

Hastelloy C-276/316L 激光异质焊缝腐蚀性能

吴东江, 范 聪, 刘士博, 马广义, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要: 利用连续激光对 Hastelloy C-276 和 316L 进行焊接, 借助电化学腐蚀方法比较焊缝中心附近和母材在酸性、中性、碱性溶液中的腐蚀性能, 并利用扫描电子显微镜和 X 线能量色散谱分析腐蚀形貌以及腐蚀表面元素成分。结果表明: 在酸性环境中, 抗腐蚀性由大到小的顺序为 C-276 的抗腐蚀性、焊缝、316L; 在中性环境中, 焊缝的抗腐蚀性和母材的相似; 而在碱性环境中, 焊缝的抗蚀性优于 316L 的, 而其腐蚀趋势大于 C-276 的, 但腐蚀速率小于 C-276 的; C-276 中 Mo 元素较 316L 中的多, 认为焊缝中 Mo 元素主要来自 C-276, 而 Mo 元素在焊缝枝晶间、枝晶杆的含量差别是造成焊缝在酸性、中性溶液中枝晶间腐蚀的重要原因之一; 在碱性溶液中焊缝发生点蚀, 这与晶格缺陷有关。

关键词: Hastelloy C-276/316L; 激光异质焊接; 电化学腐蚀

中图分类号: TG 4251

文献标志码: A

Corrosion performance of laser welding on dissimilar materials Hastelloy C-276/316L

WU Dong-jiang, FAN Cong, LIU Shi-bo, MA Guang-yi, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology, Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: By using continuous laser to weld Hastelloy C-276 and 316L and method of electrochemical corrosion, the corrosion resistances of the weld and base material in acid, neutral and alkaline solution were studied, continuously. The corrosion morphology and the composition of the corrosion surface were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that, in the acidic environment, the sequence of corrosion resistance from high to low are C-276, weld, 316L. In the neutral environment, there is little difference between corrosion resistance of the weld and base materials. In the alkaline environment, the corrosion tendency of 316L is the largest, corrosion tendency of the weld follows, the corrosion tendency of C-276 is the minimum. While the corrosion speed of weld and 316L has no obvious difference, and both of them are obviously less than C-276. In the acidic and neutral solution, the intergranular corrosion is found in the weld. The mass fraction of Mo in the intergranular is about 4% larger than that in the grain. This shows that the segregation of Mo element has a great influence on intergranular corrosion. In the alkaline solution, pitting corrosion is found in the weld and it is associated with lattice defects.

Key words: Hastelloy C-276/316L; laser dissimilar welding; electrochemical corrosion

Hastelloy C-276(以下简称 C-276)是一种万能的抗腐蚀合金, 316L 是一种奥氏体不锈钢, 二者以其优异

的抗蚀性能被广泛应用于化工、海洋及核能工程等领域, 例如在第三代核主泵 AP1000 中, C-276 与 316L

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724307); 国家自然科学基金资助项目(51175061)

收稿日期: 2013-05-20; **修订日期:** 2013-10-22

通信作者: 吴东江, 教授, 博士; 电话: 0411-84707625; E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

分别被用作核主泵屏蔽套和定子、转子连接结构^[1], 在制造过程中, 需对这两种材料进行焊接, 而焊缝抗腐蚀性是评价这种异质材料接头质量的重要方面。采用传统焊接很容易造成薄板母材的变形, 激光焊接具有小光斑直径和集中热输入量等优点, 从而大幅提高了焊接质量。

C-276 作为一种镍基合金, 不仅具有优秀的耐盐酸腐蚀性能^[2-3], 也是少有的对氯离子具有很好抗蚀性的合金, 而且其抗蚀性能对 NaCl、KCl 等盐浓度的增加并不敏感^[4]。合金中的 Cr、Mo 元素对腐蚀性能有很大影响, 研究发现, 增加 Cr 元素含量能明显提高镍基合金的抗腐蚀性能^[5], 在焊接、热处理时, C-276 中的 Mo 元素很容易发生偏析, 从而诱发各种失效问题^[6-8]。针对 316L 的研究发现, 在盐酸、硫酸溶液中, 316L 易发生点蚀^[9-10], 而在弱酸、弱碱溶液中会有明显的钝化现象, Cr、Mo 元素对钝化膜的形成具有重要作用^[11-12]。国内关于 316L 腐蚀性质的研究也较多, 主要集中在氯离子、硫离子等离子对 316L 腐蚀性的影响^[13-15]以及 316L 在酸、碱中的抗腐蚀性能和钝化性能方面^[16-19]。尽管国内外关于 C-276 和 316L 抗腐蚀性能的研究已有很多, 但关于二者异质焊焊缝抗蚀性能的研究却鲜见报道, 仅吴东江课题组对 Hastelloy C-276/316L 激光异质焊接过程微观组织进行了研究, 证实了其激光焊接的可行性^[20], 但并未对异质焊缝的抗蚀性能进行研究。

