 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i7.11043

# Key Points for Quality Control of Condenser Tube Sheet Welding

**Jun Chen**

Xiangtou International (Hengdong) Gas Power Generation Co., Ltd., Hengyang, Hunan, 421421, China

**Abstract**

The condenser is an important heat exchange and pressure-bearing equipment for thermal power and nuclear power generating units. The sealing fillet welds between the tube plate and the thin-walled heat exchange tubes directly determine the vacuum degree and leak prevention capability of the equipment. The tube plates of condensers are mostly made of carbon steel and stainless steel composite materials. The heat exchange tubes are densely arranged, with thin walls and large welding restraint stress. During construction, typical welding defects such as pores, incomplete fusion, cracks, and welding deformation are prone to occur. To ensure the safe and stable operation of the unit, this paper systematically elaborates on the core measures for the entire process of condenser tube plate welding quality control from aspects of pre-welding preparation, process control during welding, prevention of common defect causes, post-weld non-destructive testing, and standard rework. These measures can provide engineering practice references for the manufacturing, installation, and maintenance welding of condensers in power plants.

**Keywords**

condenser; tube plate welding; argon arc welding; sealing welding; metal defects; quality control

# 凝汽器管板焊接质量控制要点

陈俊

湘投国际（衡东）燃气发电有限公司，中国 · 湖南 衡阳 421421

**摘　要**

凝汽器是火力、核电发电机组重要的换热承压设备，管板与换热薄壁管材的密封角接焊缝，直接决定设备真空度与防渗漏能力。凝汽器管板多采用碳钢+不锈钢复合金属材料，换热管排布密集、管壁薄、焊接拘束应力大，施工中极易出现气孔、未熔合、裂纹、焊接变形等典型焊接缺陷。为保障机组安全稳定运行，本文从焊前准备、焊接过程工艺管控、常见缺陷成因防治、焊后无损检测与规范返修四个方面，系统阐述凝汽器管板全流程焊接质量控制核心措施，可为电厂凝汽器制造安装与检修焊接提供工程实践参考。

**关键词**

凝汽器；管板焊接；氩弧焊；密封焊；金属缺陷；质量控制

## 1 引言

热力发电厂中，凝汽器主要用于冷凝汽轮机排汽，建立并维持系统真空，提升热力循环效率。管板作为核心承重密封金属构件，分隔蒸汽侧与循环冷却水侧，长期承受交变温度应力、介质电化学腐蚀与负压载荷。目前工业常用复合钢板管板，搭配不锈钢、钛合金耐蚀薄壁换热管，接头数量巨大、焊接操作空间狭小，属于精密密封类特种焊接。

若管板封口密封焊存在隐性质量缺陷，冷却水会渗入蒸汽热力系统，造成水汽品质恶化，引发设备锈蚀、结垢，轻则机组降负荷，重则非计划停机。由于异种复合金属、薄壁管材的焊接特殊性，普通碳钢焊接工艺无法满足要求。只有落实全过程、精细化质量管控，规范金属清理、装配、施焊、检测每道工序，才能降低焊接废品率，从根源杜绝泄漏故障。

【作者简介】陈俊（1978–），男，中国湖北鄂州人，本科，助理工程师，从事金属焊接研究。

## 2 焊前准备阶段焊接基础质量控制

焊前准备是预防原生金属焊接缺陷的根本，包含材料核验、坡口加工、表面清洁、装配工装、人员工艺五大环节，是质量把控的第一道关口。

### 2.1 母材与焊接耗材验收管控

进场复合管板、耐蚀换热管，必须核对材质质保书、力学性能、耐腐蚀试验报告，检查金属表面无划伤、折叠、锈蚀、管口开裂，壁厚均匀一致。匹配选用同耐腐蚀等级专用氩弧焊实心焊丝，焊丝干燥无氧化油污，分类密封存放。焊接保护气体选用纯度 ≥99.99% 高纯氩气，防止高温焊缝金属氧化、产生氢气孔，所有金属主材、辅材复检合格后方可使用。

