

终轧温度对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板组织和性能的影响

肖丰强^{1,2,3}, 王东坡^{1,2,✉}, 胡文彬¹, 崔雷^{1,2}, 高志明¹, 周兰聚⁴

1 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350

2 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

3 山东省高新技术创业投资有限公司, 济南 250101

4 山东钢铁集团有限公司, 济南 250101

本工作以 2205 双相不锈钢和 Q235B 低碳钢为研究对象, 采用 Gleeble3800 热模拟实验机将其压缩为复合板, 并通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、力学及电化学性能测试仪器研究了终轧温度对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板显微组织、剪切强度和耐腐蚀性能的影响规律。结果表明, 在压下率一定的条件下, 终轧温度在 850~970 °C 范围内, 2205 和 Q235B 均能得到良好的结合界面, 靠近复合界面的 2205 侧形成了一个奥氏体长条带, Q235B 侧形成了宽度 39.1~47.4 μm 的脱碳区域。随着终轧温度的降低, 2205/Q235B 双相不锈钢复合钢板的剪切强度显著提高, 终轧温度为 850 °C 时剪切强度最高, 达到 445 MPa。随着终轧温度的升高, 2205 双相不锈钢中 δ 铁素体含量逐渐增加, 970 °C 时, δ 铁素体含量达到最大值 45.3%, 2205 不锈钢表面的耐腐蚀性能最佳。但随着终轧温度的升高, 2205/Q235B 结合界面处碳钢侧腐蚀深坑宽度由 35.56 μm 增大到 49.44 μm, 应注意腐蚀防护。

关键词 2205/Q235B 复合板 终轧温度 铁素体 极化曲线 剪切强度

中图分类号: TG335.81 文献标识码: A

Effect of Final Rolling Temperature on Microstructure and Properties of 2205/Q235B Duplex Stainless Steel Clad Plate

XIAO Fengqiang^{1,2,3}, WANG Dongpo^{1,2,✉}, HU Wenbin¹, CUI Lei^{1,2}, GAO Zhiming¹, ZHOU Lanju⁴

1 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

2 Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China

3 Shandong High-Tech Investment Corporation, Jinan 250101, China

4 Shandong Iron & Steel Group Co., Ltd., Jinan 250101, China

Based on the 2205 duplex stainless steel and Q235B mild steel as the research object, the Gleeble3800 hot simulation experiment machine was used to compress them into a clad plate. The influence law of the final rolling temperature on the microstructure, shear strength and corrosion resistance of the 2205/Q235B duplex stainless steel clad plate was investigated by the optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), mechanical and electrochemical performance testing. The results showed that, under the certain reduction ratio, 2205 and Q235B could obtain a good bonding interface when the final rolling temperature was within the range of 850—970 °C. A long austenitic strip was formed on the side of 2205 near the interface, and the decarburization zone with width of 39.1—47.4 μm was formed on the side of Q235B. With the decrease of the final rolling temperature, the shear strength of 2205/Q235B duplex stainless steel clad plate was significantly increased. When the final rolling temperature was 850 °C, its shear strength was the highest, reaching 445 MPa. With the increase of the final rolling temperature, the δ ferritic content of 2205 duplex stainless steel was increased gradually. The δ ferritic content of the 2205 stainless steel reached the maximum value of 45.3% at 970 °C, thus leading to the best corrosion resistance of the surface. However, with the increase of the final rolling temperature, the corrosion pit width of carbon steel side at the interface of 2205/Q235B increased from 35.56 μm to 49.44 μm. Therefore, the corrosion protection of the cross-section should be paid attention to.

Key words 2205/Q235B clad steel plate, final rolling temperature, ferrite, polarization curve, shear strength

0 引言

金属复合板既具有复层材料耐腐蚀、耐热、耐磨损等性能, 又具有基层材料的强度和刚度。其中, 不锈钢复合板是通过一定的工艺在低碳或低合金钢板上结合一层具有高耐腐蚀性不锈钢的层状复合材料, 其在金属复合板中所占比例超过 80%^[1]。

目前, 国内外一部分学者主要针对奥氏体不锈钢复合板复合界面组织及成分等开展了研究工作。丁海民等采用热轧复合方法轧制了 304+Q235B 不锈钢复合板, 研究了热轧不锈钢-碳钢复合界面的组织形貌、成分、硬度变化及结构特征。研究发现, 由于元素扩散及碳化物的生成, 复合界面附近的硬度升高^[2]。Zina 等研究了 316 奥氏体不锈钢与 A283 低碳

