

海洋工程用高强钢焊接接头在腐蚀环境下的应力腐蚀开裂行为研究

谷天帅

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

摘 要: 本文聚焦海洋工程用高强钢焊接接头在腐蚀环境下的应力腐蚀开裂行为。阐述了应力腐蚀开裂概述、高强钢焊接接头应力腐蚀开裂机理,分析了海水、含硫化氢、模拟海洋大气等不同腐蚀环境下高强钢焊接接头的应力腐蚀开裂行为。针对此,提出材料选择与改进、焊接工艺优化、防护涂层应用、阴极保护技术、环境监测与维护等防护措施,旨在为预防和控制高强钢焊接接头应力腐蚀开裂提供理论依据和实践指导,保障海洋工程结构的安全与可靠运行。

关键词: 海洋工程; 高强钢焊接接头; 腐蚀环境; 应力腐蚀开裂

引言

近年来,海洋工程领域发展迅猛,高强钢焊接接头在各类海洋结构中大量使用。但海洋环境复杂,腐蚀因素众多,高强钢焊接接头的性能与安全面临严峻挑战。应力腐蚀开裂具有突发性,危害极大,常引发安全事故,带来惨重损失。因此深入探究海洋工程用高强钢焊接接头在腐蚀环境下的应力腐蚀开裂行为,并探寻行之有效的防护措施,是保障海洋工程结构安全可靠的关键,亟待解决。

1 应力腐蚀开裂概述

应力腐蚀开裂(SCC)是一种极具破坏性的失效形式,它是指敏感材料在拉应力与特定腐蚀环境的协同作用下,产生裂纹萌生和扩展的现象。这种开裂往往在无明显预兆的情况下突然发生,极易引发严重的安全事故,造成巨大的经济损失^[1]。化工设备中的管道、海洋工程结构等一旦发生应力腐蚀开裂,可能会导致介质泄漏、结构坍塌等灾难性后果。应力腐蚀开裂的影响因素众多,主要可归结为材料、环境和应力三个方面。在材料因素方面,材料的化学成分、组织结构和力学性能等都会影响其应力腐蚀敏感性。以高强钢为例,合金元素的含量对其应力腐蚀性能有显著影响。某些合金元素的添加可能会改变材料的电化学性质,增加其在特定腐蚀介质中的反应活性,从而提高应力腐蚀敏感性。晶粒度也是一个重要因素,细小的晶粒通常能提高材料的强度和韧性,但也可能改变材料的应力分布和腐蚀行为,进而影响应力腐蚀开裂的倾向。环境因素中,腐蚀介质的种类、浓度、温度和pH值等都会影响应力腐蚀开裂的发生和发展。在海洋环境中,氯离子是主要的致裂因素。

氯离子具有很强的穿透能力,能够破坏材料表面的保护膜,引发局部腐蚀,从而加速应力腐蚀裂纹的萌生和扩展。应力因素方面,应力的类型、大小和分布都会影响开裂敏感性。拉应力是主要的致裂应力形式,当材料承受拉应力时,裂纹尖端的应力集中会加剧,促进腐蚀介质的渗透和裂纹的扩展。为了深入研究应力腐蚀开裂,研究者们采用了多种研究方法,主要分为实验方法和分析测试方法。实验方法如慢应变速率试验(SSRT)、恒载荷试验等,可以模拟不同的应力和腐蚀环境,观察材料的开裂行为。