### 2.2 管板管孔与焊接坡口精密加工

管板焊接严禁火焰切割坡口，火焰热切割会使金属边缘产生渗碳层、厚氧化皮，焊接时诱发夹渣、根部未熔合缺陷。统一采用机械铣削精加工窄间隙小角度坡口，减少熔敷填充金属，有效降低焊接拘束应力与整体变形。同时校准管孔圆度、孔径公差，严格控制换热管与管孔装配间隙：间隙过大易烧穿薄壁管壁，间隙过小贴合不严，造成密封焊根部失效。

### 2.3 焊接区域金属表面脱脂清洁

水分、油污、粉尘、氧化黑皮是焊接冷裂纹、密集气孔的主要诱因。施焊前，管板孔边四周 20mm、换热管端部 50mm 为强制清洁区域：不锈钢金属使用专用不锈钢钢丝刷打磨至露出光亮母材金属，再用丙酮擦拭脱脂；钛合金构件禁止碳钢工具接触打磨，避免铁离子污染破坏耐蚀钝化层。清洁完成后及时施焊，做好现场防尘，防止金属表面二次氧化。

### 2.4 换热管预胀装配与焊接工装防护

换热管穿管就位后，采用机械均匀柔性预胀工艺，让管壁与管孔内壁紧密贴合，消除悬空间隙，解决焊缝根部未熔合通病。采用刚性固定工装加固管板整体结构，提升金属刚度，抑制焊接弯曲、波浪变形。氩弧焊施工区域搭设密封防风围挡，禁止强风直吹熔池，避免吹散氩气保护气层；焊接过程禁止胀管、敲击等交叉振动作业，防止干扰熔池金属凝固成形。

### 2.5 焊工资质与焊接工艺评定

施焊人员必须持有复合金属、管板密封焊专项合格资质。批量正式焊接前，采用与工程一致的金属母材、耗材、参数制作模拟工艺试板，完成外观检查与渗透探伤，验证 WPS 焊接工艺评定的有效性，调试稳定电流、气流量、焊接速度等参数，试板验收合格后方可开工。

## 3 焊接施工过程动态质量实时控制

焊接过程的热输入、保护氛围、施焊顺序是控制金属晶粒组织、焊接应力、焊缝成形的核心，必须全程严格依规操作。

### 3.1 选定焊接方法与固化工艺参数

现场主流采用全自动脉冲钨极氩弧焊（GTAW），分为自熔封口密封焊和微量填丝焊，热输入小、焊缝致密密封性强，适配薄壁耐蚀金属焊接。施工中严禁私自改动既定工艺参数，恒定焊接电流、电弧电压、行走速度、氩气流量：热输入过大，薄壁金属烧穿塌陷、晶粒粗大，降低防腐性能；热输入过小，熔深不足、侧壁熔合不良，留下渗漏隐患。运弧匀速稳定，保证焊脚宽度均匀、成形规整。

### 3.2 科学排布施焊顺序，减小焊接变形

管板焊缝密集排布，连续同向焊接会造成局部热量集中，金属热胀冷缩不均，产生拱形变形、角变形。标准化施工采用分区划分、对称点焊、间隔跳焊的方式，分散集聚热量，分段释放焊接残余应力。优先采用机械强度胀管 + 密封焊接的复合连接工艺，减少焊接熔敷量，兼顾结构强度与密封性能，杜绝连片长距离连续施焊。

### 3.3 全程充氩保护，严控施工环境温湿度

焊缝正面持续通氩保护，换热管内侧管孔背面同步背充氩气，隔绝空气防止高温金属氧化；收弧后延时关闭氩气，保护弧坑高温金属冷却，避免产生弧坑微裂纹。钛合金等活性金属焊接严格管控环境湿度，高湿、阴雨天气停止作业，规避氢致脆性裂纹缺陷。

