2205双相不锈钢GTAW焊接接头组织及性能研究

樊巧芳[1],林浩[2],张波[1]
(1.江苏安全技术职业学院,江苏 徐州 221011;2.中国科学院 金属研究所,辽宁 沈阳 110000)

摘 要 以Er2209焊丝为填充材料,用钨极氩弧焊(gas tungsten arc welding,GTAW)对2205双相不锈钢钢板进行多层焊。借助金相显微镜、XRD衍射和扫描电镜对不锈钢焊接接头组织形貌及构成进行分析,并对焊接接头进行力学性能及电化学腐蚀性能测试。结果表明:2205双相不锈钢GTAW焊接接头主要由铁素体相α和奥氏体相γ构成,焊缝从顶部、中部到底部,奥氏体比例逐渐增加,主要因为多层焊时新一层焊接对前一层焊缝有再加热的作用,双相不锈钢凝固过程是铁素体转变模式,在热量的积累下铁素体向奥氏体转变。焊缝顶部硬度大于中部、底部。焊接接头抗拉强度约为760 MPa,焊缝中心的冲击功略低于热影响区。2205双相不锈钢GTAW焊接接头的耐蚀性顺序为母材>焊缝>热影响区,铁素体与奥氏体两相交界处是腐蚀的薄弱区域。

关键词 2205双相不锈钢;GTAW;显微组织;力学性能;耐蚀性
中图分类号 TG442 **文献标志码** A **文章编号** 1004-244X(2025)03-0075-06
DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250217.001

Study on microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

FAN Qiaofang[1],LIN Hao[2],ZHANG Bo[1]
(1.Jiangsu College of Safety Technology,Xuzhou 221011,China;
2.Institute of Metal Research,Chinese Academy of Sciences,Shengyang 110000,China)

Abstract Using Er2209 wire as filler material, gas tungsten arc welding (GTAW) was used to weld 2205 duplex stainless steel plate with multiple layers. The microstructure and structure of welded stainless steel joints were analyzed by means of metallographic microscope, XRD diffraction and scanning electron microscope, and the mechanical properties and electrochemical corrosion properties of welded joints were tested. The results show that 2205 duplex stainless steel GTAW welded joint is mainly composed of ferrite phase α and austenitic phase γ two phases, weld from the top, the middle to the bottom, the proportion of austenite gradually increase, mainly because the new layer of welding has a reheating effect on the previous layer of weld during multi-layer welding, duplex stainless steel solidification process is a ferrite transformation mode, under the accumulation of heat, ferrite transforms into austenite. The hardness of the top of the weld is greater than that of the middle and bottom. The tensile strength of the welded joint is about 760 MPa, and the impact power of the weld center is slightly lower than that of the heat affected zone. 2205 duplex stainless steel GTAW welded joint corrosion resistance order is base material>weld>heat affected zone, ferrite and austenite junction is the weak area of corrosion.

Keywords 2205 duplex stainless steel;GTAW;microstructure;mechanical properties;corrosion resistance

2205双相不锈钢因其焊接性好,具有良好的塑性、韧性和耐腐蚀性,而广泛应用于石油化工行业、海水环境与淡化行业及能源与环保行业等领域[1-2]。然而焊接时,不同的焊接工艺会造成奥氏体相和铁素体相的比例失衡,从而降低双相不锈钢各方面的性能[3-7]。因此,控制双相不锈钢中的两相比例,改善焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能,具有重大的科学与经济价值。焊接作为1种重要的材料加工手段,对双相不锈钢的发展及应用有着举足轻重的作用。钨极氩弧焊因其可全位置焊接,焊缝成形平整且光滑,焊接过程稳定,飞溅小,热输入可控,机械化及自动化程度高等优点,可对各种有色金属、不锈钢及合金金属进行焊接[8-9]。

本文作者用ER2209焊丝作为填充金属,采用钨极氩弧焊工艺对6 mm厚的2205双相不锈钢钢板进行多层焊,重点分析了双相不锈钢接头显微组织构成、力学性能及耐蚀性,旨在为2205双相不锈钢的GTAW焊接工艺提供理论分析依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