钢热轧复合板的显微组织、显微硬度和力学性能, 发现 316 奥氏体不锈钢与 A283 低碳钢可以实现良好的冶金复合, 并且与奥氏体不锈钢热轧复合有利于提高低碳钢母材的力学性能^[3]。还有许多学者针对奥氏体不锈钢复合板的复合轧制工艺开展了大量的研究工作。谢广明等采用真空轧制法将 6 mm 厚的奥氏体不锈钢板与 50 mm 厚的碳钢板复合, 得到了高质量的不锈钢复合板, 不锈钢-碳钢界面的剪切强度高达 467 MPa^[4]。李龙等通过真空热轧工艺制备了 304 不锈钢/Q345R 低碳钢复合板, 研究了变形量及真空度对界面结合性能的影响规律。结果表明, 当轧制总变形量从 35% 增至 75% 时, 复合板的剪切强度大约可增加 100 MPa; 当真空度由 0.1 Pa 变为 20 Pa 时, 剪切强度由 440 MPa 降至 350 MPa 左右^[5]。陈少航通过复合板轧制的数学模型和有限元模型研



请扫描二维码访问本文网络展示页面以获取补充信息 (Supplementary Information)

基金项目: 山东省泰山产业领军人才工程项目 (SF1503302301)

This work was financially supported by Shandong Taishan Industry Leading Talents Project (SF1503302301).

究了热轧工艺参数与界面结合强度之间的关系,发现 1 300 ℃时复合板界面的厚度最大,达到 4.07 μm;界面剪切强度也最大,为 288 MPa^[6]。

上述研究中,无论是组织分析还是轧制工艺研究,大多以奥氏体不锈钢-碳钢复合板为研究对象。近年来,随着工业环境对不锈钢(耐蚀、强度)综合性能要求的不断提高,传统的 304 和 316L 已不能满足现有的工业要求。双相不锈钢因同时具有铁素体不锈钢的较高强度、耐氯化物应力腐蚀性能和奥氏体不锈钢的优良韧性和焊接性优点^[7],逐渐引起了人们的广泛关注。

白允强等采用爆炸复合工艺试制了 2205/Q345 双相不锈钢复合板,研究了结合区的显微组织、元素扩散和力学性能^[8]。董珂通过有限元分析软件研究了轧制过程中不同压下率对 2205/Q235B 复合效果的影响规律,并通过实验研究了热处理工艺对 2205/Q235B 复合板组织性能的影响^[9]。

在轧制复合工艺中,终轧温度是一项重要的技术要点,对金属复合板的组织和力学性能有着显著影响。本工作采用热模拟的方法制备 2205/Q235B 双相不锈钢复合钢板,并通过模拟轧制过程中的终轧温度,研究其对复合板组织和性能的影响,以期对 2205/Q235B 双相不锈钢复合钢板的工业生产提供理论指导。

表 3 轧制工艺参数

Table 3 Rolling technological parameter

Group	Final rolling temperature	Parameter	Pass number					Total reduction ratio/%
			0	1	2	3	4	
1w	970 ℃	Temperature/℃		1 080	1 030	980	970	
		Thickness/mm	16.7	13.4	10.7	8.6	6.9	58.7
		Deformation/mm		3.3	2.7	2.1	1.7	
2w	930 ℃	Temperature/℃		1 080	1 030	980	930	
		Thickness/mm	16.7	13.4	10.7	8.6	6.9	58.7
		Deformation/mm		3.3	2.7	2.1	1.7	
3w	890 ℃	Temperature/℃		1 080	1 030	980	890	
		Thickness/mm	16.7	13.4	10.7	8.6	6.9	58.7
		Deformation/mm		3.3	2.7	2.1	1.7	
4w	850 ℃	Temperature/℃		1 080	1 030	980	850	
		Thickness/mm	16.7	13.4	10.7	8.6	6.9	58.7
		Deformation/mm		3.3	2.7	2.1	1.7	

从 2205/Q235B 复合板材上切取金相试样,并对其进行磨抛。采用两种腐蚀剂对试样进行腐蚀,2205 双相不锈钢侧采用 40% KOH 溶液进行电解腐蚀(恒电位电压 8 V,时间 10 s);Q235B 低碳钢侧采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀。采用 Zeiss Scope. A1 型金相显微镜和 Zeiss Sigma 500/VP 场发射扫描电镜对试样显微组织进行观察,借助 Axio Vision2.0 图像处理软件测量其贫碳区域宽度,并采用 X 射线能谱分析仪对合金元素的含量和分布进行检测。

依据标准 GB/T1954-2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》^[10],采用铁素体测量仪 SP10a 识别 2205/Q235B 复合钢板中双相不锈钢侧中的磁性组织,即铁素体和其马氏体转化形式。此外,采用基恩士 VHC-2000C 超景深三维显微镜对 2205/Q235B 复合钢板中双相不锈钢侧组织进行

1 实验

本实验使用的覆层材料和基层材料分别为 2205 双相不锈钢和 Q235B 低碳钢,其具体化学成分见表 1 和表 2。将 Φ10 mm、高度 6.7 mm 的 2205 双相不锈钢圆柱和 Φ10 mm、高度 10 mm 的 Q235B 低碳钢圆柱对接,然后采用 Gleeble3800 热模拟实验机的锤头将其夹住,进行压缩模拟实验。

表 1 2205 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (wt%) of 2205 stainless steel

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	N	Fe
0.038	0.67	1.49	22.31	6.31	3.04	0.005	0.037	0.18	Bal.

