

某核电厂SAF2507双相不锈钢管道开裂原因分析

刘永生, 杜爱国

江苏核电有限公司 江苏连云港 222042

摘要: 某核电厂SAF2507双相不锈钢管道在运行期间出现裂纹, 采用化学成分分析、金相检测、扫描电镜观察、能谱分析等方法, 分析了管道开裂的原因。结果表明: 裂纹性质为应力腐蚀开裂(SCC), 起源于管道内表面。缺陷产生的根本原因是焊缝存在过量补焊, 提高了材料的晶间腐蚀敏感性, 在一定焊接残余应力和海水中氯离子的共同作用下产生了应力腐蚀开裂。

关键词: 双相不锈钢; 应力腐蚀开裂; 氯离子; SAF2507钢; 管道焊缝

Causes of cracking in SAF2507 duplex stainless steel pipelines for a nuclear power plant

LIU Yongsheng, DU Aiguo

Jiangsu Nuclear Power Company, Lianyungang 222042, Jiangsu, China

Abstract: The cracks were detected in a SAF2507 duplex stainless steel pipelines for a nuclear power plant. The causes of the cracking were analyzed using chemical composition analysis, metallographic examination, scanning electron microscope observation, energy spectrum analysis. The results show that the cracks type is SCC, the cracks originates form the inner surface of pipeline. The root cause of the defects is that there is excessive repair welding in the weld, which increases the sensitivity of the material to intergranular corrosion, and SCC occurs under the combined action of residual stress and chloride ion in seawater.

Keywords: duplex stainless steel; stress corrosion cracking; chloride ion; SAF2507 steel; pipeline weld

1 序言

SAF2507属于超级双相不锈钢的典型牌号, 在普通双相不锈钢的基础上, 提高了Mo、N含量, 具有比普通双相不锈钢更优异的抗腐蚀性能^[1, 2], 广泛应用于石油化工以及海洋工程中^[3]。但即使这样的超级双相不锈钢, 由于性能与材料加工工艺、服役工况环境密切相关, 因此在一定条件下也会发生

应力腐蚀开裂问题^[4]。例如, 某院设计的双相不锈钢钾盐蒸发罐, 在服役过程中由于焊接瑕疵和组装残余应力造成的应力集中, 导致了双相不锈钢蒸发罐在高温、高含量Cl⁻介质中出现了应力腐蚀开裂现象^[5]; 某石油化工企业换热器双相不锈钢管板过胀产生的高水平残余应力作用下出现了大面积应力腐蚀开裂^[6]; 而焊接时, 多次焊接热循环作用、高

第一作者: 刘永生, 高级工程师, 工学学士, 主要从事核电厂技术管理工作, E-mail: liuys01@cnnp.com.cn。

通信作者: 杜爱国, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事核电厂材料研究和管理工作的, E-mail: duag@cnnp.com.cn。

热输入会造成焊缝及热影响区的相比比例失衡,由于双相不锈钢具有高水平热胀系数,因此导致形成较高残余应力,从而引起焊接接头发生应力腐蚀^[7, 8]。

国内某核电厂设备冷却水系统海水管道采用SAF2507钢制造,规格为 $\phi 273.1\text{mm} \times 4.19\text{mm}$,运行压力为0.25MPa,运行温度为0~45℃。运行期间发现管道对接焊缝附近内表面存在裂纹。本文从管道的化学成分、金相分析、能谱分析、裂纹断面分析等方面进行研究,明确了裂纹产生的机理和根本原因,并提出相应改进建议,为避免类似问题再次发生提供依据。

2 理化检验

2.1 宏观观察

管道内表面的宏观形貌如图1所示。焊缝为直管段与弯头环向对接焊缝,开裂处位于直管段与弯头对接焊缝的弯头侧热影响区内,在开裂位置可观察到3条裂纹,均为垂直于焊缝的轴向表面开口裂纹。利用线切割机将开裂位置切取下来,发现切割面上的3条裂纹均由内壁向外壁扩展,最大裂纹深度约为整个壁厚的2/3。开裂位置对应区域的内表面存在黑色沉积物,沿轴向分布,外表面焊缝有明显补焊痕迹,推断此处曾经历过轴向补焊,期间承受了较大焊接热输入,内表面在空气环境下形成了黑色氧化产物。

