

镍钛合金与不锈钢的焊接技术研究进展

张英超

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 镍钛合金与不锈钢因物理化学性能差异,焊接面临诸多挑战。本文梳理了焊接特性,涵盖物理、化学性能差异及焊接难点。研究进展方面,介绍了熔焊、固态焊、钎焊等焊接方法,分析了焊接接头微观组织、力学性能与耐腐蚀性能的研究成果。还探讨了未来发展趋势,包括新材料与新工艺应用、智能化与自动化焊接技术、绿色环保焊接技术。这些研究为镍钛合金与不锈钢的可靠焊接提供参考,推动相关领域技术发展。

关键词: 镍钛合金; 不锈钢; 焊接技术; 接头性能; 发展趋势

引言: 镍钛合金具备独特的形状记忆效应与超弹性,在航空航天、医疗器械等领域应用广泛;不锈钢则以良好的耐腐蚀性与高强度著称,是众多工程结构的常用材料。当需要将镍钛合金与不锈钢进行连接时,由于二者在物理和化学性能上存在显著差异,焊接过程变得极为复杂,面临诸多难题。深入研究镍钛合金与不锈钢的焊接技术,对于拓展二者应用范围、提升产品质量和可靠性具有重要意义。

1 镍钛合金与不锈钢的焊接特性分析

1.1 物理性能差异剖析

镍钛合金与不锈钢在物理性能层面存在显著差异,这些差异对焊接过程产生多方面影响。熔点方面,镍钛合金熔点相对较低,而不锈钢熔点较高。在焊接热输入环节,若采用相同热源参数,镍钛合金会率先达到熔化状态,不锈钢则需更高热量输入才能熔化^[1]。这可能导致镍钛合金过度熔化,造成焊缝金属流失,影响焊接质量;也可能因热量分配不均,使焊接接头出现未熔合等缺陷。热导率差异同样不容忽视。不锈钢热导率较大,焊接时热量传递速度快,热场分布范围广;镍钛合金热导率较小,热量传递相对缓慢,热场集中。这种差异使得焊接过程中热场分布不均匀,在不锈钢一侧热量散失快,温度梯度大,易产生较大热应力;镍钛合金一侧则可能因热量积聚导致局部过热,影响材料性能。热膨胀系数方面,镍钛合金与不锈钢存在明显不同。焊接过程中,随着温度升高,两者膨胀程度不同,冷却时收缩量也有差异。这种差异会在焊接接头内部产生较大焊接应力,当应力超过材料强度极限时,就会引发焊接变形,甚至导致接头开裂。弹性模量差异对焊接接头力学性能存在潜在影响。不锈钢弹性模量较高,镍钛合金弹性模量较低。在受力时,两者变形程度不同,易在接头处产生应力集中,降低接头承载能力,影响焊接结构整体力学性能。

1.2 化学性能差异解读

化学性能差异也给焊接带来诸多问题。镍钛合金化学活性较高,不锈钢化学活性相对较低。焊接时,镍钛合金易与周围环境中的氧、氮等元素发生反应,造成焊接氧化与污染,降低接头性能。元素互溶性差异影响焊缝金属成分均匀性。镍钛合金与不锈钢元素互溶性有限,焊接时难以形成均匀的焊缝金属,易出现成分偏析现象,影响接头力学性能与耐腐蚀性能。金属间化合物形成倾向是焊接面临的重要问题。镍钛合金与不锈钢在焊接高温作用下,易形成脆性金属间化合物。这些化合物硬度高、韧性差,会显著降低焊接接头塑性与韧性,增加接头脆化倾向,严重影响焊接结构可靠性。

1.3 焊接难点综合阐述

控制脆性金属间化合物生成是焊接难点之一。需精确控制焊接热输入与冷却速度,抑制金属间化合物形成,但这在实际操作中难度较大。有效调控焊接应力与变形也是挑战。由于物理性能差异导致应力与变形机制复杂,需综合考虑材料特性、焊接工艺等多方面因素,采取合理措施进行调控。预防焊接接头脆化倾向需从控制金属间化合物生成、优化焊接工艺等方面入手。同时,防护氧化与污染问题也至关重要,需选择合适保护气体与焊接环境,减少有害元素侵入。

2 镍钛合金与不锈钢焊接方法研究进展

2.1 熔焊技术进展

2.1.1 激光焊

激光焊基于高能量密度激光束实现材料连接,在异种材料焊接领域优势显著。其能量集中、热影响区窄,能精准控制焊接过程,减少对母材性能影响。众多学者针对激光焊参数展开深入研究,功率大小直接影响焊接熔深,功率过高易导致材料过度熔化,功率过低则无法形成良好焊缝;光斑直径影响能量分布范围,对焊缝宽

