

焊接工艺对LNG储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响

凌月关 童盼龙

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

摘要: 文章围绕焊接工艺对LNG储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响展开研究。介绍了高锰钢特性、焊接工艺原理及接头组织演变。通过观察与分析,探讨焊接工艺参数、方法及材料对接头组织的影响,以及组织变化对硬度、拉伸、弯曲和低温冲击韧性等性能的作用。还阐述了焊接工艺对组织的影响机制、组织对性能的影响规律,并提出优化策略,旨在提高焊接接头质量,推动LNG储罐制造技术发展。

关键词: LNG储罐;高锰钢;焊接工艺;焊接接头组织;性能影响

1 高锰钢及焊接工艺基础理论

1.1 高锰钢的特性

高锰钢是一种具有良好的低温性能的合金钢,其通常含有较高的锰含量(一般在22.5%-25.5%)以及适量的碳(0.35%-0.55%)。这种特殊的化学成分赋予了高锰钢一系列优异的低温性能。在力学性能方面,高锰钢具有极高的韧性。在承受强烈的冲击载荷时,其表面会发生加工硬化现象。当受到外力冲击时,高锰钢内部的位错密度急剧增加,位错之间相互纠缠、塞积,导致材料的硬度迅速提高,而心部仍保持良好的韧性。这种特性使得高锰钢在承受重载、冲击和磨损的工况下表现出色,例如在矿山破碎机锤头、铁路道岔等部件中得到广泛应用。从微观组织来看,高锰钢在常温下通常为单一的奥氏体组织^[1]。奥氏体具有面心立方晶格结构,这种结构具有较多的滑移系,使得高锰钢具有良好的塑性变形能力。同时奥氏体组织中的碳和锰原子以固溶的形式存在,固溶强化作用也在一定程度上提高了高锰钢的强度。高锰钢还具有良好的耐腐蚀性能,在一些腐蚀性介质中,高锰钢表面会形成一层致密的氧化膜,这层氧化膜能够阻止腐蚀介质进一步侵蚀基体金属,从而延长材料的使用寿命。

1.2 焊接工艺原理

焊接工艺是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使焊件达到原子结合的一种加工方法。其基本原理在于利用热源将焊件待焊部位的金属加热至熔化状态,在熔池冷却凝固的过程中,通过金属原子间的扩散、结晶等过程实现焊件的连接。常见的焊接热源有电弧、激光、电子束等,以电弧焊为例,电弧是在电极与焊件之间产生的强烈而持久的放电现象。电弧

产生的高温(可达3000℃以上)能够迅速将焊件局部金属熔化,形成熔池。在焊接过程中,熔池中的金属会发生一系列的物理和化学变化,如熔化、流动、混合等。为了保证焊接质量,还需要控制焊接电流、电压、焊接速度等工艺参数。焊接电流的大小直接影响熔深和熔宽,电流过大可能导致焊件烧穿,电流过小则可能使焊缝未焊透;电压主要影响电弧的长度和稳定性,合适的电压能够保证电弧稳定燃烧;焊接速度决定了热输入量,速度过快会导致焊缝冷却速度过快,容易产生裂纹等缺陷,速度过慢则会使热影响区变宽,影响焊件的性能。

1.3 焊接接头组织演变

焊接接头由焊缝区、热影响区和母材区组成。在焊接过程中,各区域的组织会发生不同的演变。焊缝区是填充金属和部分母材熔化后凝固形成的区域,在凝固过程中,焊缝金属会经历结晶过程。由于焊接是一个快速冷却的过程,焊缝金属的结晶往往是非平衡结晶。在结晶初期,先结晶的金属含高熔点杂质较少,后结晶的金属会将杂质推向晶界,导致晶界处成分偏析。焊缝区的组织形态取决于焊接材料和焊接工艺。热影响区是焊件在焊接热循环作用下,组织和性能发生变化的区域。根据距焊缝距离的不同,热影响区可分为过热区、正火区和部分相变区。过热区紧邻焊缝,加热温度在固相线以上至1100℃左右,此区域金属处于过热状态,奥氏体晶粒急剧长大,冷却后得到粗大的过热组织,导致该区域强度和韧性下降。正火区加热温度在Ac₃以上至固相线以下,金属在加热过程中发生重结晶,冷却后得到均匀细小的铁素体和珠光体组织,性能优于母材。部分相变区加热温度在Ac₁-Ac₃之间,只有部分组织发生相变,组织不均匀,性能也有所变化。

2 焊接工艺对 LNG 储罐用高锰钢焊接接头组织的影响

2.1 焊接坡口加工

考虑到火焰切割属燃烧过程、会导致大量的锰蒸汽,存在较大的职业健康风险,试验件采用等离子切割+修磨见光坡口面、机械刨边坡口面后进行焊接,两种条件下的焊接工艺性、焊接接头的使用性能无明显的差异。实际生产过程中,按照产品制造工艺流程,容器环缝采用机械刨边制备焊接坡口,容器纵缝、容器开孔部位采用等离子切割+修磨方式制备焊接坡口,可以保证加工边缘的材料性能满足焊接工艺要求。