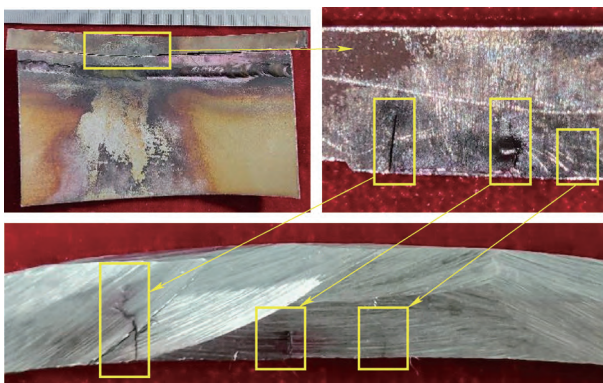


图1 管道焊缝裂纹的宏观形貌

2.2 化学成分分析

对管道焊缝两侧母材进行能谱成分分析,结果见表1。由表1可见,焊缝弯头侧和直管侧的主要合金元素Cr、Ni、Mo、N等含量,均符合EN 10088-1: 2005《Stainless steels-Part 1: List of stainless steels》中关于SAF 2507钢成分的要求。

表1 SAF 2507不锈钢管道母材化学成分(质量分数)(%)

元素	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
弯头侧母材	0.27	1.12	25.32	7.18	3.76	0.18
直管侧母材	0.32	0.86	25.44	6.70	4.08	0.17
标准值	≤0.8	≤1.2	24.0~26.0	6.0~8.0	3.0~4.5	0.05~0.20

2.3 金相观察

在开裂位置切取金相试样,在OLYMPUS GX71光学显微镜下进行金相组织观察,金相组织形貌如图2~图4所示。由图2可见,开裂部位对应的母材外表面区域存在焊缝、熔合线及热影响区组织,即该部位存在补焊情况,补焊范围宽约36mm、深约4mm,补焊区域存在气孔及大尺寸夹渣,焊接质量较差。裂纹1从管道内壁开裂,向外扩展至外表面补

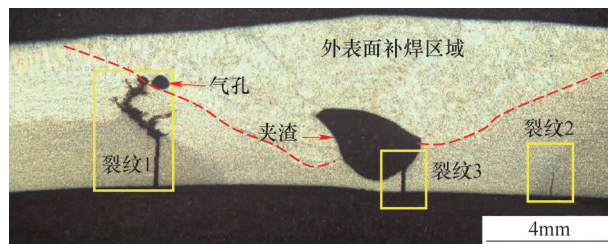
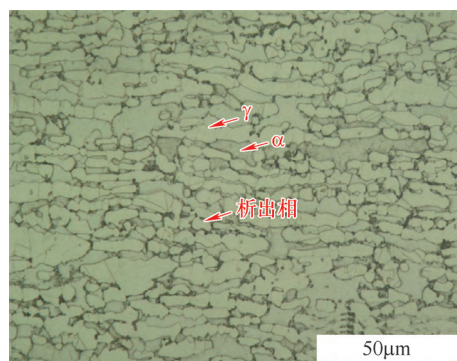
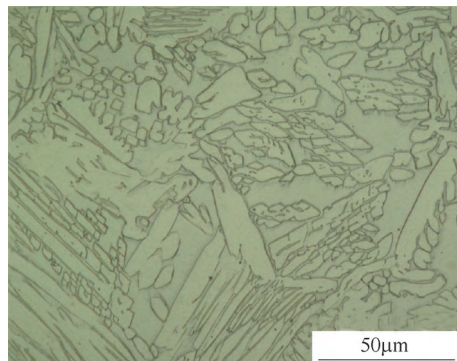