母材选用2205双相不锈钢板,其抗拉强度为710

收稿日期:2024-09-13;修回日期:2025-01-15
基金项目:江苏省高校“青蓝工程”资助项目(014000773/2018-00376)
第一作者:樊巧芳,女,副教授。E-mail:fanqiaofang159@163.com。

MPa，屈服强度为505 MPa，断后伸长率为30%，规格为300 mm×100 mm×6 mm，焊接材料选用直径为1.2 mm的Er 2209焊丝。试验母材、焊丝的主要化学成分如表1所示。

表1 试验母材、焊丝主要化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire (mass fraction/%)

成分	DSS2205	Er2209	成分	DSS2205	Er2209
C	0.023	0.013 0	Ni	5.13	8.28
Si	0.390	0.008 0	Cr	22.20	21.84
Mn	1.120	1.610 0	Mo	3.12	2.89
P	0.025	0.030 0	N	0.15	0.10
S	0.001	0.000 8			

1.2 焊接试验

将6 mm厚的2205双相不锈钢板加工成V型坡口，坡口角度为60°，钝边为1~1.5 mm。装配时母材根部间留有2.5~3 mm的间隙，焊前用丙酮清理母材的油污，采用GTAW钨极氩弧焊对6 mm的钢板进行4层对接平焊，焊接顺序如图1所示。钨极直径为3.2 mm，钨极伸出长度为3~4 mm，用质量分数为99.99%的氩气作为保护气体，对2205双相不锈钢正面和背面均进行保护。所选焊接工艺参数见表2。为减少2205双相不锈钢的焊接变形，焊前对其表面施加压力。

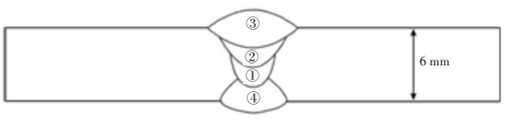


图1 2205双相不锈钢GTAW焊接顺序

Fig.1 Welding sequence of 2205 duplex stainless steel GTAW

表2 2205双相不锈钢钨极氩弧焊(GTAW)焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters of 2205 duplex stainless steel tungsten inert gas welding (GTAW)

焊接层数	电流I/A	电压U/V	焊接速度/(cm·min^{-1})	线能量/(J·cm^{-1})	电流种类及极性	电极直径/mm	正面气流量/(L·min^{-1})	背面气流量/(L·min^{-1})
1	90~100	9~11	9.0	10~12	DCEN	3.2	12~15	15~20
2	90~100	9~11	8.5	10~12	DCEN	3.2	12~15	15~20
3	90~100	9~11	9.0	10~12	DCEN	3.2	12~15	15~20
4	90~100	9~11	8.5	10~12	DCEN	3.2	12~15	15~20

1.3 性能表征

用线切割沿垂直于焊缝方向取样，对试样进行研磨、抛光和腐蚀。用Beraha腐蚀剂(0.8 g偏重亚硫酸钾，6 mL盐酸，42 mL水)对试样腐蚀约15 s。腐蚀后观察金相组织。用Image-pro图像分析软件通过对比度计算双相比例。用ZEISS AxioCam MRc5蔡司金相显微镜和JSM-6480扫描电子显微镜(SEM)对焊接接头显微组织构成进行分析。用XRD-6000型X射线衍射仪(XRD)进一步确定焊缝组织的物相构成，扫描速度5 (°)/min，扫描范围20°~90°。根据GB/T 2651—2008对GTAW焊接接头进行拉伸性能测试，取3个试样，焊接接头的抗拉强度结果取其平均值。根据GB/T 2650—2008对GTAW焊接接头进行冲击试验，温度为-20 ℃，V型缺口分别位于焊缝中心、熔合线和熔合线+2 mm，取样示意图见图2。每个位置的试样取3个，结果取其平均值。根据GB/T 2654—2008对GTAW焊接接头进行显微硬度测试，分别沿着离试样表面1 mm处，中心线3 mm处和离试样底面1 mm处，测试点位置如图3所示。

