

金属表面处理剂对 2205 双相不锈钢 PAW 焊力学性能和腐蚀行为的影响

徐明亮¹, 乔红宇¹, 曹将栋^{1*}, 仇潞¹, 尚振一¹, 张腾²

(1.江苏航运职业技术学院, 江苏 南通 226010;
2.南通市精异圆机电标准件制造有限公司, 江苏 南通 226010)

摘要: 目的 提高等离子弧焊 (PAW) 焊接 2205 双相不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能。方法 采用金属表面处理剂为介质, 对 2205 双相不锈钢 PAW 焊接接头进行保护试验, 研究了金属表面处理剂对 2205 双相不锈钢 PAW 焊接接头力学性能和耐腐蚀性能的影响, 采用扫描电镜、能谱分析、维氏硬度仪、万能试验机和电化学工作站等, 对 2205 双相不锈钢原始试样、2205 双相不锈钢 PAW 焊无金属表面处理剂保护试样、2205 双相不锈钢 PAW 焊金属表面处理剂保护试样的性能进行分析。结果 在经过金属表面处理剂保护的 2205 双相不锈钢 PAW 焊中, 金属表面处理剂中化学元素扩散至材料表面, 扩散深度不小于 0.005 mm。与未采用金属表面处理剂保护焊缝相比, 焊缝硬度为 262HV~271HV, 提高了 25%, 热影响区硬度为 262HV~271HV, 提高了 15%。万能试验机拉伸试验分析结果表明, 双相不锈钢焊接接头抗拉强度提高了 20%, 有效提高了 2205 双相不锈钢 PAW 焊接头的力学性能。电化学试验结果表明, 在 2205 双相不锈钢金属表面处理剂保护 PAW 焊中, 动电位极化曲线的点蚀电位与自腐蚀电位差最大分别为 0.287 6 V 和 0.555 4 V。维钝电流密度最小, 交流阻抗分析结果表明其容抗弧半径最大, 钝化膜内层电阻最大为 $7.531 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 有效提高了其抗腐蚀能力。结论 经过金属表面处理剂保护的 2205 双相不锈钢 PAW 焊后, 焊接接头的力学性能和抗腐蚀性最好。

关键词: 双相不锈钢; 金属表面处理剂; PAW 焊; 力学性能; 抗腐蚀性能

中图分类号: TG174.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)20-0094-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.20.008

Effect of Metal Surface Treatment Agents on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel by PAW

XU Mingliang¹, QIAO Hongyu¹, CAO Jiangdong^{1*}, QIU Lu¹, SHANG Zhenyi¹, ZHANG Teng²

(1. Jiangsu Shipping College, Jiangsu Nantong 226010, China; 2. Nantong Jingyiyuan Electromechanical Standard Parts Manufacturing Co., Ltd., Jiangsu Nantong 226010, China)

收稿日期: 2023-11-01; 修订日期: 2024-02-04

Received: 2023-11-01; Revised: 2024-02-04

基金项目: 南通市基础科学研究面上项目 (JC22022052); 南通市自然科学基金面上项目 (JCZ2023033); 江苏航运职业技术学院科技类研究课题 (HYKY/2023B02); 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20231227)

Fund: Nantong Basic Science Research General Project (JC22022052); Nantong Natural Science Foundation General Project (JCZ2023033); Science and Technology Research Project of Jiangsu Shipping College (HYKY/2022B02); Jiangsu Natural Science Foundation General Project (BK20231227)

引文格式: 徐明亮, 乔红宇, 曹将栋, 等. 金属表面处理剂对 2205 双相不锈钢 PAW 焊力学性能和腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(20): 94-101.

XU Mingliang, QIAO Hongyu, CAO Jiangdong, et al. Effect of Metal Surface Treatment Agents on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel by PAW[J]. Surface Technology, 2024, 53(20): 94-101.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: Plasma arc welding (PAW) technology is a new protection method for the welding process of 2205 duplex stainless steel, in which new protection devices are added outside the welding process, and self-formulated metal surface treatment agents are used to protect the PAW joints of 2205 duplex stainless steel. The work aims to improve the mechanical properties and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel. With the metal surface treatment agent as the medium, the protection experiment was conducted on the 2205 duplex stainless steel PAW joint and the effect of metal surface treatment agent on the mechanical properties and corrosion resistance of the welded joint was studied. Scanning electron microscopy, energy spectrum analysis, Vickers hardness tester, universal testing machine, and electrochemical workstation were used to analyze the properties of original sample, protected sample without metal surface treatment agent and protected sample with metal surface treatment agent of 2205 duplex stainless steel during PAW. The experimental results of the three samples were compared. The comprehensive results analysis showed that 2205 duplex stainless steel was protected by a metal surface treatment agent. The elements in the metal surface treatment agent diffused into the material, forming a protective layer with a diffusion depth of no less than 0.005 mm. The Vickers hardness tester analysis showed that the weld hardness was 262HV-271HV, an increase of 25%, and the hardness in heat affected zone was 262HV-271HV, an increase of 15%. The tensile test analysis of the universal testing machine showed that the tensile strength of the duplex stainless steel welded joint increased by 20%, effectively improving the mechanical properties of the 2205 duplex stainless steel PAW joint. By electrochemical workstation experiments, a comprehensive analysis was conducted on the dynamic potential and AC impedance of the original 2205 duplex stainless steel sample, the sample without metal surface treatment agent, and the sample with metal surface treatment agent. The analysis showed that the polarization curves of the three samples had obvious passivation regions, and the passivation regions were relatively wide. Electrochemical tests showed that the pitting potential and the maximum difference between pitting potential and self-corrosion potential in the polarization curve of PAW with metal surface treatment agent protection for 2205 duplex stainless steel were 0.287 6 V and 0.555 4 V, respectively. The passive current density was the smallest, and the capacitance arc radius of the metal surface treatment agent PAW sample was the largest in AC impedance analysis. The maximum resistance of the inner layer of the passive film was $7.531 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. The corrosion resistance of the surface metal surface treatment agent PAW sample in the electrochemical test was the best. The main mechanism of PAW metal surface treatment agent protection welding for 2205 duplex stainless steel was that the electronegative atoms such as N, S, P, O in the metal surface treatment agent adsorbed onto the metal surface along with C and H atoms, changing the double layer structure beneath the coated metal surface and increasing the activation energy of metal ionization. As a result, during the transformation of ferrite to austenite, the austenite that could not be precipitated in the weld seam during cooling continued to precipitate, causing the fine or blocky distribution of austenite on the ferrite, while $\text{C}_3\text{H}_9\text{NO}$ acted as a surfactant to promote intermolecular bonding. During the welding process, the transformation between phases of 2205 duplex stainless steel was not completed, and the melt pool was not fully crystallized. Surfactants could promote the reaction of other chemical components of the metal surface treatment agent with 2205 duplex stainless steel, compensating for the chemical elements in the surface treatment agent into the weld seam. The final conclusion indicates that the mechanical properties and corrosion resistance of the 2205 duplex stainless steel PAW joint protected by the metal surface treatment agent are optimal.