图2 焊缝端面宏观金相



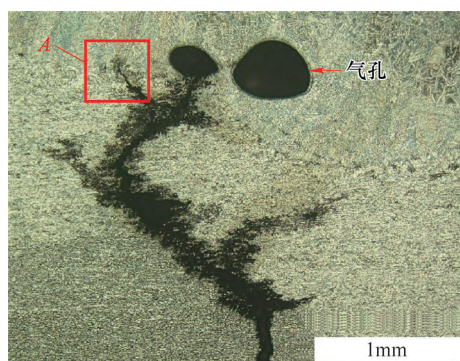
a) 母材



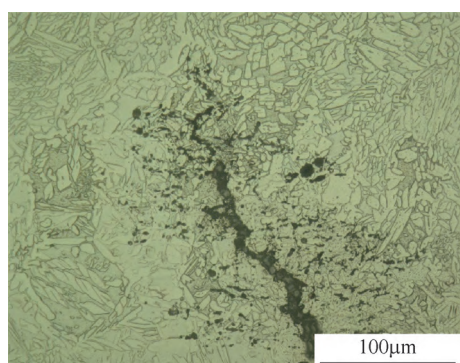
b) 焊缝

图3 母材和焊缝处的金相组织形貌

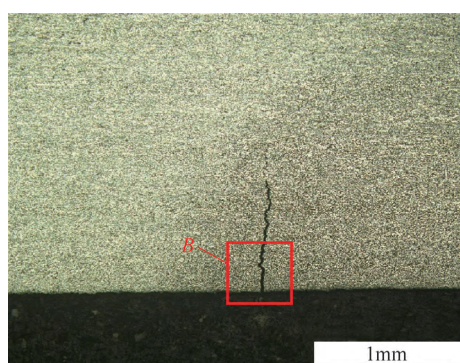
焊熔合线位置气孔处；裂纹2较浅，位于补焊热影响区范围；裂纹3位于补焊焊道正下方，扩展至补焊的



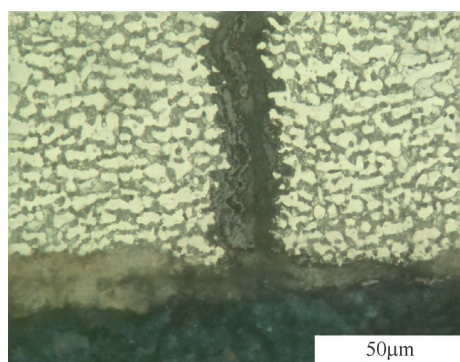
a) 裂纹1



b) A部放大



c) 裂纹2



d) B部放大

图4 裂纹的微观形貌

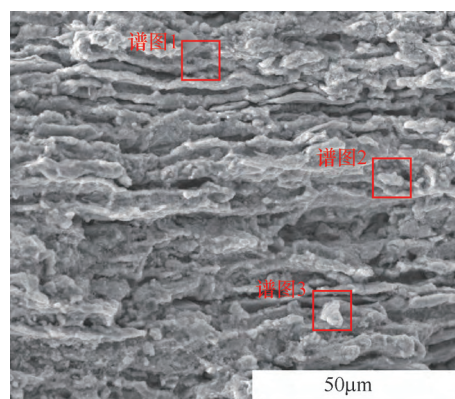
焊趾位置的夹渣处。

图3所示为母材、补焊焊缝的微观组织。由图3可见，焊缝组织较粗大，奥氏体（ γ ）多为条块状或羽毛状，与铁素体（ α ）混合在一起。母材金属的显微组织为奥氏体+铁素体，沿轧制方向呈条带状分布，可在晶界处观察到数量较多的析出相。

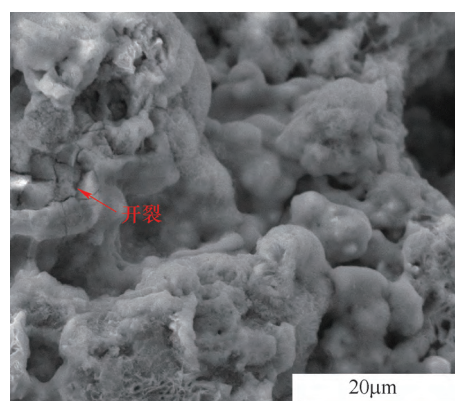
组织具有明显的轧制痕迹，由于轧制使晶粒脱离等轴晶状态，从而在两相晶界处将积累大量的位错与应变能，因此造成在奥氏体/铁素体相界产生裂纹^[7]。其中，裂纹1的一个分支扩展至熔合线处的气孔处止裂，另一条分支继续沿着相界扩展。

2.4 扫描电镜观察及能谱分析

SAF2507钢中Cr、Mo元素含量高，Cr可以在金属表面形成致密的氧化膜，Mo可以提高氧化膜的稳定性^[8]，因此具有良好的抗点蚀能力。采用机械方法将裂纹1打开，采用扫描电镜观察裂纹断面，形貌如图5所示。从图5可观察到大量松散堆积的腐蚀产物，在高含 Cl^- 的环境中腐蚀产物膜易破裂^[9]，促进应力腐蚀的形成。