表 2 Q235B 低碳钢化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition (wt%) of Q235B low-carbon steel

C	Si	Mn	S	P	Fe
0.177	0.147	0.348	0.014	0.014	Bal.

同时,研究了在总压下率、道次压下率一定的条件下,不同终轧温度对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板结合面显微组织、剪切强度和耐腐蚀性能的影响规律。轧制工艺中的加热温度为 1 200 ℃,加热速度为 5 ℃/s,保温 5 min。终轧温度分别为 970 ℃、930 ℃、890 ℃和 850 ℃,空冷至室温。具体轧制工艺如表 3 所示。

拍摄,保证照片像素在 2 000 万以上。采用 VHX-2000C 图形分析软件对组织中的铁素体和奥氏体进行颜色标定,然后计算铁素体所占比例。

按标准 GBT 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板试样进行剪切强度测试(具体实验过程见补充信息)。由于热模拟试样尺寸较小,因此采用如图 1 所示的方法对其进行剪切强度测试。首先利用线切割从热模拟试样上切取尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm 的剪切试样,然后将 2205 不锈钢侧置于带有相同尺寸凹槽的组合式夹具中固定,使 Q235B 碳侧恰好露在夹具外侧,接着旋转夹具顶部的紧固螺栓,夹紧剪切试样,再将其整体置于剪切实验底座上进行剪切实验。剪切强度测试在 MTS-E45 微机控制电子万能试验机上进行,剪切速率为

0.4 mm/min。

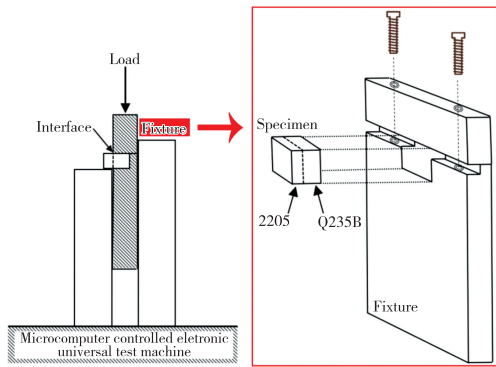


图1 剪切试样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of shear test sample

采用 CHI660E 型电化学检测系统对不同轧制工艺下制备的 2205 不锈钢进行电化学腐蚀性能测试。试验按照标准 ASTM G5^[11] 和 ASTM G59^[12] 在室温下、3.5% (质量分数,下同) 的 NaCl 水溶液中进行。电化学腐蚀试验采用标准的三电极,即饱和甘汞参比电极、铂电极,以及作为工作电极的 2205 双相不锈钢。为了获得稳定的电压,将试样先在 3.5% NaCl 水溶液中浸泡 10 min 再进行试验。电压扫描范围为 -0.8 ~ 1.5 V,扫描速度为 0.5 mV/s。

为了对比不同终轧温度下 2205/Q235B 双相不锈钢复合板结合处的耐腐蚀行为,使用冷镶剂将试样的五个面密封,只露出横截面。将处理好的试样进行相应的磨、抛处理,然后置于 5 mol/L 的 HCl 溶液中浸泡 24 h,再采用 SEM 对其腐蚀形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 2205/Q235B 双相不锈钢复合板显微组织

当终轧温度在 850 ~ 970 °C 范围内时,复合板均能得到

良好的结合界面。2205 双相不锈钢和 Q235B 低碳钢之间的界面为过渡复合区,该区域的组织形貌不同于 2205 双相不锈钢和 Q235B 碳钢,如图 2 所示。2205/Q235B 双相不锈钢复合板的终轧温度越高,越有利于 2205 双相不锈钢中的奥氏体向铁素体转变,即复合板中铁素体含量越高。

表 4 结合区 Q235B 低碳钢侧贫碳区厚度 (μm)
Table 4 Carbon poor zone thickness (μm) of the Q235B low-carbon steel near the bond zone

Group	1	2	3	4	5	6	Average
1w	46.6	47.4	47.2	47.6	48.4	47.1	47.4
2w	44.9	44.4	45.3	44	43.6	44.9	44.5
3w	39.3	38.9	39.5	40.3	38.6	39.2	39.3
4w	39.3	40.3	38.9	39.2	39.9	37.2	39.1

