

## 2 种终轧/开冷温度 DSS 2304 复合板复层组织与耐腐蚀性能对比研究

张鑫钰<sup>1</sup>, 查小琴<sup>1,2</sup>, 高灵清<sup>1,2</sup>, 张文利<sup>1</sup>, 马云飞<sup>3</sup>

(1.中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023; 2.河南省船舶及海工装备结构材料技术与应用重点实验室, 河南 洛阳 471023; 3.河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** **目的** 对比研究 2 种不同终轧/开冷温度的 2304/Q345C 热轧双相不锈钢复合板复层组织和耐腐蚀性能。**方法** 分别采用金相显微镜和透射电镜观察复层组织形貌, 采用铁素体测量仪分析计算复层远界面铁素体组织。分别采用化学浸泡法及电化学法测试复层抗点蚀和晶间腐蚀性能, 并对其组织进行金相观察和透射分析。采用万能试验机对界面进行剪切强度测试, 对界面附近进行线扫描测试分析, 进一步分析剪切性能测试结果。**结果** 在其他热轧参数一定的情况下, 终轧/开冷温度为 1 050/1 020 °C 的复合板复层组织中的铁素体含量较高, 奥氏体/铁素体相界更为规整, 位错密度较低, 晶界未发现析出相, 界面剪切强度较高, 复层的耐点腐蚀、晶间腐蚀及腐蚀电化学性能均较优。**结论** 终轧/开冷温度为 1 050/1 020 °C 的热轧双相不锈钢复合板复层具有更优的耐腐蚀性能。

**关键词:** 2304/Q345C 复合板; 热轧复合法; 剪切强度; 晶间腐蚀; 点蚀; 电化学腐蚀

**中图分类号:** TG142; TG115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)10-0094-07

**DOI:** 10.7643/ issn.1672-9242.2022.10.013

## Comparative Study on the Microstructure and Corrosion Properties of DSS 2304 Clad Plates at Two Different Finishing/Cooling Temperatures

ZHANG Xin-yu<sup>1</sup>, ZHA Xiao-qin<sup>1,2</sup>, GAO Ling-qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-li<sup>1</sup>, MA Yun-fei<sup>3</sup>

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Henan Luoyang 471023, China; 2. Henan Key Laboratory of Technology and Application of Structural Materials for Ships and Marine Equipments, Henan Luoyang 471023, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to take comparative study on the corrosion resistance properties of two 2304/Q345C hot-rolled duplex stainless steel clad plates with different finishing/cooling temperatures by chemical immersion tests and electrochemical

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-10-18

Received: 2021-07-20; Revised: 2021-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401205)

Fund: The National Key Research and Development Program (2016YFC0401205)

作者简介: 张鑫钰 (1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为金属的疲劳断裂与腐蚀性能。

**Biography:** ZHANG Xin-yu (1996—), Male, Doctoral candidate, Research focus: properties of metal fatigue, fracture and corrosion resistance.

通讯作者: 查小琴 (1975—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为金属的腐蚀与环境腐蚀性能。

**Corresponding author:** ZHA Xiao-qin (1975-), Female, Master, Researcher, Research focus: properties of corrosion and environment corrosion resistance of metal.

引文格式: 张鑫钰, 查小琴, 高灵清, 等. 两种终轧/开冷温度 DSS 2304 复合板复层组织与耐腐蚀性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 094-100.

ZHANG Xin-yu, ZHA Xiao-qin, GAO Ling-qing, et al. Comparative Study on the Microstructure and Corrosion Properties of DSS 2304 Clad Plates at Two Different Finishing/Cooling Temperatures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 094-100.

tests. in addition, the metallographic microstructure and TEM images analysis were also conducted. The results show that compared with the clad plate at finishing/cooling temperature 950/920 °C and the same other hot-rolled parameters, the ferrite content in cladding is higher at finishing/cooling temperature 1 050/1 020 °C,the austenite/ferrite phase boundary of clad plate is more regular, and the dislocation density is lower with no precipitate around phase boundary. Besides, the interfacial shear strength is higher at 1 050/1 020 °C, and the properties of pitting corrosion, intergranular corrosion resistance, and corrosion electrochemical performance of cladding layer are excellent.

**KEY WORDS:** 2304/Q345C clad plate; hot rolling process; shear strength; intergranular corrosion resistance; pitting corrosion resistance; electrochemical corrosion.