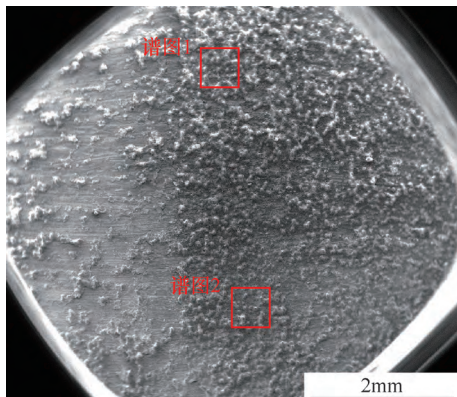
a) 断口谱图位置



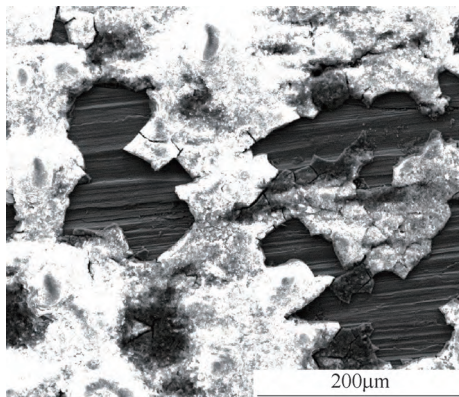
b) 断口形貌

图5 裂纹面的断口形貌

在裂纹附近的管道内表面取样观察其腐蚀产物，形貌如图6所示。从图6可看出，腐蚀产物分散堆积，从局部放大图可看到腐蚀产物膜较薄，呈龟裂状，易开裂脱落，使基体裸露在腐蚀介质中，为腐蚀的进一步推进提供了条件。



a) 内表面谱图位置



b) 腐蚀产物膜形貌

图6 裂纹附近内表面的腐蚀产物膜形貌

表2 断面和内表面能谱分析结果（质量分数）

(%)

检测位置		C	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
裂纹断面	谱图1	12.80	63.54	4.55	0.18	5.85	1.04	0.35	4.93	2.47	0.22	—	2.80	0.31	0.62
	谱图2	3.14	31.08	0.24	0.79	2.12	1.19	0.04	0.24	0.32	33.11	0.83	20.91	2.08	3.85
	谱图3	2.99	36.05	0.47	0.09	0.50	2.90	0.05	0.70	0.47	1.88	0.41	45.99	5.93	0.85
管道内表面	谱图1	0.47	41.85	2.33	4.45	8.65	0.55	1.11	1.98	0.29	7.66	0.47	28.11	1.17	—
	谱图2	0.50	42.28	2.03	5.31	10.75	0.48	1.42	2.25	0.52	6.48	0.39	25.48	1.42	—

2.5 硬度检测

从开裂位置切取焊缝、热影响区及弯头侧母材的硬度检测试样，按GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第1部分：试验方法》在HVS-50型维氏硬度计上进行维氏硬度检测，试验力为98N（10kgf），保持时间15s，结果见表3。从表3可知，弯头侧的硬度明高于补焊焊缝、热影响区及SAF2507钢的规定值。为进一步验证硬度对裂纹的影响，切取裂纹附近母材制备微观硬度检测试样，按GB/T 4340.1—2009在FM-700型维氏硬度计上进行小载荷维氏硬度检测，试验力为9.8N，保持时间15s，结果见表4。其检测结果进一步验证了弯头侧母材的硬度超标。在弯制过程中发生了大量塑性变形，从而产生了形变强化作用，同时观察到较多析出相（见图3）的存在，此因素也会导致硬度升高。

表3 硬度试验结果

(HV10)

检测位置	1	2	3	平均值
焊缝 (补焊)	263	267	260	263
母材 (弯头侧1)	373	371	378	374
热影响区	283	288	277	283
标准值	≤312HV（≤32HRC，按GB/T 33362—2016《金属材料硬度值的换算》进行换算			

表4 裂纹附近区域硬度试验结果

(HV1)

检测位置	1	2	3	平均值
裂纹附近1	364	349	350	354
裂纹附近2	374	381	369	375
标准值	≤312HV（≤32HRC，按GB/T 33362—2016《金属材料硬度值的换算》进行换算			

