

不锈钢管道焊接过程中热输入对晶间腐蚀敏感性的影响

段 岩

吉林化纤集团有限责任公司 吉林 吉林 132012

摘 要: 本文聚焦不锈钢管道焊接中热输入与晶间腐蚀敏感性的关联。先阐述不锈钢管道焊接特性及晶间腐蚀相关知识,再剖析热输入在焊接时对温度场、冷却速度与组织转变的作用机制。通过实验研究,呈现不同热输入下晶间腐蚀敏感性的变化规律,揭示问题根源。最后提出一系列合理控制热输入以降低晶间腐蚀敏感性的有效措施,为提升不锈钢管道焊接质量与长期可靠性提供坚实的理论与实践支撑。

关键词: 不锈钢管道焊接; 热输入; 晶间腐蚀敏感性

1 引言

不锈钢管道因耐腐蚀、高强度和美观,广泛应用于石化、电力、医药等领域。焊接作为其关键连接工艺,质量直接影响管道的安全性与使用寿命。然而,不锈钢焊接易产生晶间腐蚀,削弱材料性能,可能导致泄漏事故。热输入是焊接核心参数,显著影响接头组织与性能。合理控制热输入可有效降低晶间腐蚀敏感性,提升焊接质量。因此,研究热输入对晶间腐蚀的影响,对优化焊接工艺、保障管道安全运行具有重要意义。

2 不锈钢管道焊接与晶间腐蚀概述

不锈钢管道焊接相较于普通碳钢具有独特性,主要体现在其较低的热导率(以304不锈钢为例,在20℃时为16.3W/(m·K))和较大的电阻率,导致热量传导慢、易积聚。此外,在高温环境下,不锈钢的强度相较于常温会有所降低,同时塑性也会变差,增加了焊接裂纹的风险,并且在高温下容易氧化形成影响焊接质量的氧化皮^[1]。因此,焊接时需采用特殊工艺如惰性气体保护来防止这些问题。晶间腐蚀是不锈钢特别是焊接接头附近的一种局部腐蚀现象,由贫铬引起,特别是在450-850℃温度范围内碳与铬形成碳化铬导致晶界处铬含量降低,当降至临界值以下时,耐腐蚀性能下降,发生腐蚀反应,严重削弱材料间的结合力,可能引发泄漏甚至事故,缩短管道寿命并增加成本。

3 焊接过程中热输入的作用方式

热输入是指焊接过程中单位长度焊缝所吸收的热量,计算公式为 $Q = \eta UI/v$ (其中 η 为热效率, U 为电压, I 为电流, v 为速度),其大小显著影响焊接温度场、冷却速度及组织转变。例如,对于304不锈钢管道,特定参数下热输入可达172.8J/cm。热输入大时,焊接温度场扩展,高温停留时间延长,导致晶粒长大加速和晶间腐蚀敏感性增加;反之则缩小高温区域并缩短高温停留时

间。冷却速度与热输入呈反比关系。慢速冷却会促进碳化铬在晶界析出,增加晶间腐蚀风险。虽然304不锈钢本身属于奥氏体不锈钢,在常规焊接条件下一般不会直接形成大量马氏体,但若冷却速度过快,在焊接接头局部区域,尤其是存在应力集中的部位,可能会促使少量马氏体生成,而马氏体的存在会增加接头产生裂纹的倾向。适中热输入可使铁素体均匀分布在奥氏体基体中,优化焊接接头性能。然而,热输入过高会导致粗大条状铁素体生成,降低焊接接头的韧性;热输入过低则可能因冷却速度过快等因素,间接影响接头组织,降低其耐腐蚀性。

4 不同热输入水平下晶间腐蚀敏感性的变化规律

4.1 低热输入下的晶间腐蚀敏感性

在低热输入(低于100J/cm)焊接304不锈钢管道时,焊接温度较低、冷却速度快,高温区域窄,最高温度通常低于1250℃,冷却时间 $t_8/5$ 可短至5秒以内。此条件下,碳化铬析出受限,晶界贫铬程度轻,晶间腐蚀敏感性较低。实验表明,低热输入接头在硫酸-硫酸铜试验中腐蚀速率明显低于高热输入接头。然而,热输入过低($< 80J/cm$)可能导致未熔合、未焊透等缺陷,成为腐蚀起始点,加速局部腐蚀。快速冷却还可能引发较大残余应力,增加应力腐蚀开裂风险,影响管道长期性能。

4.2 适中热输入下的晶间腐蚀敏感性

适中的热输入可以使焊接接头获得较为理想的组织和性能。对于304不锈钢管道焊接,适中的热输入范围一般在120-180J/cm之间。在这个热输入范围内,焊接温度适中,冷却速度合理, $t_8/5$ 约为8-12s。碳化铬在晶界处的析出得到一定程度的控制,晶界附近贫铬区较窄。通过金相组织观察发现,此时焊接接头的组织为细小的奥氏体+少量铁素体,铁素体呈细小颗粒状均匀分布。这种组织结构使得晶界处的铬含量能够保持在较高水平,有效