KEY WORDS: duplex stainless steel; metal surface treatment agent; PAW; mechanical properties; corrosion resistance

由铁素体 (α) 和奥氏体 (γ) 构成的双相不锈钢是一种复合金属材料。它综合了铁素体不锈钢与奥氏体不锈钢的优势, 表现出卓越的耐腐蚀性、高强度以及优秀的塑性能力^[1-2], 广泛应用于石油化工、船海工程以及建筑行业等领域^[3]。双相不锈钢焊接时由于其 C、S、P 等元素含量较低, 所以焊接时出现裂纹的概率较低, 但是焊接热循环会导致脆化和敏化倾向性大, 因此在使用时往往需要进行热处理^[4]。在双相不锈钢焊接过程中, 热循环对焊头的微观结构、塑性和抗腐蚀能力产生了负面效果,

这是限制其使用的主要问题。因此, 如何实现高效焊接并确保焊接头的使用性能, 是需要解决的关键问题^[5-6]。

本文提出通过在焊接过程中加入金属表面处理剂, 研究表面保护介质对焊接接头微观组织的作用, 对比研究了 2205 双相不锈钢原始试样、2205 双相不锈钢 PAW 焊无金属表面处理剂试样、金属表面处理剂保护试样的组织结构与力学性能及电化学腐蚀行为, 揭示了金属表面处理剂保护对提高焊接接头力学性能及电化学腐蚀性能的影响机制。

1 试验

1.1 材料

试验母材选择 300 mm×100 mm×4 mm 的 I 型坡口 2205 双相不锈钢板，焊前用角向磨光机安装专用的不锈钢百叶轮，对待焊部位母材 20 mm 以内污物清理干净，漏出金属光泽。

试验采用 S3 2205 双相不锈钢，其化学成分和力学性能见表 1~2；试验用金属表面处理剂的化学成分为自配置，见表 3，通过正交试验分析得到最优的配比关系，金属表面处理剂 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ （硼砂）具有较强的润湿铺展作用，焊接时可以去除焊接面的氧化物，降低焊缝表面张力，促进黏合剂（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）、活性剂（ $\text{C}_3\text{H}_9\text{NO}$ ）、润滑剂（ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ）等的混合吸收，缓蚀剂的加入稀释了 KCl 对钢铁材料

腐蚀的影响，有效提高了防腐功能，同时 KCl 是一种金属热处理剂，而菜籽油具有很高的黏稠度和传热稳定性，广泛应用于工业热处理中，和 KCl 相互配合使用能够有效提高焊缝焊后热处理效果^[7]。

表 1 2205 双相不锈钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2205 duplex stainless steel wt.%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	N	Fe
0.18	0.52	1.51	22.53	5.64	3.16	0.001	0.022	1.17	Bal.

表 2 2205 双相不锈钢力学性能

Tab.2 Mechanical properties of 2205 duplex stainless steel

Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Hardness (HB)
≥450	≥620	≥25	≤290

表 3 金属表面处理剂化学成分

Tab.3 Chemical composition of metal surface treatment agents wt.%

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	NaNO_2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	KCl	$\text{C}_3\text{H}_9\text{NO}$	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	Inhibitor	Rapeseed oil
15	18	15	10	25	5	2	10

