

Research on Optimization of Quality Control Process for Welding in Titanium Heat Exchanger Manufacturing

Xiaoliang Qiang

Yankuang Jining Chemical Equipment Co., Ltd., Jining, Shandong, 272000, China

Abstract

Titanium heat exchangers, as important heat exchange equipment in industries such as chemical engineering, metallurgy, and energy, are widely used in heat exchange processes under high-temperature, high-pressure, and corrosive environments. Titanium alloys are widely used in the manufacturing of heat exchangers due to their excellent corrosion resistance, high-temperature resistance and light weight. However, titanium alloy materials face numerous challenges during the welding process, especially the issue of welding quality control, which directly affects the performance and service life of heat exchangers. This paper, in combination with the welding characteristics of titanium heat exchangers, analyzes the key factors affecting the welding quality of titanium alloys and proposes strategies for optimizing the welding process. By improving the surface treatment before welding, selecting the appropriate welding method, controlling the welding parameters and adopting advanced non-destructive testing technology, this paper proposes a systematic process optimization scheme for the welding quality control of titanium heat exchangers, aiming to enhance the strength, corrosion resistance and stability of the welded joints. Experimental research and theoretical analysis show that optimizing the welding process can significantly improve the welding quality of titanium heat exchangers and provide a reliable guarantee for the long-term stable operation of titanium alloy heat exchangers.

Keywords

Titanium heat exchanger; welding quality; process optimization; welding parameters; Non-destructive testing

钛换热器制造焊接质量控制工艺优化研究

强晓亮

兖矿济宁化工装备有限公司, 中国 · 山东 济宁 272000

摘要

钛换热器作为化工、冶金、能源等行业中重要的热交换设备,广泛应用于高温、高压和腐蚀性环境下的热交换过程。钛合金因其优异的耐腐蚀性、耐高温性和轻质特性而被广泛应用于换热器的制造。然而,钛合金材料在焊接过程中面临着诸多挑战,特别是其焊接质量控制问题,直接影响到换热器的性能和使用寿命。本文结合钛换热器的焊接特点,分析了影响钛合金焊接质量的关键因素,提出了优化焊接工艺的策略。通过改进焊接前的表面处理、选择合适的焊接方法、控制焊接参数以及采用先进的无损检测技术,本文提出了系统的钛换热器焊接质量控制工艺优化方案,旨在提高焊接接头的强度、耐腐蚀性及稳定性。实验研究和理论分析表明,优化焊接工艺能显著提高钛换热器的焊接质量,为钛合金换热器的长期稳定运行提供可靠保障。

关键词

钛换热器; 焊接质量; 工艺优化; 焊接参数; 无损检测

1 引言

钛合金因其在强腐蚀环境中的优异耐蚀性能、较高的比强度和耐高温特性,广泛应用于换热器的制造,尤其是在石油化工、海洋工程、航空航天等高要求领域。然而,钛合金在焊接过程中易受到氧化、氮化及热影响区的组织变化等问题的影响,这些问题不仅影响焊接接头的机械性能,还可能大大降低钛换热器的使用寿命。因此,钛换热器的焊接质

量控制成为生产中至关重要的一环。

尽管钛合金材料在许多高端技术领域得到了广泛应用,但由于其焊接难度较大,焊接接头常常面临裂纹、气孔、夹杂物等问题,这对钛换热器的整体性能构成威胁。为了保证钛换热器的可靠性和长期稳定性,焊接工艺的优化显得尤为重要。优化钛合金的焊接工艺,减少焊接缺陷,提升焊接接头的性能,是当前钛合金焊接技术研究的热点。

本研究旨在探讨在钛换热器制造过程中,如何通过焊接工艺优化,提高焊接质量,从而提高钛换热器的耐腐蚀性、强度以及长久性。通过理论分析和实验验证,本研究提出了一套行之有效的优化工艺方案,期望为钛换热器的焊接质量

