

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.010

2205 双相不锈钢焊接技术研究

贺振宇

(核与辐射安全中心 生态环境部,北京 100082)

摘 要:采用不同焊接技术对 2205 双相不锈钢进行焊接,研究焊接接头微观组织、力学性能和点蚀行为的演变。分析单面 CO₂ 气体保护横对接焊、双面埋弧自动对接焊和手工焊条横对接焊对焊缝微观组织和力学性能的影响。结果表明:针对 3 种不同的焊接技术,焊缝组织中 ferrite 和 austenite 的质量分数各保持在 50% 左右。双面埋弧自动对接焊接头表现出最优的抗拉强度和冲击韧性。

关键词:2205 双相不锈钢;焊接技术;微观组织;力学性能

中图分类号:TG44 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0057-06

Research on Welding Technology of 2205 Duplex Stainless Steel

HE Zhenyu

(Ministry of Ecology and Environment, Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

Abstract: This paper investigates the welding of 2205 duplex stainless steel using different welding techniques, focusing on the evolution of the microstructure, mechanical properties, and pitting corrosion behavior of the welded joints. The effects of single-sided CO₂ gas-shielded butt welding, double-sided submerged arc automatic butt welding and manual shielded metal arc butt welding on the weld seam microstructure and mechanical properties are analyzed. The results show that for the three different welding techniques, the mass fractions of ferrite and austenite in the weld microstructure remain around 50%. And the double-sided submerged arc automatic butt weld joints display the best tensile strength and impact toughness.

Keywords: 2205 duplex stainless steel; welding technology; microstructure; mechanical properties

0 引言

在实际服役工况中,传统的奥氏体不锈钢经常遭到晶间腐蚀、应力腐蚀和点蚀等各种局部破坏。双相不锈钢对上述各腐蚀类型表现出显著的优势,故逐渐受到越来越多的重视,其在造船、石油化工、海工装备和海水与废水处理等行业应用非常广泛。2205 双相不锈钢具有较高的强度、良好的耐腐蚀性能(点蚀、晶间腐蚀等)、较高的冲击功吸收能力、极低的热膨胀系数和良好的可焊性,是目前应用最广泛的双相不锈钢^[1-2]。理想情况下,双相不锈钢中铁素体相与奥氏体相的比例应该各占 50%,这样有益于充分利用奥氏体的优异韧性和耐腐蚀性、铁素体的强度和优良的焊接性^[3]。

然而,由于实际双相不锈钢存在奥氏体/铁素体比例不合格、焊接接头耐腐蚀性低等问题,故焊

接难度较大。因此,在实际工程应用中如何提高其焊接性能是一个亟待解决的问题^[4-5]。对于 2205 双相不锈钢的焊接而言,关键点是保证焊接接头理想的双相质量分数比例。2205 双相不锈钢的焊接方法通常包括埋弧焊(SAW)^[6]、手工电弧焊(SMAW)^[7]、氩弧焊(GTAW)^[8]、激光焊^[9-10]等。上述大多数工作都是研究焊后热处理对焊接接头微观结构和性能的影响。一般来说,焊接热输入越大,高温停留时间就越长,其有助于铁素体向奥氏体转化,奥氏体含量也就越高^[11]。有研究表明^[12],2205 双相不锈钢铁素体含量小于 25%,其强度和抗应力腐蚀能力就会降低。如果铁素体含量大于 65%,抗点蚀能力、韧性和氢致开裂性能就会变差。因此,鉴于双相不锈钢焊接的特殊性,本文在前期充分调研之后进行了一系列焊接试验并编制了相关的焊接工艺,研究和评价不同焊接工艺的变化对双相不锈钢的可焊性影响。

基金项目:上海市经济化信息委员会产业转型升级发展专项资金计划项目(17XI-12)

作者简介:贺振宇(1972—),男,山西忻州人,高级工程师,学士,研究方向为民用核安全设备,rayhan@njtu.edu.cn。

1 双相不锈钢的焊接试验

1.1 双相不锈钢材料

本文所采用的 2205 双相不锈钢试验板材分别采用直读光谱仪和高频红外碳硫分析仪测量不锈钢试板的质量分数,结果如表 1 所示。采用万能试验机(100 kN)测试 2205 双相不锈钢试验板材的拉伸性能,获得屈服强度 586 MPa、抗拉强度 762 MPa 和延伸率 32%。与此同时,采用全自动维氏硬度计表征板材的显微硬度,加载力选择 1 MPa,保载时间 15 s,在不同显微区域测量 10