1.2 方法

试验试样为一对 300 mm×100 mm×4 mm 机械加工 I 型坡口 2205 双相不锈钢，利用 PAW 焊不填丝法进行焊接，焊接时首先将清理好的工件进行装配定位，定位焊在工件首尾两端 20 mm 以内，定位焊点长度为 10~15 mm，工件两端加引弧板和收弧板，然后将定位好的工件放置在 PAW 焊工作台上进行焊前模拟运行校准，保证焊缝的直线度，打开背面待焊焊缝保护氩气，将背面待焊焊缝空气排净，以保证背面焊缝单面焊双面成形质量，最后在引弧板开始焊接，收弧板结束。焊接时分 2 组，一组不加任何保护措施，另一组焊接时试样表面利用金属表面处理剂进行保护，具体保护方法如图 1 所示，试样 2205 双相不锈钢采用自动 PAW 焊，单面焊双面成形，采用纯度 99.99% 的 Ar 作为保护气体双面保护，电极为 $\phi 3.2$ mm 钍钨极，焊枪枪外加保护防护拖罩，防止金属表面处理剂溅入熔池中，焊接时将金属表面处理剂喷涂在焊接接头上，喷涂时焊接接头温度逐渐降低，利用温度传感器测量焊缝温度，进而控制金属表面处理剂用量。工艺参数如表 4 所示。

试验采用日本电子 JSM-6510 分析焊缝组织结构；使用济南中仪 HV-1000 维氏硬度仪测量试样表面硬度，测量前用不锈钢专用抛光轮对待测试样表面进行抛光，为保证结果的准确性，硬度测量时分别对焊接接头的上、中、下 3 个部位进行测量；使用河源 YF-900 电脑万能试验机对 2205 双相不锈钢进行拉伸测试，按 GB/T 228.1—2010 进行试验，对待测试样

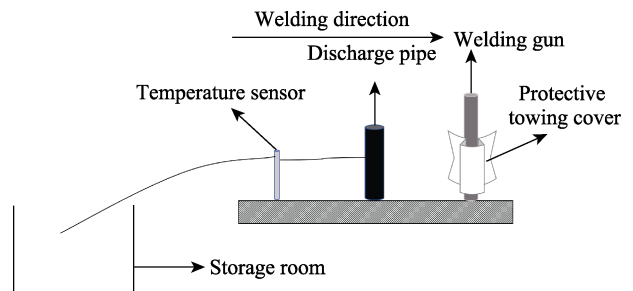


图 1 2205 双相不锈钢 PAW 金属表面处理剂保护图示
Fig.1 Protection diagram of metal surface treatment agent for 2205 duplex stainless steel during PAW

表 4 2205 双相不锈钢 PAW 焊金属表面处理剂保护主要工艺参数

Tab.4 Main process parameters of metal surface treatment agent protection for 2205 duplex stainless steel during PAW

Welding speed/ (mm·min ⁻¹)	Welding current/ A	Positive gas flow rate/ (L·min ⁻¹)	Negative gas flow rate/ (L·min ⁻¹)	Sensors measure temperature/ °C
135	150	8	6	380

利用万能压力机进行校平，利用平面磨床将焊缝磨平，然后利用线切割机取 200 mm×50 mm×4 mm 试样；采用武汉科恩特仪器股份有限公司电化学工作站进行电化学实验，采用传统的三电极体系，试样为工作电极、铂电极为辅助电极、甘汞电极为参比电极，溶液为 3.5%（质量分数）NaCl，将待测试样利用线切割机取 10 mm×10 mm×4 mm 试样，利用环氧树脂

对试样进行封装, 然后采用 800、1200、1500 和 2000 目砂纸进行逐级打磨, 打磨后利用超声波清洗设备在工业酒精中清洗, 用去离子水冲洗, 再用酒精脱水烘干, 将待测试样浸泡在 NaCl 溶液中 20 min 后进行电化学测试。

2 结果与分析

2.1 金属表面处理剂保护对焊缝组织结构的影响

图 2 为 2 种试样焊缝的扫描电镜形貌, 经金属表面处理剂处理的焊缝奥氏体相细碎分布在铁素体基体上, 主要原因是焊态下金属表面处理剂直接喷涂到焊接接头, 使试样温度下降速度加快, 金属表面处理剂中含有一定的缓蚀剂, 缓蚀剂在金属表面形成一层有效的吸附膜, 缓蚀剂中含有大量的 N、S、P、O 等电负性原子, 会与原子团和 C、H 原子结合吸附在金属表面, 改变涂覆金属表面处理剂下的金属表面的双电层结构, 提高了金属离子化的活化能, 进而在铁素体向奥氏体转变时, 焊缝冷却时来不及析出的奥氏

体会继续析出, 导致奥氏体细碎或以块状的形式分布在铁素体上^[8-9]。未保护试样两相分布规则, 且奥氏体明显多于铁素体。

图 3 为金属表面处理剂焊缝能谱分析图谱, 试验时取 5 mm×5 mm 的焊缝试样, 先对焊缝表面进行振动式抛光, 然后在中心点进行能谱分析, 如图 3 所示, 图 3b 为 5 mm×5 mm 试样利用平面磨床进行磨削 0.005 mm 的 EDS 图谱。图 3a 为未磨削焊缝 EDS 图谱, Cl、K、Na 元素质量分数接近 50%, 图 3b 为磨削焊缝 EDS 图谱, Cl、K、Na 元素质量分数只有不到 25%, 减少了 50%, 对比 2205 双相不锈钢, 在 EDS 图谱中可以明显观察到 2205 双相不锈钢有外来元素扩散到金属表面, 另外 C₃H₉NO 作为表面活性剂, 促进了分子间的键结合, 在焊接过程中 2205 双相不锈钢相之间还没有完成转换, 熔池还未完全结晶, 表面活性剂会促使金属表面处理剂的其他化学成分与 2205 双相不锈钢发生反应, 使表面处理剂中的化学元素补偿到焊缝中。另外, 焊接热会使大部分金属表面处理剂中的化学元素和 2205 双相钢少部分化学元素烧损, 因此会出现 EDS 图谱中的现象。