在此, 本文作者采用电化学方法, 在已有 Hastelloy C-276/316L 激光异质焊接研究的基础上, 分析了激光异质焊接焊缝在酸性、中性、碱性溶液中的抗腐蚀性能, 并将其与母材进行比较, 为其工业应用提供理论指导。

1 实验

1.1 激光焊接

实验所用材料为厚度 0.4 mm 的 C-276 和 316L 薄

板, 其成分见表 1。焊接方式为平板对接, 焊接前用丙酮、无水乙醇及蒸馏水清洁被焊表面。焊接设备采用 Nd:YAG 连续激光器, 焊接参数设置如下: 焊接功率 190 W, 焊接速度为 350 mm/min, 氩气为保护气, 流量为 10 L/min, 离焦量为 0 mm。

1.2 电化学腐蚀

图 1 所示为 Nd:YAG 连续激光焊接得到的焊缝截面形貌, 图 2 所示为 Nd:YAG 脉冲激光焊接下焊缝的主要元素分布, 直线 L_1 、 L_2 之间的焊缝主要元素为 Fe、Ni、Cr 和 Mo, 且分布均匀^[20]。试样尺寸为 30 mm×20 mm×0.4 mm, 用 400~3000 号金相砂纸进行粗磨和细磨, 然后抛光, 得到焊缝腐蚀截面 S, 腐蚀面处于 L_1 与 L_2 之间, 且平行于 L_1 面。

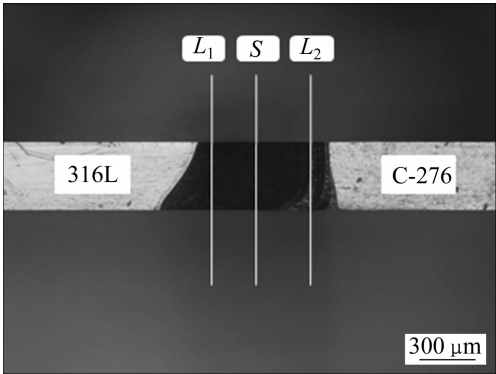


图 1 焊缝截面形貌

Fig. 1 Cross-section morphology of weld

腐蚀液成分如表 2 所列, 腐蚀温度为室温。电化学测试体系采用三电极体系, 待测工件作为工作电极, 饱和甘汞作为参比电极, 铂片作为辅助电极, 电化学仪器采用 PARSTAT 2273 型电化学测试仪, 配合自带软件 Electrochemistry Power Suite Software 测试了焊缝和母材在酸性、中性、碱性溶液中的腐蚀性能。极化曲线扫描电位范围为-0.5~1.5 V, 扫描速率设定为 5 mV/s。腐蚀后利用扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝腐蚀形貌, 并利用 X 线能量色散谱(EDS)选取 3 处不

表 1 C-276 和 316L 的化学成分

Table 1 Chemical composition of C-276 and 316L

Material	Mass fraction/%											
	Ni	Fe	Cr	Mo	W	Co	Mn	C	Si	P	S	V
C-276	Bal.	4~7	14.5~16.5	15~17	3~4.5	≤2.5	≤1.0	≤0.01	≤0.08	≤0.04	≤0.03	≤0.035
316L	10~14	Bal.	16~18	2~3	—	—	≤2.0	≤0.03	≤1.00	≤0.035	≤0.03	—