次,取平均值,得到硬度为 264 HV。

表 1 2205 双相不锈钢质量分数 单位:%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.03	1.00	2.00	0.03	0.02	22.30	5.80	2.60

1.2 双相不锈钢焊接试验

本文开展了 3 项焊接试验,涉及不同位置的单面 CO₂ 气体保护横对接焊、双面埋弧自动对接焊和手工焊条横对接焊,焊接试验项目如表 2 所示,试验参数设计如表 3 所示。

表 2 2205 双相不锈钢焊接试验项目

序号	试验项目	板厚/mm	焊接方法	焊接位置	焊接材料
1	单面 CO ₂ 气体保护横对接焊	11	FCAW	PC	AVESTA FCW 2205-PW/φ1.2
2	双面埋弧自动对接焊	11	SAW	PA	Thermanit 22/09(焊丝)/φ3.0+Marathon 431(焊剂)
3	手工焊条横对接焊	11	SMAW	PC	BOEHLER FOX CN 22/9 /φ3.2

表 3 2205 双相不锈钢焊接试验参数

序号	试验项目	焊道层	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(cm/min)
1	单面 CO ₂ 气体保护横对接焊	打底层	130~150	19~22	10~15
		中间层	160~180	21~24	22~28
		盖面层	160~180	21~24	30~35
2	双面埋弧自动对接焊	正面	470~520	33~36	50~58
		反面	470~520	33~36	50~58
3	手工焊条横对接焊	正面打底层	100~120	24~27	11~14
		正面中间层	100~115	23~26	17~21
		正面盖面层	100~115	23~26	17~21
		反面	95~110	23~26	15~19

双相不锈钢采用等离子或激光切割(空气或惰性气体均可),然后采用铣边机来加工坡口。焊前将油漆、毛刺打磨干净,清除待焊区的灰尘、氧化皮、油污等杂质。对接焊缝焊接前,在焊缝起始端和终端安装引弧板和熄弧板,引弧和熄弧长度为 50~100 mm。焊后不进行热处理。在焊接试验结束后,根据中国船级社(CCS)和《材料与焊接规范》等规定^[13],对试板进行外观检验、X 射线和表面渗透探伤、焊缝断面宏观金相观察、横向拉伸试验、横向侧弯试验和冲击试验,评估不同焊接技术对 2205 双相不锈钢焊接质量的影响。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 1 显示了基体金属 2205 双相不锈钢的显微组织,其中亮白色为奥氏体,边界清晰,浅灰色为铁素体,呈带状交替分布,没有明显的第二相析出。焊接试验结束后,焊缝的宏观形貌和两个焊接接头的横截面形态如图 2 所示。焊接接头主要分为 3 部分:母材、焊缝和热影响区。对 2205 双相不锈钢试板焊缝采用目视、PT、RT 射线探伤。结果表明:焊缝表面及焊缝内部未发现咬口、未熔

合、裂纹夹渣等缺陷(本刊为黑白印刷,相关问题请咨询作者)。图3分别呈现了焊接试验1、试验2、试验3的金相微观组织。图3(a)、图3(d)、图3(g)显示了3种焊接工艺下焊缝的微观结构。由图3可以观察到,基体为铁素体,羽毛状、条块状为奥氏体,双相边界清晰且明显。大量树枝状奥氏体相分布在铁素体的晶界上,少量奥氏体相分布在铁素体晶粒内。在铁素体相上分布着带有明显不规则长条的奥氏体。在热影响区,铁素体晶粒长大,在铁素体边界及内部有羽毛状及条块状奥氏体析出。奥氏体主要呈块状和条状,分布