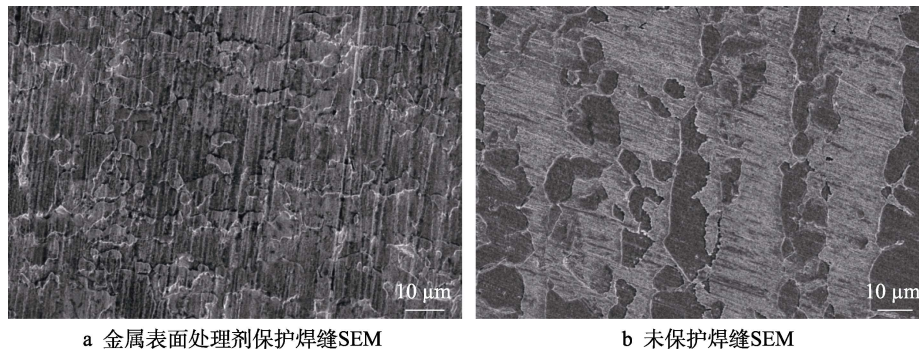


图 2 不同试样焊缝的 SEM 形貌图
Fig.2 SEM morphologies of weld seams of different samples: a) SEM of weld seam protected by metal surface treatment agent; b) SEM of unprotected weld seam

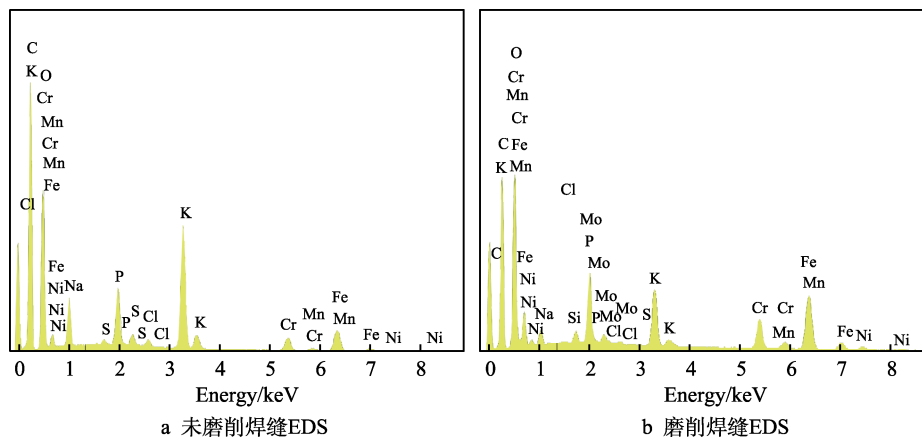


图 3 金属表面处理剂保护焊缝的 EDS 能谱分析
Fig.3 EDS analysis for metal surface treatment agent protected weld seam: a) EDS of unground weld seam; b) EDS of ground weld seam

2.2 金属表面处理剂保护对力学性能影响

2.2.1 金属表面处理剂保护的焊接接头表面硬度分布

维氏硬度测量区分别为试样母材 (BM)、热影响区 (HAZ) 和焊缝区 (WM)，图 4 为维氏硬度测量结果，反映了试样焊接接头上、中、下各部位的硬度变化情况。未采用金属表面处理剂保护试样 WM 硬度普遍低于 BM 和 HAZ 硬度，HAZ 硬度也低于 BM 硬度，但是 HAZ 硬度与 BM 硬度差距较小，金属表面处理剂试样 WM 硬度普遍高于 BM 和 HAZ 硬度，同时 HAZ 硬度略高于 BM 硬度。从图 4a 可以看出，BM 硬度有一定波动，主要是因为受到双相钢 α 与 γ 的影响，因为双相钢的组织为轧制状态，而 γ 硬度小于 α 硬度^[10]，测量时，维氏硬度仪压头可能单一作用在了 γ 上，因此会出现测试硬度值波动的现象。

未采用金属表面处理剂保护试样 (图 4b) 的 WM 硬度普遍比 BM 硬度低，维氏显微硬度值主要集中在 210HV~220HV。试样焊接接头硬度下降主要是因为由于焊接热循环，焊接时高温的持续会使双相不锈钢中的 N 烧损，且焊接过程中是没有额外的 N 进行补充的，因为 N 是双相不锈钢主要的固溶强化元素，N 的烧损会使焊接接头强化效果明显减弱，因而 WM 硬度低于 BM 和 HAZ 硬度。同时 HAZ 由于受到持续高温的作用，也会有部分 N 元素烧损，但是烧损量明显远低于 WM。WM 硬度的降低，虽然在一定程度上提高了 BM 金属的塑性，但是也会降低 WM 的强度，这也是在拉伸试验时 WM 断裂的原因之一。对于未采用金属表面处理剂试样 HAZ，受焊接热循环的影响，一方面组织中 α 的增加和长大会使其硬度高于 WM 硬度，另一方面由于受到焊接高温的影响，HAZ 组织中部分 N 元素会烧损但烧损量较 WM 要少，造成 HAZ 强度和硬度下降，塑性提高^[11-13]。

