分屑形式及钻削过程 [J]. 工具技术, 2019, 53(4): 86-89.
- [5] 孙志远, 张茂龙, 胡欢. 1000MW 核电蒸汽发生器管子管板焊接 [J]. 压力容器, 2016, 33(1): 67-73.
- [6] 孙国辉, 邹迪婧, 谢彦武. 镍基 690 合金管子与管板焊接技术 [J]. 动力工程学报, 2016, 36(5): 411-415.
- [7] 丁训慎. 核电站蒸汽发生器传热管的腐蚀与防护 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(1): 15-37.
- [8] 李伟, 王强, 杨笑瑾, 等. 镍基合金换热管与镍基合金管板液压胀接试验研究 [J]. 化工机械, 2017, 44(4): 386-389.