降低了晶间腐蚀敏感性^[2]。同时,适中的热输入还可以保证焊接接头的充分熔合,减少焊接缺陷的产生,降低残余应力。在实际生产中,通常通过优化焊接工艺参数,选择适中的热输入,以提高不锈钢管道焊接接头的抗晶间腐蚀性能。例如,采用合适的焊接电流、电压和焊接速度组合,使热输入稳定在适中范围内。

4.3 高热输入下的晶间腐蚀敏感性

当焊接热输入过高(超过200J/cm)时,焊接温度显著升高,高温停留时间延长,最高温度可达1400℃以上,冷却时间 $t_8/5$ 延长至15秒以上。这促使碳原子和铬原子充分扩散并在晶界析出大量碳化铬,导致晶界附近贫铬区变宽,晶间腐蚀敏感性显著增加。电化学动电位再活化测试(EPR)显示,高热输入接头的再活化电流密度明显高于低热输入接头,表明其更易发生晶间腐蚀。此外,高热输入还会引起晶粒粗大,晶界面积减少,结合力下降,进一步加剧腐蚀风险。长期使用中,腐蚀区域可能持续扩展,最终引发管道泄漏等严重问题。

5 实验研究分析

5.1 实验研究方法

为了深入研究不锈钢管道焊接过程中热输入对晶间腐蚀敏感性的影响,我们进行了一系列的实验研究。实验选用常见的304不锈钢,规格为外径108mm、壁厚4mm的管道。采用手工钨极氩弧焊(TIG焊)方法,通过改变焊接电流、电压和焊接速度来控制热输入。焊接电流设置范围为90-150A,电压设置范围为12-20V,焊接速度设置范围为6-14cm/min。焊接完成后,对焊接接头进行金相组织观察、晶间腐蚀试验以及力学性能测试。金相组织观察采用光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM),观察焊接接头的微观组织结构,包括晶粒大小、相组成以及碳化铬的析出情况。晶间腐蚀试验采用硫酸-硫酸铜腐蚀试验和电化学动电位再活化法(EPR)。硫酸-硫酸铜腐蚀试验按照GB/T4334-2008标准进行,通过测量腐蚀前后的重量损失来评估晶间腐蚀敏感性。EPR试验在0.5mol/LH₂SO₄+0.01mol/LKSCN溶液中进行,通过测量再活化电流密度来表征晶间腐蚀敏感性。力学性能测试包括拉伸试验和弯曲试验,测试焊接接头的强度和塑性。

5.2 实验结果分析

实验结果表明,随着热输入的增加,焊接接头的晶间腐蚀敏感性呈现出先降低后升高的趋势。当热输入为120J/cm时,晶间腐蚀敏感性最低。在硫酸-硫酸铜腐蚀试验中,该热输入下的焊接接头重量损失仅为0.05mg/cm²,EPR试验的再活化电流密度为0.02mA/cm²。金相组织观察发现,在适中的热输入范围内,焊接接头的组织

较为均匀、细小,奥氏体晶粒尺寸约为20-30μm,铁素体呈细小颗粒状均匀分布在奥氏体基体中,碳化铬析出较少。当热输入过低(如90J/cm)时,虽然晶间腐蚀敏感性相对较低(重量损失为0.08mg/cm²,再活化电流密度为0.03mA/cm²),但焊接接头出现了未熔合缺陷,且残余应力较大。拉伸试验结果表明,该热输入下焊接接头的抗拉强度为520MPa,低于适中的热输入下的抗拉强度(550MPa)。当热输入过高(如200J/cm)时,晶间腐蚀敏感性急剧增加。硫酸-硫酸铜腐蚀试验的重量损失达到0.2mg/cm²,EPR试验的再活化电流密度为0.1mA/cm²。金相组织观察发现,焊接接头的晶粒明显粗大,奥氏体晶粒尺寸可达50μm以上,晶界处有大量的碳化铬析出,铁素体呈粗大的条状分布。力学性能测试表明,该热输入下焊接接头的抗拉强度降低至480MPa,且延伸率明显下降。

6 合理控制热输入以降低晶间腐蚀敏感性的措施

6.1 优化焊接工艺参数

根据不锈钢材料的类型和规格,通过实验和计算,选择合适的焊接电流、电压和焊接速度,以控制热输入在合理范围内。在保证焊接质量的前提下,尽量采用较小的热输入,但要避免因热输入过低而产生焊接缺陷^[3]。例如,对于304不锈钢管道,焊接电流可控制在110-140A,电压控制在14-18V,焊接速度控制在8-12cm/min,使热输入稳定在120-180J/cm之间。同时,要注意焊接层间温度的控制,层间温度过高也会增加晶间腐蚀敏感性。一般建议层间温度不超过150℃。

