海上气田井口管线双相不锈钢焊接接头泄漏失效分析

王艳[1]，李振祥[2]，王心悦[2]，吴世品[2]

1.天津海运职业学院　天津　300350
2.天津职业技术师范大学　天津　300222

摘要：针对海上气田井口管线双相不锈钢三通焊接接头处出现裂纹引起的泄漏问题开展失效分析，从宏观和微观断口形貌、裂纹扩展路径、微观组织特征、相比例和焊接接头硬度等综合分析了失效原因。结果表明：裂纹从管道内壁焊接接头焊趾处起裂，穿过热影响区，向基体母材扩展导致管道泄漏，失效原因主要是管道内壁焊接接头焊缝成形不良引起的应力集中，加上腐蚀环境，诱发应力腐蚀开裂。焊缝金属组织中形成大量的二次奥氏体，导致奥氏体含量增加，铁素体含量仅为20%，降低了焊缝金属对应力腐蚀开裂的抵抗力。母材组织出现大量的块状沿晶分布的σ相金属间化合物，导致母材变脆，加速裂纹扩展，同时增加了局部腐蚀泄漏风险。

关键词：双相不锈钢；焊接接头；裂纹；应力腐蚀

Failure analysis of leakage at welded joints of duplex stainless steel in offshore gas field wellhead pipelines

WANG Yan[1], LI Zhenxiang[2], WANG Xinyue[2], WU Shipin[2]

1.Tianjin Maritime College, Tianjin 300350, China
2.Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

Abstract: Failure analysis was carried out for the leakage problem caused by cracks in the welding joint of duplex stainless steel tee in the wellhead pipeline of offshore gas fields. The failure causes were comprehensively analyzed from macroscopic and microscopic fracture morphology, crack propagation path, microstructural characteristics, phase proportion and hardness of the welding joint. The results show that the crack initiates from the weld toe of the welding joint on the inner wall of the pipeline, passes through the heat affected zone and extends to the base metal, leading to pipeline leakage. The main failure reasons are the stress concentration caused by poor weld formation of the welding joint on the inner wall of the pipeline and the corrosion environment, which induces stress corrosion cracking. A large number of secondary austenite are formed in the weld metal structure, resulting in the increase of austenite content and the ferrite content is only 20%, which reduces the resistance of the weld metal to stress

基金项目：天津市教委科研计划项目（2020KJ104）；天津海运职业学院校级课题（XJ2023-Z-02）。

第一作者：王艳，高级工程师，主要研究方向为焊接工艺及检验，E-mail：wangyan322123@163.com。

通信作者：吴世品，讲师，主要研究方向为焊接冶金及焊接结构，E-mail：shipinwu@tju.edu.cn。

corrosion cracking. A large number of blocky sigma (σ) phase intermetallic compounds distributed along the grain appear in the base metal structure, leading to brittleness of the base metal, accelerating crack propagation and increasing the risk of local corrosion leakage.

Keywords: duplex stainless steel; welded joint; crack; stress corrosion

1 序言

随着海上气田开发不断向深水、超高温高压方向发展，井口管线面临极端服役环境。海上气田井口压力高达138MPa，油嘴后面温度最高达144.3℃，井口管线承受高浓度CO_2、H_2S、Cl^-等介质的腐蚀。双相不锈钢因其具有高强度、良好的耐蚀性和焊接适用性，广泛应用于井口管线及油气装备零件[1]。在海上油气开发过程中，气田井口管线焊接接头作为整个油气装备的薄弱环节，一旦发生泄漏会造成严重的经济损失和海洋环境污染。双相不锈钢管线焊接常见的问题包括相比例失调、热裂纹或冷裂纹、点蚀及应力腐蚀等。由于双相不锈钢热膨胀系数高，因此当焊接热输入过小、熔池热量不足时，会导致层间未完全熔合，同时焊缝或热影响区易出现热裂纹或冷裂纹[2-5]。此外，双相不锈钢焊接过程中析出σ相或铬氮化物，加上焊接残余应力，在腐蚀环境中易发生点蚀或应力腐蚀开裂[6]。