不锈钢-碳钢复合板是通过一定复合工艺在低碳钢板上结合一层具有高耐蚀性不锈钢的层状复合材料<sup>[1]</sup>,兼具了覆层金属的耐腐蚀及基层金属的强度高、硬度大等优点,被广泛应用于核电、石化和海洋工业等领域<sup>[2-3]</sup>。目前生产不锈钢-碳钢复合板常有 3 种方法:铸轧法、爆炸焊接-轧制法和直接轧制法<sup>[4]</sup>。相较于其他 2 种方法,直接轧制法具有成本低、工艺简单等优点。主要分为冷轧和热轧复合法,其中热轧复合法应用最为广泛,但却存在着与空气接触易发生氧化、界面结合强度低的缺点<sup>[5]</sup>,因此研究如何改进热轧工艺来提高轧制复合板的性能具有非常重要的意义<sup>[6-7]</sup>。肖丰强等<sup>[8]</sup>采用热模拟实验方法研究了不同终轧温度对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板界面组织和性能的影响,结果表明,终轧温度在 850~970 °C 内,2205 和 Q235B 可获得良好的结合面,并随着终轧温度的降低,2205/Q235B 双相不锈钢复合板的剪切强度提高。Wang 等<sup>[9]</sup>研究了不同淬火温度和保温时间对复合板组织和力学性能的影响,发现随着淬火温度的升高,合金的拉伸行为和断裂特征呈现韧性-脆性转变,延长淬火时间可以获得强度较高的结合面。代响林等<sup>[10]</sup>针对真空热轧工艺下的复合板,研究了其界面处的组织和元素扩散现象,发现近界面的碳钢为铁素体组织,远界面的碳钢为铁素体和珠光体组织,

碳钢中的碳元素向不锈钢扩散,不锈钢中铬镍元素向碳钢扩散,碳元素的扩散距离最大。宜亚丽等<sup>[11]</sup>采用数值模拟的方法研究了热轧不锈钢复合板晶粒组织的均匀性,发现下压率是影响基层和复层不均匀因子及基层平均晶粒尺寸的最主要因素,轧制温度是影响复层平均晶粒尺寸的最主要因素,而轧制速度对基层和复层平均晶粒尺寸及复层不均匀因子的影响最小。综上所述,目前的研究主要集中在复合板的力学性能和界面组织,但在复合板实际应用中,由于复合板复层是接触腐蚀介质的关键部位,其耐腐蚀性对于复合板的安全服役也至关重要<sup>[12-13]</sup>。为此,本文以 2304/Q345C 双相不锈钢复合板为研究对象,开展不同终轧温度和开冷温度复合板复层组织和腐蚀性能的对比研究,为不锈钢复合板的生产及应用提供相关的数据支撑。

1 试验

1.1 材料及复合工艺

选取厚度为 54 mm 的 Q345C 低碳钢为基层,厚度为 14 mm 的 2304 双相不锈钢(DSS 2304)为覆层的不锈钢-碳钢复合板作为试验材料。复合材料的化学成分见表 1。

表 1 2304 双相不锈钢和 Q345C 碳钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 2304 duplex stainless steel, and Q345C carbon steel

| 材料       | %     |       |      |       |       |       |       |       |      |
|----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | C     | Si    | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Cu    | Mo   |
| DSS 2304 | 0.023 | 0.42  | 1.18 | 0.027 | 0.003 | 4.5   | 23.41 | 0.46  | 0.23 |
| Q345C    | 0.194 | 0.225 | 1.20 | 0.013 | 0.003 | 0.012 | 0.028 | 0.007 | 0.03 |

复合工艺采用真空热轧法,将 Q345C 碳钢和 2304 双相不锈钢进行三道次热轧,加热温度为 1 200 °C,保温超过 120 min,压缩比为 2。前两道次的下压率为 15%,开轧温度为 1 150 °C,其中 1#复合板的终轧温度为 950 °C,开冷温度为 920 °C;2#复合板的终轧温度为 1 050 °C,开冷温度为 1 020 °C,通过辊道进行空冷。

1.2 组织观察及成分测量

采用线切割方法从复合板复层表面切取金相试样,选取 40% (质量分数) KOH 溶液作为腐蚀剂,对试样表面进行电解腐蚀(恒电位为 8 V,时间为 10 s),并用 ZEISS Observer. Z1 金相显微镜观察腐蚀后试样的组织形貌。参照 GB/T 1954—2008,采用铁素体测量仪 SP10a 识别 2304/Q345C 复合板复层远界

面处的铁素体组织,并计算出铁素体所占比例。透射试样的制备是从复合板的复层切割 0.5 mm 厚的薄片,并保留原始表面,对切取的试样进行双喷电解、离子减薄,利用 CM200 透射电镜在 200 kV 的加速电压下观察试样的形貌。