为检测2205双相不锈钢GTAW焊接接头的电化学腐蚀性能，分别从焊缝区域、热影响区和母材位置3个位置进行取样，如图4所示。用EG M283型电化学工作站测试试样耐点蚀性能，采用标准三电极体系，以饱和甘汞电极为参比电极，铂电极为辅助电极，电化学待测试样为工作电极。对截取的6 mm×10 mm×2 mm试样进行电化学腐蚀试验，腐蚀面积为20 mm^2，腐蚀溶液为1 mol/LHCl溶液+2 mol/LH_2SO_4的混合溶液。动电位极化曲线工作参数为：扫描范围为-0.5~1.5 V，扫描速度为2 mV/s，阻抗测试采用的激励型号为5 mV的正弦波，测量频率为100 kHz~10 MHz。

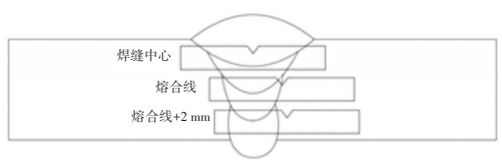


图2 GTAW焊接接头冲击试样取样位置

Fig.2 Sampling location of impact specimens for GTAW welded joints

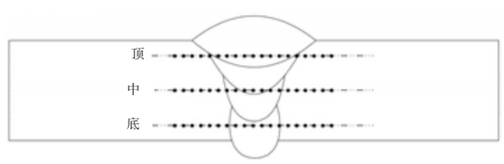


图3 GTAW焊接接头显微硬度测试点位置

Fig.3 Schematic diagram of microhardness testing location for GTAW welded joints

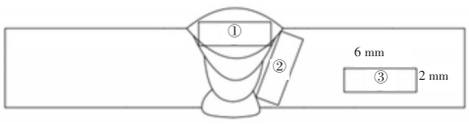


图4 GTAW焊接接头电化学试样取样位置

Fig.4 Sampling location of electrochemical specimens for GTAW welded joints

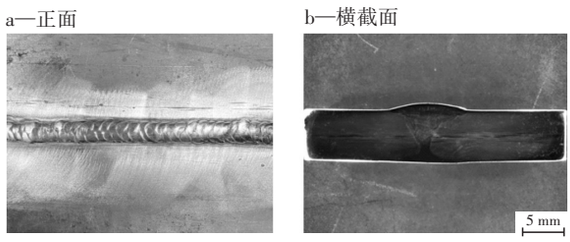


图5 2205双相不锈钢GTAW焊接接头宏观形貌

Fig.5 Macroscopic morphology of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

2 结果与讨论

2.1 接头宏观形貌分析

图5为2205双相不锈钢焊缝正面及横截面的宏观形貌图。由图5a可以看出,采用GTAW焊接2205双相不锈钢,焊缝呈典型的鱼鳞状,焊缝表面均匀光滑,无严重的氧化、飞溅及咬边等缺陷。2205双相不锈钢具有导热系数小,线膨胀系数大的物理性能,在焊接过程中极易产生收缩现象,由图5b可知,GTAW焊接接头变形不明显,焊接角变形量约为3°。由此可以看出,与其他电弧焊相比,GTAW焊接热输入量较小,减小了焊缝的热量集中,从而控制了焊接变形,最终焊缝成型较好。