由图 4a 可以看出，金属表面处理剂保护试样 WM 和 HAZ 硬度均高于 BM 硬度，一方面由于 WM 组织

冷却后得到的 γ 细碎分布在 α 基体上，有一定的细晶强化和晶界强化作用，且 α 相所占比例大于 γ 。另一方面这是因为焊接接头经过金属表面处理剂保护，相当于经过了一定的淬火热处理，热处理时元素在 γ - α 两相中的分配系数不同，随冷却时间的延长，焊接接头的温度降低， γ 形成的元素得到充分扩散， γ 含量逐渐增加，进而达到两相平衡的状态。但是由于温度的剧烈变化， γ 含量得到增加，而组织又粗大化，因此 BM 的硬度增大。

因此在多方面的影响因素下，试样因为冷却介质不同，组织不一，焊接接头的硬度波动也不一样。结合不同试样保护方式下焊接接头温度大小和变化可以看出，试样焊接接头冷却速度快的 WM 和 HAZ 硬度比 BM 硬度高，而冷却速度慢的 WM 和 HAZ 硬度低于 BM 硬度。

2.2.2 金属表面处理剂保护的焊接接头拉伸变形行为

按照常温金属拉伸试验标准 GB/T 228.1—20102205 对双相不锈钢进行拉伸测试，研究发现，不同成分的多组分金属或合金中各元素之间的微观结构变化可能引发其多阶段的加工硬化现象^[14-16]。以双相不锈钢为例，当 2 种成分间的硬度差距很小时，即使是在变形过程中，如果奥氏体的孪晶作用发生变化，也可能影响到材料的加工硬化程度^[17-19]。此外，因为存在着 2 种成分间硬度的差异，在变形过程中难以有效地释放局部应力，所以降低了材料的塑性^[20-21]。

图 5 为 2205 双相不锈钢拉伸-变形曲线，从拉伸试验结果可以明显看出，金属表面处理剂保护试样拉伸载荷要比原始试样和未采取任何保护试样的都大，同时位移也增大，从屈服变形阶段到塑性变形阶段再到失稳断裂阶段，3 组金属表面处理剂试样断裂点的应力提高了近 20%，而且屈服变形和塑性变形时间延长。结合前期分析，金属表面处理剂试样显微组织奥氏体细碎分布在铁素体上，焊缝硬度要比母材基体硬

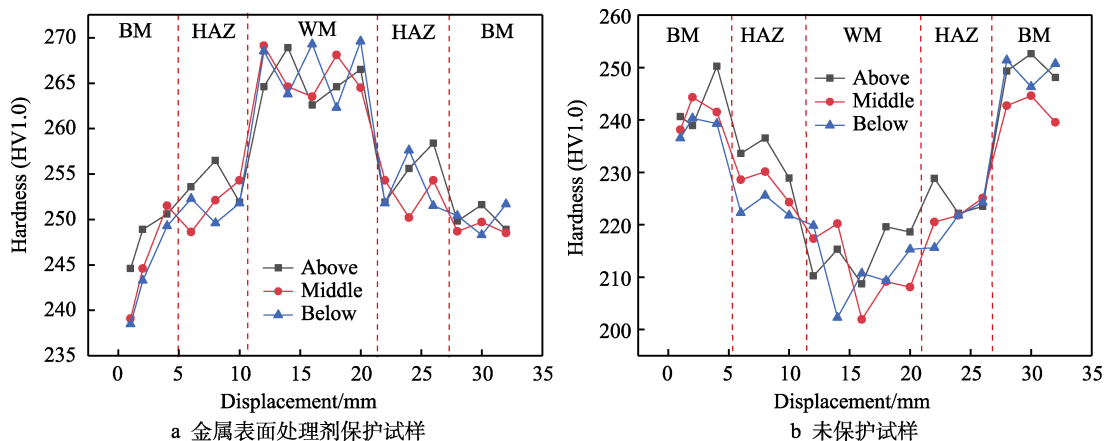


图 4 不同试样焊接接头的维氏硬度分布

Fig.4 Vickers hardness distribution of different weld seam: a) sample protected by metal surface treatment agent; b) unprotected sample

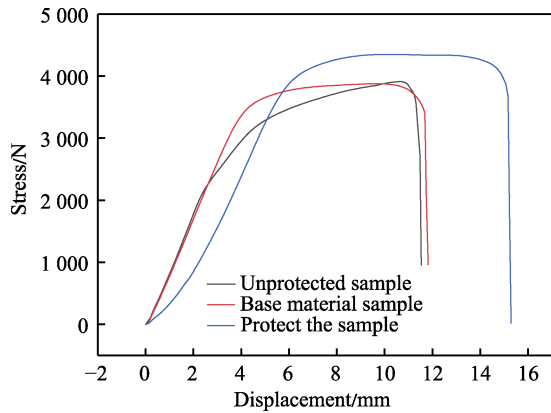


图 5 2205 双相不锈钢拉伸-变形曲线

Fig.5 Tensile deformation curve of 2205duplex stainless steel

度高 15%，金属表面处理剂化学元素过渡到焊缝中，起到表面晶粒细化作用，因此会出现以上现象。

2.3 金属表面处理剂保护对电化学腐蚀性能的影响

2.3.1 动电位极化曲线

2205 双相不锈钢不同试样在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中的动电位极化曲线如图 6 所示。可以看出，曲线形状大体相同，具有明显的钝化区域，且钝化区域都比较宽，而根据学者的研究，这是金属物件首先开始出现点状腐蚀的位置，数值越高说明该物质发生孔蚀的可能性越小^[22-24]。

