

S32707钢管在油气管道的应用前景

马秀清, 姬茹一, 吴学纲, 生金峰, 王康帅, 魏 星

机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司, 上海

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年6月9日

摘 要

随着全球能源需求的持续增长, 油气资源的高效、安全输送成为能源领域的关键环节。管道作为油气输送的主要方式, 对管材的性能提出了极高要求。S32707钢管作为一种高性能双相不锈钢, 凭借其出色的综合性能, 在油气管道领域展现出广阔的应用前景。

关键词

管道, 油气输送, S32707钢管, 应用前景

Application Prospect of S32707 Steel Pipe in Oil and Gas Pipelines

Xiuqing Ma, Ruyi Ji, Xuegang Wu, Jinfeng Sheng, Kangshuai Wang, Xing Wei

Machinery Industry Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Testing Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 18th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: Jun. 9th, 2025

Abstract

As the global energy demand continues to grow, the efficient and safe transportation of oil and gas resources has become a key link in the energy field. As the main mode of oil and gas transportation, pipelines put forward extremely high requirements for the performance of pipes. As a high-performance duplex stainless steel, S32707 steel pipe shows a broad application prospect in the field of oil and gas pipelines with its excellent comprehensive properties.

Keywords

Pipeline, Oil and Gas Transportation, S32707 Steel Pipe, Application Prospect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油气输送管道是我国能源产业脉络的主要组成部分，它的安全性能直接关系到我国的经济发展和国家能源安全。传统的输送管道材料使用的是管线钢，面对高温、高压、自然灾害等苛刻条件环境时，易出现事故、寿命周期短的局限性。S32707 钢管的出现，凭借其优异的耐腐蚀性、高强度、耐磨性等性能，为油气管道提供了一种可靠、高效的解决方案[1]-[5]。

2. S32707 钢管在油气管道应用中的优势

2.1. 卓越的耐腐蚀性能

油气输送的环境比较复杂，输送介质中的各类化学物质如硫化氢、二氧化碳以及高浓度的氯化物等，都对管道构成非常严峻的腐蚀挑战。S32707 材质钢管的化学成分非常独特，使其具有超高的耐腐蚀性能。其铬元素含量在 26.0%~29.0%，镍元素含量在 5.5%~9.5%，钼元素含量处于 4.0%~5.0%，氮含量为 0.30%~0.50%。在这些元素的协同作用下，材料的表面形成了一层致密且稳定的钝化膜，能够有效阻止腐蚀介质与钢管的接触。

在含氯环境中，S32707 钢管展现出卓越的应力腐蚀开裂(SCC)抗耐性，能够有效避免因应力和腐蚀共同作用而导致的管道破裂问题。在酸性环境里，它对一般腐蚀也具有出色的抗耐性，确保在输送含酸油气时，管道不会因腐蚀而快速损坏。而且，面对冲刷腐蚀和腐蚀疲劳，S32707 钢管同样表现优异，在油气高速流动以及长期交变载荷的工况下，依然能够保持良好的性能，极大地延长了管道的使用寿命，降低了管道腐蚀所导致的维修成本。

2.2. 高强度与良好的机械性能

油气管道在运行过程中，不仅要承受内部油气的压力，还要应对外部地质条件变化等带来的各种应力。S32707 钢管具有优良的机械性能，拥有高强度、优异的韧性和塑性。其屈服强度可达 700 MPa，抗拉强度不低于 920 MPa，是普通奥氏体不锈钢的两倍左右。同时，良好的延伸率(通常 $\geq 25\%$)，使其在受到一定程度的拉伸变形时，不会轻易出现脆裂现象，在地质条件复杂、可能存在地面沉降或位移的区域，这种特性可以让管道更好地适应环境变化，保证管道的完整性和油气输送的连续性。

此外，S32707 钢管的高强度使其能够承受更高的内部压力，适用于高压油气输送场景，降低过高压导致管道破裂的风险，提高油气输送的安全性和效率。

2.3. 良好的加工性能和焊接性能

在油气管道的建设施工过程中，管道的加工和焊接是重要环节。S32707 钢管具备良好的加工性能，可供应为线材、锻件、板材、圆钢等多种形式，方便根据不同的工程需求进行加工成型。无论是弯曲、切割还是钻孔等加工操作，都能顺利进行，这为管道的安装和铺设提供了便利。