2.2 接头显微组织分析

图6为2205双相不锈钢GTAW焊接接头的微观形貌。可以看出,焊接接头主要由母材、热影响区和焊缝构成。2205双相不锈钢母材具有清楚的轧制方向,母材中颜色较深的为铁素体,颜色较浅的为奥氏体,它们顺着轧制方向均匀分布(图6a)。靠近熔合线附近的是热影响区,其中铁素体和奥氏体失去了轧制时的方向性(图6b)。图6c~e是焊缝区,分别对应于焊缝的顶部、中部和底部。焊缝顶部中奥氏体比例较少,约为38.9%(图6c)。焊缝中部奥氏体比例增加,约为52.6%(图6d)。焊缝底部奥氏体比例增至68%(图6e)。焊缝为多层焊缝,新一层焊缝的形成,对前一层焊缝具有再加热的作用。双相不锈钢焊缝的凝固模式遵循F(铁素体)模式,随着温度的降低,先从液相中生成铁素体,随后铁素体向奥氏体转变,焊接热输入量越大,高温停留时间越长,这种转变越充分,奥氏体比例越高,晶粒尺寸越大。因此从焊缝顶部到底部,奥氏体相比例逐渐增加,晶粒逐渐粗化。由图6c~e可以看出,奥氏体形态有晶界奥氏体,晶内奥氏体和魏氏奥氏体,晶界奥氏体较为粗大,晶内奥氏体晶粒细小,魏氏奥氏体垂直于晶界奥氏体呈平行羽毛状。对于焊缝区和热影响区奥氏体晶粒尺寸,焊缝区明显大于热影响区。

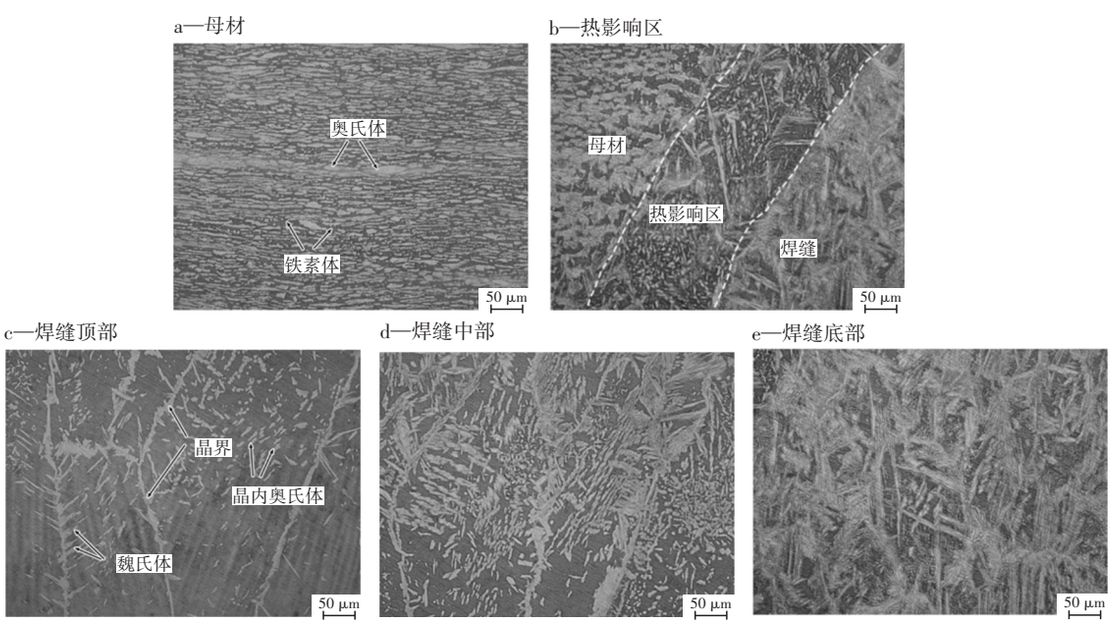


图6 2205双相不锈钢GTAW焊接接头微观形貌

Fig.6 Microstructure of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

为进一步确定2205双相不锈钢焊接接头显微组织构成,对其进行XRD衍射分析,结果见图7所示。可以看出,接头组织主要由铁素体相和奥氏体相组成,

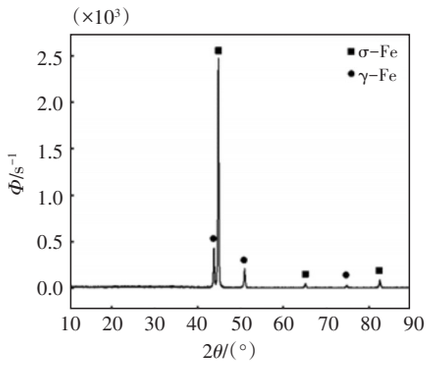


图7 2205双相不锈钢GTAW焊接接头XRD衍射图

Fig.7 XRD diffraction pattern of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