在铁素体晶界处。同时,铁素体晶粒中析出少量块状奥氏体,如图3(c)、图3(f)、图3(i)所示。不同焊接工艺下焊缝组织差异不大,在图3中均无氧化物析出。

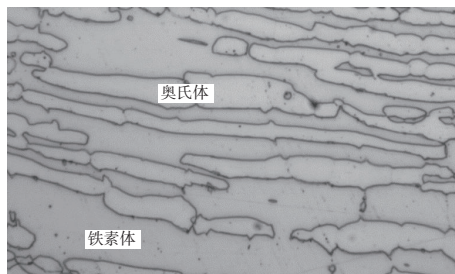


图1 2205 双相不锈钢典型显微组织

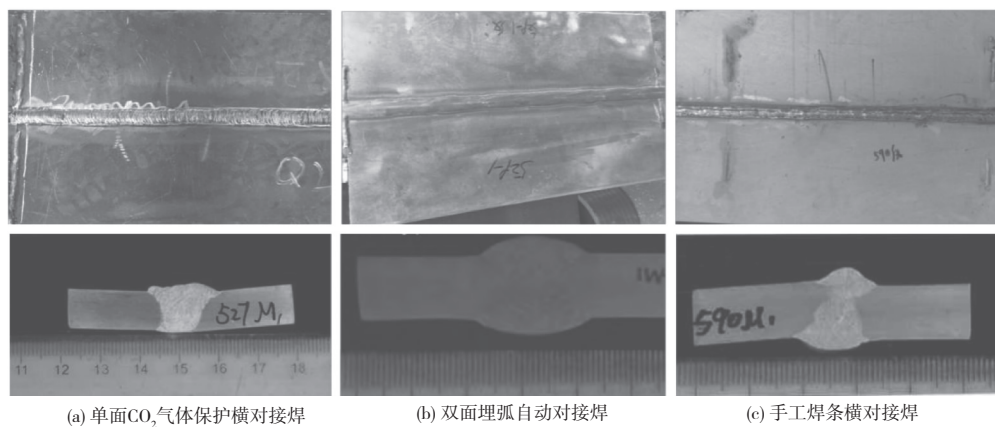


图2 2205 双相不锈钢宏观焊缝形貌和接头横截面形态

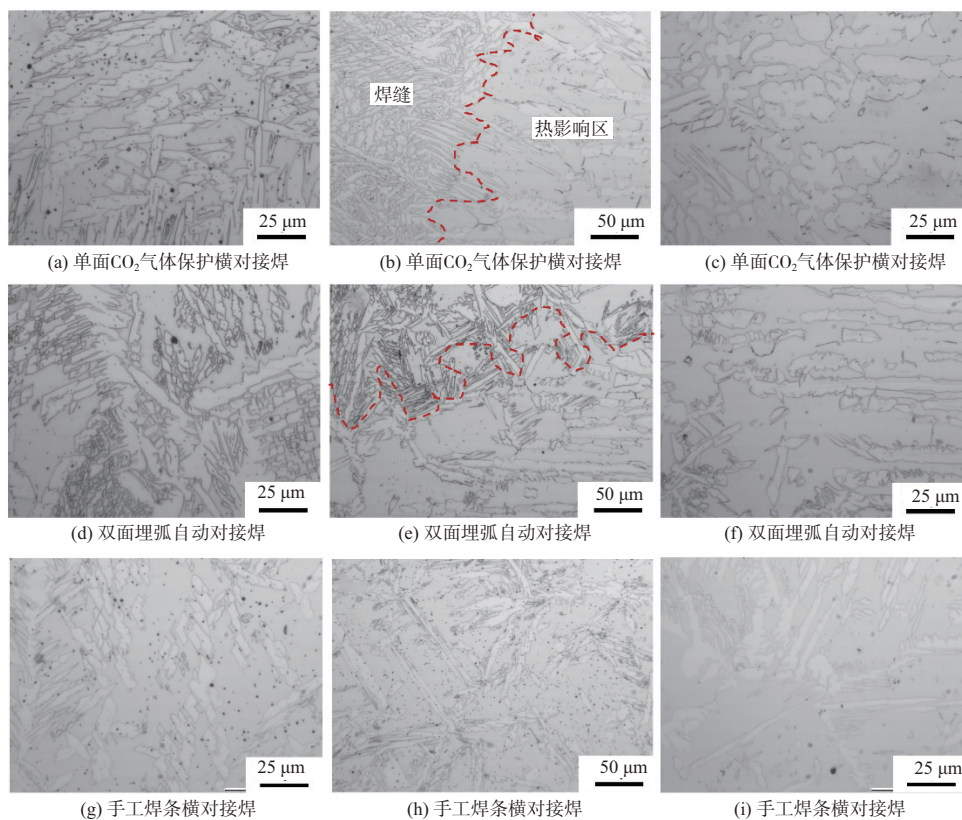
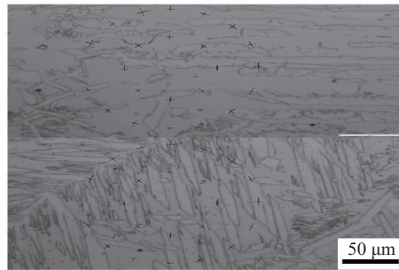
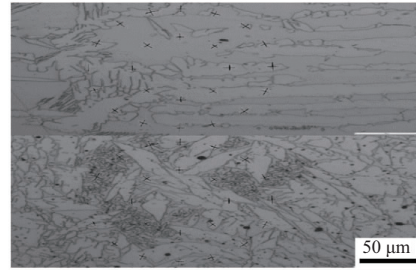