某海上气田井口管线服役3个月后，在双相不锈钢三通焊接接头处因出现贯穿裂纹而导致泄漏。通过宏观观察和微观断口形貌、裂纹扩展路径、微观组织特征、相比例和焊接接头硬度等综合分析了双相不锈钢焊接接头失效的原因，探讨了双相不锈钢焊接接头裂纹形成机理，为改进和控制焊接质量提供指导和借鉴。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

管线母材为2205双相不锈钢，壁厚8mm，焊接方法采用钨极氩弧焊单面焊。利用直读光谱仪检测了双相不锈钢焊接接头母材和焊缝的化学成分，见表1。

表1 母材和焊缝的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V
母材	0.013	0.48	1.38	0.02	0.01	23.05	5.13	3.04	0.15	0.18
焊缝	0.007	0.49	1.47	0.01	0.01	23.33	7.80	3.10	0.10	0.10

2.2 失效分析方法

双相不锈钢三通焊接接头处出现泄漏的位置如图1所示。在双相不锈钢焊接接头泄漏位置截取试样，观察宏观裂纹萌生位置及扩展方向，采用SEM对断口微观形貌进行观察，并结合EDS能谱仪分析断口表面腐蚀产物的成分。

利用Olympus光学显微镜和JSM-7800F热场发射扫描电子显微镜观察母材、热影响区和焊缝的微观组织形貌，腐蚀溶液采用60mLH_2O+30mLHCl+1g$K_2S_2O_5$，根据ASTM A923—2014《双相奥氏体-铁素体不锈钢有害金属间相检测方法-A法》和ASTM E562—2011《系统手动点计数法测定铁素体体积分数的标准试验方法》统计了双相不锈钢焊接接头母材、热影响区和焊缝的相比例。同时，采用维氏硬度计测试焊接接头各区域的硬度，根据API 1104—2005《管道及相关设施焊接标准》进行测试，测试位置位于管道表面下方1.5mm的焊缝区、热影响区和母材，每个区域分别测试3个有效数据，载荷为10kgf（98N），保载时间15s。

图1 双相不锈钢焊接接头泄漏位置

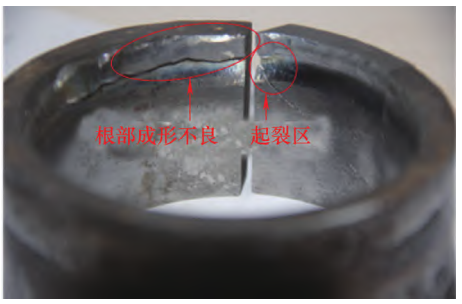
3 试验结果和分析

3.1 断口分析

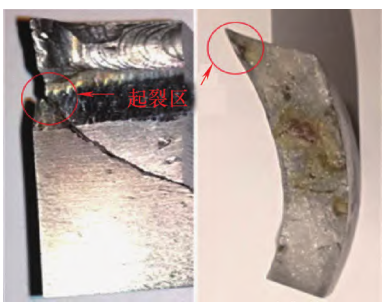
观察双相不锈钢焊接接头失效试样，如图2所示。从裂纹宏观走向可知，裂纹从管内壁焊接接头焊趾处起裂，穿过热影响区，向基体母材扩展，裂纹扩展过程中贯穿整个壁厚导致管道泄漏。管道内壁焊接接头处存在焊接成形不良（见图2a），焊缝出现下塌，裂纹起源于焊接起弧和熄弧的交界处