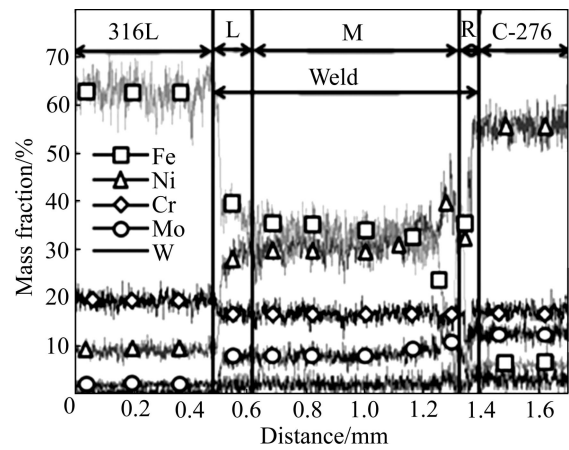


图 2 焊缝主要元素分布
Fig. 2 Distribution of major elements in weld

表 2 腐蚀液配制

Table 2 Corrosion liquid preparation		
Solution	pH	Etching solution
Acid	1	100 mL H ₂ O+5 mL HCl+3 g NaCl
Neutral	7	100 mL H ₂ O+3 g NaCl
Alkaline	14	100 mL H ₂ O+3 g NaOH+3 g NaCl

同的腐蚀表面, 检测元素质量分布, 求取平均值。

2 结果与讨论

2.1 酸溶液中焊缝抗蚀性分析

根据腐蚀学原理, 合金腐蚀电压越低, 热力学上腐蚀趋势就越大, 而腐蚀电流密度越大, 腐蚀速率越快。所以, 合金的腐蚀电压越高, 腐蚀电流密度越小, 耐蚀性越好。由表 3 可知, 焊缝的腐蚀电压大于 316L 的, 而略小于 C-276 的, 所以, 在焊缝的腐蚀倾向低于 316L 的, 却稍高于 C-276 的。从动力学的角度分析, 焊缝和 316L 的腐蚀电流密度同在一个数量级(10^{-6} A/cm²), 但是比 C-276 的腐蚀电流密度大一个数量级

表 3 酸性溶液中焊缝、316L 和 C-276 的电化学参数
Table 3 Electrochemical parameters of weld, 316L and C-276 in acidic solution

Material	$\phi_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
316L	-365.996	5.41×10^{-6}
Weld	-274.509	2.78×10^{-6}
C-276	-249.406	8.02×10^{-7}

(10^{-7} A/cm²), 显然, 焊缝和 316L 腐蚀速率无太大差别, 而大于 C-276 的腐蚀速率。综上分析, 酸性环境下焊缝的耐腐蚀性能差于 C-276 的, 但优于 316L 的。

图 3 所示为焊缝、316L 和 C-276 在酸性环境下的极化曲线。由图 3 可以看出, 在电压小于 0.5 V 的区域, 焊缝处于极化腐蚀状态, 此时反应速率很快; 当电压为 0.5~1.0 V 时, 焊缝进入稳定钝化阶段, 很显然, 焊缝的稳定钝化区范围小于 C-276 的稳定钝化区范围 (0.2~0.9 V), 且焊缝的维钝电流密度(1×10^{-2} A/cm)远远大于 C-276 的维钝电流密度(1×10^{-5} A/cm), 说明虽然同处于钝化状态, 但焊缝腐蚀速率比 C-276 的大。而在 316L 不锈钢的极化曲线中无明显钝化区, 在 -0.2~1.0 V 之间, 随着电压增大, 电流密度先减小后增大。

图 4 所示为焊缝酸性腐蚀条件下的 SEM 像。由图 4 可看出, 焊缝在酸性环境下发生了明显的枝晶间腐蚀, 利用 EDS 分别测量枝晶杆和枝晶间主要元素质量分数。结果如下: 枝晶杆中 Fe 35.32%, Ni 29.25%, Cr 17.32%, Mo 13.31%; 枝晶间中 Fe 33.01%, Ni 27.49%, Cr 17.60%, Mo 17.48%。枝晶间和枝晶杆中含量最多的为 Fe 和 Ni, 且二者含量相差不大。Cr 元素质量分数在枝晶间和枝晶杆中也没有明显差别, 说明在焊接过程中, Cr 元素并没有发生明显的微观偏析, 即枝晶间腐蚀并非由 Cr 元素偏析引起。C-276 中的 Mo 元素质量分数为 15.0%~17.0%, 而 316L 中 Mo 元素的质量分数只有 2.0%~3.0%, 可以认为, 焊缝中的 Mo 元素主要来自 C-276。在焊接熔池结晶过程中, Mo 元素发生偏析, 使得枝晶间 Mo 元素的质量分数比枝晶杆 Mo 元素的质量分数提高 4% 左右, 增大了枝晶