### 3.4 标准化控制焊缝外观成形尺寸

密封焊焊缝要求表面圆润光滑、平滑过渡，无宽窄不均、单边偏焊、焊瘤等问题。验收硬性指标：焊缝余高控制 0~3mm，咬边深度 ≤0.5mm，无连续条状咬边、管壁塌陷；焊脚几何尺寸满足设计密封要求，保证焊缝长期耐受介质腐蚀与交变应力。

## 4 凝汽器管板典型焊接金属缺陷及防治

结合现场检修制造经验，管板高频缺陷为气孔、夹渣、未熔合、冷热裂纹、焊接变形，针对性分析成因并制定防控措施，可大幅提升焊接一次合格率。

### 4.1 气孔缺陷

成因：氩气纯度不足、防风失效空气侵入、金属表面残留油污水分、熔池冷却过快气体来不及逸出。防治：统一使用高纯焊接氩气，加固防风遮蔽；焊前彻底脱脂烘干，适当延长收弧冷却时间，让熔池内气体充分溢出。

### 4.2 未熔合、夹渣缺陷

成因：坡口机械氧化皮清理不彻底、换热管预胀贴合间隙超标、焊接电流热输入不足、运弧摆动不当。防治：精加工后彻底打磨坡口露出新金属；严格执行预胀装配标准；匹配规范焊接电流，标准摆动运弧，单道焊后及时清渣。

### 4.3 焊接冷热裂纹

成因：复合金属拘束应力集中、层间温度过高材质敏化、交叉施工振动、局部多次返修过热。防治：对称跳焊分散应力，严控层间温度；焊接区域禁止敲击震动；缺陷返修采用小热输入补焊，减少热影响区范围。

### 4.4 焊接整体结构变形

成因：局部热量堆积、坡口填充金属过多、管板固定刚性不足。防治：选用窄间隙坡口减少填充量，刚性工装固定 + 分区对称焊接；变形校正采用低温冷态处理，严禁暴力锤击，保护密封焊缝完整。

## 5 焊后无损检测、验收与规范返修

焊后检测是排查表面开口微缺陷、保障密封不漏的最后防线，必须全员 100% 基础检查，关键部位无损探伤。

### 5.1 全覆盖外观目视检查

所有管板封口焊缝逐根目视检查，严禁存在表面裂纹、

贯穿性气孔、烧穿、超标咬边、严重飞溅等缺陷，不合格部位标记隔离，禁止流入下道组装工序。

### 5.2 液体渗透 PT 无损检测

凝汽器密封焊缝以渗透检测（PT） 为核心手段，全面排查肉眼不可见的微裂纹、针孔渗漏类开口缺陷，是密封性能检测关键。高参数机组提高抽检比例，配合涡流复检排查热影响区隐性损伤，检测需待焊缝冷却至常温，保证结果准确。

### 5.3 缺陷标准化返修流程

打磨彻底清除全部超标缺陷，探明缺陷实际边界后，沿用原合格焊接工艺小热输入补焊，不随意扩大坡口损伤母材。严格限制同一位置返修次数，防止金属材质劣化、耐腐蚀性下降；返修完毕必须再次复探检测，合格方可竣工验收。

### 5.4 消应力热处理与防腐钝化

整体焊接探伤合格后，按需进行低温消应力处理，释放残余焊接应力；打磨焊缝飞溅与尖锐棱角，对复合板热影响区做钝化防腐处理，适配循环冷却水工况，延缓金属电化学腐蚀，延长设备使用寿命。