【作者简介】强晓亮(1972-),男,中国山东济宁人,本科,工程师,从事压力容器设计制造研究。

控制提供有力支持。

2 钛合金焊接的特点与影响因素

钛合金因其优异的耐腐蚀性、高比强度和良好的生物相容性，广泛应用于航空航天、化工设备、海洋工程以及医用器械等领域。在钛换热器制造过程中，焊接是关键工艺之一，焊接质量的优劣直接影响换热器的力学性能、耐腐蚀性能以及长期服役的稳定性。钛合金焊接过程的复杂性主要体现在其材料本身的特殊物理和化学性质，这就要求在焊接工艺选择、焊接参数控制及后续处理等方面高度精准与规范化操作。[1]

2.1 钛合金的焊接特点

钛合金在焊接过程中最显著的特点是其高反应活性。钛在高温条件下会与氧、氮、氢、碳等元素发生剧烈反应，形成脆性化合物，如 TiO_2 、 TiN 、 TiH 等。这些化合物严重削弱焊接接头的塑性和韧性，增加了裂纹形成的风险。尤其在空气环境中加热时，钛表面易迅速生成致密且难以清除的氧化膜，厚度可达几毫米，阻碍焊缝金属与母材的冶金结合，从而影响焊缝强度和耐蚀性。

为避免钛合金的氧化，焊接过程中必须对焊缝区、热影响区甚至焊缝尾部实施全方位气体保护。惰性气体保护（如高纯氩气）是最常用的手段，通过 TIG、MIG 等气体保护焊方式进行焊接，有效隔绝空气中的活性气体。此外，钛合金导热性差、比热小，焊接热影响区易形成粗大的晶粒结构，降低接头的疲劳强度，这要求在施焊时严格控制热输入、焊接速度与温度梯度。

2.2 焊接质量的关键影响因素

钛合金焊接质量受多种因素的影响，其中关键影响因素主要包括以下几个方面：

焊接方法的选择：常用的焊接方法包括钨极氩弧焊（TIG）、金属极氩弧焊（MIG）、激光焊、电阻焊等。其中，TIG 焊因其热输入可控、焊缝质量好、设备稳定性高，广泛应用于中厚板和管道的钛合金焊接。激光焊则适用于高精度、小件零部件的焊接，具备热影响区小、焊接速度快等优势，但对设备要求较高，适合自动化、批量化生产。

焊接材料的选用：焊丝或焊条的成分必须与母材匹配，以确保冶金相容性和力学性能一致性。若焊接材料纯度不高，可能引入杂质或气体，降低焊缝质量。[2] 因此，必须选用经真空熔炼、含氧量、氮氢含量控制在标准范围内的钛合金焊丝。

焊接参数的控制：包括焊接电流、电压、焊接速度、热输入量等因素。适当的焊接电流可以确保良好的熔深和成形质量；过高的热输入可能导致晶粒粗化、热影响区扩展，从而降低接头力学性能。采用脉冲焊技术可以有效控制热输入，减小热影响区，抑制晶粒长大。[3]

焊接过程环境控制：包括焊接区域的清洁度、气体保

护范围、焊接工作间的洁净度等。钛合金对油污、氧化物极其敏感，因此，焊接前的表面处理尤为重要，必须去除氧化膜和污染物，通常采用化学酸洗或机械打磨等方式。

焊后热处理：焊后热处理可用于消除焊接残余应力、改善接头组织和力学性能。一般钛合金焊接后不进行高温退火，以防止性能劣化，但对某些厚壁结构件或承压设备，适当的中温退火可提升疲劳寿命。

2.3 常见焊接缺陷及其影响

尽管钛合金焊接技术日益成熟，但在实际操作中仍可能出现多种焊接缺陷，主要包括裂纹、气孔、夹渣、未熔合、咬边、焊缝成形不良等。这些缺陷将直接影响钛换热器的使用寿命和安全性能。