### 1.3 剪切性能测试

剪切强度测试参照 GB/T 6396—2008,考虑到剪切试验过程中界面受力的对称性,为了保证断口在界面处,采用非对称型拉剪试样,加载方式如图 1 所示。将碳钢侧置于带有相同尺寸凹槽的组合式夹具中固定,使复层侧恰好露在夹具外侧,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试验底座上进行剪切试验。剪切强度测试用 MTS-E45 微机控制电子万能试验机进行,剪切速率为 1 mm/min。使用 FEG Quanta650 扫描电镜,在 20 kV 电压下对 2 种复合板界面处的 Cr、Mn 和 Fe 元素进行线扫描分析,得到 3 种元素由基层到覆层的含量变化曲线。

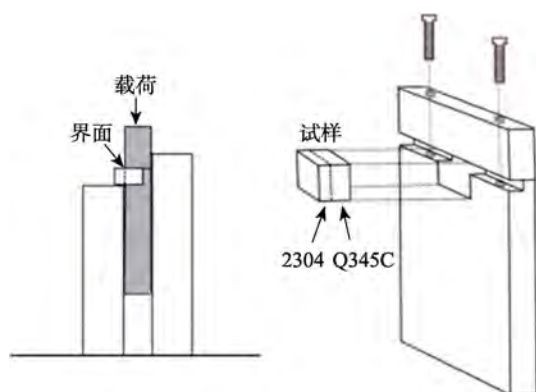


图 1 剪切试样

Fig.1 Schematic diagram of shear test sample

### 1.4 腐蚀性能测试

腐蚀试验试样均从复层取样,并保留原始表面,点腐蚀试验参照 GB/T 17897—2016,试样尺寸为 30 mm×2 mm×2.5 mm,晶间腐蚀参照 ASTM G108—1994(2005),试样尺寸为 80 mm×20 mm×2.5 mm,试验结果用腐蚀形貌及腐蚀速率表征,腐蚀速率计算见式(1)。

$$K = \frac{240 \times (m_0 - m_1)}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中:  $K$  为腐蚀速率,  $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ ;  $m_0$  为样品腐蚀前的质量,  $\text{g}$ ;  $m_1$  为样品腐蚀后的质量,  $\text{g}$ ;  $S$  为样品表面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为样品腐蚀时间,  $\text{h}$ 。

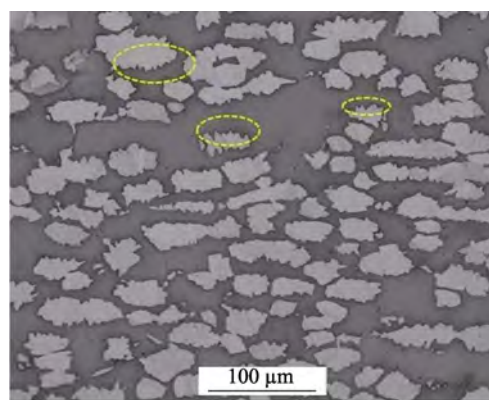
电化学腐蚀性能测试参照 ASTM G5 和 ASTM G59,采用三电极体系(参比电极为饱和甘汞电极,对电极为铂片,工作电极为被测腐蚀试样)对试样进行电化学性能测试。测试仪器为 Gill AC Bi-STAT 电化学工作站。介质条件为室温 3.5% 的 NaCl 溶液,电压