在管道连接时，焊接质量是管道系统的密封性和整体强度的关键因素。S32707 钢管可以采用常规的焊接方法进行焊接，焊接接头具有良好的强度和耐腐蚀性，与管道本体性能匹配度高，有效保证焊接部位的可靠性，降低因焊接质量问题导致的泄漏风险，提高工程的施工效率和质量[6] [7]。

2.4. 适应复杂的应用场景

油气管道的铺设环境多样,包括陆地、海洋、沙漠等不同地理区域。S32707 钢管凭借其综合性能优势,能够适应各种复杂的应用场景。在海洋油气开采中,它能够承受海水的强腐蚀以及海洋环境中的高压、低温等恶劣条件,为海底油气管道的安全运行提供可靠保障。在沙漠地区,面对高温、风沙以及土壤中可能存在的腐蚀性物质,S32707 钢管也能稳定工作,确保油气的顺利输送。

3. S32707 钢管拓展应用空间

3.1. 深海油气开发

目前,深海油气开发已成为全球能源发展的主要方向。深海环境具有高压、低温、强腐蚀等特点,因此对管道材料的要求极为苛刻,而 S32707 钢管的优异特性使其成为深海油气管道的理想选材。在深海油气输送中,S32707 钢管能够承受巨大的水压,抵御海水的腐蚀,确保油气的安全输送。目前,一些深海油气田已开始采用 S32707 钢管作为海底输油管道,未来随着深海油气开发的不断深入,其应用前景将更加广阔[8]-[10]。

3.2. 高含硫油气田开采

高含硫油气田的油气中含有大量的硫化氢等腐蚀性气体,对管道材料的耐腐蚀性要求极高。S32707 钢管凭借其出色的抗硫化氢腐蚀性能,在高含硫油气田开采中具有明显优势。使用 S32707 钢管作为输送管道,能够有效降低管道腐蚀风险,保障高含硫油气的安全开采和输送[11]。

3.3. 老旧油气管道改造

全球范围内存在大量服役多年的老旧油气管道,这些管道因长期受到腐蚀、磨损等因素影响,存在安全隐患,需要进行改造或更换。S32707 钢管的高性能特点使其成为老旧油气管道改造的优质选择。采用 S32707 钢管替换原有的管材,能够显著提升管道的性能和安全性,延长管道使用寿命,减少管道泄漏等事故的发生。在老旧油气管道改造市场,S32707 钢管具有较大的应用潜力。

4. S32707 钢管在油气管道应用面临的难点

随着油气开采环境日益复杂,对管道性能的要求不断提高,S32707 钢管在实际应用中也面临着诸多挑战。

4.1. 焊接工艺难点

4.1.1. 热影响区性能变化

焊接是油气管道建设中不可或缺的环节,但是 S32707 钢管在焊接过程中会对钢管的热影响区产生显著影响。在焊接热循环的作用下,热影响区的组织结构发生变化,奥氏体和铁素体组织的比例偏离母材的平衡状态,导致热影响区的力学性能和耐腐蚀性下降。例如,热影响区的硬度可能会增加,韧性降低,从而使该区域更容易发生脆性断裂和腐蚀。

为了减少热影响区组织结构变化的不利影响,严格控制焊接工艺参数,如焊接电压、电流及焊接速度等。同时,配以适合的焊接材料和预热、后热工艺。然而,在实际工程中,由于焊接条件的复杂性和多样性,要实现对热影响区性能的有效控制并非易事。

4.1.2. 焊接裂纹的产生

S32707 钢管在焊接过程中易产生多种类型的裂纹,如冷裂纹、热裂纹和再热裂纹等。焊接裂纹会严

重降低管道的强度和密封性，减少管道的使用寿命。为防止焊接裂纹的产生，需要采取一系列措施，如优化焊接工艺，严格控制焊接材料中的氢含量，采用合适的焊接顺序和方法，对焊接接头进行预热和后热处理等。但是，这些措施的实施需要较高的技术水平和严格的质量控制，增加了焊接工艺的难度和成本。

一、冷裂纹

1. 产生原因

(1) 组织转变

S32707 在焊接冷却过程中，会发生奥氏体和铁素体相的转变。如果冷却速度过快，可能导致相转变不均匀，产生内应力，进而引发冷裂纹。同时，相比比例的变化也会影响材料的性能，当铁素体含量过高或过低时，都可能使材料的韧性下降，增加冷裂纹敏感性。