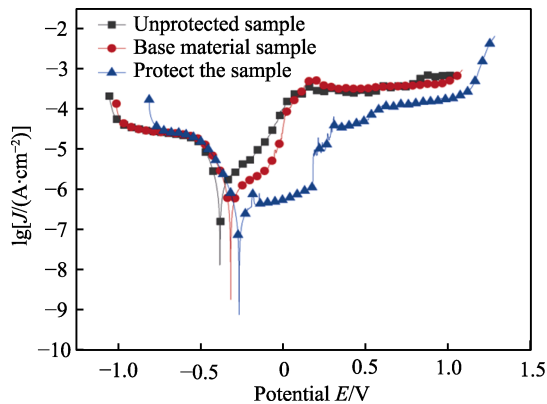


图 6 2205 双相不锈钢不同试样的动电位极化曲线

Fig.6 Dynamic potential polarization curves of different specimens of 2205 duplex stainless steel

2205 双相不锈钢表面的防护层的均质性和稳固性与该材料中 α 相和 γ 相密不可分。如果这 2 种相的分布相对平衡且比例接近 1 : 1，那么这种情况下其防护层会保持较稳定的状况，能有效地阻止双相钢点蚀现象的发生。然而，若双相钢中的 α 相和 γ 相分布失衡，则可能引发防护层被破坏的情况，进而削弱了双相钢对抗点蚀的能力。各种试样 2205 双相不锈钢的动电位极化曲线参数如表 5 所示。点蚀发生所对应的电位为点蚀电位，母材试样、未保护焊缝试样

和金属表面处理剂保护焊缝试样的点蚀电位分别为 0.129 4、0.052 5、0.287 6 V。金属表面处理剂保护试样点蚀电位最高，表明该保护试样焊缝 2505 双相钢发生点蚀的倾向较低。由电化学特性可知，点蚀电位 (E_b) 与自腐蚀电位 (E_{corr}) 之差是评价材料耐腐蚀性能的主要依据，其数值越大，耐蚀性能越好，在表 5 中，金属表面处理剂的点蚀电位 (E_b) 与自腐蚀电位 (E_{corr}) 之差最高，说明金属表面处理剂保护试样的耐腐蚀性能最好。此外，金属表面处理剂中含有大量的耐腐蚀元素，这些物质元素在焊接过程中一部分吸附于钢的表面或扩散至钢中，故金属表面处理剂保护焊缝有较好的抗腐蚀能力。从表 5 可以发现，金属表面处理剂试样的腐蚀速率最小，自腐蚀电位最大，自腐蚀电流最小，因此材料钝化膜的溶解速率最小，这意味着该试样上的钝化层分解速度降低了，这是由于点蚀电位是衡量材料抗腐蚀能力的关键指标，同时也是决定材料腐蚀趋势的重要因素。

表 5 不同焊接接头试样的动电位极化参数
Tab.5 Dynamic potential polarization parameters of different welded joint samples

Sample	E_b/V	E_{corr}/V	E_b-E_{corr}/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	Corrosion rate/ ($mm \cdot a^{-1}$)
Base material sample	0.129 4	-0.319 1	0.448 5	2.05×10^{-6}	0.024 1
Unprotected sample	0.052 5	-0.383 7	0.436 2	5.56×10^{-6}	0.652 7
Protect the sample	0.287 6	-0.267 8	0.555 4	6.93×10^{-7}	0.008 1

从 3 组试验试样的动电位极化曲线明显可以观察到 3 种试样钝化电流密度的区别，3 种试样在 3.5% (质量分数，下同) NaCl 溶液中均处于溶解状态，因为 2205 双相不锈钢中含有大量的 Cr、Ni、Mo 等易钝化元素，所以 3 种试样极化时均能进入钝化状态，但是与其他 2 个试样相比，金属表面处理剂保护试样因金属表面处理剂中含有一定的耐腐蚀化学成分，而更加容易钝化，极化时致钝电流最小，未保护试样的致钝电流最大，主要原因是焊接时焊接热循环对试样中 Cr、Ni、Mo 等耐腐蚀元素烧损，而金属表面处理剂试样焊接时，由于有保护措施，减少了焊接热循环对试样耐腐蚀元素烧损的量，而金属表面处理剂中还含有大量的耐腐蚀元素，因此出现了此试验中的结果，各试样按耐腐蚀性能由大到小的顺序依次为：金属表面处理剂保护试样、基体母材试样、未保护焊接试样。

2.3.2 交流阻抗

2205 母材原始试样、PAW 焊未采用金属表面处理剂保护试样和金属表面处理剂保护试样的交流阻抗图如图 7 所示，可以很明显看出金属表面处理剂试

样的容抗弧半径最大。一般情况下,金属材料的抗蚀性能越强,电荷在金属-溶液界面转移时受到的阻力越强,同时也意味着容抗弧半径越大^[25]。从图7中可以分析出容抗弧半径的改变趋势,金属表面处理剂保护焊缝试样的阻抗弧大于母材试样阻抗弧大于未保护试样阻抗弧,说明金属表面处理剂的抗蚀性能最强。图8为3种试样2205双相不锈钢的等效电路图,