（见图2b），不良的焊缝成形导致其应力集中比其他位置更高。

采用SEM观察裂纹起裂区和扩展区形貌，并采用EDS分析断口表面腐蚀产物的成分，如图3所示。起裂区和扩展区宏观断口均较为齐平，呈现脆性断裂特征。起裂区微观断口未见明显韧窝或沿晶断裂特征，呈现涟漪状棱纹和不连续细小刻面（见图3a）。扩展区微观断口形貌可见发亮反光的刻面和二次裂纹（见图3b）。相较于起裂区微观断口形貌，裂纹扩展区断口形貌表现出更明显的脆性特征。根据腐蚀产物能谱分析结果可知，断口表面发生一定程度的氧化，氧含量升高，生成一定的氧化物，且断口表面存在少量的Cl元素（见图3c、d）。



a）成形不良

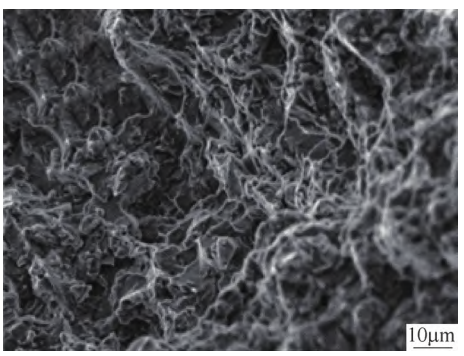


b）起裂位置

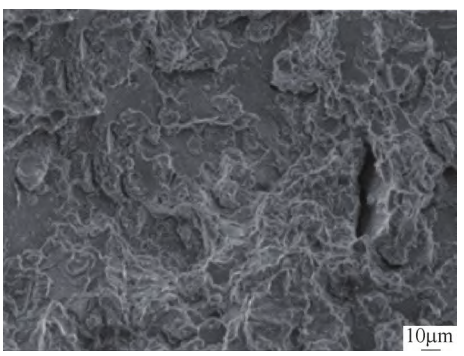
图2　裂纹起裂位置、扩展方向及宏观断口

3.2　微观组织

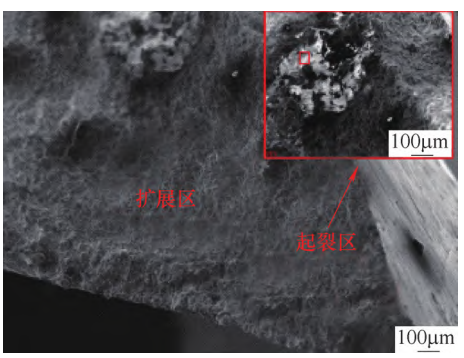
焊接接头焊缝区、热影响区和母材的金相组织和SEM组织如图4所示。从图4可看出，焊缝组织主要为铁素体（褐色）＋奥氏体（黄白色）＋二次奥氏体（黄白色小块）。由于焊缝经过多次焊接热循环，在铁素体晶粒内形成大量的小块状二次奥氏体，使奥氏体含量增加，显著高于铁素体含量。热影响区组织主要为铁素体（褐色）＋奥氏体（黄白色），热影响区由于经过焊接高温热循环，因此组织发生相变结晶，铁素体和奥氏体晶粒长大，但未发现析出相和金属间化合物。母材组织主要为铁



