

Study on the Influence of Pre treatment Process on Welding Quality of Titanium Alloy and High Temperature Alloy before Welding

Shoufeng Zheng

Haizhuang Shenyang Bureau, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

Titanium alloys and high-temperature alloys are widely used in high-end fields such as aerospace and energy due to their unique and excellent properties, but the welding difficulty between the two is relatively high. The article focuses on exploring the influence mechanism of pre-treatment processes before welding, including surface cleaning, groove preparation, pre deformation, and pre heating, on the welding quality of titanium alloys and high-temperature alloys. By combining theoretical analysis with a review of existing research results, the article deeply analyzes the inherent relationship between each pre-treatment process link and the performance and microstructure characteristics of welding joints. The aim is to provide comprehensive theoretical basis and technical reference for optimizing welding processes and improving welding quality, and to help promote the progress and development of manufacturing technology in related fields.

Keywords

titanium alloy; high-temperature alloy; pre-treatment before welding; welding quality

钛合金与高温合金焊接前的预处理工艺对焊接质量的影响研究

郑守峰

海装沈阳局, 中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

钛合金与高温合金因各自独特的优异性能在航空航天、能源等高端领域广泛应用,但二者焊接难度较大。文章着重探讨焊接前预处理工艺,包括表面清理、坡口制备、预变形与预加热等方面对钛合金与高温合金焊接质量的影响机制,通过理论分析与已有研究成果综述相结合的方式,深入剖析各预处理工艺环节与焊接接头性能、微观组织特征之间的内在联系,旨在为优化焊接工艺、提升焊接质量提供全面的理论依据与技术参考,助力推动相关领域制造技术的进步与发展。

关键词

钛合金; 高温合金; 焊接前预处理; 焊接质量

1 引言

随着现代工业,尤其是航空航天、能源动力等领域向着高性能、高可靠性方向发展,钛合金与高温合金的应用日益广泛。钛合金以其低密度、高强度、良好的耐腐蚀性等特点,在减轻结构重量、提高结构效率方面表现卓越;高温合金则凭借出色的高温强度、抗氧化性及抗热腐蚀能力,成为高温部件的关键材料。然而,由于钛合金与高温合金在物理性能(如热膨胀系数、热导率、熔点等)和化学性质(如元素活性)上存在显著差异,二者焊接时面临诸多挑战,如焊

接裂纹、气孔、未熔合等缺陷极易产生,严重影响焊接接头的质量与性能。焊接前的预处理工艺作为焊接过程的重要前置环节,对后续焊接质量的保障起着举足轻重的作用。深入研究其对焊接质量的影响规律与机制,具有极为重要的理论与现实意义。

2 钛合金与高温合金的特性差异

2.1 物理性能差异

2.1.1 热膨胀系数

钛合金的热膨胀系数相对较高,而高温合金的热膨胀系数较低。在焊接过程中,这种差异会导致在热循环作用下,焊接接头处产生较大的热应力。例如,在冷却阶段,钛合金收缩程度较大,而高温合金收缩相对较小,两者相互制约,容易在接头区域形成应力集中,为焊接裂纹的产生埋下

【作者简介】郑守峰(1988-),男,中国辽宁沈阳,硕士,工程师,从事先进材料的焊接与制造研究。

隐患。

2.1.2 热导率

钛合金的热导率一般低于高温合金。这意味着在焊接时,热量在钛合金中的传导速度相对较慢,容易造成局部热量积聚,使焊接熔池的温度场分布不均匀。而高温合金相对较好的热导率则可能导致焊接热影响区的范围有所不同,进一步影响焊接接头的组织和性能。

2.1.3 熔点

钛合金的熔点通常低于高温合金。在焊接过程中,需要精确控制焊接热输入,以确保两种材料都能在合适的温度区间内实现良好的熔合,避免因熔点差异导致的未熔合或过度熔化等问题^[1]。