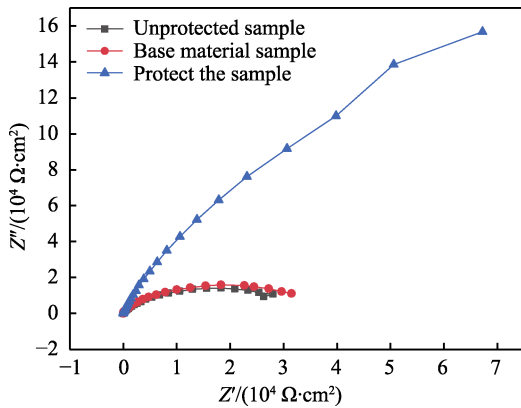


图7 不同试样交流阻抗分析图
Fig.7 AC Impedance analysis of different samples

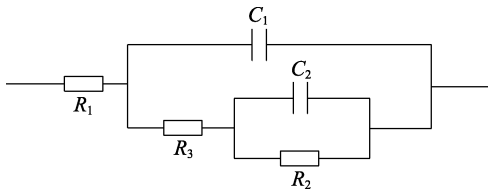


图8 交流阻抗等效电路图
Fig.8 Equivalent circuit diagram of ac impedance

R_1 为溶液电阻, C_1 为双电层电容, R_3 为电荷转移电阻, 反应电荷是体现金属发生腐蚀反应快慢的重要指标, 同时也体现了电化学反应过程中透过电极和电解质溶液两相界面迁移难易程度, R_3 高意味着电荷迁移过程中所受的阻力强, 材料的耐腐蚀性好; C_2 为钝化膜电容, R_2 为钝化膜电阻。

表6为2205双相不锈钢不同试样等效电路拟合数据。由表6可见,金属表面处理剂试样溶液电阻 R_1 较小,说明其对试验体系的影响较小;钝化膜内层电阻 R_2 的值远大于外层电阻 R_3 ,表明对双相不锈钢基体起主要保护作用的为钝化膜内层;金属表面处理剂试样的 R_2 最大,一般情况下, R_2 越大,电荷迁移所受的阻力越强,表明材料的耐腐蚀性能越好^[26]; R_2 的值越大,其保护能力越强,因此与其他2组试样相比,金属表面处理剂试样的耐蚀性最高。极化电阻是表征金属材料耐蚀性重要参数,在图8所示的等效电路中,极化电阻 $R_0=R_3+R_2$ 。由表6数值计算可知,3种试样按极化电阻从大到小的顺序依次为金属表面处理剂试样、未保护试样和母材原始试样,金属表面处理剂试样的 R_0 值最大,说明金属表面处理剂试样的耐蚀性能最好。试样表面的钝化膜性能是材料抗腐蚀性能的重要表征,金属表面处理剂试样的 C_1 和 C_2 数值、 R_3 和 R_2 数值都是最大的,进一步证明了金属表面处理剂试样抗蚀性能最好。由于金属表面处理剂保护试样的 R_2 最高,此刻离子迁移时所受阻力最大,其抗蚀能力最佳;而原始试样和未保护试样的 R_2 较小,表明两试样双相钢的抗蚀性能下降,这与动电位扫描的结论相同。

表6 2205双相不锈钢不同试样等效电路拟合数据表

Tab.6 Equivalent circuit fitting data for different samples of 2205 duplex stainless steel

Sample	$R_1/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_1/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_3/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_2/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_2/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
Unprotected sample	9.013	3.216×10^{-5}	1 796	4.713×10^{-5}	5.624×10^5
Base material sample	8.635	3.132×10^{-5}	1 988	4.024×10^{-5}	6.192×10^5
Protect the sample	7.088	2.186×10^{-5}	3 224	3.213×10^{-5}	7.531×10^5

3 结论

1) 2205双相不锈钢PAW焊金属表面处理剂化学元素扩散至金属中,改变了表面性质。

2) 与未采用金属表面处理剂2205双相不锈钢PAW焊相比,金属表面处理剂保护试样焊缝表面硬度提高了25%,热影响区表面硬度提高了15%,未采取保护试样焊缝和热影响区硬度明显降低。

3) 与未采用金属表面处理剂2205双相不锈钢PAW焊相比,金属表面处理剂试样抗拉强度提高了近20%,屈服大幅度提升。

4) 电化学试验结果表明,与未采用金属表面处理剂2205双相不锈钢PAW焊相比较,金属表面处理

剂试样抗蚀性能大幅度提高,综合抗蚀性能提高近20%。

参考文献:

[1] 陆世英,张延凯,康喜范. 不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.
LU S Y, ZHANG Y K, KANG X F. Stainless Steel[M]. Beijing: Atomic Press, 1995.

[2] 陈兴润,潘吉祥. 2205双相不锈钢焊接接头组织与性能研究[J]. 焊接, 2014(10): 54-57.
CHEN X R, PAN J X. Microstructures and Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joint[J]. Welding & Joining, 2014(10): 54-57.

[3] 孙文山. 双相不锈钢的进展及其在工业中的应用[J].