2 高强钢焊接接头应力腐蚀开裂机理

阳极溶解机理基于电化学腐蚀原理。当高强钢焊接接头处于腐蚀介质中并承受拉应力时,材料表面会发生滑移,产生滑移台阶。这些滑移台阶会暴露出新鲜金属表面,使其成为阳极,而周围未被破坏的钝化膜则作为阴极,从而形成腐蚀电池。在腐蚀电池的作用下,阳极金属发生溶解反应,导致裂纹尖端处的金属不断被消耗。随着金属的溶解,裂纹尖端的应力集中程度加剧,这又进一步促进了裂纹的扩展。在含有氯离子的海洋环境中,氯离子会破坏焊接接头表面的钝化膜,加速阳极金属的溶解过程,使应力腐蚀开裂更容易发生。氢致开裂机理则与腐蚀过程中氢的产生和扩散有关。在腐蚀介质中,阴极反应会产生氢原子。这些氢原子会被高强钢材料吸附,并扩散到材料内部。当氢原子扩散到裂纹尖端等应力集中区域时,会降低材料原子间的结合力,使材料的脆性增加。随着氢原子在裂纹尖端的不断富集,材料在该区域的强度和韧性进一步下降,最终导致裂纹的萌生和扩展。在含硫化氢的油气田环境中,硫化氢的

阴极反应会产生大量的氢原子，增加氢致开裂的风险。在实际的应力腐蚀开裂过程中，阳极溶解机理和氢致开裂机理的作用程度会受到腐蚀环境和应力状态的影响。在某些情况下，阳极溶解机理可能起主导作用；而在另一些情况下，氢致开裂机理可能更为显著。

3 不同腐蚀环境下高强钢焊接接头应力腐蚀开裂行为

3.1 海水环境

海水是一种极具腐蚀性的介质，富含氯离子、硫酸根离子等多种成分。氯离子对高强钢焊接接头应力腐蚀开裂的影响尤为突出。高强钢焊接接头表面通常会自然形成一层钝化膜，这层膜能有效阻止腐蚀介质与基体的直接接触。氯离子具有极强的穿透能力，能够吸附在钝化膜表面，并与膜中的金属离子发生化学反应，破坏钝化膜的结构，使其局部变薄甚至出现破损，进而引发局部腐蚀。这种局部腐蚀会在焊接接头表面形成腐蚀坑，在应力作用下，腐蚀坑底部会产生应力集中，加速裂纹的萌生和扩展。海水温度、流速和溶解氧含量等因素也会显著影响应力腐蚀开裂的敏感性。温度升高会加快化学反应速率，包括腐蚀反应和裂纹扩展速率。在热带海域，海水温度常年较高，高强钢焊接接头在海水中的应力腐蚀开裂风险显著增加。一些在热带海域服役的海洋平台结构，其高强钢焊接接头在较短时间内就出现了应力腐蚀开裂现象，导致结构强度下降，使用寿命缩短^[2]。海水流速会影响腐蚀产物的沉积和扩散。流速较低时，腐蚀产物容易在焊接接头表面沉积，形成腐蚀产物层，这层产物可能会阻碍氧气的扩散，导致局部缺氧环境，改变腐蚀类型和速率；流速较高时，海水对焊接接头的冲刷作用增强，会加速腐蚀介质的更新，使更多的氯离子等腐蚀性离子接触到焊接接头表面，同时冲刷作用还可能破坏焊接接头表面的保护膜，增加应力腐蚀开裂的可能性。

3.2 含硫化氢环境

在海洋石油和天然气开采过程中，高强钢焊接接头不可避免地会接触到含硫化氢介质。硫化氢是一种强腐蚀性气体，它导致高强钢焊接接头应力腐蚀开裂的主要机理是氢致开裂。当焊接接头暴露在含硫化氢环境中时，硫化氢会在焊接接头表面发生电化学反应，产生氢原子。这些氢原子具有很强的渗透能力，能够扩散到焊接接头内部。在应力的作用下，氢原子会在裂纹尖端等应力集中区域富集，降低金属原子间的结合力，使金属的脆性增加，从而导致裂纹的萌生和扩展。开裂行为与硫化氢浓度、温度和pH值密切相关。硫化氢浓度较高时，焊接接头表面发生的电化学反应更加剧烈，产生的