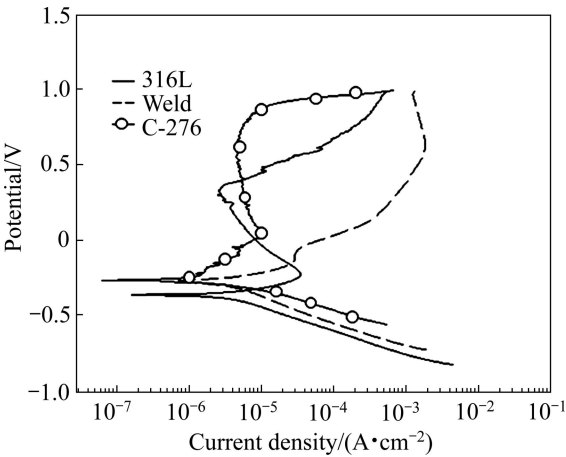


图 3 酸性溶液下焊缝、316L 和 C-276 的极化曲线图
Fig. 3 Polarization curves of weld, 316L and C-276 in acid solution

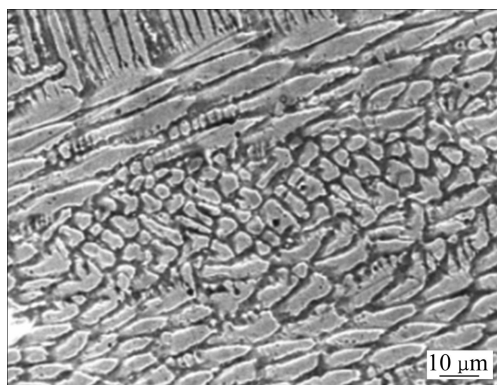


图 4 酸性条件下焊缝腐蚀的形貌

Fig. 4 Corrosion morphology of weld in acid solution

间和枝晶杆在焊缝中成分和结构的不均匀性,从而逐渐造成了枝晶间腐蚀。

2.2 中性溶液中焊缝抗蚀性分析

表 4 所列为中性溶液下 316L、焊缝和 C-276 的电化学参数。从表 4 中可以看出,焊缝和 316L、C-276 的腐蚀电压都在 -250 mV 左右,由热力学知识可知,焊缝、母材在中性环境中的腐蚀趋势相差不大;而从动力学角度分析,焊缝和母材的腐蚀电流密度均在 10^{-8} A/cm² 数量级上,表明焊缝和母材的腐蚀速率没有明显差别。综上分析,在中性溶液中,焊缝和母材的抗腐蚀性能相似。

表 4 中性溶液下 316L、焊缝和 C-276 的电化学参数

Table 4 Electrochemical parameters of 316L, weld and C-276 in neutral solution

Material	$\phi_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
316L	-229.967	1.63×10^{-8}
Weld	-257.133	2.95×10^{-8}
C-276	-273.355	1.22×10^{-8}

图 5 所示为在中性环境下焊缝和母材的极化曲线图。由图 5 可看出,在 -2.5~-0.1 V 阶段,焊缝和母材都处于极化腐蚀阶段,腐蚀速率很快。在 -0.1 V 时,腐蚀表面状态不稳定,因钝化-活化交替进行而导致电流出现震荡,焊缝和 C-276 进入了钝化过渡区,而 316L 却没有明显钝化过渡现象。在 0 V 左右,焊缝和 316L 进入稳定钝化区,研究表明,Cr 元素是提高合金抗蚀性能的有效元素,其以 Cr_2O_3 、 CrOOH 、 $\text{Cr}(\text{OH})_3$