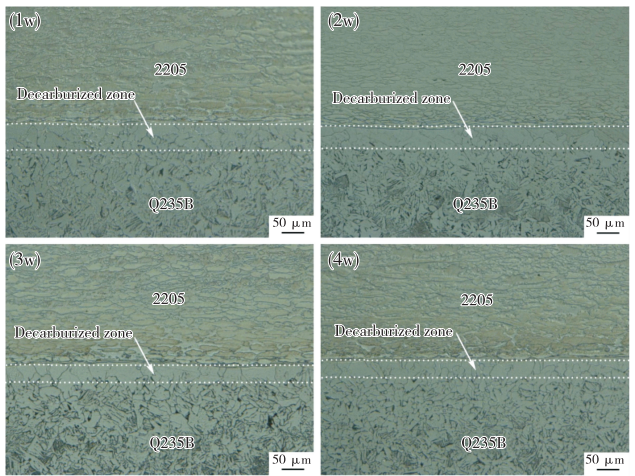


图2 不同终轧温度下制备的 2205/Q235B 复合钢板的横截面微观形貌:(1w)970 °C;(2w)930 °C;(3w)890 °C;(4w)850 °C

Fig. 2 Cross-sections microstructure of the 2205/Q235B clad steel plate prepared under different final rolling temperatures: (1w) 970 °C; (2w) 930 °C; (3w) 890 °C; (4w) 850 °C

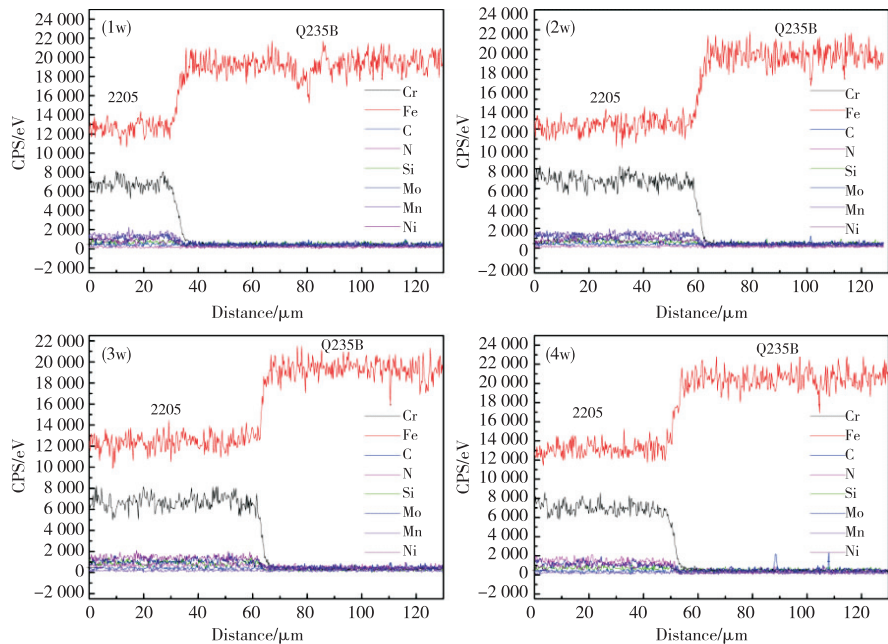


图3 不同终轧温度下制备的 2205/Q235B 复合钢板结合区的 EDS 检测结果:(1w)970 °C;(2w)930 °C;(3w)890 °C;(4w)850 °C (电子版为彩图)
Fig. 3 EDS results of the 2205/Q235B clad steel plate bond zones prepared under different final rolling temperatures: (1w) 970 °C; (2w) 930 °C; (3w) 890 °C; (4w) 850 °C

在 2205/Q235B 双相不锈钢复合板结合区的 2205 不锈钢侧均形成了一个奥氏体长条带,这主要是因为 Q235B 中的 C 元素含量较高,2205 双相不锈钢中的 Cr 元素含量较高,而结合处存在元素的相互扩散效应(由高浓度向低浓度扩散)。因此,2205 双相不锈钢中的 C 元素含量增加,Cr 元素含量下降,这有利于奥氏体的形成,而两种钢结合处是元素扩散最严重的区域,故形成了奥氏体带。

此外,由于结合处 Q235B 低碳钢侧中的 C 元素含量降低,形成一层脱碳区(全为铁素体区域)。终轧温度越高,2205/Q235B 双相不锈钢复合板结合界面处 C 元素的扩散程度越大,因而结合处 Q235B 低碳钢侧的贫碳区厚度越大,如图 2 和表 4 所示。

当终轧温度不同时,合金元素在结合面两侧的分布规律基本类似。自 2205 双相不锈钢向 Q235B 侧测量,发现 Fe 元素含量增加,Cr 元素含量降低。这是因为 2205 双相不锈钢中含有大量(约为 22.31%)的 Cr 元素(为了保证其耐腐蚀性能);而 Q235B 低碳钢中含有大量 Fe 元素(约 99.3%),所以 Fe 元素和 Cr 元素产生如图 3 所示的分布规律。此外,Fe 和 Cr 两种元素在结合面的含量是逐渐变化的而非突变,说明两种元素在浓度差的作用下产生了相互扩散。由于其他几种元素在两种钢中的含量较少,因此在 Fe 元素和 Cr 元素的映衬下,它们在结合面的分布规律呈现稳定分布状态。