无第二相析出。由文献可知，双相不锈钢在焊接过程中易析出σ相、氮化物Cr_2N与CrN及二次奥氏体相γ_2等有害相，从而降低焊接接头的耐腐蚀性能和冲击韧性[10-13]。但是XRD衍射分析未发现第二相析出，可能是因为上述这些有害物相含量太少，未能检测到。

2.3 接头硬度分析

图8为双相不锈钢GTAW焊接接头焊缝顶部、中部和底部的硬度分布曲线图。可知，在接头上、中位置，焊缝区的硬度普遍高于母材和热影响区，而底部位置，焊缝的硬度与母材相当，略低于热影响区。焊缝顶部的硬度远高于中部和底部区域。分析认为，接头顶部的焊缝区域硬度显著增高是因为填充层焊接时，由于焊缝较宽，热输入要高于打底层，热输入增加使得焊缝在高温停留的时间变长，增加了铁素体晶粒长大，晶粒析出相增加，从而使焊缝硬度增加。而焊缝底部硬度下降是因为在焊接过程中，高温导致焊缝中的N烧损，N是固溶强化元素，N的烧损导致焊缝中心强化效果减弱，从而使得硬度降低。

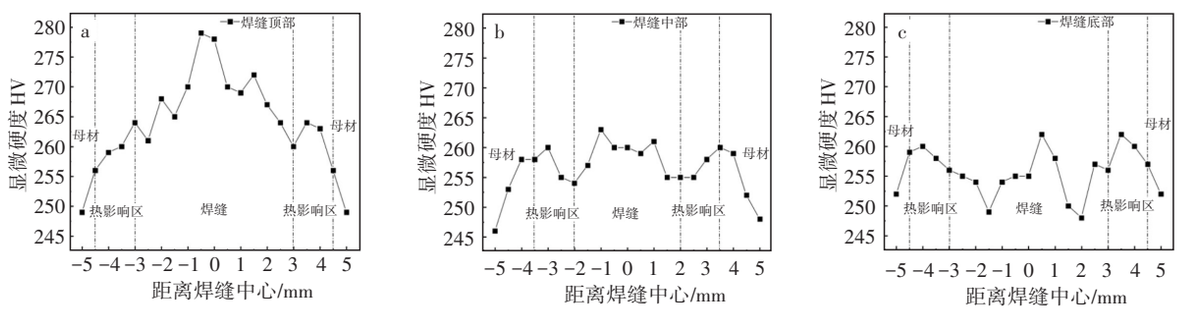


图8 2205双相不锈钢GTAW焊接接头不同区域的硬度分布曲线

Fig.8 Hardness distribution curves of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints in different regions

2.4 接头拉伸性能分析

表3为2205双相不锈钢GTAW焊接接头的拉伸试验结果。可知，3个断裂试样有2个断裂于母材，1个断裂于焊缝，这说明焊缝的平均抗拉强度较高，这是因为铁素体晶粒的生长方向平行于拉伸方向，与奥氏体晶粒交错分布且方向各异，铁素体的晶体表面由于奥氏体的存在得到扩展，晶体表面的扩展减少了两相间的位错，强化了晶界，进而增强了焊缝抗拉强度。

图9为2205双相不锈钢GTAW焊接接头的拉伸断口形貌。可以看出，断口上密集分布大量尺寸不一的韧窝，说明2205双相不锈钢GTAW焊接接头具有良好的塑性，拉伸断口为韧性断裂。

表3 2205双相不锈钢GTAW焊接接头的拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

序号	最大拉力/kN	抗拉强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/MPa	断裂位置
1	112.7	751.33	18.53%	3 609.59	母材
2	109.2	727.84	11.20%	3 680.69	焊缝
3	114.8	784.21	19.02%	3 601.76	母材