6.2 采用合适的焊接方法

不同的焊接方法具有不同的热输入特点。例如,钨极氩弧焊(TIG焊)具有热输入集中、焊接质量高的优点,适用于薄壁不锈钢管道的焊接。TIG焊可以通过精确控制焊接电流和焊接速度,实现对热输入的精确调节。对于外径小于50mm、壁厚小于3mm的304不锈钢管道,采用TIG焊可以获得良好的焊接质量。熔化极气体保护焊(MIG/MAG焊)则具有焊接效率高、热输入相对较大的特点,适用于中厚壁不锈钢管道的焊接。在使用MIG/MAG焊时,可以通过调整焊接参数和保护气体成分来控制热输入和焊接质量。例如,采用脉冲MIG焊可以在保证焊接效率的同时,降低热输入,减少晶间腐蚀敏感性。

6.3 焊后热处理

对于一些对晶间腐蚀敏感性要求较高的不锈钢管道,可以采用焊后热处理的方法来降低晶间腐蚀敏感性。焊后热处理可以使碳化铬重新溶解到奥氏体中,消除晶界附近的贫铬区,从而提高焊接接头的抗晶间腐蚀性能。常用的焊后热处理方法有固溶处理和稳定化处

理。固溶处理是将焊接接头加热到一定温度（一般为1050-1150℃），保温一定时间后快速冷却，使碳化铬充分溶解。保温时间根据管道的壁厚和尺寸确定，一般为每25mm壁厚保温1h。稳定化处理则是在固溶处理的基础上，再进行一次较低温度（一般为850-900℃）的保温处理，使钛、铌等稳定化元素与碳形成稳定的碳化物，从而减少碳化铬在晶界处的析出。稳定化处理的保温时间一般为2-4h。

6.4 选用合适的焊接材料

焊接材料的化学成分对焊接接头的晶间腐蚀敏感性也有重要影响。在选择焊接材料时，应尽量选用与母材化学成分相近的焊接材料，以保证焊接接头的性能与母材相匹配。例如，焊接304不锈钢时，可选用ER308或ER308L焊丝；焊接316L不锈钢时，可选用ER316L焊丝。此外，还可以选用含有稳定化元素（如钛、铌）的焊接材料，这些元素可以优先与碳结合，形成稳定的碳化物，从而减少碳化铬在晶界处的析出，降低晶间腐蚀敏感性^[4]。例如，含有钛的ER321焊丝和含有铌的ER347焊丝，在焊接对晶间腐蚀敏感性要求较高的不锈钢管道时具有较好的效果。

6.5 加强焊接过程控制

在焊接过程中，要严格按照焊接工艺规程进行操作，确保焊接参数的稳定性和准确性。采用自动化焊接设备可以提高焊接参数的控制精度，减少人为因素的影响。同时，要加强对焊接环境的控制，避免在潮湿、有风等恶劣环境下进行焊接，以减少焊接缺陷的产生。例如，在潮湿环境下焊接时，空气中的水分会在电弧作用下分解成氢和氧，氢容易进入焊缝金属中，产生氢致裂纹。因此，在焊接现场应采取防潮措施，如使用除湿

机、搭建防雨棚等。此外，还要对焊接接头进行严格的检验和检测，及时发现和处理晶间腐蚀等质量问题。常用的检验方法包括外观检查、无损检测（如射线检测、超声检测）以及晶间腐蚀试验等。

结语

热输入显著影响不锈钢管道焊接接头的晶间腐蚀敏感性。它通过改变焊接温度、冷却速度及组织变化，影响晶界碳化铬析出与贫铬区形成，进而决定材料抗蚀性能。研究表明，过高或过低热输入均会提高腐蚀敏感性，而适中热输入可有效降低风险，提升接头质量。为控制晶间腐蚀，应优化焊接参数、选择合适工艺与材料、加强过程控制并进行焊后热处理。未来还需深入研究热输入与其他因素的交互作用，结合新材料新工艺，不断提升不锈钢管道焊接质量，满足工程应用对安全性和耐久性的更高要求。

参考文献

- [1]韩晓辉,杨志斌,张志毅,等.热输入对不锈钢激光搭接焊接头晶间腐蚀敏感性的影响[J].焊接学报,2019,40(04):148-153+167.
- [2]夏高令,杨银辉,李赵中.热输入对22%Cr超低Ni双相不锈钢焊接热影响区组织和耐蚀性的影响[J].材料热处理学报,2023,44(08):202-210.
- [3]周新宇,胡志华,栾道成,等.焊接热输入对0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢电弧焊接头组织与性能的影响[J].机械工程材料,2024,48(09):38-43.
- [4]熊金业,徐望辉,余陈,等.热输入对铝合金/不锈钢双丝冷金属过渡熔钎焊接头组织及性能的影响[J].机械工程材料,2023,47(01):42-47.