2.2 2205/Q235B 双相不锈钢复合板剪切强度

当终轧温度从 970 ℃ 降至 850 ℃ 时,2205/Q235B 双相不锈钢复合钢板的结合强度得到显著提高,如图 4 所示。终轧温度为 970 ℃ 时,复合板的剪切强度最低,为 390 MPa;终轧温度为 850 ℃ 时,复合板的剪切强度最高,为 445 MPa。分析认为,在较低的终轧温度下,复合板的脱碳区宽度较小,铁

素体组织晶粒更细。同时,随着终轧温度的降低,塑性变形温度降至再结晶温度以下,加工硬化现象逐渐显现,这些都有利于复合板剪切强度的提高。所有剪切试样的剪切强度均超过 GB/T 8165-2008《不锈钢复合钢板和钢带》^[13]中规定的剪切强度的标准(210 MPa),说明试验制备的四组 2205/Q235B 双相不锈钢复合板剪切强度均满足工程应用要求。

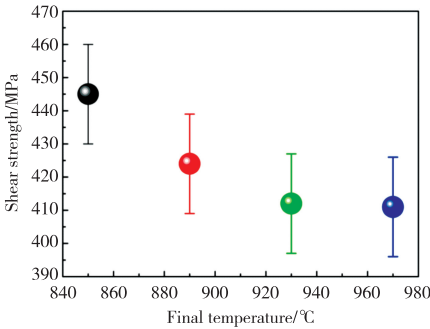


图 4 2205/Q235B 复合钢板的剪切强度
Fig. 4 Shear strength of the 2205/Q235B clad steel plate

图 5 为不同终轧温度下 2205/Q235B 双相不锈钢复合板剪切断口的微观形貌。由图 5 中 1w—4w 的剪切形貌可以看出,断口可分为起裂区、扩展区。由图 5 中 1w-2—4w-2 可知,断口有韧窝也有解理面。随着剪切强度的提高,韧窝减少,解理面面积增加,复合板发生脆性断裂的倾向增大。从图 2

表 5 图 5 中 2205/Q235B 复合钢板剪切断口不同区域的合金元素含量(原子分数,%)

Table 5 Chemical composition in different regions (at%) of the shear fracture of the 2205/Q235B clad steel plates in Fig. 5

Element	A	B	C	D	E	F	G	H
C K	07.98	8.09	07.77	6.63	09.56	10.99	09.76	8.07
Fe K	92.02	91.91	92.23	93.37	90.44	89.01	90.24	91.93

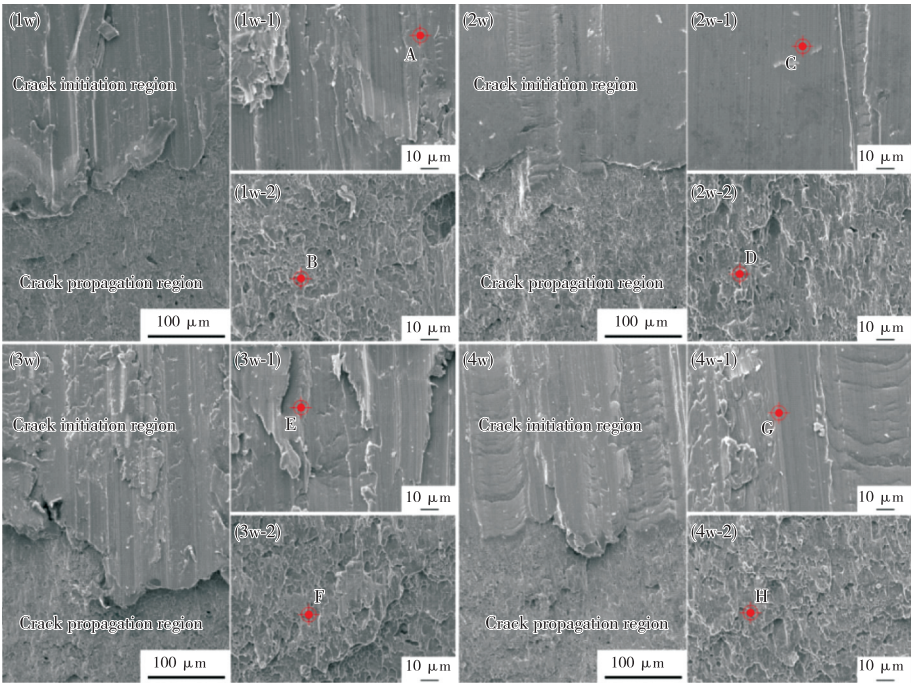


图 5 不同终轧温度下制备的 2205/Q235B 复合钢板的剪切断口:(1w、1w-1 和 1w-2)970 ℃;(2w、2w-1 和 2w-2)930 ℃;(3w、3w-1 和 3w-2)890 ℃;(4w、4w-1 和 4w-2)850 ℃