2.2 焊接工艺适应性

焊接工艺参数对焊接接头组织变化起着关键作用。焊接热输入是影响组织变化的重要因素之一。热输入过大时,热影响区的过热区范围扩大,晶粒粗化严重,导致接头强度和韧性下降。当焊接电流过大、焊接速度过慢时,热输入增加,热影响区过热区晶粒尺寸可能从正常情况下的几十微米增大到几百微米,晶界的弱化使得接头在受力时容易发生沿晶断裂。焊接方法的不同也会导致组织变化的差异。例如,采TIG焊时,由于热输入集中且冷却速度快,焊缝区和热影响区的组织相对细小,过热区范围较小;而采用传统的电弧焊时,热输入相对分散,热影响区较宽,组织变化更为明显。另外,焊接材料的选择也会影响接头组织。如果焊接材料的成分与母材不匹配,可能会导致焊缝区出现脆性相或未熔合等缺陷,从而影响接头的整体性能。

通过一系列的高锰低温钢的焊接工艺试验,在焊接工艺性方面,钢材的可焊性良好,焊接热影响区未出现裂纹或组织恶化、性能严重下降的情况;冶金可焊性与钢材和焊材、工艺方式有关,焊条电弧焊(SMAW)的操作位置影响明显,平焊位置尚可,其他焊接位置易出现气孔;SAW、GTAW的冶金焊接性良好;药芯焊丝气保焊(FCAW)焊接过程的气孔、飞溅严重,需改善焊材的工艺性,参照最新的承压设备标准,本次工艺评定试验将FCAW工艺暂时排除在外。

3 焊接工艺对 LNG 储罐用高锰钢焊接接头性能的影响

3.1 硬度分布

焊接接头的硬度分布是反映其性能的关键指标之一,对评估接头质量和使用可靠性至关重要。在焊缝区,由于焊接时快速冷却的作用,合金元素可能来不及均匀扩散而发生偏析,这使得焊缝区的硬度往往高于母材。例如,在一些特定的高锰钢焊接接头中,焊缝区的硬度值可能达到300-350HV,而母材的硬度通常在200-250HV范围内。热影响区的硬度分布则表现出明显的

不均匀性。过热区因高温导致晶粒急剧粗大,其硬度可能会有所降低;正火区由于经历了重结晶过程,组织均匀细小,硬度可能略高于母材;部分相变区组织变化不彻底,硬度则介于过热区和正火区之间。这种硬度的不均匀分布,在接头受力时极易引发应力集中现象,进而严重影响接头的整体性能。

3.2 拉伸性能

拉伸性能是衡量焊接接头承载能力的重要指标,直接关系到LNG储罐在运行过程中的安全性。在拉伸试验中,焊接接头的抗拉强度和伸长率是衡量其性能优劣的关键参数。通常情况下,若焊接工艺选用合理,焊接接头的抗拉强度能够达到母材的90%以上,满足工程使用要求。然而,若焊接过程中出现诸如气孔、夹渣或未熔合等缺陷,接头的抗拉强度会显著下降。例如,某LNG储罐用高锰钢焊接接头在无缺陷时,抗拉强度可达800MPa以上,但一旦出现气孔缺陷,抗拉强度可能大幅降至600MPa以下,严重影响接头的承载能力。伸长率方面,合理的焊接工艺能够保证接头具有一定的塑性,其伸长率一般能达到母材的80%左右,使接头在受力时能够发生一定的塑性变形而不立即断裂^[3]。

我们对焊接接头做抗拉强度测试时,其值800-860MPa,焊缝金属的测试值 R_p :405-530MPa、 R_m :810-870MPa,符合标准要求 ≥ 800 MPa的规定。

3.3 弯曲性能

弯曲性能反映了焊接接头在受力弯曲时的变形能力,是评估接头在复杂应力状态下性能的重要指标。在弯曲试验中,如果接头内部存在缺陷或组织不均匀,可能会导致接头在弯曲过程中出现裂纹或断裂,从而影响储罐的整体结构安全。良好的焊接工艺可以使接头在规定的弯曲角度下不出现裂纹,确保储罐在制造、运输及使用过程中能够承受一定的弯曲变形。按照标准的180°角度下,合格的焊接接头弯曲后表面应无肉眼可见裂纹,且弯曲后的试样仍能保持一定的完整性,这表明接头具有良好的弯曲性能,能够适应储罐在制造、运输及使用过程中可能遇到的弯曲应力。如果焊接工艺不当,如热输入过大导致热影响区软化,接头在弯曲时可能会在热影响区出现裂纹,降低储罐的可靠性。