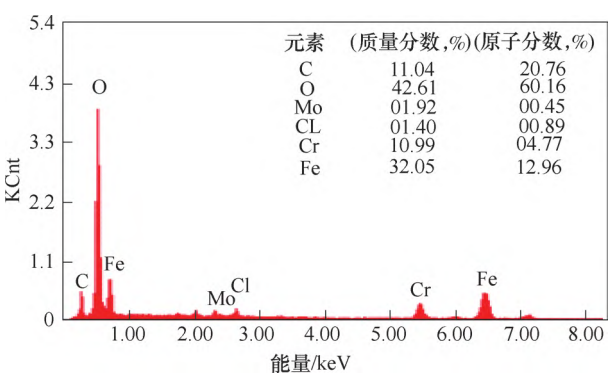
a）起裂区



b）扩展区

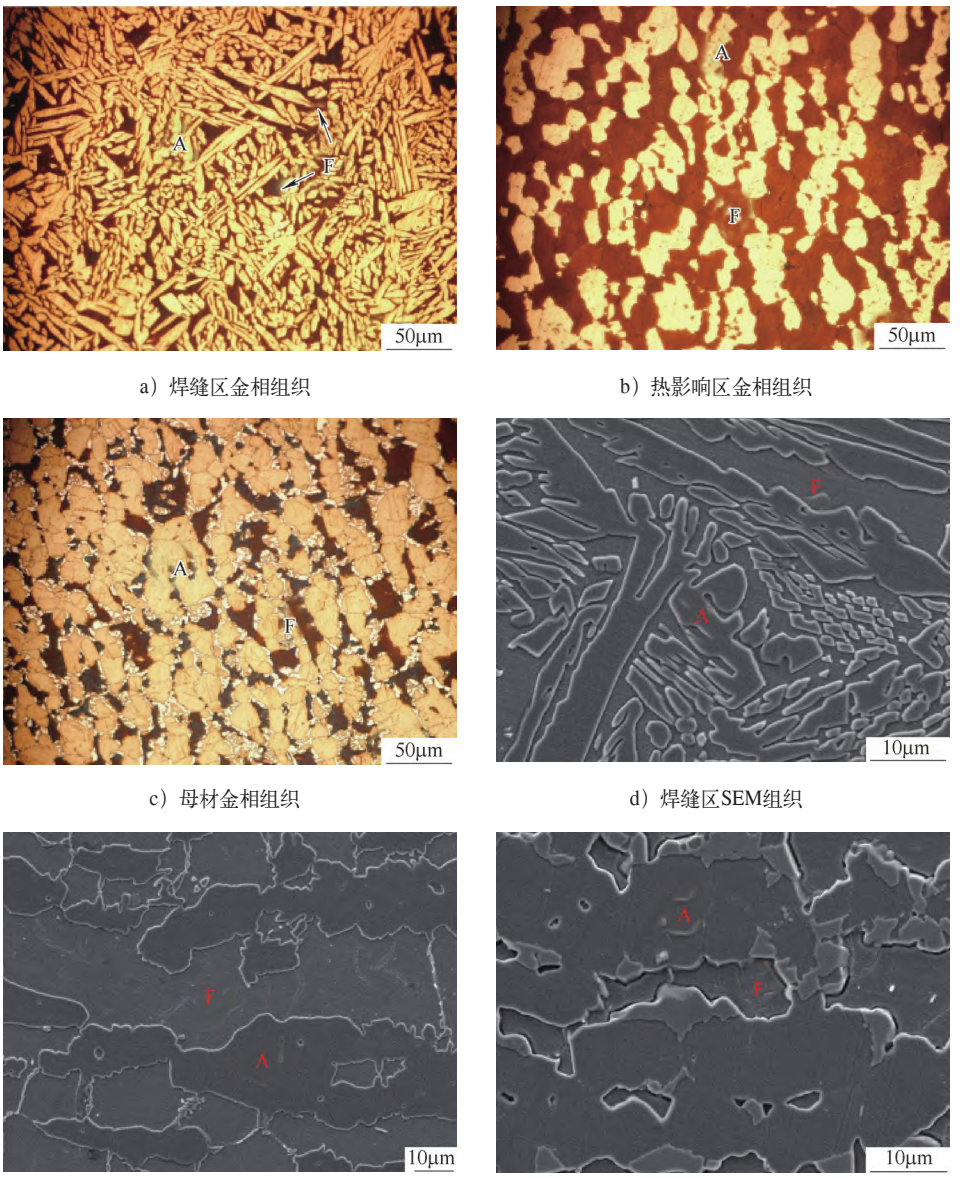


c）腐蚀产物



d）能谱分析

图3　断口形貌和腐蚀产物能谱分析结果



a）焊缝区金相组织　b）热影响区金相组织

c）母材金相组织　d）焊缝区SEM组织

e）热影响区SEM组织　f）母材SEM组织

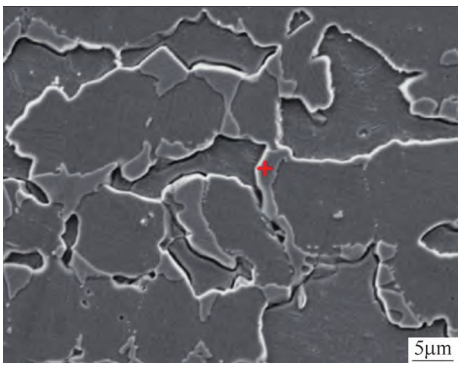
图4　焊接接头微观组织

素体（褐色）＋奥氏体（黄白色）＋金属间化合物（亮白色小块）。

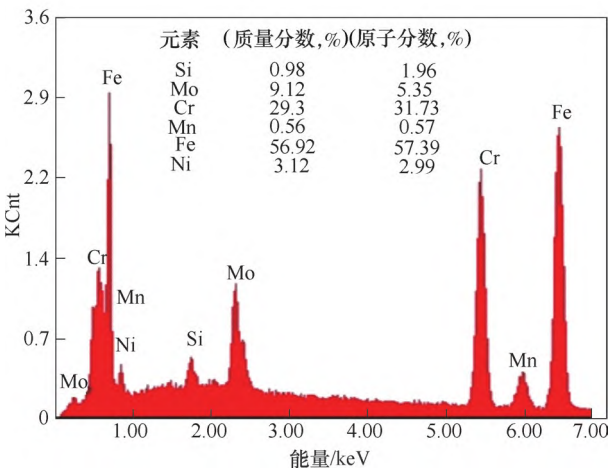
母材组织除正常的铁素体和奥氏体外，还出现了异常组织，即大量的亮白色小块状金属间化合物，沿铁素体和奥氏体相界分布。从母材的组织可看出，铁素体含量明显低于奥氏体含量。通过分析母材微观组织中奥氏体相与铁素体相之间沿晶分布的块状金属间化合物的EDS成分（见图5），发现金属间化合物富含Cr、Mo元素，推断其为σ相金属间化合物。

3.3　相比例