Fig. 5 Shear fractures of the 2205/Q235B clad steel prepared under different final rolling temperatures : (1w, 1w-1 and 1w-2) 970 ℃; (2w, 2w-1 and 2w-2) 930 ℃; (3w, 3w-1 and 3w-2) 890 ℃; (4w, 4w-1 and 4w-2) 850 ℃

和表 4 可知,2205/Q235B 双相不锈钢复合板的 Q235B 侧会发生脱碳(组织全部为铁素体),脱碳区宽度大致在 39.1~47.4 μm ,且脱碳区铁素体晶粒尺寸远大于远离界面 Q235B 区域的铁素体晶粒,因此该区域的强度较低。而一般情况下,剪切断裂多发生在界面区域中强度较低的部位。此外,对剪切断口进行能谱分析,发现无论起裂区和扩展区中均未检测到 Cr、Ni 等不锈钢标志性元素(如表 5 所示),这进一步说明剪切断裂出现在复合界面较为薄弱的 Q235B 低碳钢侧的脱碳区域。

2.3 2205/Q235B 双相不锈钢复合板的耐腐蚀性能

耐腐蚀性能是 2205/Q235B 双相不锈钢复合板最主要的表面性能,因此,本实验检测了不同终轧温度下 2205 双相不锈钢表面的电化学腐蚀性能,结果如图 6 和表 6 所示。随着终轧温度的降低,2205 双相不锈钢的腐蚀电流密度逐渐增加,而腐蚀电位和击穿电位逐渐减小。这说明随着终轧温度的降低,2205 双相不锈钢表面的耐腐蚀性能逐渐变差。

表 6 2205 双相不锈钢的腐蚀电位和电流密度

Table 6 Corrosion potential and current density of the 2205 duplex stainless steel

Group	1w	2w	3w	4w
Corrosion potential/mV	-187	-205	-243	-259
Electric current density/(A/cm^2)	3.9×10^{-7}	4.9×10^{-7}	6.1×10^{-7}	7.6×10^{-7}
Breakdown potential/mV	960	940	920	910

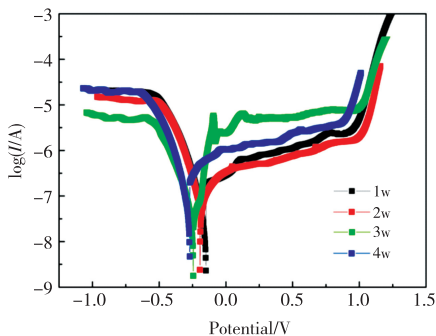


图 6 2205 双相不锈钢的极化曲线(电子版为彩图)

Fig. 6 Polarization curves of the 2205 duplex stainless steel

2205 双相不锈钢中主要含有 δ 铁素体和 γ 奥氏体,而材料的耐腐蚀性能与 δ 铁素体含量密切相关,当 δ 铁素体与 γ 奥氏体的比值接近于 1:1 时,材料的耐腐蚀性能最优。利用铁素体测量仪和组织标定方法对 2205/Q235B 复合板的 2205 双相不锈钢中的 δ 铁素体含量进行检测,结果如表 7 和图 7 所示。终轧温度对 2205 侧铁素体含量及形态均有显著影响,当终轧温度由 970 $^{\circ}\text{C}$ 降至 850 $^{\circ}\text{C}$ 后,铁素体含量由 45.3% 降低至 38.7%。从金相组织上看,终轧温度对冷却过程中 δ 铁素体向 γ 奥氏体转变的影响较大,其特征为当终轧温度为 850 $^{\circ}\text{C}$ 时, γ 相比比例增加。这主要是因为终轧温度降低,2205 双相不锈钢在高温下的停留时间变短,有利于 δ 铁素体向 γ 奥氏体的转变,进而降低了 δ 铁素体的含量。同时,在温度为 600~900 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内,2205 双相不锈钢易析出有害相。由 2205 双相不锈钢的敏化温度曲线可知,第二相析出的鼻尖温度在 850 $^{\circ}\text{C}$ 左右,因此即使在较短的时间内停留,也容易析出 σ 有害相,这严重影响了 2205 双相不锈钢的耐腐蚀性能^[14-15]。

表 7 2205 双相不锈钢表面的铁素体含量(%)

Table 7 Ferrite content (%) on the surface of the 2205 duplex stainless steel

Group	1	2	3	4	5	Average
1w	47.12	43.63	43.65	46.33	45.62	45.27
2w	43.52	44.96	44.34	43.93	44.95	44.34
3w	40.84	37.66	36.64	43.98	38.23	39.47
4w	40.72	37.05	38.76	36.74	40.08	38.67