2.2 化学性质差异

钛合金在高温条件下具有极强的化学活性,容易与周围环境中的氧、氮、氢等气体元素发生反应,形成钛的氧化物、氮化物或氢化物等脆硬化合物。这些化合物的生成会显著降低钛合金的力学性能,特别是焊接接头的韧性和强度。例如,钛合金在焊接过程中,如果高温环境下与空气接触,可能在接头区域形成氧化钛(TiO_2)层。氧化钛不仅硬度高,而且较脆,容易在焊接过程中裂开或在使用过程中断裂,导致焊接接头的强度下降。此外,氢的吸收会导致钛合金产生氢脆现象,进而使焊接接头变得更加脆弱。这些化学反应不仅影响钛合金的微观结构和力学性能,还可能导致焊接接头的脆断,特别是在承受较大机械应力或高温环境下使用时,焊接接头的破坏风险显著增加。因此,控制焊接过程中的温度、氛围和保护气体的使用是避免这种化学反应并确保焊接质量的关键。

高温合金具有较高的化学稳定性,其合金元素如镍、铬、钴等在高温条件下表现出较好的耐腐蚀和抗氧化性能,但在与钛合金焊接时,仍可能发生元素扩散和化学反应,从而影响焊接接头的组成和性能稳定性。在焊接过程中,钛合金中的钛元素与高温合金中的一些元素(如镍)可能发生扩散,形成金属间化合物。例如,镍和钛在高温下容易反应形成钛镍金属间化合物(TiNi),这些金属间化合物通常具有较高的硬度和脆性,且在焊接接头中容易成为薄弱环节,导致接头的脆性增加。随着焊接温度的升高,钛和高温合金中的其他元素(如铬、铁)也可能发生扩散和反应,形成不均匀的相结构,影响接头的机械性能。为了提高钛合金与高温合金的焊接质量,必须采取适当的焊接工艺,精确控制焊接温度和焊接环境,减少元素扩散,防止形成脆硬的金属间化合物,从而确保接头的韧性和强度。

3 焊接前预处理工艺

3.1 表面清理

3.1.1 机械清理

机械清理主要包括打磨、抛光、喷砂等方法。打磨可

以去除钛合金与高温合金表面的氧化皮、油污、锈蚀以及其他表面污染物,使焊接表面平整光洁,有利于焊接电弧的稳定引燃和熔池的良好形成。例如,采用砂轮打磨时,需注意选择合适的砂轮粒度和打磨力度,避免过度打磨造成表面划痕或损伤基体材料。抛光则可进一步提高表面光洁度,减少表面粗糙度对焊接质量的影响。喷砂处理能够在金属表面形成均匀的微小凹坑,增加表面的比表面积,从而提高焊接时的润湿性和结合力。但喷砂过程中要严格控制喷砂压力和砂粒的粒度与材质,防止砂粒嵌入金属表面或对表面造成过度冲击^[2]。

3.1.2 化学清理

化学清理是利用化学试剂与金属表面的杂质发生化学反应,从而达到清洁表面的目的。对于钛合金,常用的化学清理试剂有氢氟酸-硝酸混合液等。氢氟酸能够溶解钛合金表面的氧化膜,硝酸则起到氧化和钝化的作用,防止钛合金表面过度腐蚀。在使用化学清理方法时,必须精确控制试剂的浓度、温度和清洗时间。浓度过高可能导致金属基体过度腐蚀,温度过高或时间过长也会产生类似的不良后果。对于高温合金,通常先采用碱性溶液去除油污,然后再用酸液进行钝化处理,以去除表面的氧化层并形成一层钝化膜,提高其在焊接过程中的抗氧化能力。