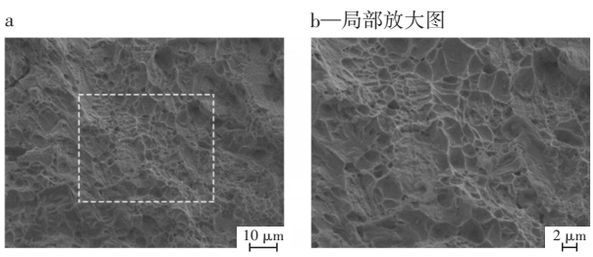


图9 2205双相不锈钢GTAW焊接接头(试样2)的拉伸断口形貌

Fig.9 Tensile fracture morphology of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joint (specimen 2)

2.5 接头冲击性能分析

夏比冲击试验的V型缺口分别开在焊缝区、熔合线和熔合线+2 mm，分别对应试样1~3#，将试样放置于-20 ℃的冲击低温槽内5 min。位于焊缝区的冲击韧性平均值为35 J，略小于熔合线的平均值37 J和熔合线+2 mm区的平均值37 J。这主要是因为焊缝区在多层焊接条件下，形成了热量积累，焊缝区内晶粒较粗大，奥氏体形态呈现较多的羽毛状，裂纹穿越这样组织需要较低的能量，呈现较低的冲击功，实际和热影响区

的冲击韧性相差不大。

图10为-20 ℃时V型缺口位于焊缝区和热影响区的冲击断口形貌。可以看出,断口均具有解理台阶和韧窝构成的混合式断裂形貌,图中韧窝数量不少,尺寸较小。图10a中解理台阶较图10b中大,说明缺口位于焊缝区的韧性略差一点。这与冲击功结果一致。

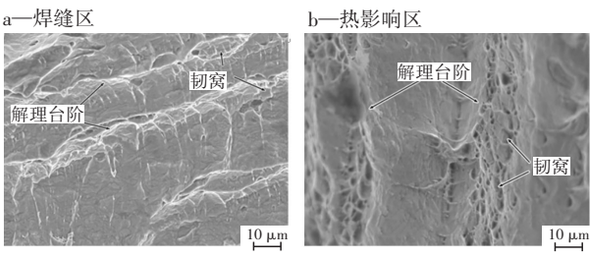


图10 2205双相不锈钢GTAW焊接接头的冲击断口形貌

Fig.10 Impact fracture morphology of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

2.6 接头动电位电化学极化曲线分析

图11为2205双相不锈钢GTAW焊接接头表面极化曲线。可知,2205双相不锈钢接头存在明显的钝化区,说明试样表面自发形成钝化膜,抑制接头的腐蚀。接头不同区域的腐蚀电位相差小,均在1.05 V_{SCE}附近,电压超过1.05 V_{SCE}以后,钝化膜被击穿,电流迅速增大,说明在此条件下双相不锈钢表面发生了稳态点

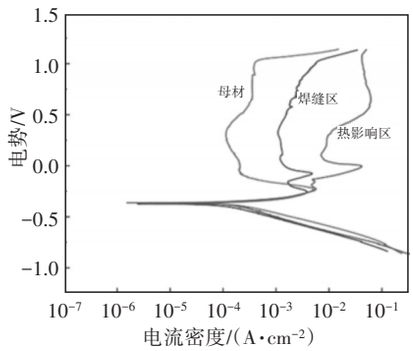


图11 电化学动电位极化曲线对比

Fig.11 Comparison of electrochemical potentiometric polarization curves

蚀。从腐蚀电流密度来看,接头的腐蚀电流密度越大,腐蚀速率最快,耐腐蚀性能越差,说明接头不同区域的耐蚀性顺序为母材>焊缝>热影响区。

2.7 接头腐蚀坑形貌分析

图12为2205双相不锈钢焊接接头的腐蚀形貌。由图12a、b可知,母材中奥氏体与铁素体沿轧制方向均匀分布,仅在奥氏体相间发现极个别微小的腐蚀坑,这说明铁素体相比奥氏体相更容易腐蚀,且两相交界处是腐蚀的薄弱区域。由图12c、d可知,焊缝区奥氏体相呈羽毛状,且零星出现了腐蚀坑,奥氏体与铁素体的边界线区域出现了少量的腐蚀坑。由图12e、f可知,