- 兵器材料科学与工程, 2001, 24(4): 49-53.
- SUN W S. Progress in Duplex Stainless Steel and Its Application in Industry[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(4): 49-53.
- [4] OREDSSON J, ERNHARDSSON S B. Performance of High Alloy Austenitic and Duplex Stainless Steels in Sour Gas and Oil Environments[J]. Materials Performance, 1983, 22(1): 35-42.
- [5] 王扬. 2205 双相不锈钢焊接接头组织和力学性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- WANG Y. A Study on the Microstructure and Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joints[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [6] KORDATOS J D, FOURLARIS G, PAPANIMITRIOU G. The Effect of Cooling Rate on the Mechanical and Corrosion Properties of SAF 2205 (UNS 31803) Duplex Stainless Steel Welds[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(3): 401-408.
- [7] 蒋海珍. 新型水溶性防锈抗磨多功能添加剂的研究[D]. 上海: 上海大学, 2006.
- JIANG H Z. Study on a New Water-soluble Multifunctional Additive for Rust Prevention and Wear Resistance[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006.
- [8] 李伟, 栗卓新, 李国栋, 等. 固溶处理对双相不锈钢 FCAW 焊接接头性能的影响[J]. 电焊机, 2008, 38(11): 22-26.
- LI W, LI Z X, LI G D, et al. Influence of Solution Treatment on FCAW Welding Joint of Duplex Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(11): 22-26.
- [9] 申艳丽, 孟庆森, 张丙静, 等. 焊接工艺对 2205 双相不锈钢焊接接头综合性能的影响[J]. 焊接, 2007(6): 47-52.
- SHEN Y L, MENG Q S, ZHANG B J, et al. Influence of Welding Technology on Properties of 2205 Dual Phase Stainless Steel[J]. Welding & Joining, 2007(6): 47-52.
- [10] SIEURIN H, SANDSTRÖM R. Austenite Reformation in the Heat-Affected Zone of Duplex Stainless Steel 2205[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 418(1/2): 250-256.
- [11] 曾洪涛. 2205 双相不锈钢在热浓缩海水中的点蚀行为研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- ZENG H T. Study on Pitting Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in Hot Concentrated Seawater[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021.
- [12] 袁宝林. 双相不锈钢中($\alpha+\gamma$)组织对氢脆和应力腐蚀开裂敏感性的影响[J]. 上海钢研, 1985(5): 91-92.
- YUAN B L. Dual Phase Stainless Steel ($\alpha+\gamma$) Effect of Microstructure on Sensitivity to Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking[J]. Shanghai Steel Yan, 1985(7): 91-92.
- [13] 乔园园. 2205 双相不锈钢腐蚀性能的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- QIAO Y Y. Study on Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [14] PARK K T, HAN S Y, AHN B D, et al. Ultrafine Grained Dual Phase Steel Fabricated by Equal Channel Angular Pressing and Subsequent Intercritical Annealing[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(9): 909-913.
- [15] PARK K T, HAN S Y, SHIN D H, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructures and Tensile Properties of Ultrafine Grained C-Mn Steel Containing 0.34 Mass% V[J]. ISIJ International, 2004, 44(6): 1057-1062.
- [16] PARK K T, LEE Y K, SHIN D H. Fabrication of Ultrafine Grained Ferrite/Martensite Dual Phase Steel by Severe Plastic Deformation[J]. ISIJ International, 2005, 45(5): 750-755.
- [17] 王凯, 李天庆, 陈阳, 等. 超级双相不锈钢 2507 焊接工艺研究现状[J]. 精密成形工程, 2022, 14(12): 160-169.
- WANG K, LI T Q, CHEN Y, et al. Research Status of Welding Process on Super Duplex Stainless Steel 2507[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(12): 160-169.
- [18] 张志强, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 双相不锈钢多层多道焊接接头微观组织表征[J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 79-82.
- ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Microstructure Characterization of Duplex Stainless Steel Multi-Pass Welded Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 79-82.
- [19] VERCAMMEN S, BLANPAIN B, DE COOMAN B C, et al. Cold Rolling Behaviour of an Austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-Steel: The Importance of Deformation Twinning[J]. Acta Materialia, 2004, 52(7): 2005-2012.
- [20] MA E. Instabilities and Ductility of Nanocrystalline and Ultrafine-Grained Metals[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(7): 663-668.
- [21] YANG Y H, YAN B, LI J, et al. The Effect of Large Heat Input on the Microstructure and Corrosion Behaviour of Simulated Heat Affected Zone in 2205 Duplex Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53(11): 3756-3763.
- [22] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- CAO C N. Principle of Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [23] 侯瑞鹏, 任万里. 热处理对 2205 双相不锈钢耐腐蚀性能的影响[J]. 山西冶金, 2004, 27(3): 24-25.
- HOU R P, REN W L. Effect of the Heat Treatment on Corrosion Property of Duplex Stainless Steel 2205[J]. Shanxi Metallurgy, 2004, 27(3): 24-25.
- [24] 苗伟行, 胡文彬, 高志明, 等. 304 不锈钢在海洋环境混凝土模拟液中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(6): 543-548.
- MIAO W H, HU W B, GAO Z M, et al. Corrosion Behavior of 304SS in Simulated Pore Solution of Concrete for Use in Marine Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(6): 543-548.
- [25] TAVEIRA L V, MONTEMOR M F, DA CUNHA BELO M, et al. Influence of Incorporated Mo and Nb on the Mott-Schottky Behaviour of Anodic Films Formed on AISI 304L[J]. Corrosion Science, 2010, 52(9): 2813-2818.
- [26] TURNBULL A, BEYLEGAARD E L, HUTCHINGS R B. Hydrogen Transport in SAF 2205 and SAF 2507 Duplex Stainless Steels[J]. Materials Science, 2009, 21(2): 68-79.