扫描范围为  $-0.5 \sim 1.5 \text{ V}$  (vs. SCE),扫描速度为  $0.5 \text{ mV/s}$ 。

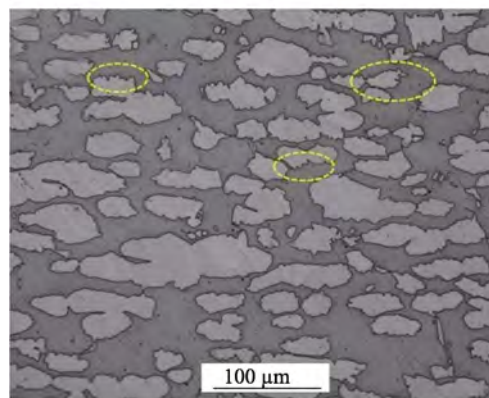
## 2 结果和讨论

### 2.1 复层微观组织

2 种复合板复层远界面金相组织如图 2 所示。可以看出,2 种条件的试样复层均由白色的奥氏体和黑色的铁素体组成,奥氏体呈岛状分布在铁素体内,相界呈现出锯齿状形貌。这是由于热轧过程中合金元素在两相界面的扩散富集,使得铁素体相和奥氏体相的界面发生迁移造成的。任永峰等<sup>[14]</sup>在对于 2205 双相不锈钢复合板的研究中也有相关的论述。相较于 1#试样,2#试样组织中的奥氏体相界趋于规整,这是因为在较高的终轧/开冷温度下,合金元素扩散得更加充分,使得其在两相界面的富集程度下降,进而降低了奥氏体和铁素体相界面的迁移距离<sup>[15]</sup>。1#试样复层铁素体的成分占比为 54.22%,2#试样为 58.17%,说明在 1 050/1 020 °C 的终轧/开冷温度下,铁素体的含量更高。这是因为终轧/开冷温度较高时,材料在高温下的停留时间变长,有利于 2304 双相不锈钢复层发生奥氏体向铁素体转变,使得铁素体含量增加。金玉龙等<sup>[16]</sup>在研究碳含量对于复合板复层组织和性能影响的过程中也得出了相应的结论。



a 1#



b 2#

图 2 2304/Q345C 轧制不锈钢复合板远界面的金相组织  
Fig.2 Optical microstructure of cladding in remote interface of 2304/Q345C hot rolled stainless steel clad plates

2 种复合板复层远界面的透射组织如图 3 所示。可以看出, 奥氏体 ( $\gamma$ ) 和铁素体 ( $\alpha$ ) 的相界面存在明显位错, 这是由于奥氏体/铁素体相界对位错产生钉扎了作用, 阻碍位错运动所致。相较于 1#试样, 2#试样的位错密度较低, 位错塞积现象明显减少。这是因为终轧温度较高, 使得奥氏体边界趋于规整, 一方面降低了热轧过程中合金元素的迁移阻力, 减少了

柯氏气团的钉扎作用; 另一方面降低了晶界处的位错能, 使得位错更易滑移, 减少了位错塞积。另外, 1#试样在晶界处有析出相生成 (如图 3c 所示), 经过衍射花样标定 (见图 3f) 和能谱分析 (见图 4) 确定为  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , 而 2#试样无析出相生成。这可能是因为在较高的终轧/开冷温度下可以促进碳化铬的固溶, 抑制析出相在晶界处的生成。