等多种形态组成了钝化膜的主要成分^[21-22]。比较发现,焊缝的稳定钝化区范围(0~0.3 V)明显小于 316L 的钝化区范围(0~0.6 V),并且维钝电流密度也大于 316L 的,说明在钝化状态时,焊缝的腐蚀速率大于 316L,而 C-276 没有明显的稳定钝化区。焊缝的过钝化电位为 0.3 V,小于 316L 的过钝化电位(0.6 V),在焊缝和 316L 各自的过钝化区内都发生了“二次钝化”现象,此现象与 Cr 的氧化物转变有关^[23]。

图 6 所示为焊缝中性条件下的腐蚀形貌。由图 6 可见,在中性溶液中发生了明显的枝晶间腐蚀,利用 EDS 分别测量枝晶间和枝晶杆主要元素的含量。结果如下(质量分数):枝晶杆中 Fe 39.12%, Ni 29.02%, Cr 18.24%, Mo 13.62%, 枝晶间中 Fe 32.16%, Ni 31.37%, Cr 18.07%, Mo 18.40%。比较发现,枝晶间和枝晶杆中 Cr 元素质量分数相差不大,排除铬元素的偏析造成晶间腐蚀的可能性;如在酸性环境中的分析,

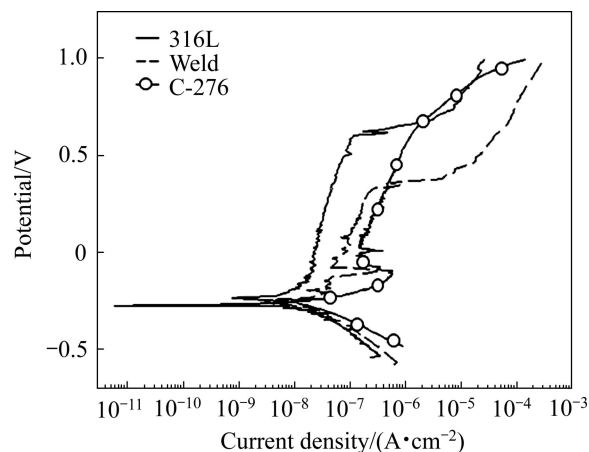


图 5 中性环境下焊缝和母材的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of weld and base metal in neutral solution

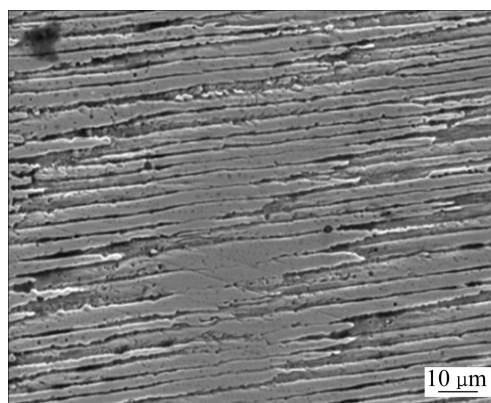


图 6 中性条件下焊缝腐蚀的形貌

Fig. 6 Corrosion morphology of weld in neutral solution

焊缝中的 Mo 元素在熔池结晶过程中发生偏析,使得枝晶间 Mo 元素质量分数比枝晶杆提高 4%左右,导致了枝晶间抗腐蚀性性能下降,逐渐造成了枝晶间腐蚀。

2.3 碱性溶液中焊缝抗蚀性分析

表 5 所列为碱性溶液下电化学参数。由表 5 看出,在碱性环境中,焊缝的腐蚀电压大于 316L 的腐蚀电压,很显然,在热力学上焊缝比不锈钢 316L 有更稳定的腐蚀倾向,而焊缝的腐蚀电压明显小于 C-276 的,所以在碱性环境中焊缝的腐蚀趋势介于 C-276 和 316L 之间。但是从动力学的角度来看,焊缝的腐蚀电流密度和 316L 同在一个数量级(10^{-7} A/cm²),而明显小于 C-276 的腐蚀电流密度(10^{-5} A/cm²),由此可知,在碱性环境下焊缝和 316L 的腐蚀速率相当,而明显小于 C-276 的。

表 5 碱性溶液下电化学参数

Table 5 Electrochemical parameters in alkaline solution

Material	$\phi_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
316L	-603.790	3.88×10^{-7}
Weld	-438.168	2.36×10^{-7}
C-276	-239.706	1.08×10^{-5}