## 6 标准体系与自动化焊接技术进展

### 6.1 国内外相关焊接标准体系

凝汽器管板焊接作业的质量管控工作，依托多层级标准体系予以支撑。国内现行主流规范主要包含 DL/T 1097—2023《火力发电厂凝汽器管板焊接技术规程》、NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》，以及 NB/T 47013 承压设备无损检测系列标准。其中 DL/T 1097—2023 为 2008 版标准的替代版本，其适用边界得到延伸，除原有碳钢 - 不锈钢复合管板外，新增碳钢 - 钛复合管板相关内容，覆盖钛质与不锈钢两类主流换热管材，该标准的归口单位为电力行业电站焊接标准化技术委员会（DL/TC 18）。 NB/T 47014—2023 在 2011 版基础上完成大范围修订，补充复合金属材料、换热管与管板连接结构的焊接工艺评定相关内容，同时增设电子束焊、锆材焊接的评定规则，并对“焊接热输入”等专业术语的定义进行修正。

### 6.2 自动化焊接技术的工程应用进展

自动化焊接技术现已成为凝汽器制造及运维检修领域管板焊接工艺的主要发展趋势。传统手工氩弧焊作业高度依赖操作人员专业技能，不仅生产效率有限，也难以保障焊缝质量的稳定性。管板自动焊技术整合参数预设定、自动对位、焊缝轨迹追踪及成型状态在线监测等多项功能，可有效改善焊接成品质量的均一性。现有研究针对凝汽器钛管与管板密封焊缝，搭建了整套自动化修复工艺体系，分别采用自熔焊与自动填丝焊两种工艺开展模拟试样修复试验。检测结果显示，两类工艺处理后的焊缝内部均未检出焊接缺陷，外观成型状态优良，有效规避了手工修复作业易产生二次污染、连接可靠性不足、作业效率低下等问题，完全能够满足现场检修的应用要求。 智能型管板焊接设备在自动化基础上，进一步融合电弧状态监测、机器视觉定位与轨迹跟踪等前沿技术。

### 6.3 先进无损检测技术的新发展

焊后质量检验环节中，除常规外观目视检测与渗透检测（PT）外，超声相控阵检测（PAUT）正逐步推广应用于管板焊缝质量筛查工作。该技术依托多阵元探头实现声束的灵活调控，可实时生成缺陷可视化成像结果，有效提升检测作业的效率与判定精度，尤其契合管板角焊缝空间狭小、结构复杂的检测工况。手持式管板焊缝超声相控阵自动化检测设备，依靠扫查机构与定心密封组件协同运作，可完成焊缝区域的快速自动化扫查作业。

### 6.4 焊接质量管理信息化建设

当前凝汽器管板焊接的质量管控工作，已逐步融入数字化追溯管理体系。依托焊接工艺参数动态采集、作业人员资质及工时电子化登记、无损检测数据与焊缝点位信息绑定、返修流程全闭环管控等信息化技术，可实现单条焊缝全流程信息溯源。自动化焊接设备结合数字化管理平台，能够对焊接电流、电压、送丝速率、保护气体流量等核心工艺参数开展在线监测，并针对参数异常自动预警，从工艺执行环节规避偏差问题。

## 7 结论

凝汽器管板金属焊接是集材料学、焊接工艺、应力控制、无损检测于一体的系统性质量工程。其控制核心总结为三点：第一，焊前严控复合板材、焊材质量，精准机械加工坡口，极致清洁焊接金属表面，保证装配预胀精度；第二，焊中固化全自动氩弧焊工艺参数，全程高纯氩气保护，采用对称跳焊工艺控制热变形与残余应力；第三，焊后落实外观全检 + 渗透无损探伤，合规闭环缺陷返修，配套防腐消应力处理。随着发电设备自动化水平提升，自动化管板焊接已成为主流。只有持续规范金属焊接施工标准、强化焊工技能管控、全流程落实质量要点，才能彻底解决管板焊缝泄漏通病，保障凝汽器真空度稳定，助力发电机组安全、经济、长效运行。

### 参考文献

[1] DL/T 1097-2023，火力发电厂凝汽器管板焊接技术规程[S].北京：中国电力出版社，2023.

[2] 王超.电站换热器复合管板氩弧焊焊接缺陷控制研究[J].焊接技术，2022.

[3] 李刚.薄壁不锈钢换热管与管板密封焊工艺优化[J].金属加工热焊，2023.