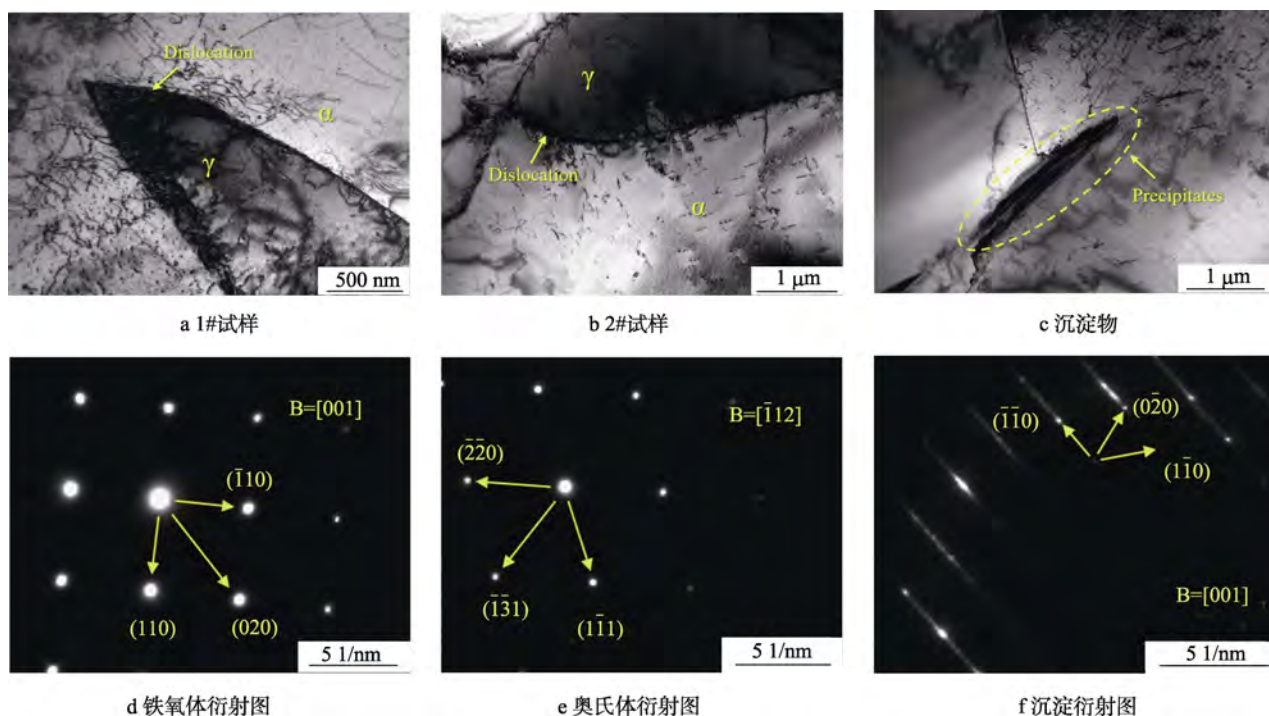


图 3 2304/Q345C 轧制不锈钢复合板复层组织的透射组织

Fig.3 TEM images of cladding in 2304/Q345C hot rolled stainless steel clad plates: a) 1# sample; b) 2# sample; c) precipitates; d) ferrite diffraction pattern; e) austenite diffraction pattern; f) precipitates diffraction pattern

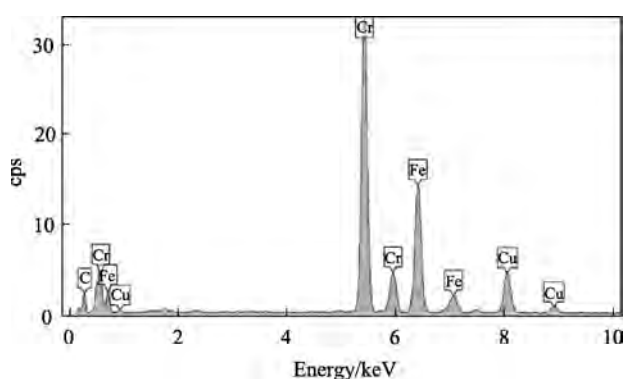


图 4 析出相元素图谱

Fig.4 Energy dispersive spectrum analysis of precipitates

## 2.2 界面剪切性能

通过剪切性能测试得出, 1#试样界面剪切强度为 310.7 MPa, 2#试样界面剪切强度为 337.0 MPa。说明在 1 050/1 020  $^{\circ}\text{C}$  的终轧/开冷温度下, 不锈钢复合板的结合强度更好。这是因为复合板的结合程度与界面

合金元素扩散有关, 在终轧/开冷温度较高时, 界面两侧原子的扩散速度较快, 扩散距离较远, 界面结合程度更高, 结合性能更好。Kurotsu 等<sup>[17]</sup>在研究真空热轧复合板的氧化程度时也得出相同的结论。马久乐<sup>[18]</sup>研究复合板热处理工艺时发现, 随着终轧温度的升高, 剪切强度升高, 但是其上升趋势有一定减缓。他认为这是因为界面处金属原子被激活, 原子扩散加剧, 金属原子之间发生互扩散, 形成了冶金结合, 但是随着终轧温度继续升高, 界面之间冶金结合增多, 所以结合强度相较之前提高效果会减弱。为了进一步分析剪切性能测试结果, 对 2 种复合板试样界面附近进行了线扫描测试分析, 结果如图 5 所示。界面两侧的 Mn 含量基本不变, 而复层侧 Fe、Cr 含量升高。1#试样界面处的 Cr 原子互扩散距离约为 20  $\mu\text{m}$ , 而 2#试样界面处 Cr 原子互扩散距离约为 28  $\mu\text{m}$ 。说明在较高的终轧/开冷温度下, 界面附近的合金元素互扩散更加充分, 界面的结合性能提高, 这能较好地解释以上剪切强度的测试结果。