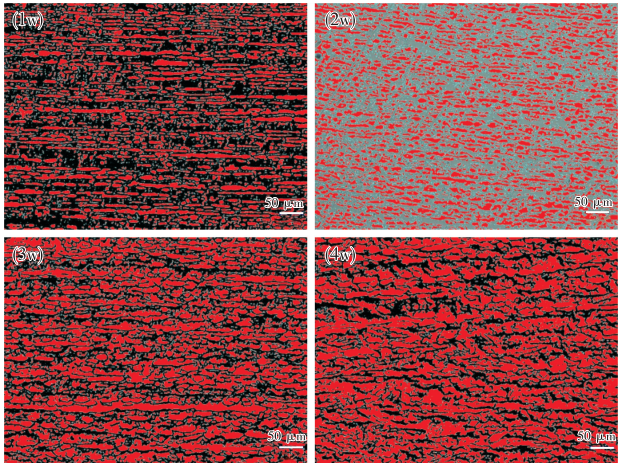


图 7 2205 双相不锈钢表面的铁素体(底色表示)分布情况:(1w)970 $^{\circ}\text{C}$;(2w)930 $^{\circ}\text{C}$;(3w)890 $^{\circ}\text{C}$;(4w)850 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 7 Ferrite (background color) distribution on the surface of 2205 duplex stainless steel: (1w) 970 $^{\circ}\text{C}$; (2w) 930 $^{\circ}\text{C}$; (3w) 890 $^{\circ}\text{C}$; (4w) 850 $^{\circ}\text{C}$

虽然 2205/Q235B 复合板中 2205 双相不锈钢表面的耐腐蚀性能随着终轧温度的降低而逐渐变差,但复合板仍具有非常优异的耐腐蚀性能。但暴露在外的接头横截面在腐蚀介质中是否具有同样优异的耐腐蚀性能尚无法确定,需进一步测试。图 8 为 2205/Q235B 复合板横截面在 5 mol/L HCl 溶液中浸泡 24 h 后的微观形貌。通过对比发现,四组 2205/Q235B 复合板中的 2205 双相不锈钢变化不明显,只产生了较浅的组织;而 Q235B 低碳钢被严重腐蚀,且靠近结合区的腐蚀最严重,形成了非常深的腐蚀坑。随着终轧温度的升高,Q235B 低碳钢侧靠近结合区的腐蚀坑宽度逐渐增加,由 850 $^{\circ}\text{C}$ 的 35.56 μm 增大到 970 $^{\circ}\text{C}$ 的 49.44 μm 。从图 3 可知,Cr 元素的扩散距离在 850 $^{\circ}\text{C}$ 时为 8 μm ,在 970 $^{\circ}\text{C}$ 为 12 μm 。为了进一步验证该结论,选取 4w 试样,从结合界面处开始向碳钢侧移动,每隔 6 μm 做一个点状 EDS,结果发现:结合界面处 Cr 含量为 1.73% (原子分数,下同)、6 μm 左右时的 Cr 含量为 0.39%、12 μm 左右时 Cr 含量为 0.21%,之后再未检测到 Cr 元素的出现,结果与图 3 一致。由此可以断定,Cr 元素扩散进入贫碳区的距离则要小于 12 μm 。而由图 2 和表 4 可知,C 元素的扩散距离在 850 $^{\circ}\text{C}$ 时为 39.1 μm ,在 970 $^{\circ}\text{C}$ 为 47.4 μm ,扩散距离远大于 Cr 元素。分析认为,在贫碳区虽然有 Cr 元素扩散进入,但其扩散距离非常有限,明显小于贫碳区宽度,Cr 对贫碳区电位的影响有限。贫碳区全部为粗大的铁素体组织,而 Q235B 其他区域为常见的铁素体和珠光体组织。贫碳区位于 2205 双相不锈钢和 Q235B 低碳钢之间,其不仅与 Q235B 低碳钢的其他区域形成电位差,还与 2205 双相不锈钢形成较大的电位差,因此该区域腐蚀最严重。在应力作用下,该区域的腐蚀速率进一步加快,且容易以裂纹源的形式形成开裂。因此,在 2205/Q235B 双相不锈钢复合

板应用时,应做好对暴露在外的截面的腐蚀防护。

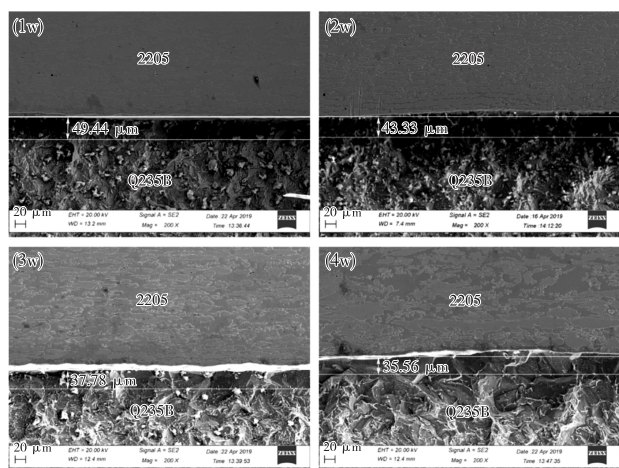


图8 2205/Q235B复合钢板横截面的酸浸泡微观形貌:(1w)970℃;(2w)930℃;(3w)890℃;(4w)850℃

Fig.8 Acid immersion micromorphology of the cross section of the 2205/Q235B composite steel plate: (1w) 970℃; (2w) 930℃; (3w) 890℃; (4w) 850℃

