

Research on Manufacturing Process of Titanium Tube Heat Exchanger

Youxin Ye^{1,2}

1. Guangxi Bosco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

2. Guangxi Kejia Equipment Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

Abstract

Titanium tube heat exchangers have become an irreplaceable key equipment under harsh working conditions due to their excellent corrosion resistance, good heat transfer performance, and processability. They are widely used in fields such as papermaking, chemical industry, metallurgy, energy, environmental protection, food and medical care. The excellent performance of titanium tube heat exchangers can be achieved through precise execution of manufacturing processes and strict coverage of quality control systems. This article focuses on the core process links and key quality control nodes in the entire manufacturing chain of titanium tube heat exchangers, and conducts in-depth analysis and discussion. The article elaborates on the key process points of the entire process from titanium material cutting, precision tube sheet processing, strict cleaning and assembly, core expansion and welding, to final assembly. It particularly emphasizes the protective and special measures that must be taken for the high temperature activity, easy pollution, and difficult processing characteristics of titanium materials. And elaborated on the airtightness test and non-destructive testing techniques such as ultrasound and radiation. By strictly controlling each link, the aim is to ensure the long-term safe and stable operation of titanium tube heat exchangers, providing theoretical reference and practical guidance for high-end equipment manufacturing.

Keywords

titanium tube heat exchanger; Manufacturing process; Welding protection; Expansion control; Process quality control; Non-destructive testing

钛管式换热器制造工艺研究

叶又鑫^{1,2}

1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 中国·广西南宁 530007

2. 广西科佳装备科技有限公司, 中国·广西南宁 530007

摘要

钛管式换热器因其优异的耐腐蚀性、良好的传热性能和可加工性能,在苛刻工况下成为不可替代的关键设备,广泛应用于造纸、化工、冶金、能源、环保、食品医疗等领域。钛管式换热器的卓越性能能实现,需要制造工艺的精准执行与质量控制体系的严密覆盖。本文聚焦于钛管式换热器制造全链条中的核心工艺环节与关键质量控制节点,进行深度剖析与论述。文章详细阐述从钛材下料、精密管板加工、严格清洁装配、核心胀接与焊接,到最终总装的全流程工艺要点,特别强调了针对钛材高温活性高、易污染、难加工特性所必须采取的防护与特殊措施。并深入论述了气密性试验以及超声波、射线等无损检测技术。通过对各环节的严格控制,旨在保障钛管式换热器的长期安全稳定运行,为高端装备制造提供理论参考与实践指导。

关键词

钛管式换热器; 制造工艺; 焊接保护; 胀接控制; 过程质量控制; 无损检测

1 引言

钛管式换热器作为高端耐腐蚀装备,在海洋开发、精细化工及环保产业的应用迅猛发展。与常规碳钢或不锈钢换热器相比,耐腐蚀性能突出,尤其在含氯离子环境中性能远

超不锈钢。但是,钛换热器制造对制造环境、下料、焊接等各个工序的控制要求更高,尤其是管板加工和换热管焊接工序。因此,其制造绝非普通工艺的简单移植,而是深深融入从第一道工序开始的每一个细节之中。

2 核心制造工艺

钛管式换热器的制造工艺管控是一个技术密集型的精密过程,需要从原材料检验、下料、管板加工、组装、胀管、焊接、检测等各个环节严格管控。只有严格遵守工艺要求,

【作者简介】叶又鑫(1990-),男,中国广西钦州人,本科,工程师,从事钛焊接,不锈钢焊接,碳钢焊接,机械加工研究。

系统管理,才能获得稳定的品质。

2.1 原材料控制

钛管与管板必须进行实物验证,用光谱仪等检测原来元素是否满足要求,检测管壁厚度是否在公差允许范围内,排查轧制或焊接过程中可能产生的纵向裂纹、夹杂、壁厚不均等缺陷。对于复合管板,除超声波探伤确保贴合率($\geq 98\%$)外,还需在边缘进行宏观金相检查,验证结合界面质量^[1]。

2.2 下料加工

下料切割必须在专用洁净区域进行,使用不锈钢或硬质合金刀具。优先使用激光或者水刀切割,使用激光切割钛材时,使用氩气(纯度 $\geq 99.99\%$)做保护,避免热影响区氧化。所有切割加工后的断面,必须立即使用专用不锈钢丝刷或千叶片清理毛刺和附着物,并用丙酮或专用无氯清洗剂彻底脱脂。

2.3 管板加工

管板是换热器的核心,其加工精度直接决定管束装配质量、胀焊效果和使用寿命。要求加工环境必须在独立、洁净的数控加工中心进行,严禁与碳钢工件混线加工。使用高精度硬质合金刀具,并专用于钛材加工。钻削工艺采用低速、大进给工艺,冷却液必须为专用无氯、无硫的水溶性切削液,并保证大流量、高压冲洗,以迅速排屑和降温。