氢原子数量增多，氢致开裂的风险也随之增加，焊接接头容易发生脆性断裂。在深海油气田开发中，由于硫化氢浓度较高，高强钢焊接接头在短时间内就可能出现脆性断裂，给油气开采带来巨大的安全隐患和经济损失。温度升高会加快硫化氢的电化学反应速率，增加氢原子的产生和扩散速度，加速裂纹的萌生和扩展。温度变化还可能改变金属的微观组织结构，影响其力学性能和抗应力腐蚀开裂能力。pH值的变化会影响硫化氢的电化学腐蚀过程，在酸性环境下，硫化氢的电化学反应更容易进行，应力腐蚀开裂的敏感性增加。

3.3 模拟海洋大气环境

海洋大气中含有大量的盐分和湿气，在高强钢焊接接头表面会形成一层薄液膜，从而引发电化学腐蚀。温度、湿度和盐分浓度等因素会影响开裂行为。高温高湿和盐分浓度高时，应力腐蚀开裂的敏感性增加。在沿海地区的海洋工程设施中，模拟海洋大气环境下的应力腐蚀开裂问题不容忽视。一些沿海的码头设施、灯塔等，其高强钢焊接接头在长期暴露于模拟海洋大气环境中后，会出现不同程度的应力腐蚀开裂现象，影响设施的正常使用和安全性。

4 高强钢焊接接头应力腐蚀开裂的防护措施

4.1 材料选择与改进

材料自身的性能是影响应力腐蚀开裂的关键因素之一。在材料选择上，应优先选用具有良好抗应力腐蚀性能的高强钢材料。这类材料通常经过特殊设计和处理，在化学成分和微观组织结构上具备更优的耐腐蚀特性。合理调整合金成分是提升材料抗应力腐蚀性能的重要手段。添加适量的铬元素，铬能在材料表面形成一层致密的氧化铬保护膜，有效阻止腐蚀介质的侵入，显著提高材料的耐腐蚀性。镍元素的添加也有类似作用，它不仅增强材料的耐腐蚀性，还能改善材料的韧性和低温性能。钼、铜等元素的合理配比，也能进一步提升材料在不同腐蚀环境下的抗应力腐蚀能力。通过热处理工艺优化材料的组织结构同样至关重要。不同的热处理方式可以改变材料的晶粒大小、相组成和残余应力分布。适当的退火处理可以细化晶粒，减少晶界处的应力集中，降低应力腐蚀敏感性；调质处理则能使材料获得良好的综合力学性能，在保证强度的提高其抗应力腐蚀开裂的能力。

4.2 焊接工艺优化

焊接工艺对焊接接头的应力腐蚀开裂行为有着直接影响。采用合理的焊接工艺参数是控制焊接质量、减少残余应力的关键。在焊接方法的选择上，应根据具体

的工程需求和材料特性进行综合考虑。对于薄板焊接,气体保护焊具有焊接速度快、热输入小、焊缝质量好等优点;而对于厚板焊接,埋弧焊则能提供更大的熔深和较高的焊接效率。焊接速度和焊接电流的控制也至关重要。焊接速度过快可能导致焊缝未熔合、夹渣等缺陷;焊接速度过慢则会使热输入过大,引起焊接接头过热、过烧,导致晶粒粗大,增加应力腐蚀敏感性。焊接电流的大小直接影响焊缝的熔深和宽度,过大的电流会使焊缝金属过热,产生裂纹倾向;过小的电流则可能导致焊缝成形不良^[3]。因此需要根据材料的厚度、焊接位置等因素,精确控制焊接速度和焊接电流,确保焊接接头的质量。焊后热处理是消除焊接残余应力、提高焊接接头抗应力腐蚀性能的有效方法。通过加热和保温过程,使焊接接头内部的残余应力得到释放和重新分布,降低应力集中程度。