裂纹：常见于焊缝根部或热影响区，主要由焊接应力集中、高温脆性组织或冷却过程中的组织应变引起。裂纹一旦形成，易沿晶界扩展，造成结构失效。

气孔：主要由焊接区氢气含量过高、焊前清洁不彻底、气体保护不良等原因引起。气孔不仅降低焊缝致密性，还可能成为腐蚀介质侵入的通道。

夹渣与未熔合：多由于焊接过程热输入不足、焊缝成形不良或操作技术不到位导致。夹渣会形成焊缝中的非金属夹杂，降低接头强度。

焊缝组织不均：因热循环过程中的快速冷却或晶粒粗化，导致焊缝组织分布不均匀，进而影响整体力学性能及疲劳寿命。

焊接变形与残余应力：由于钛合金热膨胀系数小，焊接过程易产生集中应力，造成结构变形，甚至影响后续装配与服役性能。

3 钛换热器焊接工艺优化路径

为了提高钛换热器的焊接质量，减少焊接过程中的常见缺陷，需从钛合金材料的焊接特性出发，制定科学、系统的焊接工艺方案。结合前期研究与实际工程应用经验，本文提出一套针对钛合金焊接工艺的优化路径，涵盖焊前准备、焊接方法选择、焊接材料匹配以及参数控制等多个方面，以提升焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能，确保换热器的长期稳定运行。

3.1 焊接前的表面处理

钛合金材料具有高度活泼性，在高温条件下极易与空气中的氧、氮、氢等元素发生反应，从而生成脆性相，降低焊接接头的质量和使用寿命。因此，焊接前的表面处理工作尤为关键，直接关系到焊缝的纯净度与焊接过程的稳定性。

在实际操作中，应先使用机械打磨（如砂纸、钢丝刷）对焊接区及其周边 20 ~ 30mm 范围内的表面进行清理，去除氧化皮、锈迹等污染物。随后，需使用无水酒精或丙酮擦拭表面，以去除油污、水分等有机杂质。此外，对于高洁净要求的场合，还可以采用酸洗处理，如使用氢氟酸与硝酸的

混合液轻微腐蚀表面,进一步去除氧化膜,提高焊缝冶金结合质量。处理完成后,应尽快进行焊接,以防重新氧化。[4]

3.2 选择合适的焊接方法与焊接材料

钛合金焊接工艺的选择需要兼顾焊接质量、设备成本及可操作性等因素。综合各种焊接方法的适用性,目前**钨极氩弧焊(TIG焊)**是最常用且效果最稳定的一种焊接方法,尤其适合用于薄板钛合金的焊接。TIG焊采用高纯氩气作为保护气体,可有效隔绝焊接区与空气的接触,减少氧化现象,焊接热影响区小,焊缝成形美观,焊接缺陷少,工艺适应性强。

对于焊接材料的选择,应严格遵循“成分相近”的原则。所选用的焊丝或焊条需与母材的化学成分尽可能一致,以保证焊缝金属与母材的物理性能、化学稳定性和抗腐蚀能力相匹配。例如,TA2钛材常配用TA2或TA1焊丝进行焊接,确保焊缝接头具有与母材一致的综合性能。同时,焊材须具备低杂质含量、高纯度和良好的可焊性,以避免气孔、夹杂等缺陷的产生。

3.3 精确控制焊接参数

钛合金焊接对工艺参数的敏感性较高,合理控制焊接电流、电压、焊接速度、保护气体流量等参数,是实现高质量焊缝的关键所在。

焊接电流与热输入控制:电流过大易导致焊缝金属过热、晶粒粗化,甚至产生烧穿、气孔等缺陷;电流过小则可能导致焊接不熔合或熔深不足。因此,应根据钛合金厚度合理设定焊接电流,保持热输入稳定适中,防止焊接热影响区过大。

焊接速度:焊接速度应与电流和电压相协调,速度过慢会增加热输入、扩大晶粒;速度过快则易造成焊缝熔合不良、成形不佳。一般建议保持均匀、稳定的焊接速度,避免过快或忽快忽慢造成的不良组织。