度有重要作用；焊接速度与热输入密切相关，速度过快热输入不足，速度过慢热输入过多，均会影响焊缝质量。目前，激光焊在镍钛合金与不锈钢焊接应用中不断取得新成果，为异种材料连接提供了高效途径。

2.1.2 等离子弧焊

等离子弧焊具有能量密度高、电弧稳定性好等特点，适用于多种材料焊接场景。在镍钛合金与不锈钢焊接中，工艺参数优化是关键^[2]。电流大小决定等离子弧能量，气压影响等离子流速度与挺度，喷嘴尺寸则对电弧形态和能量分布有调节作用。通过对这些参数精细调整，可有效改善焊接质量，解决异种材料焊接难题，提高接头性能。

2.1.3 电子束焊

电子束焊利用高速电子束轰击工件产生热量实现焊接，真空环境要求保证了焊接过程不受空气污染。加速电压、束流、聚焦电流等参数控制对焊接质量至关重要。加速电压影响电子束能量，束流决定热输入大小，聚焦电流调节电子束聚焦程度。合理控制这些参数，可实现镍钛合金与不锈钢高精度焊接，满足对焊接质量要求极高的应用场景。

2.2 固态焊技术进展

2.2.1 扩散焊

扩散焊通过原子扩散实现界面结合，界面结合机制复杂且受多种因素影响。温度、压力、时间等参数对接头性能影响显著。温度升高可加速原子扩散，但过高温度易引发材料性能变化；适当压力有助于原子接触，促进扩散；时间延长可使扩散更充分，但过长可能导致晶粒长大。通过优化这些参数，可有效抑制镍钛合金与不锈钢金属间化合物生成，提高接头质量。

2.2.2 摩擦焊

摩擦焊基于机械摩擦产生热量使材料达到塑性状态实现连接，分为旋转摩擦焊、线性摩擦焊等多种类型。旋转速度、轴向压力、摩擦时间等参数优化对焊接质量意义重大。旋转速度影响摩擦产热，轴向压力决定材料塑性变形程度，摩擦时间控制热量积累与材料结合过程。不同参数组合下，镍钛合金与不锈钢焊接接头组织与性能呈现不同特点，为焊接工艺选择提供依据。

2.2.3 爆炸焊

爆炸焊利用炸药爆炸产生的能量实现材料连接，能量传递机制复杂。炸药量、爆炸距离、基复板间距等参数控制对焊接效果影响明显。炸药量决定爆炸能量大小，爆炸距离影响能量传递效率，基复板间距影响材料结合状态。通过精确控制这些参数，可实现镍钛合金与不锈钢大面积连接，界面呈现独特特征，满足特殊工程需求。

2.3 钎焊技术进展

钎焊利用熔点低于母材的钎料实现连接，钎料选择需考虑与母材的化学相容性和物理性能匹配。常用银基钎料、铜基钎料等在镍钛合金与不锈钢焊接中性能各异。钎焊工艺参数优化同样重要，钎焊温度影响钎料流动性与润湿性，保温时间决定钎料与母材相互作用程度，钎剂选择可改善焊接环境，减少氧化。通过优化这些参数，可提高钎焊质量，实现镍钛合金与不锈钢可靠连接。

3 镍钛合金与不锈钢焊接接头性能研究进展

3.1 微观组织研究进展

在镍钛合金与不锈钢焊接过程中，接头组织演变规律受多种因素交织影响。焊接热输入大小、冷却速度快慢以及材料自身特性等，均会导致接头组织发生复杂变化^[3]。深入研究这些因素，有助于精准把握组织演变方向。金属间化合物在焊接接头中较为常见，对性能影响显著。科研人员致力于探究金属间化合物类型，不同类型化合物在物理化学性质上存在差异；分析形态，或呈块状、或呈针状等，不同形态对性能影响不同；明确分布位置，是在焊缝中心、热影响区还是其他区域；以及揭示形成机制，从原子扩散、化学反应等角度进行剖析。此外，晶粒细化与再结晶行为对接头性能也起着关键作用。晶粒细化可提高材料强度与韧性，再结晶过程则会影响材料内部应力状态与组织结构，进而影响接头综合性能。

3.2 力学性能研究进展

抗拉强度与断裂韧性是衡量焊接接头力学性能的重要指标。科研人员不断探索更精准的测试方法，以准确获取接头力学性能数据。同时，深入研究影响因素，如焊接工艺参数、材料成分差异等，为优化焊接工艺提供依据。疲劳性能与蠕变性能评估也是研究重点。在长期交变载荷或高温环境下，接头易出现疲劳破坏与蠕变变形。通过建立科学评估方法，可预测接头在实际工况下的使用寿命。为提升疲劳与蠕变性能，研究人员从材料选择、工艺优化等方面提出提升策略。硬度分布与耐磨性同样不容忽视。通过合理测试手段了解接头硬度分布情况，分析耐磨性影响因素，进而采取改善措施，如调整焊接工艺、进行表面强化处理等，提高接头耐磨性能。