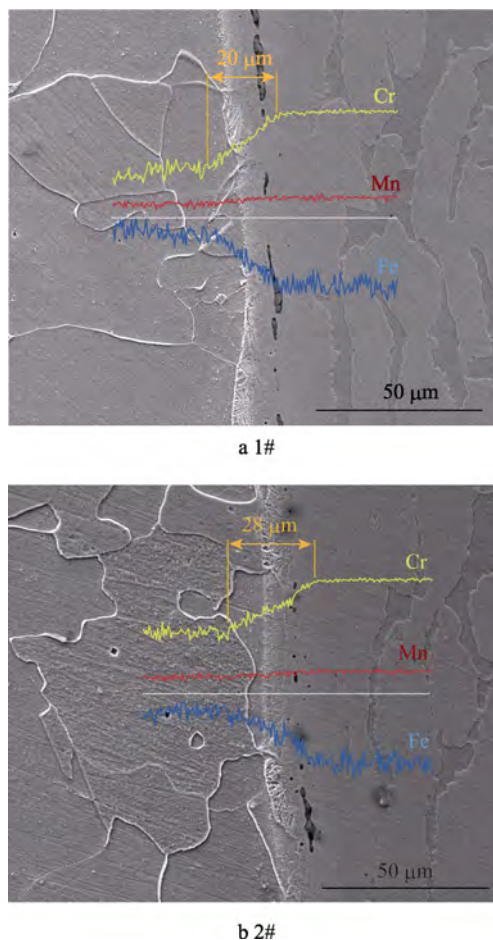


图 5 2304/Q345C 不锈钢复合板界面处线扫描结果图  
Fig.5 Line scan results of interface of 2304/Q345C stainless steel clad plate

## 2.3 复层耐腐蚀性能

点蚀后试样的表面形貌如图 6 所示。可以看出, 1#试样腐蚀后出现了明显的点蚀坑, 而 2#试样腐蚀后未见明显点蚀。2 种复合板复层的电化学极化曲线如图 7 所示。2 种终轧/开冷温度下, 2304/Q345C 不锈钢复合板复层腐蚀性能测试结果见表 2。可以看出, 相较 1#试样, 2#试样复层的晶间腐蚀和点蚀速率均较低, 复层开路电位  $E_{\text{corr}}$  和腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  也较低, 击穿电位  $E_p$  较高。相关文献研究表明<sup>[19]</sup>, 开路电位  $E_{\text{corr}}$  和击穿电位  $E_p$  均与材料的耐蚀能力有关。引入电位差  $\Delta E = E_p - E_{\text{corr}}$  可以系统表征 2 种材料的耐蚀性, 电位差  $\Delta E$  越大, 材料表面的耐蚀性能越好。根据表 2 中参数可以得出, 2#试样的电位差  $\Delta E$

较大, 说明其抗腐蚀性能较好, 这与化学浸泡实验结果一致。说明在 1 050/1 020 °C 的终轧/开冷温度下, 复层的抗腐蚀性能要优于 950/920 °C 终轧/开冷温度下的复层。

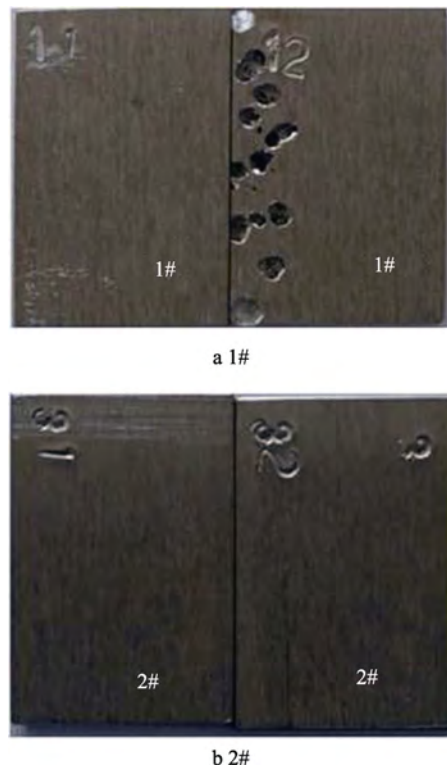


图 6 点腐蚀前后的试样表面形貌对比  
Fig.6 Experimental results of pitting corrosion of 2304/Q345C hot rolled stainless steel clad plates

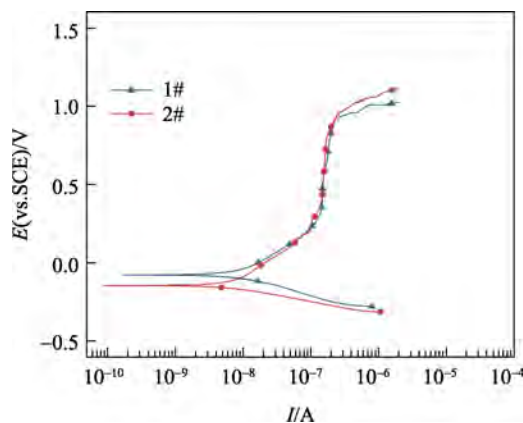


图 7 不同终轧温度下的 2304 不锈钢复合板复层极化曲线  
Fig.7 Polarization curves of cladding in DSS 2304/Q345C hot rolled stainless steel clad plates