(2) 焊接应力

焊接过程中，由于局部加热和冷却的不均匀性，会在焊件中产生焊接应力。对于 S32707 这种高强度材料，焊接应力更容易积累，当应力超过材料的强度极限时，就可能产生冷裂纹。特别是在焊接厚板或复杂结构时，焊接应力更为显著。

(3) 氢的影响

尽管 S32707 对氢的敏感性相对较低，但在焊接过程中，如果焊接材料受潮、焊件表面有油污或铁锈等，仍可能引入氢。氢在金属中扩散聚集，会降低材料的韧性，促使冷裂纹的形成。

2. 预防措施

(1) 控制焊接工艺参数

采用合适的焊接方法，如钨极氩弧焊(TIG)或熔化极气体保护焊(MIG)，这些方法热量集中，焊接热输入容易控制。

严格控制焊接热输入。通常焊接热输入应控制在 10 kJ/cm~25 kJ/cm 之间，以保证合适的冷却速度，避免组织转变不均匀和焊接应力过大。

采用较小的焊接电流和较快的焊接速度，多层多道焊时，层间温度应控制在 100℃~150℃ 以下，防止过热和氢的聚集。

(2) 焊前预热和焊后处理

焊前预热温度一般控制在 100℃~150℃ 左右，预热可以减缓冷却速度，减少焊接应力，有利于氢的逸出。

焊后及时进行热处理，如固溶处理或消除应力退火。固溶处理温度一般在 1020℃~1100℃，保温时间根据焊件厚度确定，然后快速冷却，以保证双相组织的比例和性能。消除应力退火可以在较低温度下进行，如 600℃~700℃，保温一段时间，以消除焊接应力。

(3) 选择合适的焊接材料

选用与 S32707 相匹配的焊接材料，如 ER2594 焊丝等，保证焊缝金属的化学成分和性能与母材相近，特别是要控制好镍、钼等合金元素的含量，以维持双相组织的稳定性。

焊接材料应具有低氢特性，使用前需按照规定进行烘干处理，以减少氢的来源。

(4) 焊件清理与保护

焊前必须对焊件表面进行严格清理，去除油污、铁锈、水分等杂质，可以采用机械清理或化学清洗的方法。

焊接过程中采用有效的气体保护措施，如使用纯度较高的氩气作为保护气体，防止空气中的氢、氧等有害气体侵入焊缝，同时也能减少焊接过程中的氧化。

(5) 优化焊接结构设计

在设计焊接结构时, 应尽量避免焊缝过于集中和交叉, 减少焊接应力的集中。合理安排焊缝位置, 使焊接过程中焊件能够自由收缩, 减少约束应力。例如, 采用对称焊缝、分段退焊等工艺, 以降低焊接应力。

二、热裂纹

1. 产生原因

(1) 合金元素的影响

S32707 含有较多的合金元素, 如铬、镍、钼等。这些元素会影响焊缝金属的结晶过程和性能。当合金元素含量过高或配比不当时, 可能会导致焊缝金属的凝固温度范围变宽, 低熔点共晶物增多, 从而增加热裂纹的敏感性。例如, 镍含量过高可能会促进形成镍-硫等低熔点共晶, 在晶界处形成薄弱环节, 容易引发热裂纹。

(2) 焊接热输入

焊接过程中, 过高的热输入会使焊缝金属处于高温的时间过长, 导致晶粒长大, 晶界处的低熔点共晶物更容易被熔化, 削弱晶界的结合力, 从而增加热裂纹产生的可能性。同时, 热输入过大还会使焊接应力增大, 进一步促使热裂纹的形成。

(3) 焊接应力

焊接时, 由于焊件局部受热不均匀, 在冷却过程中会产生焊接应力。在焊缝金属凝固收缩时, 这种应力会作用于晶界等薄弱部位。如果应力超过了焊缝金属在高温下的强度, 就容易导致热裂纹的出现。特别是在焊接厚板或结构复杂的焊件时, 焊接应力更为复杂和集中, 热裂纹的倾向也更大。

(4) 焊接工艺

不合理的焊接工艺也可能导致热裂纹。例如, 焊接速度过快, 会使焊缝金属冷却速度过快, 不利于气体逸出和低熔点共晶物的均匀分布, 容易形成气孔和热裂纹。另外, 多层多道焊时, 如果层间温度过高, 会使前一层焊缝金属再次受热, 影响其组织和性能, 增加热裂纹的敏感性。