管孔孔径公差通常控制在 H7 级,孔间距公差 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内,孔内表面粗糙度 $Ra \leq 3.2\ \mu\text{m}$ 。更为关键的是,管孔与管板密封面的垂直度必须严格控制,通常要求不大于 0.05mm ,否则将导致穿管困难和胀接不均匀。对于复合管板,钻孔后需用专用工具对管孔内壁的钛复层进行精确的液压胀接槽或机械开槽,槽深、宽度和位置需严格按图施工,以在后续胀管时形成抗拉脱的机械互锁结构。钻孔完成后,孔两端需倒角去除毛刺,用高压清洗机和专用刷头对每一个管孔进行彻底清洗,去除残留的切削液和钛屑,并用白布擦拭检查无污渍,避免穿管过程划伤、污染管子。

2.4 壳体加工

壳体卷制要严格控制内孔直径和卷制圆度,凡有碍管束拆装的壳体内壁焊缝余高均应磨至与母材表面齐平,并复卷保证圆度。外圆周长偏差控制在 $0\text{-}10\text{mm}$,圆筒同一断面上的最大内径与最小内径之差,不应大于该断面公称直径 DN 的 0.5% ,且应符合下列规定^[2]:

- a) $\text{DN} \leq 1200\text{mm}$ 时,不大于 5mm ;
- b) $\text{DN} > 1200\text{mm} \sim 2000\text{mm}$ 时,不大于 7mm ;
- c) $\text{DN} > 2000\text{mm} \sim 2600\text{mm}$ 时,不大于 12mm ;
- d) $\text{DN} > 2600\text{mm} \sim 3200\text{mm}$ 时,不大于 14mm ;
- e) $\text{DN} > 3200\text{mm} \sim 4000\text{mm}$ 时,不大于 16mm 。

2.5 清洁装配与穿管

穿管前需先完成壳体筒身划线开孔工作,筒身按照图纸的位置进行划线开孔,开孔后用胶布将所开孔封起来,避

免后续操作导致异物进行换热器内部而无法取出。装配区域应保持高于一般车间的洁净度,操作人员需穿戴干净手套(非棉质,以防纤维残留)。穿管前,再次检查管端是否光滑无毛刺,管束通常从固定管板侧开始穿入。穿管时,严禁强行敲击,需使用引导铜棒或塑料棒辅助,防止钛管表面被划伤或管口变形,每一根管穿过所有折流板的过程应顺畅无阻。

2.6 胀接工艺控制

胀接的目的是消除管与管板孔间的间隙,形成紧密的接触以承受压力并辅助密封。采用合理的跳胀顺序,从中心向外呈辐射状或分区进行,以减少管板变形。对于钛管,液压胀接因其控制精确、胀接均匀、残余应力小而被优先采用。机械滚胀次之,但需严格控制胀杆推进速度和滚珠数量。胀度控制是核心参数,胀度不足导致连接不紧,过度则引起管壁减薄甚至开裂。通常通过控制胀接压力和测量管壁减薄率(约 $3\%\text{-}8\%$)来保证。强度焊接+贴胀,换热管为钛材,贴胀的胀管率为 $2\%\text{-}3\%$;强度胀接+密封焊,换热管为钛材,强度胀的胀管率为 $4\%\text{-}5\%$,胀后换热管理论内径计算公式和胀管率计算公式:

$$K = (d_2 - d_1 - b) / 2\delta \times 100\%$$

式中: k 以管壁减薄率计算的胀度, d_1 换热管胀后内径, d_2 换热管胀前内径, b 换热管与管板管孔的双边间隙(管孔直径减去换热管的外径), δ 换热管壁厚。

2.7 换热管平口

换热管胀管完成后,可采用四点均布点焊对换热管进行点焊固定。检查各管子管口长度、平整度,对超长、不平整管口进行切屑平口,确保管子突出管板 2mm 左右为宜。

2.8 焊接过程控制

管口焊接是换热器制造中技术难度最高、质量风险最大的环节。焊前需将管板和管子焊口区域用不锈钢丝轮打磨至金属光泽,并立即用丙酮擦洗,之后严禁徒手触摸。施焊应在空气洁净、无尘、无烟环境下进行,且焊接场所应具有独立区域。要求风速 $< 1.5\text{m/s}$,相对湿度 $\leq 80\%$,焊接过程风速过大,容易造成保护气掺杂进其他气体造成焊接质量缺陷,相对湿度过大易造成焊接气孔、飞溅增大等问题。钛在 250°C 以上开始剧烈吸氢、氧、氮,如果熔池中侵入氧气、氮气等有害气体,则被焊部位的塑性、韧性和表面颜色等都有明显的改变,其机械性能显著下降,过热倾向增高,接头脆化。如果焊接区域得不到气体的有效保护,必将导致焊接质量的下降,严重时将导致产品的报废。保护气选用氩气,纯度 $\geq 99.99\%$,流量适中(过大易产生湍流),焊接停止后应继续通保护气,待焊缝和热影响区温度低于 250°C 后方可停止气体保护。焊接换热管时,因为管子与管板之间的焊接点位较多、且密集,连续焊接作业状态下不容易散热,可采取回形跳焊的方法,即对一个点位管板与管子环焊完成之后,待温度冷却后,再对间隔一个点位距离的下一个管板进