表 2 2304/Q345C 轧制不锈钢复合板复层的腐蚀性能测试结果

Tab.2 Corrosion resistance results of cladding in 2304/Q345C hot rolled stainless steel clad plates

| 试验材料 | 晶间腐蚀敏感性/<br>( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 点蚀速率/<br>( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 电化学参量                      |                                                                             |                |
|------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|
|      |                                                                      |                                                                   | 开路电位 $E_{\text{corr}}$ /mV | 腐蚀电流密度<br>$J_{\text{corr}}/(\text{10}^{-5} \text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 击穿电位 $E_p$ /mV |
| 1#   | 229.79                                                               | 1 440.36                                                          | -133                       | 7.61                                                                        | 1 050          |
| 2#   | 151.27                                                               | 455.34                                                            | -213                       | 2.97                                                                        | 1 080          |

不锈钢的点蚀主要与钝化膜的抗击穿能力有关, 材料的缺陷越少, 或不均匀性越低, 其膜的抗腐蚀性越好。在较高终轧/开冷温度下, 位错密度降低, 有利于复层表面生成较为稳定的钝化膜, 可以有效抑制点蚀的发生。另外, Rao 等<sup>[20]</sup>在对奥氏体不锈钢复合板的热轧工艺研究中得出, 在热轧过程中, 提高开冷温度, 使得组织在高温区域的保温时间更长, 组织更加均匀, 对抑制点蚀的发生有一定促进作用。因此, 2#试样的抗点蚀性能明显优于 1#试样。晶间腐蚀主要和晶界的析出相有关, 当晶界有富铬析出相时, 会致使周边贫 Cr, 从而在晶内和晶界产生电位差, 导致晶界优先腐蚀。1#试样的抗晶间腐蚀性能较低, 与晶界析出的  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  有关。2#试样由于在较高终轧/开冷温度下, 生成的碳化铬重新固溶, 晶界析出相消失<sup>[21]</sup>, 故其抗晶间腐蚀性能相对较好。

### 3 结论

2 种终轧/开冷温度下, 轧 2304/Q345C 双相不锈钢-碳钢复合板复层的微观组织与耐腐蚀性能对比研究表明, 2 种复合板复层均由奥氏体和铁素体组成, 相界呈锯齿状形貌, 相较于 950/920 °C 终轧/开冷温度下的复合板, 1 050/1 020 °C 终轧/开冷温度下的复合板复层的两相相界趋于规整, 铁素体含量较高, 相界的位错密度较低, 析出相消失。1 050/1 020 °C 的终轧/开冷温度下, 复合板界面处的剪切强度较大, 结合强度较高, 耐点蚀和晶间腐蚀性更优。