双相不锈钢的相比例对其脆性和耐蚀性均有一定的影响[7]。当双相不锈钢焊缝或热影响区中铁素体相比例超过65%时，容易导致金属脆性增加，耐蚀性下降。当铁素体含量低于30%时，容易导致强度和抗应力腐蚀能力下降。因此，为了分析焊接接头不同区域的相比例，从母材、热影响区和焊缝区分别选取10个区域，每个区域通过100个栅格点进行相比例统计计算。裂纹附近焊接接头试件焊缝、热影响区和母材的铁素体含量分别为20.2%、53.9%和28.3%，其中热影响区的铁素体含量在正常范围内，而焊缝和母材的铁素体含量偏低。结合微观组织分析结果，在母材铁素体和奥氏体的晶界上生成大量金属间化合物，表明热处理工艺过程可能存在



a）SEM组织



b）能谱分析

图5 金属间化合物能谱分析

问题，从而导致铁素体含量偏低；主要由于经过多次焊接热循环，导致焊缝生成大量的二次奥氏体，引起奥氏体含量增高。

3.4 焊接接头硬度

焊接接头焊缝区、热影响区和母材的硬度测试结果见表2。从表2可知，焊缝区的硬度最低，平均值为260HV10；热影响区硬度平均值为281HV10；母材的硬度最高，平均值为337HV10。母材的硬度偏高可能与母材出现大量的为σ相金属间化合物有关。σ相作为富集Cr、Mo元素的金属间化合物，其自身硬度较高，导致材料的硬度增加。同时，σ相的析出产生第二相强化效应，有利于材料硬度提高。但σ相的析出也伴随材料的脆性增加和塑性下降。