3 结论

(1)在总压下率为58.7%时,终轧温度在850~970℃范围内,2205和Q235B均能得到良好的结合界面。由于C、Cr、Ni等元素的相互扩散,靠近复合界面的2205侧形成了一个奥氏体长条带,Q235B侧形成了宽度为39.1~47.4 μm的脱碳区域。(2)随着终轧温度的降低,2205/Q235B双相不锈钢复合钢板的剪切强度显著提高。终轧温度为970℃时,其剪切强度最低,为390 MPa;终轧温度为850℃时,其剪切强度最高,达到445 MPa。(3)终轧温度变化对2205侧铁素体含量和铁素体形态均有显著影响。随着终轧温度的升高,2205双相不锈钢中的δ铁素体含量逐渐增大,970℃时,δ铁素体含量达到最大(45.3%),此时2205不锈钢表面的耐腐蚀性能最佳。(4)对2205/Q235B复合板横截面进行浸泡,发现2205双相不锈钢和Q235B低碳钢之间的贫碳区腐蚀最为严重,且随着终轧温度的升高,Q235B低碳钢侧靠近结合区的腐蚀坑宽度逐渐增大,由850℃的35.56 μm增大到970℃的49.44 μm。因此,在2205/Q235B复合板工程应用时,需要特别注意暴露在外的截面的腐蚀防护。

参考文献

- 1 Li L, Zhang X J, Liu H Y, et al. *Steel Rolling*, 2013, 30(3), 43 (in Chinese).



Fengqiang Xiao received his M. S. degree in June 2007 from University of Science and Technology Beijing. Since September 2014, he learned at the College of Materials Science and Engineering in Tianjin University, focusing on the preparation of duplex stainless steel composite plate and the research of friction stir welding technology.

肖丰强,2007年7月毕业于北京科技大学,获得材料学硕士学位。于2014年9月至今在天津大学材料科学与工程学院学习,主要从事双相不锈钢复合板的制备及其搅拌摩擦焊接工艺研究。

- 2 Ding H M, Fan X L, Wang J F, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(11), 18 (in Chinese).
- 3 Zina D, Noamen G, Monique G, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 656, 130.
- 4 Xie G M, Luo Z A, Wang G L, et al. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(10), 1398 (in Chinese).
- 5 Li L, Zhang X J, Zhu Z C, et al. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2014, 13(1), 46 (in Chinese).
- 6 Chen S H. Effect of rolling process parameters on interface bonding strength of stainless steel/carbon steel composite plate. Master's Thesis, Taiyuan University of Science and Technology, China, 2014 (in Chinese).
- 7 Wu W. *Baosteel Technical Research*, 2018, 11(2), 25.
- 8 Bai Y Q, Huang W, Wang Z Z, et al. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(12), 33 (in Chinese).
- 9 Dong K. Microstructure analysis of 2205/Q235 hot rolling bonding interface and duplex stainless steel. Master's Thesis, Yanshan University, China, 2017 (in Chinese).
- 10 Harbin Welding Institute, Tianjin Bridge Welding Materials Group Co., Ltd., Tianjin Golden Bridge Welding Materials Group Co., Ltd., et al. *Method for measurement of ferritic content in weld seams of chrome-nickel austenitic stainless steel*, Standardization Administration of China, 2008 (in Chinese).
- 11 *Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements*, American Society for Testing and Materials, USA, 2014.
- 12 *Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements*, American Society for Testing and Materials, USA, 2014.
- 13 Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co., Ltd., Metallurgical Information and Standardization Research Institute. *Stainless steel composite plate and steel strip*, Standardization Administration of China, 2008 (in Chinese).
- 14 Ma M, Ding H, Tang Z Y, et al. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(4), 504 (in Chinese).
- 15 Shi S K, Wang J, Li H F, et al. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2011, 23(6), 463 (in Chinese).



Dongpo Wang, professor, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University. He received his Ph. D. degree in material processing engineering from Tianjin University in January 2000. He mainly engaged in welding structural fracture and strength research works and carried out a series of basic theory and applied technology research on aerospace, oil and gas pipeline, offshore drilling platform and other fields. Now, he has published 220 articles and applied for more than 80 patents.

王东坡,天津大学材料科学与工程学院,教授。2000年1月毕业于天津大学,材料加工工程专业博士。主要从事焊接结构断裂与强度研究工作,针对航空航天、石油天然气输送管道、海上钻井平台、高速轨道车辆等领域开展了一系列基础理论及应用技术研究。在国内外重要期刊发表文章220篇,申请专利80余项。

(责任编辑 荆秋叶)