2. 预防措施

(1) 控制合金元素含量

严格控制焊接材料中的合金元素含量, 使其与母材相匹配。对于 S32707 钢, 应确保焊接材料中的铬、镍、钼等元素含量在合适的范围内, 以保证焊缝金属具有良好的抗热裂性能。对母材和焊接材料进行严格的化学成分检验, 确保其符合标准要求, 避免因合金元素偏差而导致热裂纹。

(2) 优化焊接工艺参数

合理控制焊接热输入, 采用较小的焊接电流、较快的焊接速度和适当的电弧电压。减少焊缝金属在高温下的停留时间, 防止晶粒长大和低熔点共晶物的过度熔化。

多层多道焊时, 严格控制层间温度, 一般应将层间温度控制在 $100^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 以下, 避免前一层焊缝金属过热。同时, 注意每层焊缝的厚度和宽度, 保证焊缝成形良好, 避免出现过大的余高或过宽的熔池, 以减少焊接应力和热裂纹的产生。

(3) 降低焊接应力

采用合理的焊接顺序, 如先焊收缩量大的焊缝, 后焊收缩量小的焊缝; 对于对称结构, 采用对称焊接的方法, 使焊接应力相互抵消。例如, 在焊接大型结构件时, 可采用分段退焊、跳焊等工艺, 减少焊接应力的积累。

焊前对焊件进行适当的预热, 预热温度在 $100^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 左右。预热可以降低焊件的冷却速度, 减小焊接应力, 同时也有利于氢的逸出, 降低冷裂纹的风险。

焊后及时进行消除应力处理,如采用热处理方法,将焊件加热到一定温度(如 600℃~700℃)并保温一段时间,然后缓慢冷却,以消除焊接过程中产生的残余应力。

(4) 加强焊件清理

焊前彻底清理焊件表面的油污、铁锈、水分等杂质,这些杂质在焊接过程中可能会分解产生气体,影响焊缝金属的凝固过程,增加热裂纹的敏感性。可采用机械打磨、化学清洗等方法进行清理,确保焊件表面清洁。

对焊接材料进行严格的烘干处理,去除其中的水分,以减少焊接过程中氢的来源,降低热裂纹的发生几率。

三、再热裂纹

1. 产生原因

(1) 焊接残余应力

焊接过程中会产生残余应力,在后续的再热过程中,残余应力会重新分布和释放。当局部应力超过材料在再热温度下的屈服强度时,就可能引起裂纹的萌生和扩展。特别是对于 S32707 这种高强度材料,焊接残余应力相对较大,再热裂纹的敏感性也较高。

(2) 合金元素的影响

S32707 中的合金元素如铬、钼、钒等,在再热过程中会发生碳化物的析出和聚集。这些碳化物的析出会导致晶界附近的合金元素贫化,使晶界的强度降低。同时,合金元素的存在还会影响材料的热膨胀系数和相变特性,进一步增加再热裂纹的倾向。

(3) 热影响区的组织变化

焊接热影响区的组织在再热过程中会发生变化,如晶粒长大、组织不均匀等。这些组织变化会使材料的力学性能下降,尤其是韧性降低,从而更容易在应力作用下产生裂纹。

(4) 再热温度和时间

再热温度过高或保温时间过长,会加速碳化物的析出和组织变化,增加再热裂纹的产生几率。通常,在 550℃~650℃ 范围内,再热裂纹的敏感性较高。

2. 预防措施

(1) 控制焊接残余应力

采用合理的焊接工艺,如选择合适的焊接顺序、预变形法等,减小焊接残余应力。例如,对于大型结构件,可采用分段焊接、对称焊接等方法,使焊接应力相互抵消。

焊后进行及时有效的消除应力处理,如采用热处理方法,将焊件加热到一定温度(如 600℃~700℃)并保温一段时间,然后缓慢冷却,以降低焊接残余应力。

(2) 优化合金成分和焊接材料

严格控制 S32707 母材和焊接材料中的合金元素含量,使其配比合理。例如,适当降低碳含量,增加镍、钼等元素的含量,可以提高材料的抗再热裂纹能力。

选择合适的焊接材料,如采用含铌、钛等稳定化元素的焊接材料,这些元素可以抑制碳化物的析出,提高晶界的稳定性,从而降低再热裂纹的敏感性。

(3) 控制热影响区的组织

采用合适的焊接工艺参数,控制焊接热输入,避免热影响区晶粒过度长大。例如,采用较小的焊接电流、较快的焊接速度,可使热影响区的组织更加细小均匀,提高材料的韧性和抗裂性能。