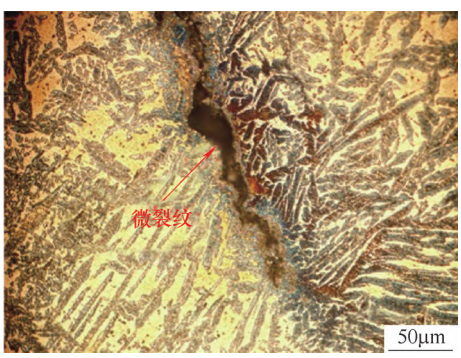
表2 焊接接头硬度 （HV10）

焊缝	热影响区	母材
259、257、264	252、276、315	338、341、333

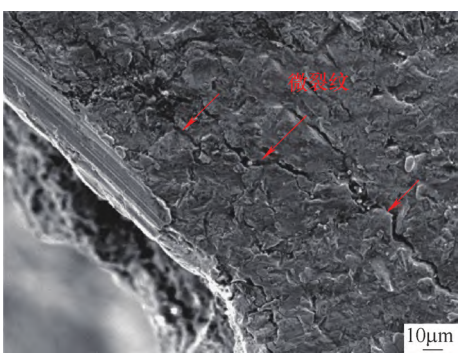
3.5 裂纹形成机理

海上气田进口管线双相不锈钢焊接接头裂纹从管道内壁的焊趾处萌生。从失效件裂纹所处位置分析，裂纹萌生处根部焊缝出现下塌，焊缝成形不良，导致焊趾处存在较大的应力集中。同时，裂纹起裂部位靠近焊道起弧、息弧处，在根部焊道发现长度约0.5mm的微裂纹（见图6a），裂纹为二次裂纹，并未贯穿管道。同时，结合裂纹起裂源管道内壁表面的形貌观察（见图6b），发现管道内壁存在一定的腐蚀现象，且裂纹起裂区和扩展区附近的管道内壁表面出现大量的二次裂纹。结合断口形貌和能谱分析结果，裂纹起裂源和扩展区均为脆性断裂，并未发现明显的沿晶断裂特征，断口表面存在大量的二次裂纹，同时能谱分析发现断口表面存在一定的含Cl^-的腐蚀产物。考虑到海上气田井口管线输送油气具有一定的腐蚀性，加上焊接接头焊趾处存在较高的应力集中，因此推测双相不锈钢焊接接头失效主要是应力腐蚀开裂引起的。

双相不锈钢兼具奥氏体不锈钢良好的塑韧性、耐蚀性，以及铁素体不锈钢的高强度和耐应力腐蚀性能[8]。双相不锈钢焊接接头的奥氏体含量要求维



a）焊缝区



b）内壁表面

图6 焊接接头起裂区附近的微裂纹

持在30%～70%，但是根据焊缝组织和相比例分析结果，奥氏体含量高达80%，而铁素体仅为20%。根部焊缝在经过多次焊接热循环后，尤其在起弧和熄弧的接头处，由于多次再加热作用，在非平衡铁素体内或铁素体与一次奥氏体边界处会析出二次奥氏体组织，导致奥氏体含量增加。双相结构中铁素体可阻断奥氏体裂纹扩展路径；当铁素体含量不足时，裂纹沿奥氏体晶界快速延伸，导致应力腐蚀开裂倾向增大，因此双相不锈钢焊缝中铁素体含量不足会削弱焊缝对晶间腐蚀和应力腐蚀开裂的抵抗力。同时，铁素体对Cl^-腐蚀的抵抗力强于奥氏体，在含Cl^-环境中，铁素体含量低会引起局部腐蚀加速[6, 9]。此外，铁素体不足导致屈服强度下降、韧性降低，易引发脆性断裂[10]。因此，对于海上气田双相不锈钢管线焊接接头，不仅要严格控制焊接接头成形质量，减少应力集中，同时要选择合理的焊接参数，保证焊缝金属的相比例在合理的范围内，从而有效预防焊接接头出现局部腐蚀和应力腐蚀开裂。