3.3 耐腐蚀性能研究进展

镍钛合金与不锈钢焊接接头在不同腐蚀介质中腐蚀行为各异。在生理盐水、酸性溶液等环境中，接头会发生不同程度腐蚀。深入研究腐蚀行为，包括腐蚀速率、腐蚀产物特征等，有助于了解接头腐蚀机理。腐蚀介质不仅会导致接头外观与尺寸变化，还会对其微观组织和力学性能产生负面影响。例如，腐蚀可能引发微观组织

结构改变,降低材料强度与韧性。为提升焊接接头耐腐蚀性能,科研人员从多个角度开展研究。表面处理技术如涂层、镀层等,可在接头表面形成保护层,隔绝腐蚀介质;合金化方法通过调整材料成分,提高材料自身耐腐蚀性,为接头在恶劣环境下的可靠应用提供保障。

4 镍钛合金与不锈钢焊接技术的未来发展趋势

4.1 新材料与新工艺的应用趋势

在镍钛合金与不锈钢焊接领域,新型焊接材料的研究正成为推动技术进步的关键力量。高熵合金钎料凭借独特的多元组元结构,展现出优异的物理化学性能,有望在提高焊接接头强度、耐腐蚀性等方面发挥重要作用^[4]。纳米复合钎料则通过引入纳米颗粒,改善了钎料的润湿性与流动性,为提升焊接质量提供了新途径。这些新型焊接材料的应用前景广阔,将为镍钛合金与不锈钢的可靠连接提供更多选择。先进焊接工艺的引入同样备受关注。搅拌摩擦焊的新变种不断涌现,通过优化搅拌头设计、调整焊接参数等方式,进一步拓展了搅拌摩擦焊在异种材料焊接中的应用范围。复合焊接工艺将不同焊接方法的优势有机结合,如激光-电弧复合焊接,既能发挥激光焊能量集中、热影响区小的特点,又能借助电弧焊的稳定电弧,提高焊接效率与质量。未来,这些先进焊接工艺将朝着更高效、更精准的方向发展。

4.2 智能化与自动化焊接技术趋势

焊接过程智能化控制技术是提升焊接质量与效率的重要手段。传感器技术的不断发展,使得能够实时监测焊接过程中的温度、应力、变形等关键参数,为智能算法提供准确数据支持。智能算法通过对这些数据的分析处理,实现对焊接参数的自动调整与优化,确保焊接过程稳定可靠。焊接设备自动化升级也是未来发展的必然趋势。机器人焊接系统具有高度的灵活性与精准性,能够完成复杂焊接任务,提高生产效率与产品质量。自动化生产线则将多个焊接工序集成在一起,实现连续、高效生产。然而,自动化升级也面临诸多挑战,如设备成

本高、技术人才短缺等,需要行业共同努力克服。

4.3 绿色环保焊接技术趋势

随着环保意识的增强,低能耗焊接工艺的研究与应用日益受到重视。节能型激光焊通过优化激光发生器结构、提高能量转换效率等方式,降低了焊接过程中的能耗。高效等离子弧焊则通过改进等离子弧发生装置,提高了能量利用率,减少了能源浪费。无污染焊接材料的开发与推广也是绿色环保焊接的重要方向。无铅钎料避免了铅元素对环境的污染,环保型焊剂则减少了焊接过程中有害气体的排放。此外,焊接废弃物处理与回收技术的发展也至关重要。通过研发先进的处理与回收技术,能够实现焊接废弃物的资源化利用,降低对环境的影响,推动焊接行业可持续发展。

结束语

镍钛合金与不锈钢焊接技术的研究已取得一定成果。从焊接特性分析到多种焊接方法的探索,再到对接头性能的深入研究,每一步都为解决焊接难题提供了思路与方法。新材料与新工艺、智能化与自动化、绿色环保焊接技术的发展方向,为进一步提升焊接质量与效率指明道路。随着研究的不断深入,相信镍钛合金与不锈钢的焊接技术将不断完善,在更多领域发挥重要作用,为相关产业的发展注入强大动力。

参考文献

- [1]韩乐洁,陈天驹,马迅,等.镍钛合金与不锈钢的焊接技术研究进展[J].材料导报,2026,40(2):119-128.
- [2]常敬欢,余刚,曹睿,等.钛合金/铜-镍/不锈钢焊接接头的组织与性能[J].焊接学报,2023,44(7):48-55.
- [3]周海宽,杨海丽.不同厚度镍中间层对镍钛合金与不锈钢激光焊接接头组织及性能的影响[J].热加工工艺,2024,53(19):29-34.
- [4]牛小男,崔丽,王鹏,等.镍铝青铜过渡层对钛合金/不锈钢异种材料激光焊接接头组织与力学性能的影响[J].焊接学报,2022,43(1):42-47.