3.2 坡口制备

3.2.1 坡口形状

坡口形状的选择直接影响焊接质量和焊接工艺的难易程度。常见的坡口形状有V形、U形、X形等。V形坡口加工相对简单,但其焊接时填充金属量较大,且焊接过程中热量分布不均匀,容易导致较大的焊接变形。U形坡口在减少填充金属量方面具有优势,同时能使焊缝根部的应力集中程度相对较低,但U形坡口的加工难度较大,需要专用的加工设备和较高的加工精度。X形坡口在双面焊接时,能够使焊接应力分布更为均匀,有效减少焊接变形,并且在相同板厚条件下,相较于V形坡口可减少焊接填充量。然而,X形坡口对焊件的装配精度要求极高,否则容易出现根部未焊透或未熔合等缺陷。在钛合金与高温合金焊接中,应根据焊件的厚度、焊接方法以及对焊接质量和变形控制的要求等因素综合考虑选择合适的坡口形状。

3.2.2 坡口尺寸

坡口尺寸主要包括坡口角度、钝边高度和根部间隙等参数。坡口角度过大,会使焊接时的填充金属量显著增加,焊接热输入增大,从而导致焊接变形加剧,同时也可能使焊缝金属的结晶方向发生改变,影响焊缝的力学性能。坡口角度过小,则会使焊接电弧难以到达坡口根部,容易造成根部未熔合或未焊透等缺陷。钝边高度的设置要合理,过大会阻碍焊接电弧对根部的熔化,导致根部无法焊透;过小则可能在焊接过程中被烧穿,使焊缝背面成形不良。根部间隙过大,容易在焊接过程中产生气孔、夹渣等缺陷,因为过大的

间隙会使熔池中的气体和熔渣难以排出；根部间隙过小则会使焊接操作困难，同样容易引发未熔合等问题。

3.3 预变形与预加热

3.3.1 预变形

由于钛合金与高温合金热膨胀系数差异较大，焊接过程中必然会产生焊接变形。预变形处理是在焊接前根据焊件的形状、尺寸以及焊接工艺参数等因素，对焊件施加一定量的反向变形。例如，对于平板对接焊接，可以通过机械弯曲的方式使焊件预先产生一定的弯曲变形，在焊接过程中，随着焊接热应力的产生，焊件会朝着与预变形相反的方向变形，从而在一定程度上抵消焊接变形，使焊接后的焊件尺寸更接近设计要求。预变形量的确定需要综合考虑多种因素，如焊件的材质特性、板厚、焊接热输入以及焊接顺序等。如果预变形量过大或过小，都无法达到理想的控制焊接变形的效果。

3.3.2 预加热

预加热是在焊接前对焊件进行加热处理。对于钛合金与高温合金焊接，预加热的主要目的是降低焊接过程中的冷却速度，减少焊接热应力，防止焊接裂纹的产生。预加热温度的选择至关重要，温度过高可能会导致钛合金晶粒长大，降低其力学性能，同时也可能使高温合金中的某些强化相发生溶解或粗化，影响其高温性能；温度过低则无法有效发挥预加热的作用。此外，预加热的范围和加热速度也需要合理控制。加热范围应覆盖焊接接头及其周边一定区域，以保证温度场的均匀性；加热速度过快可能会在焊件内部产生热应力，而过慢则会影响生产效率。

4 预处理工艺对焊接质量的影响机制

4.1 表面清理对焊接质量的影响

4.1.1 对焊接熔合的影响

经过彻底的表面清理，无论是机械清理还是化学清理，都能有效去除金属表面的氧化膜、油污和杂质等。这使得焊接时焊接热源能够更有效地作用于金属基体，促进熔池的形成和熔合。例如，去除钛合金表面的氧化膜后，钛原子与其他合金元素在熔池中的扩散更加顺畅，有利于形成均匀的焊缝金属，提高焊缝的结合强度。

4.1.2 对焊接气孔和夹渣的影响

表面清理不彻底时，残留的油污、氧化皮等杂质在焊接过程中会分解或卷入熔池，形成气孔或夹渣。而良好的表面清理工艺能够显著减少这些缺陷的产生。如化学清理去除了钛合金表面的氢氧等杂质，降低了焊缝中氢气孔的形成几率；机械清理去除的氧化皮和杂质可防止其在熔池中形成夹渣。