4.3 防护涂层应用

在焊接接头表面涂覆防护涂层是一种简单而有效的防护措施,其作用是隔绝腐蚀介质与基体的接触,从而防止应力腐蚀开裂的发生。环氧涂层具有良好的附着力、耐化学腐蚀性和绝缘性能,能够有效阻挡海水、氯离子等腐蚀介质的侵蚀。它施工方便,可根据不同的使用要求调整涂层的厚度和性能。聚氨酯涂层则具有优异的耐磨性、耐候性和装饰性,适用于一些对表面外观有较高要求的场合。金属涂层如热喷涂锌、铝等,能在焊接接头表面形成一层致密的金属保护层,不仅具有良好的耐腐蚀性,还能提供一定的阴极保护作用。为确保涂层的长期有效防护效果,涂层应具备良好的附着力、耐腐蚀性和耐磨性。在涂覆过程中,需要严格控制表面处理、涂层厚度和涂覆工艺等参数,以保证涂层的质量。定期对涂层进行检查和维护,及时修复破损的涂层,防止腐蚀介质渗入。

4.4 阴极保护技术

阴极保护技术是通过使焊接接头成为阴极,抑制阳极反应,从而防止应力腐蚀开裂的一种电化学保护方法。牺牲阳极阴极保护是利用比被保护金属电位更负的金属或合金作为阳极,与被保护的焊接接头形成原电池,阳极不断溶解,为焊接接头提供电子,使其电位降低,从而抑制腐蚀反应的发生。这种方法适用于小型结构或局部保护,如海洋平台的小型构件、船舶的局部区域等。常用的牺牲阳极材料有锌、铝、镁及其合金。外

加电流阴极保护则是通过外部直流电源向被保护的焊接接头提供阴极电流,使其电位低于腐蚀电位,达到保护的目。这种方法适用于大型结构或长距离管道的保护,如海底管道、大型海洋平台等。外加电流阴极保护系统需要合理设计阳极地床、电源设备和监控系统,以确保保护效果的稳定和可靠。

4.5 环境监测与维护

建立完善的海洋工程环境监测系统是及时发现和应对应力腐蚀开裂风险的重要手段。该系统应能够实时监测腐蚀环境的参数,如海水温度、盐度、氯离子浓度、硫化氢含量等。通过对这些参数的监测和分析,可以了解腐蚀环境的变化趋势,评估焊接接头的应力腐蚀风险。根据监测结果,及时采取相应的防护措施^[4]。当监测到海水中的氯离子浓度升高时,可以增加防护涂层的检查和维护频率,或者调整阴极保护系统的参数,以确保焊接接头得到有效的保护。定期对海洋工程结构进行检查和维护也是必不可少的。检查内容包括焊接接头的外观质量、涂层的完整性、阴极保护系统的运行状况等。一旦发现裂纹等缺陷,应及时进行修复,防止缺陷的进一步扩展。建立完善的维护档案,记录结构的检查和维护情况,为后续的管理和决策提供依据。

结语

海洋工程用高强钢焊接接头在腐蚀环境中的应力腐蚀开裂行为受多因素交织影响,不同腐蚀环境下的开裂表现各异。当前采取的材料优化、工艺改进、涂层防护、阴极保护及环境监测等措施,能有效应对该问题。但未来仍需深化开裂机理研究,积极开发新型防护材料与技术,强化环境监测预警体系,以此全方位保障海洋工程结构安全,助力海洋工程领域持续稳健发展。

参考文献

- [1]李洋.船用钢焊接接头在模拟海洋环境下的应力腐蚀行为研究[D].江苏:江苏科技大学,2023.33-34.
- [2]张丽萍,苟毅,罗晓东,等.海洋环境下E690低合金高强钢MAG焊接接头热影响区耐腐蚀性能研究[J].电焊机,2024,54(10):77-85.
- [3]彭文山,李金泽,胡娜,等.深海静水压力对高强钢焊接接头腐蚀影响研究[J].装备环境工程,2024,21(10):118-126.
- [4]彭慧文.9Ni钢典型焊接接头在模拟海水中的腐蚀行为与机理研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2024.44-45.