双相不锈钢母材微观组织中存在大量的小块状脆性σ相，管线在运行一段时间后，不仅母材极易发生腐蚀，存在腐蚀泄漏风险，而且大量的脆性σ相存在会导致母材变脆，加速裂纹扩展，其中扩展区的断裂形貌也表明，裂纹在母材扩展阶段出现大量的脆性解理断裂特征。当裂纹扩展至脆性σ相时，裂纹沿σ相与铁素体或奥氏体晶界扩展；脆性σ相的存在，降低了裂纹扩展的阻力，导致裂纹更容易扩展，加速断裂失效的进程。σ相脆化属于材质裂化范畴，脆化后的材料对晶间腐蚀更敏感[9, 10]。因此，针对管线双相不锈钢母材的材质存在的σ相脆化问题，不容忽视，需要全面检测并评估管线母材材质的安全性，开展失效可能性评估，通过制定相应的检测策略来降低管线泄漏风险。

4 结束语

针对海上气田井口管线双相不锈钢焊接接头出现的泄漏问题，从裂纹宏观和微观断口形貌，裂纹扩展方向、微观组织、相比例和焊接接头硬度综合分析失效原因，主要结论如下。

1）裂纹从管道内壁焊接接头焊趾处起裂，穿过热影响区，向基体母材扩展并贯穿整个壁厚从而导致管道泄漏。管道内壁焊接接头焊缝成形不良引起应力集中，加上腐蚀环境，诱发应力腐蚀开裂是泄漏的主要原因。

2）焊缝金属经过多次焊接热循环后出现大量的二次奥氏体组织，导致奥氏体含量增加，铁素体含量仅为20%，降低了焊缝金属对应力腐蚀开裂的抵抗力。

3）双相不锈钢母材组织除了铁素体和奥氏体，出现大量的块状沿晶分布的σ相金属间化合物，导致母材变脆，加速裂纹扩展；同时σ相析出会引起局部腐蚀泄漏风险。

参考文献：

[1] 高安泰. 国产超级双相钢管材在海上油田的失效分析[J]. 中国新技术新产品，2021（23）：68-70.

[2] 黄江中，杜招霞，李黎霞，等. 双相不锈钢自动焊工艺开发[J]. 焊接技术，2024，53（12）：79-83.

[3] 刘波，陈坤，张连爽，等. 深水管汇S32750超级双相不锈钢小径管焊接工艺及质量控制[J]. 石油和化工设备，2024，27（12）：62-64，67.

[4] 彭杏娜，乔亚霞，高仕龙，等. 2205双相不锈钢焊接接头在模拟海水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护，2024，45（10）：57-64.

[5] 颜丙锁，刘波，冯加亮，等. 浅谈双相不锈钢井口管汇焊接施工工艺[J]. 石油和化工设备，2024，27（10）：128-129，112.

[6] 秦琴，田金欣，唐诗佳，等. 双相不锈钢焊接性能及接头耐腐蚀性能的研究现状[J]. 机械工程材料，2021，45（9）：13-18.

[7] 曹欣锋. 2205双相不锈钢局部腐蚀及钝化性能研究[D]. 北京：北京科技大学，2023.

[8] 王心宝，周彬，郭旺，等. S31803双相不锈钢焊缝返修焊接的相比例控制[J]. 焊接，2017（5）：64-67，71.

[9] 仇潞. 热输入对超低碳双相不锈钢焊缝性能的影响[J]. 焊接技术，2018，47（7）：27-29.

[10] 曹红霞. 2205双相不锈钢管TIG和MMA焊接接头组织与性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.

（收稿日期：20250509）