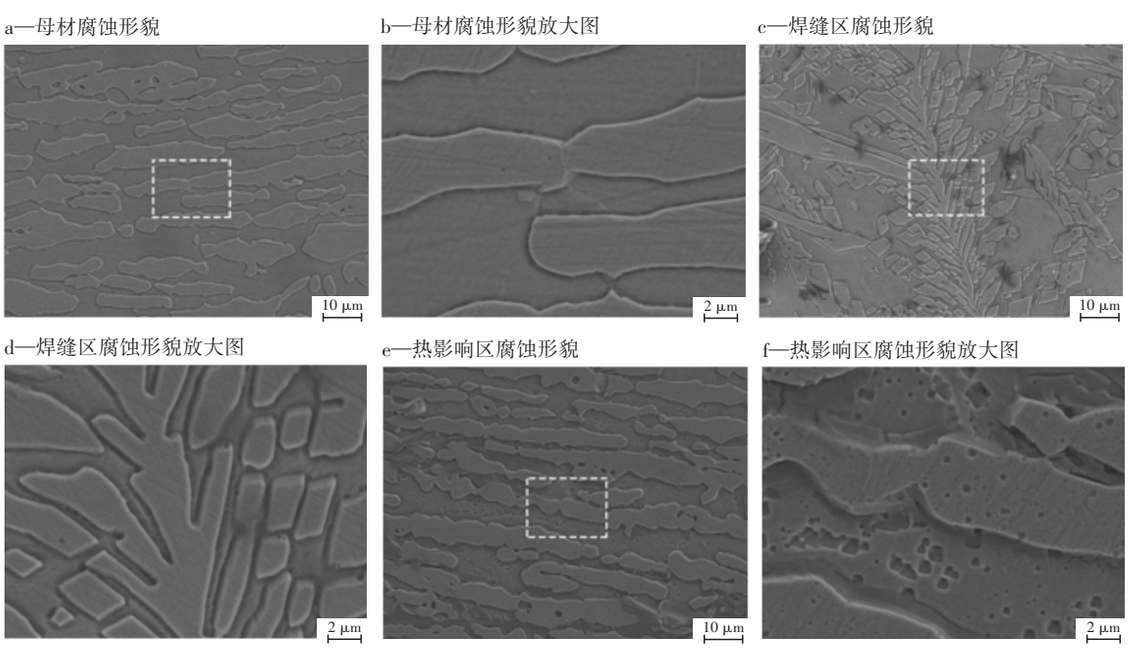


图12 2205双相不锈钢GTAW焊接接头的腐蚀形貌

Fig.12 Corrosion morphology of 2205 duplex stainless steel GTAW welded joints

热影响区中奥氏体与铁素体相中均出现了大量的腐蚀坑,且相比于奥氏体,铁素体相中的腐蚀坑直径更大,数量更多,腐蚀更严重,这与动电位极化曲线结果一致。

3 结 论

1) 2205双相不锈钢GTAW多层焊接头的焊缝成

形良好，焊接接头主要由铁素体相α和奥氏体相γ构成。焊缝从上至下，奥氏体相γ比例逐渐增加。

2）2205双相不锈钢GTAW多层焊焊缝硬度顶部>中部>底部，焊缝区略大于热影响区。焊接接头的抗拉强度约为760 MPa，拉伸的断裂位置位于热影响区。位于焊缝中心、熔合线和熔合线+2 mm区域的-20 ℃的冲击功均约为35 J。焊缝中心因有大量魏氏体奥氏体的存在，冲击韧性略差。

3）2205双相不锈钢GTAW焊接接头的耐蚀性顺序为母材>焊缝>热影响区，且奥氏体和铁素体两相交界处是腐蚀的薄弱区域。

4 参考文献

[1] 赵帅，廖柯熹，吴超，等. 双相不锈钢应力腐蚀行为及防护技术研究进展[J]. 表面技术，2022，51(8)：123-134.
ZHAO Shuai，LIAO Kexi，WU Chao，et al. Research progress on stress corrosion behavior and protection technology of duplex stainless steel[J]. Surface Technology，2022，51(8)：123-134.（in Chinese）

[2] NOGARA J，ZARROUK S J. Corrosion in geothermal environment：Part 1：Fluids and their impact[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2018，82：1333-1346.