温度与冷却速率控制:焊接过程中要控制焊接区的预热和层间温度,防止过高温度导致组织变化。同时,焊后应控制冷却速率,避免急冷引起残余应力或组织脆化。对于多层焊接结构,需确保前层焊缝充分冷却后再进行下一道焊接。

保护气体流量与覆盖范围:高纯氩气的保护是钛合金焊接成功的保障,焊接时应使用二级或三级高纯氩气(纯度 $\geq 99.99\%$),调节合适流量(一般为15~20L/min),并扩大保护罩覆盖范围至焊缝尾部,防止焊缝未完全冷却前与空气接触而氧化。

4 钛换热器焊接质量控制的优化方案

根据钛换热器焊接过程中易氧化、易脆化及热影响区组织敏感等特点,结合前述优化路径,本文进一步提出切实可行的钛换热器焊接质量控制优化方案,旨在提升焊接接头的整体性能,延长设备使用寿命,并确保其在高腐蚀、高温等复杂工况下的稳定运行。

4.1 采用惰性气体保护

由于钛合金在高温下极易与空气中的氧、氮、氢等元素反应,导致焊缝变脆、性能下降,因此必须在焊接过程中实施全方位的惰性气体保护。通常选用高纯度氩气(纯度 $\geq 99.99\%$)作为保护气体,对焊缝、热影响区及焊缝尾部进行有效覆盖,防止未冷却区域暴露于空气中。保护气体的流量应根据焊接电流和焊接速度调整,确保气流稳定、覆盖均匀,从而减少气孔、氧化变色等缺陷的发生,提高焊缝的致密性和表面质量。

4.2 采用先进的无损检测技术

焊接完成后的质量检测是保障钛换热器安全运行的关键环节。针对钛合金焊缝可能出现的裂纹、气孔、未熔合等隐蔽性缺陷,应引入高精度的无损检测技术。X射线检测可直观反映焊缝内部缺陷的位置和形态,适用于焊缝截面整体评估;而超声波检测则对微小裂纹和夹渣敏感,适合快速筛查大面积焊缝。通过合理组合多种无损检测方法,可全面评估焊接质量,及时发现问题,避免缺陷带入后续工序甚至成品中,保障换热器运行安全。[5]

4.3 优化焊后处理工艺

焊后处理对提高钛合金焊接接头的力学性能和稳定性具有重要作用。首先,可通过中低温退火处理细化焊缝区和热影响区的粗大晶粒,改善其组织结构,提升接头的强度与韧性。其次,进行焊后应力消除处理,能有效缓解焊接过程中产生的残余应力,降低因应力集中而引发的疲劳损伤风险。对于部分关键部位,还可考虑进行喷丸强化等表面处理,进一步提高焊缝抗裂性能和服役可靠性。通过上述焊后工艺优化,确保钛换热器在长期运行中的稳定性与安全性。

5 结语

钛合金材料在换热器制造中具有重要应用,然而其焊接工艺的控制仍面临诸多挑战。通过优化焊接前的表面处理、选择适当的焊接方法、控制焊接参数以及采用无损检测技术,能够显著提高钛换热器的焊接质量,确保其长期稳定运行。未来,随着技术的不断进步和对钛合金材料性能的深入研究,钛换热器的焊接工艺将更加完善,从而为各行业提供更加高效、耐用的换热设备。

参考文献

- [1] 郭宏新. 高效换热器技术及工程应用[M]. 化学工业出版社:202308.381.
- [2] 杨兰田,高秋英,王毛毛,等. 油气田站内换热器腐蚀原因及其对策[J]. 腐蚀与防护,2022,43(11):114-118.
- [3] 刘玉祥. 钛管子管板自动钨极氩弧焊工艺[J]. 化工设备与管道,2021,58(06):34-38.
- [4] 党燕妮. NCu30双管板换热器胀接扭矩及胀管率的控制[D]. 西安建筑科技大学,2020.
- [5] 孙文君,王善林,陈玉华,等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术,2019,62(18):63-72.