4.2 坡口制备对焊接质量的影响

4.2.1 对焊接应力与变形的影响

合理的坡口形状和尺寸能够优化焊接热循环过程，减少焊接应力与变形。如X形坡口双面焊接时，焊接热量分布相对对称，使得焊接过程中产生的横向收缩应力相互抵消一部分，从而降低焊接变形量。而坡口尺寸不合适，如坡口

角度过大或根部间隙过大，会导致焊接热输入不均匀或过大，使焊接应力集中，进而增大焊接变形程度，甚至可能导致焊接裂纹的产生^[1]。

4.2.2 对焊缝金属结晶与力学性能的影响

坡口形状和尺寸影响焊缝金属的结晶过程。较窄的坡口角度和较小的根部间隙会使焊缝金属的结晶方向相对单一，可能导致焊缝的各向异性增强；而合适的坡口形状和尺寸能够使焊缝金属在结晶过程中形成较为均匀的晶粒结构，有利于提高焊缝的力学性能，如强度、韧性和塑性等。

4.3 预变形与预加热对焊接质量的影响

4.3.1 预变形对焊接变形与残余应力的影响

预变形通过预先调整焊件的形状，在焊接过程中与焊接变形相互作用。当预变形量合适时，能够有效控制焊接变形，使焊件最终的形状和尺寸精度得到提高。同时，由于焊接变形得到有效控制，焊接接头处的残余应力分布也更加均匀，减少了因残余应力集中导致的焊接裂纹萌生的可能性，提高了焊接接头的疲劳寿命和可靠性。

4.3.2 预加热对焊接裂纹与组织性能的影响

预加热降低了焊接冷却速度，减少了焊接热应力，对于防止钛合金与高温合金焊接时因热应力过大而产生的冷裂纹具有重要作用。同时，预加热能够影响焊缝金属和热影响区的组织转变。例如，对于高温合金，适当的预加热可以使焊缝金属中的强化相在冷却过程中更均匀地析出，提高焊缝的高温强度；对于钛合金，预加热可避免因冷却速度过快而形成马氏体等脆性组织，改善焊接接头的韧性。

5 结论

钛合金与高温合金焊接前的预处理工艺对焊接质量有着至关重要的影响。表面清理工艺通过去除表面杂质和氧化膜，为良好的焊接熔合创造条件，减少气孔和夹渣等缺陷。坡口制备工艺中的坡口形状和尺寸参数直接关系到焊接应力、变形以及焊缝金属的结晶和力学性能，合理选择坡口能够优化焊接过程，提高焊接质量。预变形与预加热工艺分别从控制焊接变形和改善焊接组织性能、减少焊接裂纹等方面发挥作用。在实际的钛合金与高温合金焊接工程中，必须综合考虑各种因素，根据焊件的具体要求和焊接工艺条件，精心设计和实施焊接前的预处理工艺，以确保焊接质量满足高端领域对结构件性能的严格要求，推动钛合金与高温合金焊接技术在航空航天、能源等关键行业的进一步发展与应用。

参考文献

- [1] 周牧, 王倩, 王延绪, 翟梓融, 何伦华, 李昂, 马英杰, 雷家峰, 杨锐. 焊前预处理对钛合金厚板焊接残余应力的影响[J]. 金属学报, 2024, 60 (08): 1064-1078.
- [2] 陈凤林, 侯春明. 焊接顺序对TC4钛合金TIG焊T型接头残余应力和变形的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47 (12): 75-81.
- [3] 刘鹏, 梁敬凡, 肖奇, 雷强, 罗文忠. 不同条件下钛合金电极块焊接氮化规律研究[J]. 冶金与材料, 2023, 43 (11): 169-171.