[3] PU Juan，XIE Peng，LONG Weimin，et al. Effect of current on corrosion resistance of duplex stainless steel layer obtained by plasma arc cladding[J]. Crystals，2022，12(3)：341.

[4] 彭云，宋亮，赵琳，等. 先进钢铁材料焊接性研究进展[J]. 金属学报，2020，56(4)：601-618.
PENG Yun，SONG Liang，ZHAO Lin，et al. Research status of weldability of advanced steel[J]. Acta Metallurgica Sinica，2020，56(4)：601-618.（in Chinese）

[5] 沈伟，孙丽娟，李长荣，等. 固溶处理对S32707特超级双相不锈钢析出相、组织及性能影响[J]. 工程科学学报，2021，43(10)：1339-1345.
SHEN Wei，SUN Lijuan，LI Changrong，et al. Solution treatment effect on precipitates，microstructure，and properties of S32707 hyper-duplex stainless steel[J]. Chinese Journal of Engineering，2021，43(10)：1339-1345.（in Chinese）

[6] 李港志，祁凯，朱永飞，等. 2507超级双相不锈钢激光焊接接头组织和力学性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版)，2017，31(2)：148-152.
LI Gangzhi，QI Kai，ZHU Yongfei，et al. Study of microstructure and mechanical properties of 2507 super duplex stainless steel welded joint by laser welding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology：Natural Science Edition，2017，31(2)：148-152.（in Chinese）

[7] 李港志，李瑞峰，叶昕宁，等. 2507超级双相不锈钢激光焊接接头组织及耐蚀性研究[J]. 焊接技术，2017，46(12)：8-11.
LI Gangzhi，LI Ruifeng，YE Xinning，et al. Research on the microstructure and corrosion resistance of laser welded joints of 2507 super duplex stainless steel[J]. Welding Technology，2017，46(12)：8-11.（in Chinese）

[8] KAR A，BALAJI G，TAMANG S，et al. Mechanical characterization of gas tungsten arc welded super duplex stainless steel joint[J]. Materials Research Innovations，2018，22(1)：1-7.

[9] MAKHDOOM M A，AHMAD A，KAMRAN M，et al. Microstructural and electrochemical behavior of 2205 duplex stainless steel weldments[J]. Surfaces and Interfaces，2017，9：189-195.

[10] 师金凤，雷玉成. 2205双相不锈钢薄壁小径管钨极氩弧焊接头组织和性能[J]. 焊接，2021(9)：34-38.
SHI Jinfeng，LEI Yucheng. Microstructure and mechanical properties of GTAW joint of 2205 duplex stainless steel small-bore thin wall tube[J]. Welding and Joining，2021(9)：34-38.（in Chinese）

[11] PEZZATO L，LAGO M，BRUNELLI K，et al. Effect of secondary phases precipitation on corrosion resistance of duplex stainless steels[J]. Materials Science Forum，2016，879：1495-1500.

[12] SMUK O，SELLEBY M，BERGMAN B. The effect of copper on secondary phase precipitation in duplex stainless steel-a thermodynamic calculations approach[J]. Zeitschrift Für Metallkunde，2005，96(8)：918-923.

[13] 艾建阳，胡裕龙，王皓，等. 双相不锈钢及其焊接接头腐蚀研究进展[J]. 表面技术，2022，51(4)：77-91.
AI Jianyang，HU Yulong，WANG Hao，et al. Research progress on corrosion of duplex stainless steel and its welded joint[J]. Surface Technology，2022，51(4)：77-91.（in Chinese）