对于重要的焊接结构,可在焊后进行适当的热处理,如正火、回火等,以改善热影响区的组织,提高其力学性能。

(4) 合理控制再热工艺

优化再热温度和时间, 根据焊件的材质、厚度、结构等因素, 制定合理的再热工艺规范。避免再热温度过高或保温时间过长, 一般应将再热温度控制在 $550^{\circ}\text{C}\sim 650^{\circ}\text{C}$ 以下, 保温时间不宜过长。在再热过程中, 采用适当的加热和冷却速度, 避免温度急剧变化产生新的应力[12] [13]。

4.2. 成本与经济性难点

1. 材料成本高昂

S32707 钢管因其合金元素含量较高, 生产工艺较为复杂, 导致材料成本较高。与普通碳钢或低合金钢相比, S32707 钢管的价格可能会高出数倍甚至更多。在大规模的油气管道建设项目中, 材料成本会占据工程总成本的很大比例。因此, S32707 钢管的高材料成本会给项目带来较大的经济压力, 限制了其在一些对成本较为敏感的项目中的应用。

2. 维护成本增加

虽然 S32707 钢管具有较好的耐腐蚀性能和力学性能, 但在长期的油气输送过程中, 仍然需要进行定期的维护和检测, 以确保管道的安全运行。由于 S32707 钢管的特殊性能和应用环境, 其维护和检测的要求相对较高。

S32707 钢管出现腐蚀或损坏, 修复的难度和成本也相对较大。由于其材料特性, 修复过程需要采用特殊的焊接工艺和材料, 并且对修复质量的要求也非常严格。因此, S32707 钢管的维护成本相对较高, 这也是在其应用过程中需要考虑的一个重要经济因素。

4.3. 安装与施工难点

S32707 钢管的高强度和硬度使得其在加工过程中面临较大的困难。在进行管道的切割、弯曲、焊接等加工操作时, 需要采用特殊的设备和工艺, 以确保加工质量和精度。例如, 在切割 S32707 钢管时, 普通的切割工具可能无法满足要求, 需要使用高速切割设备或激光切割技术; 在进行管道弯曲时, 由于其弹性模量较大, 弯曲半径难以控制, 容易出现裂纹或变形不均匀等问题。

加工难度大不仅会增加施工成本和时间, 还可能影响管道的安装质量和使用寿命。因此, 在油气管道施工过程中, 需要配备专业的加工设备和技术人员, 并且制定合理的加工工艺方案, 以克服 S32707 钢管的加工难题。

5. S32707 钢管在油气输送领域的应用策略

5.1. 管道优化设计策略

管道设计时, 应对 S32707 钢管进行全面的应力分析。通过有限元分析等方法, 模拟管道在不同工况下的受力情况, 包括内压、外载荷、温度变化等因素引起的应力分布。根据应力分析结果, 对管道的结构和布局进行优化设计, 如合理设置弯头、三通、支吊架等部件的位置和形式, 减少应力集中点, 降低管道的应力水平。根据油气输送量、输送压力、流速等参数, 运用流体力学和材料力学原理, 精确计算管径和壁厚。在管道的选材和制造过程中, 严格控制材料的质量和性能指标, 确保其满足应力设计要求, 提高管道的抗疲劳和抗断裂能力, 还可以降低成本投入。同时采取在管道内、外壁, 可采用耐腐蚀涂层, 结合阴极保护等方式进行防护, 进一步延长管道使用寿命。

5.2. 管道连接策略

S32707 钢管的连接方式主要有焊接、法兰连接和螺纹连接等。对于油气输送管道, 焊接连接是常用

的方式。在焊接过程中，应严格按照焊接工艺规程进行操作，选用适合的焊接材料和焊接方法，优化焊接工艺，严格控制焊接材料中的氢含量，采用合适的焊接顺序和方法，控制焊接参数，如焊接电压、电流、焊接速度等，以及对焊接接头采取预热和后热工艺控制确保焊接质量。焊接完成后，对焊缝进行无损检测，如超声波检测、射线检测等，消除焊接缺陷。