3 分析与讨论

应力腐蚀开裂是指敏感材料由于拉应力和特定腐蚀介质同时存在而引起的开裂^[10]，在高pH值的海水环境中应力腐蚀为沿晶开裂，氧在腐蚀过程中起到了促进阳极反应的作用^[11]；在含有大量Cl⁻的海水环境中，由于铁素体电位更负，对奥氏体起着阴极保护作用，裂纹一般在 α/γ 相界和夹杂物处，并在铁素体相内或沿相界以铁素体的溶解方式扩展^[12]。促进应力腐蚀形成的应力既包括工作应力，又包括残余应力。

本文所研究接头的补焊发生在环焊缝附近，从图1、图2可看出，其焊接路径穿越了环焊缝，沿轴向施焊，由于环焊缝的存在，2条焊缝交叉处拘束度较高，因此必然存在环向及轴向的双相高值残余拉应力，叠加由内压产生的工作应力后，该区域的应力处于较高水平，有利于应力腐蚀裂纹的形成与扩展。

环向的补焊宽度范围较大，由于共进行了2道补焊（见图2），其中第一道焊接的深度约为4mm，达到这样的深度需要较高的焊接热输入，因此将对焊接热影响区产生较大影响，如晶粒粗化、在晶界形成Cr₂₃C₆、Cr₂N等析出相^[13, 14]，叠加第二道焊接的影响后，热影响区受到的影响将进一步恶化，从而破坏了晶界的耐腐蚀能力。另外，根据硬度检测结果，裂纹附近金属硬度超标，也标志着抗腐蚀能力下降。因此，尽管基体Cr含量高达25%（质量分数），但仍然存在晶间腐蚀的可能性。

根据图2、图4的裂纹形貌观察可发现，裂纹沿 α/γ 相界形成与扩展，裂纹面为轴向，扩展方向为壁厚方向，基本垂直于内压作用下的环向应力及环向焊接残余应力。裂纹形貌中可观察到多个裂纹分支，符合应力腐蚀裂纹的基本特征。

冷却水系统的管道中介质为海水，含有较多Cl⁻，为应力腐蚀的产生创造了外在条件；表2给出的腐蚀产物膜中含有较多Cl元素，且裂纹面及管道内壁腐蚀产物形貌中均存在龟裂现象（见图5、图6），符合高Cl⁻环境中应力腐蚀产物膜的特征，可以进一步确定该裂纹为应力腐蚀裂纹。

按GB/T 13401—2017《钢制对焊管件技术规范》的要求，当缺陷深度不大于公称壁厚的1/4、且≤5mm时，可采用焊接的方式修补。根据金相观察

结果，本文管道接头弯头侧母材外表面补焊深度约为4mm。但该管道的壁厚仅为4.19mm，补焊深度已远超壁厚1/4，显然采用焊接进行补焊的操作不符合GB/T 13401—2017的要求。过量的补焊给原始焊缝、补焊焊缝及焊缝附近的热影响区带来了高焊接残余应力，同时由于较高焊接热输入的作用，将导致析出相在晶界析出，降低晶界处Cr原子含量，提高晶间腐蚀敏感性。因此，应加强焊缝质量控制，严格按照GB/T 13401—2017的规定、在允许深度范围内进行补焊，且补焊时尽量采用较小的热输入，并严格控制层间、道间温度在较低的水平。

4 结束语

1) 本文所述SAF2507双相不锈钢海水管道开裂的性质为应力腐蚀开裂。裂纹起源于弯管侧内表面热影响区，该区域在外表面补焊过程中承受了较高焊接热输入，形成了较高残余应力及析出相，导致相界面处的抗晶间腐蚀能力降低，从而在高Cl⁻海水环境中形成了应力腐蚀。

2) 本文所述外表面补焊超出了GB/T 13401—2017的规定，因此建议在工程中加强焊缝质量控制，严格按照规范允许的深度进行补焊，且补焊时采用较小的热输入，并合理控制层间、道间温度。

参考文献：

- [1] WESTIN E M, JOHANSSON M M, BYLUND L A, et al. Effect on microstructure and properties of super duplex stainless steel welds when using backing gas containing nitrogen and hydrogen[J]. Welding in the World, 2014, 58 (3) : 347-354.
- [2] NILSSON J O, WILSON A. Influence of isothermal phase transformations on toughness and pitting corrosion of super duplex stainless steel SAF 2507[J]. Materials Science and Technology, 1993, 9 (7) : 545-554.
- [3] 吴玖. 双相不锈钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.
- [4] 黄建中，左禹. 材料的耐蚀性和腐蚀数据[M]. 北京：化学工业出版社，2003.
- [5] 王军，靳彤，马一鸣，等. 高残余应力下2507双相不锈钢应力腐蚀开裂行为[J]. 压力容器，2020, 37 (3) : 50-55.
- [6] 黄杰，由扬帆，徐蔚，等. 打底焊热输入对