图3 2205 双相不锈钢的金相显微组织

如图 4 所示,分别呈现了试验 1、试验 2、试验 3 的微观组织铁素体的形貌。结合图像后处理,采用 Image Pro Plus 软件统计铁素体含量。结果表明:试验 1 中热影响区域铁素体含量平均值为 52.4%,焊缝铁素体含量平均值为 46.2%,如图 4(a)所示。试验 2 中热影响区域铁素体含量平均值为 53.8%,焊缝铁素体含量平均值为 48.2%,如图 4(b)所示。试验 3 中热影响区域铁素体含量平均值为 54.6%,焊缝铁素体含量平均值为 48.5%,如图 4(c)所示。图 4 的统计结果表明,铁素体含量均接近 50%。铁素体含量与高温停留时间直接相关,这是因为高温时间短,从铁素体转变为奥氏体的时间短,铁素体含量升高。焊缝中铁素体和奥氏体的含量对接头的性能影响显著。有研究表明^[14-16],奥氏体相的质量分数对 2205 双相不锈钢焊接接头冲击韧性有着显著影响。这是因为碳、氮等元素在奥氏体相中溶解度较高,焊接后在高温冷却过程中不易析出碳化物及氮化物,从而有效抑制晶界脆化和奥氏体的晶粒长大。

(a) 单面CO₂气体保护横对接焊

(b) 双面埋弧自动对接焊



(c) 手工焊条横对接焊

图 4 2205 双相不锈钢的铁素体组织形貌

2.2 力学性能

焊接接头的力学性能是评价不同焊接技术和工艺参数选择是否恰当的直接依据。本文从拉伸、弯曲、冲击和显微硬度测试等多个角度进行焊接接头力学行为表征,结果分别如表 4 和表 5 所示。对比之下,可以发现双面埋弧自动对接焊接头的力学性能表现优异,接头具有最高的弯曲强度和抗拉强度,平均值分别为 603 MPa 和 774 MPa;单面 CO₂ 气体保护横对接焊接头的具有最低的弯曲强度和抗拉强度,平均值分别为 563 MPa 和 738 MPa。同时,焊接接头的冲击韧性差异也很明显,在焊缝附近的任何位置,双面埋弧自动对接焊接头表现出最高的冲击功。特别地,在熔合线+2 mm 位置处具有最大的冲击韧性,平均值达到 144 J。最显著的差异在于双面埋弧自动对接焊接头熔合线处的冲击韧性明显高于单面 CO₂ 气体保护横对接焊和手工焊条横对接焊接头熔合线处的冲击韧性,冲击韧性提升 1 倍。一般地,冲击韧性大小与奥氏体含量有关,奥氏体含量越高,韧性越大。此外,2205 双相不锈钢显微组织特点导致显微硬度的变化并不显著,均符合船级社的标准与规范。综上所述,从力学性能表征结果分析,采用双面埋弧自动对接焊 2205 双相不锈钢接头具有显著的优势,接头性能更优异。