#### 参考文献:

- [1] LI Long, ZHANG Xin-jin, LIU Hui-yun, et al. Production Technology and Application of Stainless Steel Clad Plate[J]. Steel Rolling, 2013, 30(3): 43-47.
- [2] LIU B X, WANG S, FANG W, et al. Meso and Micro-scale Clad Interface Characteristics of Hot-Rolled Stainless Steel Clad Plate[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 17-25.
- [3] 于涛, 井玉安, 张亚樵, 等. 不锈钢复合板界面组织形貌[J]. 钢铁, 2018, 53(11): 63-69.  
YU Tao, JING Yuan, ZHANG Ya-qiao, et al. Interfacial Microstructure Morphologies of Stainless Steel Clad Plate[J]. Iron & Steel, 2018, 53(11): 63-69.
- [4] 何天仁. 轧制法生产不锈钢复合板工艺研究及应用[J]. 中国冶金, 2014, 24(1): 6-10.  
HE Tian-ren. Analysis and Application of Stainless Steel Composite Plate by Hot Rolling Technology[J]. China Metallurgy, 2014, 24(1): 6-10.
- [5] 段昌新. 真空热轧 316L/EH40 复合板界面微观组织及力学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.  
DUAN Chang-xin. Study on Microstructure and Mechanical Properties of the Interface of Vacuum Hot Rolled 316L/EH40 Composite Plate[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [6] 张心金, 祝志超, 刘会云. 热轧不锈钢复合板界面组织与拉伸断裂的研究[J]. 武汉科技大学学报, 2017, 40(6): 408-414.  
ZHANG Xin-jin, ZHU Zhi-chao, LIU Hui-yun. Study on Interfacial Morphologies and Tensile Fracture of Hot-Rolled Stainless Steel Clad Plates[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2017, 40(6): 408-414.
- [7] 蒋健博, 及玉梅, 付魁军, 等. 热轧不锈钢复合板组织与性能分析[J]. 焊接, 2015(7): 42-46.  
JIANG Jian-bo, JI Yu-mei, FU Kui-jun, et al. Investigation of Microstructures and Properties of Hot-Rolled Stainless Clad Plate[J]. Welding & Joining, 2015(7): 42-46.
- [8] 肖富强, 王东坡, 胡文彬, 等. 终轧温度对 2205/Q235B 双相不锈钢复合板组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16119-16124.  
XIAO Feng-qiang, WANG Dong-po, HU Wen-bin, et al. Effect of Final Rolling Temperature on Microstructure and Properties of 2205/Q235B Duplex Stainless Steel Clad Plate[J]. Materials Reports, 2020, 34(16): 16119-16124.
- [9] LIU B X, WANG S, FANG W, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Stainless Steel Clad Plate by Heat Treatment[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 216: 460-467.
- [10] 代响林, 刘宝玺, 马久乐, 等. 真空热轧法制备不锈钢复合板组织和力学性能[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 65-70.  
DAI Xiang-lin, LIU Bao-xi, MA Jiu-le, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Clad Plate Fabricated by Vacuum Hot Rolling[J]. Iron & Steel, 2017, 52(2): 65-70.
- [11] 宜亚丽, 韩晓铠, 张磊, 等. 316L/EH40 不锈钢复合板热轧过程中晶粒组织的均匀性[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 47-55.  
YI Ya-li, HAN Xiao-kai, ZHANG Lei, et al. Homogeneity of Grain Structure for 316L/EH40 Stainless Steel Clad Plate during Hot Rolling Process[J]. Iron & Steel, 2020, 55(1): 47-55.
- [12] 张欣耀, 查小琴, 任永峰, 等. DSS2205 轧制与爆炸复合板复层组织与性能分析[J]. 物理测试, 2021, 39(1): 1-5.  
ZHANG Xin-yao, ZHA Xiao-qin, REN Yong-feng, et al. Microstructure and Properties Analysis of Composite Layer of DSS2205 Rolled and Exploded Clad Plates[J]. Physics Examination and Testing, 2021, 39(1): 1-5.
- [13] 吕泽华, AGAMURADOV Dayanch, 张志雄, 等. 热轧双覆层不锈钢/碳钢复合板组织与性能研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(7): 168-175.  
LÜ Ze-hua, DAYANCH A, ZHANG Zhi-xiong, et al. Research on Microstructure and Properties of Double Cladding Stainless Steel/Carbon Steel Clad Plate by Hot

- Rolling[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(7): 168-175.
- [14] 任永峰, 查小琴, 张凌峰. 2205 双相不锈钢热轧复合板复层组织及性能研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(3): 122-129.
- REN Yong-feng, ZHA Xiao-qin, ZHANG Ling-feng. Study on Multiple Layer Microstructure and Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Hot Rolled Clad Plates[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(3): 122-129.
- [15] 代响林. 热轧不锈钢复合板界面组织及性能的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- DAI Xiang-lin. Research on Interfacial Microstructure and Properties of Stainless Steel Clad Plate Fabricated by Hot Rolling[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [16] 金玉龙. 不锈钢复合板碳扩散及组织性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- JIN Yu-long. Study on Carbon Diffusion and Microstructure of Stainless Steel Clad Plates[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [17] KUROTSU T, SEGAWA A. Evaluation of Deformation Behavior of Oxide Scale in Hot Rolling Process by Vacuum Hot Rolling Mill[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 126-131.
- [18] 马久乐. 不锈钢复合板热处理行为的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- MA Jiu-le. Study on Heat Treatment Behavior of Stainless Steel Clad Plate[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018.
- [19] ARTURO G R M, HUGO L M V, RAFAEL G H, et al. Electrochemical Characterization of AISI 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joints with Electromagnetic Interaction[J]. Procedia Materials Science, 2015, 8: 950-958.
- [20] RAO N V, SARMA D S, NAGARJUNA S, et al. Influence of Hot Rolling and Heat Treatment on Structure and Properties of HSLA Steel Explosively Clad with Austenitic Stainless Steel[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(11): 1387-1396.
- [21] 王子蒙. 316L/Q370qE 复合板界面组织演变特征及腐蚀行为研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
- WANG Zi-meng. Microstructure Evolution and Corrosion Resistance of Interface in 316L/Q370qE Clad Plates[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2020.

责任编辑: 刘世忠