(下转第136页)

5 结论及建议

5.1 结论

对于规格为 $\phi 88.9\text{mm} \times 7.62\text{mm}$ 、 $\phi 60.3\text{mm} \times 5.54\text{mm}$ 的奥氏体不锈钢对接焊缝,得出以下结论。

1) 超声波相控阵检测技术能够有效检测出役致裂纹。

2) 超声波相控阵检测技术在单侧扫查时,探头对侧焊缝区域裂纹缺陷检出率低,容易发生漏检。

3) 超声波相控阵检测技术对于高度较小的裂纹,容易误判缺陷性质。

4) 射线检测对役致裂纹的检出率低,检出率低于超声波相控阵检测技术。

5.2 建议

1) 对于66.6~100mm壁厚的奥氏体不锈钢焊缝役致裂纹缺陷检测,以超声波相控阵检测为主要检测手段,以减少大修工期。

2) 当现场条件限制超声波相控阵检测只能进行单侧扫查时,可通过去除焊缝余高增加扫查面积,或采用纵波探头补充检测,提高对探头对侧裂纹缺陷的检出率。

3) 在对超声波相控阵检测结果有疑问时,补充进行射线检测,以提高检测结果的可靠性。

4) 对高度较小裂纹的超声波相控阵检测工艺优化及信号特征进一步研究分析,以便有效地在裂纹发展前期发现和判断。

6 展望

在不锈钢管道壁厚焊缝、承插焊缝、设备焊缝等检测上,超声波相控阵检测技术同样具有推广和应用价值。目前,我国核电行业超声波相控阵检测技术应用还处于起步阶段,随着具体检测工艺开发应用和进一步可靠性验证,相应相控阵检测技术标准的发布,其未来应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 程怒涛, 杨涛, 叶欣延, 等. 核岛大壁厚马鞍形接管焊缝射线检测技术[J]. 无损探伤, 2021, 45 (6): 44-48.
- [2] 李衍. 超声相控阵技术 第一部分: 基本概念[J]. 无损检测, 2007, 31 (4): 24-25.
- [3] 电力行业电站金属材料标准化技术委员会. 火力发电厂焊接接头相控阵超声检测技术规程: DL/T 1718—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [4] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [5] 邱振昌. 奥氏体不锈钢对接焊缝的相控阵超声检测技术研究[J]. 市场监管与质量技术研究, 2022, 5 (5): 10-12.
- [6] 何慈武. 小径薄壁管座角焊缝超声波相控阵检测方法的仿真应用研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
- [7] 杨敬, 吴斌, 焦敬品, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声阵列检测方法[J]. 焊接学报, 2022, 43 (2): 1-10, 113.

MW 20240227

(上接第129页)

- SAF2507双相不锈钢焊接接头性能的影响[J]. 压力容器, 2016, 33 (12): 7-12.
- [7] 寇晓培, 张钰柱, 翠兰, 等. 2507双相不锈钢在海水脱硫不同阶段的腐蚀钝化行为[J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (7): 115-126.
- [8] 张兴洪. C、Si、Cr、Mo含量对2507铸造双相不锈钢组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [9] 李玉, 刘光明, 李富天, 等. 2507双相不锈钢在酸性高氯环境下的腐蚀行为[J]. 中国表面工程, 2024, 37 (2): 45-50.
- [10] DAVISON R M, REDMOND J D. A guide to using duplex stainless steels[J]. Materials & Design, 1991, 12 (4): 187-192.
- [11] ZHOU H J, XUE F, CHANG H, et al. Effect

of Mo on microstructural characteristics and coarsening kinetics of Γ' precipitates in Co-Al-W-Ta-Ti alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34 (5): 799-805.

- [12] 吕迎玺, 董志, 臧旭. 弯曲应力对经济型双相不锈钢LDX2101应力腐蚀影响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30 (2): 172-176.
- [13] 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 (8): 202-210.
- [14] 栗宏伟, 赵志毅, 薛润东. 热输入对SAF2507超级双相不锈钢焊接接头显微组织及硬度的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43 (2): 20-26, 114.

MW 20240320