表 4 不同焊接技术下 2205 双相不锈钢拉伸-弯曲试验结果

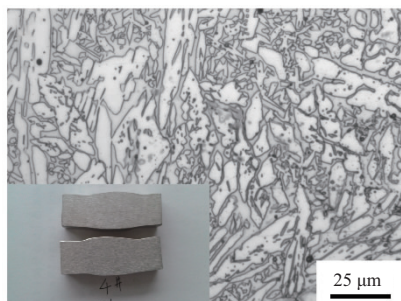
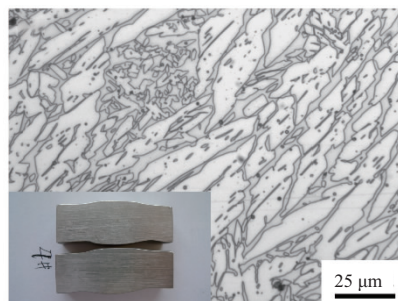
试验项目	试验温度/℃	弯曲强度/MPa	抗拉强度/MPa	断口情况	面弯	背弯
单面 CO ₂ 气体保护横对接焊	20	563	738	断于母材	完好	完好
双面埋弧自动对接焊	20	603	774	断于母材	完好	完好
手工焊条横对接焊	20	579	771	断于母材	完好	完好

表 5 不同焊接技术下 2205 双相不锈钢冲击试验与显微硬度结果

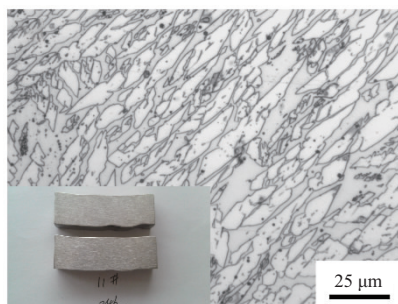
试验位置	冲击韧性/J			显微硬度/HV		
	单面 CO ₂ 气体 保护横对接焊	双面埋弧 自动对接焊	手工焊条 横对接焊	单面 CO ₂ 气体 保护横对接焊	双面埋弧 自动对接焊	手工焊条 横对接焊
基体金属	—	—	—	265	273	262
焊缝中心	52	76	42	257	274	285
熔合线	63	126	61	253	273	270
熔合线+2 mm	134	144	106	267	293	266

2.3 点腐蚀行为

2205 双相不锈钢焊接接头的点蚀行为研究对于确保材料在海洋工程等恶劣环境下的长期稳定性和安全性至关重要。因此,研究焊接接头的点蚀行为可以预测和提高材料在实际应用中的耐腐蚀性能。本文将试验项目 1—试验项目 3 的焊接接头在经过磨抛处理后,采用 10% 草酸溶液浸泡 24 h,显微组织变化如图 5 所示。可以观察到,3 种焊接试验技术下 2205 双相不锈钢出现不均匀的点蚀坑,数量较少,尺寸细小,无明显的大直径点蚀坑。根据孔蚀现象,可以判断出 2205 双相不锈钢表现出良好的耐点蚀性能。研究表明^[17-18],不锈钢的耐点蚀性能与其微观组织中奥氏体和铁素体的比例密切相关。周鹏等^[19]发现,2205 双相不锈钢在 1 100 ℃ 固溶处理后表现出优异的耐腐蚀性。将经此处理的样品置于 10% 氯化铁溶液中浸泡,腐蚀速率显著降低。这是因为富含铬和钼元素的铁素体相可以保持双相不锈钢表面钝化膜的稳定性及其修复能力^[20-21]。此外,由于铁素体相的热膨胀系数低于奥氏体相,因此其耐点蚀性能也高于奥氏体相。李剑颖等^[22]的研究同样表明,在 1 100 ℃ 固溶处理 20 min 后,2205 双相不锈钢的铁素体与奥氏体相比比例达到 50%,从而表现出优良的耐点蚀性能。综上可知,本文 3 种焊接试验技术下 2205 双相不锈钢接头中铁素体平均含量接近 50%,均表现出比较优异的耐点蚀性能。

(a) 单面 CO₂ 气体保护横对接焊

(b) 双面埋弧自动对接焊



(c) 手工焊条横对接焊

图 5 2205 双相不锈钢焊缝点蚀形貌

3 结语

不难发现,双相不锈钢焊接接头微观组织与性能受到热影响区的热输入和冷却条件的影响,这与焊接工艺息息相关^[23]。2205 双相不锈钢的焊接设计和质量控制是影响该材料大规模使用的重要因素。本文采用 3 种不同的焊接技术研究了 2205 双相不锈钢接头显微组织和力学性能的演变。结果表明:焊缝组织中铁素体和奥氏体的比例约各占 50%。双面埋弧自动对接焊接头具有最高的抗拉强度和冲击韧性,分别为 774 MPa 和 144 J。此外,2205 双相不锈钢表现出良好的耐点蚀性能。本文的研究结果为实际生产焊接 2205 双相不锈钢提供实验基础与理论依据,为获得具有理想显微组织比例的焊接接头提供技术参考与工艺基础。