我们采取横向弯曲试验进行评价时,部分试样在受拉面焊缝中心出现明显的缩颈或开裂,特别是大热输入的SAW工艺条件下更明显。从弯曲试样的变形情况、开裂特征分析,开裂部位均在受拉面的焊缝中心,此部位的应变率远大于弯曲试验区域的平均应变率。试样的弯曲型面可以明显的看到变形的不均匀性,横向弯曲试样

的中间部位有明显的突变、纵向弯曲试验的弯曲面连续均匀。分析认为,是由于焊接热影响区及母材的实际屈服强度远大于焊缝,导致测试区域的变形不连续,弯曲过程中的材料应变集中在焊缝区域发生。

3.4 低温冲击韧性

对于LNG储罐用高锰钢焊接接头,低温冲击韧性尤为重要,因为LNG储罐通常在-165℃左右的低温环境下运行,接头需具备在低温下抵抗冲击载荷的能力。低温冲击韧性通过低温冲击试验评估,合格的焊接接头应具有较高的冲击吸收功。为了更多的韧性储备,我们做了-196℃的低温下的接头冲击试验,其三种焊接方法的冲击吸收功基本都能超过50J,远高于标准值的27J,这表明接头在低温下仍能保持较好的韧性。

4 焊接工艺与组织性能关系探讨

4.1 焊接工艺对组织的影响机制

焊接工艺通过影响焊接热循环来改变焊接接头的组织。焊接热输入是关键因素之一。热输入过大会导致热影响区过热,晶粒粗化,甚至出现魏氏组织等不良组织。甚至,当焊接热输入超过一定值时,热影响区的晶粒尺寸可能从正常的几十微米增大到几百微米,从而降低接头的强度和韧性。热输入过小则可能导致焊缝未熔合或气孔等缺陷。焊接速度也会影响组织,焊接速度过快时,熔池冷却速度加快,可能导致焊缝区出现淬硬组织,增加裂纹倾向;焊接速度过慢则会使热影响区范围扩大,组织变化更复杂。另外,焊接方法的选择也会对组织产生影响。例如,激光焊接具有热输入小、冷却速度快的特点,可以得到细小的焊缝组织;而电弧焊的热输入相对较大,组织变化更为明显。

4.2 组织对性能的影响规律

焊接接头的组织直接决定了其性能。细小的等轴晶组织通常具有良好的强度和韧性,而粗大的晶粒或不良组织(如魏氏组织、马氏体组织等)会降低接头的性能。例如,在拉伸试验中,具有细小等轴晶组织的接头抗拉强度和伸长率较高;而存在魏氏组织的接头,其抗拉强度可能降低20%-30%,伸长率也会大幅下降。在低温冲击韧性方面,组织中的脆性相(如碳化物、马氏体等)会显著降低接头的冲击韧性。例如,当焊缝区碳化

物含量过高时,接头在低温下的冲击吸收功可能从合格值(如27J)降至不合格值(如10J以下)。

4.3 焊接工艺优化策略

为了优化焊接工艺,提高LNG储罐用高锰钢焊接接头的组织性能,我们采取以下策略:(1)控制热输入:通过调整焊接电流、电压和焊接速度,将热输入控制在合理范围内。对于LNG储罐用高锰钢,可将热输入控制在15-25kJ/cm之间,以达到最佳的焊缝性能。(2)选择合适的焊接方法:根据储罐的厚度和结构特点,选择合适的焊接方法。对于纵、环缝,采用SAW焊接;(3)优化焊接材料:选择与母材匹配的焊接材料,确保焊缝金属的化学成分和组织性能与母材相近。开发适用于高锰钢的焊接材料,减少裂纹倾向^[4]。通过以上焊接工艺优化策略,可以有效改善LNG储罐用高锰钢焊接接头的组织性能,提高储罐的安全性和可靠性,为LNG储罐的安全运行提供保障。

结束语

综上所述,焊接工艺在LNG储罐用高锰钢焊接中起着决定性作用,深刻影响着焊接接头的组织与性能。通过系统研究,明确焊接工艺与组织性能之间的紧密联系,并提出了针对性的优化策略。这些策略的实施将有助于提升焊接接头的质量,增强LNG储罐的安全性和可靠性。未来,随着技术的不断进步,将继续深入研究,为LNG储罐制造领域提供更优质、更高效的焊接解决方案。

参考文献

- [1]牛董山钰,李波,信国松,等.LNG储罐用高锰钢焊接研究现状及展望[J].电焊机.2025,55(3).DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.04
- [2]冯伟,于庭祥,陈波,等.LNG储罐用低温高锰钢埋弧焊材料组织和性能研究[J].压力容器.2023,40(5).DOI:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.05.001.
- [3]李冬毓,王嘉睿,孙万田.LNG储罐用钢06Ni9DR焊接接头弯曲试验断裂失效分析[J].压力容器.2023,40(8).DOI:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.08.010.
- [4]郭广飞,章小浒,任明皓,等.焊接工艺对LNG储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响[J].压力容器,2024,41(5):29-35.DOI:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.05.004.