行跳焊,这样有助于温度的分区散热,确保焊接效果和质量。除了焊接区域冲氩保护以外,背面保护也至关重要,管板与管子环缝的管内壁也要充氩保护^[3]。

焊接应采用小电流、快焊速、低热输入。多层焊时,必须待前一层焊缝冷却至室温(或低于60℃)并清理表面后,再施焊下一层。严格控制层间温度,防止晶粒长大,保证接头韧性。焊后立即进行100%着色渗透检测(PT),检查焊缝表面有无裂纹、气孔等缺陷。同时,焊缝颜色是最直观的质量判据:银白色最佳,金黄色可接受,蓝色稍差,紫色、灰色或白色粉状物表明氧化严重,必须将氧化层彻底打磨去除并补焊。

表1

焊缝与热影响区表面颜色	氩气保护情况	合格判定
银白色	良好	合格
金黄色(致密)	尚好	合格
蓝色	稍差	只可用于非重要部位
紫色	较差	常压设备
灰色	差	不合格
白色粉状物	很差	不合格

焊接完成后,检查焊口成形情况,对焊接成形差的焊缝进行返工焊接,同时按照表1对焊接区域的表面颜色检验,对保护效果不理想的接头,进行返工处理,一般情况下,氧化效果较轻时可用不锈钢丝刷将氧化部位刷至金属光亮色(银白色)或进行酸洗处理,以保证内部金属不被继续氧化。

3 无损检测

管板角焊缝检测,超声波检测(UT)是首选。使用小角度(45°-70°)横波斜探头,沿焊缝周向扫查,可有效检测未熔合、未焊透及根部裂纹等内部缺陷。管子与管板密封焊缝表面检测可使用着色渗透检测(PT),检测必须使用低硫、低氯、低氟的专用渗透剂,防止对钛造成腐蚀。在制造过程中,管子可能因穿管、胀接等操作产生新的损伤,在总装试压前,可再次使用涡流检测对管子进行快速普查,特别是管端胀接区域。对于高压厚壁管箱焊缝,可采用射线检测(RT),但由于钛对射线的吸收特性与钢不同,需采用较低的电压和特定的曝光曲线。

4 压力试验与气密性试验

4.1 液压试验

试压环境温度不应低于5℃,介质要求使用洁净水,其氯离子含量必须严格控制,通常要求小于25ppm,最好使用去离子水,防止对钛造成点蚀。过程控制缓慢分级升压(如0.5倍设计压力为一级),每级保压检查。达到试验压力(通常为设计压力的1.25-1.5倍)后,保压时间不少于30分钟。

保压期间,压力表应稳定,同时派专人对所有焊缝、胀口、法兰密封面进行细致目视检查,无渗漏、无可见异常变形、无异常响声为合格。试验完毕后,必须立即将水彻底排净,并用干燥、洁净的压缩空气或氮气吹扫至完全干燥,这是防止静态水残留导致腐蚀或微生物滋生的必要步骤。

4.2 气密性试验

在液压试验合格后,用于检测极微小的泄漏,特别是对工艺介质为有毒或易燃气体时尤为重要。一般采用压缩空气或氮气,压力为设计压力或略低。在保压期间,在所有密封连接处涂抹发泡剂(肥皂水)进行检漏。对于有更高要求的场合,可采用氦质谱检漏^[4],将设备抽真空后在外围喷氦气,或用氦气充压后在外围用吸枪探测,灵敏度极高。

5 质量控制体系

质量控制不是独立的环节,需要全员全过程系统管控。建立供应商名录,进行准入评审,向前延伸管理,严格管控供应商。对每批次材料执行“文件审查+实物抽检/全检”制度,关键材料(如管板、钛管)可进行第三方复验。推行“三检制”(自检、互检、专检)。生产过程需要完整、准确的质量记录。在关键工序(如下料后、管板钻孔后、胀接后、焊接后)设立质量控制点,核心控制点需进行三级确认,检验并记录过程数据,经质检员签字确认合格后,方可流转至下道工序。焊工要求持证上岗,焊接时,记录每道焊缝的焊工号、焊接电流电压、气体流量、保护状况;胀接时,自动记录每根管的胀接压力-时间曲线。这些记录是产品可追溯性的核心。从材料质保书、工艺评定报告、焊工资格证书,到每道工序的检验记录、无损检测报告、压力试验记录,直至最终的产品合格证、竣工图,必须形成完整的文件包。实现从一根钛管、一块管板到整台设备的全生命周期信息追溯。

6 结论

钛管式换热器的制造,需要重点对制造环境、管板精密加工、胀管加工、管板焊接进行严格控制。强调以预防性的管理思维,全员全过程参与,系统管理,每个环节严格控制。只有严谨的质量管控才能制造出经得起时间与苛刻环境考验的钛管式换热器,从而支撑起现代高端工业的稳定运行与持续发展。

参考文献

- [1] 李晓峰,王建军.钛制化工设备[M].北京:化学工业出版社,2018
- [2] 中国机械工程学会焊接学会编.焊接手册(第3版修订本).北京:机械工业出版社,2015
- [3] JB/T 4745-2002钛制焊接容器
- [4] 张启坤,赵浩.钛焊接头保护与质量控制[J].焊接技术,2022