参考文献:

- [1] 王凯,吴战芳,吕周晋,等. 双相不锈钢热等静压粉末冶金成形技术研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2025, 35(2):136-145.
- [2] 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.
- [3] 樊巧芳,林浩,张波. 2205 双相不锈钢 GTAW 焊接接头组织及性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(3):75-80.
- [4] KUMAR GURRALA A, TIRUMALLA A, SHEIK S, et al. Role of nitrogen shielding environment on microstructure and corrosion behavior of 2205 duplex stainless-steel A-GTA welds[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 66: 595-601.
- [5] LI L Y, XIAO J, HAN B, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of L415/316L bimetal composite pipe using post internal - welding process[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 179:104026.
- [6] HU X D, QIN L, WANG H Q, et al. Microstructure formation and its effect on mechanical properties for duplex stainless steel 2205 plasma arc welded joint[J]. Metals, 2024, 14(1):68.
- [7] XIE X F, LI J W, JIANG W C, et al. Nonhomogeneous microstructure formation and its role on tensile and fatigue performance of duplex stainless steel 2205 multi-pass weld joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 786:139426.
- [8] HAN L H, HAN T, CHEN G X, et al. Influence of heat input on microstructure, hardness and pitting corrosion of weld metal in duplex stainless steel welded by keyhole-TIG[J]. Materials Characterization, 2021, 175:111052.
- [9] ZHAO W, XIANG H L, YU R X, et al. Effects of laser scanning speed on the microstructure and mechanical properties of 2205 duplex stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94:1-9.
- [10] ODERMATT A E, VENTZKE V, DORN F, et al. Effect of laser beam welding on microstructure, tensile strength and fatigue behaviour of duplex stainless steel 2205[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 72:148-158.
- [11] MOHAMED A Y, MOHAMED A H A, ABDEL HAMID Z, et al. Effect of heat treatment atmospheres on microstructure evolution and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel weldments[J]. Scientific Reports, 2023, 13:4592.
- [12] 刘玉华. 带极堆焊 2205 双相不锈钢焊材应用研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(3):32-34.
- [13] HAGHDADI N, LEDERMUELLER C, CHEN H S, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties in 2205 duplex stainless steels during additive manufacturing and heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 835:142695.
- [14] 沈亚仁. 2205 双相不锈钢薄板端接接头焊接工艺[J]. 电焊机, 2021, 51(2):70-73, 112.
- [15] 周弋琳, 陈阿静, 赵德龙, 等. 2205 双相不锈钢焊接工艺及耐腐蚀性能分析[J]. 造船技术, 2021, 49(1):57-61.
- [16] XIAO Y, TANG J L, WANG Y Y, et al. Corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in NaCl solutions containing sulfide ions[J]. Corrosion Science, 2022, 200:110240.
- [17] NIGON G N, BURKAN ISGOR O, PASEBANI S. The effect of annealing on the selective laser melting of 2205 duplex stainless steel: microstructure, grain orientation, and manufacturing challenges[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134:106643.
- [18] SHEN K L, JIANG W C, SUN C, et al. Insight into microstructure, microhardness and corrosion performance of 2205 duplex stainless steel: effect of plastic pre-strain[J]. Corrosion Science, 2023, 210:110847.
- [19] 周鹏, 崔珊, 史洪源等. 固溶温度对热轧态 2205 双相不锈钢组织和点蚀性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(5):142-146.
- [20] 王云, 梁民航, 赵朋成, 等. 厚板埋弧焊接头焊后感应热处理应力场的数值分析[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2):49-51, 56.
- [21] WU W J, LIU S G, LI W G, et al. Identification of microstructure factors affecting hydrogen embrittlement of a 2205 duplex stainless steel[J]. Corrosion Science, 2022, 208:110643.
- [22] 李剑颖, 王徐皇, 吴文强. 时效处理对 2205 双相不锈钢组织及性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2025(1):91-98.
- [23] LI L Y, DU Z X, SHENG X Z, et al. Comparative analysis of GTAW+SMAW and GTAW welded joints of duplex stainless steel 2205 pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199:104748.

收稿日期: 2024-09-26