5.3. 加强技术创新和研发

为提升 S32707 钢管效能，必须加强技术创新与研发。

1. 在生产工艺方面

持续探索新型技术，如对热轧、冷拔等工艺进行深度优化，精确调控钢管组织结构，使其强度与韧性达到更优水平，从而提高生产效率、保证质量并降低成本。只有不断推进技术创新与研发，才能持续增强 S32707 钢管的性能与适应性，为油气输送打造更为可靠、优质的解决方案，助力油气产业高质量发展。

2. 材料性能改进方面

通过不断研发和改进，S32707 钢管的性能得到进一步提升。在化学成分设计方面，通过调整合金元素的含量和配比，开发出性能更优的 S32707 钢管新品种，以满足不同工况下的油气输送需求。在表面处理技术方面，研究开发新型的涂层材料和处理工艺，进一步提高 S32707 钢管的耐腐蚀性能和耐磨性。这些材料性能的改进将使 S32707 钢管在油气管道应用中更具竞争力。

3. 智能化监测与维护技术融合

随着物联网、大数据、传感器等技术的快速发展，智能化监测与维护技术在油气管道领域得到广泛应用。S32707 钢管与智能化监测系统相结合，能够实时监测管道的运行状态，如压力、温度、腐蚀情况等参数，及时发现异常问题，并进行数据分析进行故障诊断和预测。通过智能化监测数据，可对管道进行精准维护和管理，提高管道的可靠性和安全性。这种智能化监测与维护技术的融合，将为 S32707 钢管在油气管道领域的长期稳定应用提供有力保障[14] [15]。

6. 结论

S32707 钢管凭借其优异的性能，在油气输送领域具有广阔的应用前景。通过合理的管道设计、严格的施工安装和科学的维护管理策略，能够充分发挥其优势，满足油气输送领域对安全性、可靠性和经济性的要求。在实际应用中，应根据不同的工程条件和需求，制定个性化的应用策略，并不断总结经验，优化技术方案，以提高油气输送的质量和效率，推动油气行业的可持续发展。未来，随着技术的不断进步和应用经验的积累，S32707 钢管在油气输送领域的应用将更加广泛和深入。

参考文献

- [1] 张江涛. 特超级双相不锈钢 S32707 制备工艺及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [2] Charles, J., Chemelle, P., 胡锦涛, 等. 双相不锈钢的发展现状及未来市场趋势[J]. 世界钢铁, 2011, 11(6): 1-22.
- [3] 丰涵, 周晓玉, 刘虎, 宋志刚. 特超级双相不锈钢的发展现状及趋势[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(4): 1-5.
- [4] 李秋扬, 赵明华, 张斌, 等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348.
- [5] 丁建林, 西昕, 张对红. 能源安全战略下中国管道输送技术发展展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 632-639.
- [6] 王庆川, 薛魏, 武正彬, 等. UNS S32707 特超级双相不锈钢换热管的焊接[J]. 中国化工装备, 2022, 24(2): 33-36.
- [7] 李冬毓, 张永明. 双相不锈钢焊接技术研究[J]. 石油化工设备技术, 2017, 38(1): 56-58.
- [8] 王纯, 贾小斌, 冯伟, 等. 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究[J]. 压力容器, 2021, 38(5):

22-25.

- [9] 张彬彬, 张树才, 李志兴, 等. 特超级双相不锈钢 S32707 在酸化海水中的钝化行为研究[J]. 冶金工程, 2018, 5(2): 47-54.
- [10] 梁超. 双相不锈钢管材在海洋石油平台的应用与研究[J]. 化工管理, 2024(21): 158-160, 168.
- [11] 刘子轩, 王竹, 唐德志, 等. 油气工业中氢对双相不锈钢腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2024, 46(4): 684-694.
- [12] 刘爱国, 刘震昊. 我国近 10 年双相不锈钢焊接研究进展分析[J]. 焊接技术, 2024, 53(8): 1-9.
- [13] 程必刚. 超级双相不锈钢的焊接性及焊接技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(6): 198-200.
- [14] 赵静, 周超, 曹宇航. RPA 在钢管生产信息化管理中的应用[J]. 焊管, 2022, 45(8): 53-56, 60.
- [15] 徐明. “5G + 工业互联网”的数字孪生钢管生产集成技术研究[J]. 工业互联网, 2023(11): 33-39.