从图 7 极化曲线看出,当电压-0.5~-0.25 V 范围内时,焊缝处于极化腐蚀阶段,腐蚀速率很快,而电压在-0.25~0.5 V 之间时,极化曲线的斜率较-0.5~-0.25 V 阶段的大,说明腐蚀速率有所减小,发生了不完全钝化,这是由于在碱性环境中钝化膜的生成速率小于溶解速率引起的。在 316L 的极化曲线中,可以

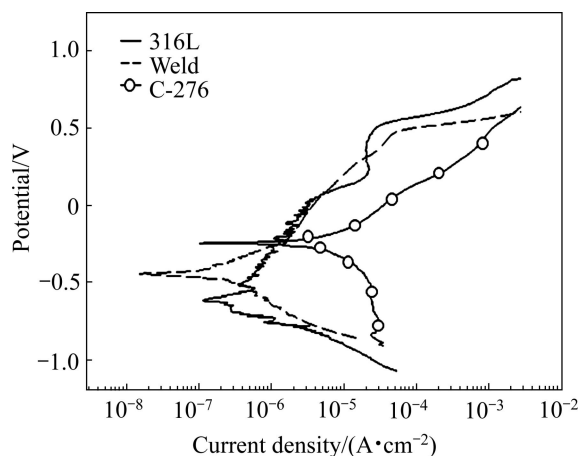


图 7 碱性环境下焊缝、316L 和 C-276 的极化曲线

Fig. 7 Polarization curves of weld, 316L and C-276 in alkaline solution

看到明显的钝化区(0.2~0.4 V),而在不含 NaCl 的质量分数为 1%的 NaOH 溶液中,316L 的钝化区间为 0.1~0.9 V^[19],可以看出受 Cl⁻的影响,钝化区间明显减小,说明在 0.4 V 时钝化膜被破坏。根据吸附理论,氯离子和氧在钝化膜上竞相吸附,当氧的吸附点被氯离子取代时,形成了可溶性络合物,从而钝化膜被破坏。而从 C-276 的极化曲线可以看出,C-276 始终处于极化腐蚀阶段,没有观察到钝化现象,从而解释了 C-276 的腐蚀电流密度比焊缝和 316L 的都大的原因。

图 8 所示为碱性条件下焊缝的腐蚀形貌。由图 8 可以看出,焊缝发生明显的点蚀,而点蚀与元素分布的均匀程度、晶体缺陷程度有很大关系^[24-25]。利用 EDS 在点蚀和没有点蚀处测量主要元素的含量,结果如下(质量分数):点蚀处 Fe 27.04%,Ni 34.64%,Cr 19.37%,Mo 18.95%,非点蚀处 Fe 27.19%,Ni 34.47%,Cr 17.84%,Mo 20.30%,发现在点蚀处和非点蚀处主要元素的质量分数并没有显著差别,这就排除了金属元素分布不均匀造成点蚀的可能。而由于激光焊接过程的快速冷却,使焊缝存在大量非平衡晶体缺陷,因此认为焊缝点蚀与晶格缺陷有关。

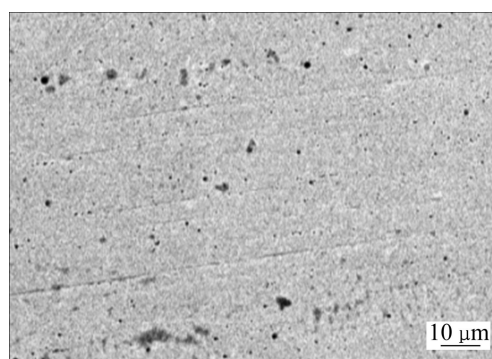


图 8 碱性条件下焊缝的腐蚀形貌

Fig. 8 Corrosion morphology of weld in alkaline solution

3 结论

1) 在酸性环境中,抗腐蚀性从大到小的顺序为 C-276、焊缝、316L;焊缝的稳定钝化区小于 C-276 的,而 316L 没有明显的钝化区;Mo 元素偏析是造成焊缝酸性环境中的枝晶间腐蚀的重要原因之一。

2) 在中性溶液中,焊缝和母材的抗腐蚀性相差不大;焊缝的稳定钝化区范围明显小于 316L 的钝化区范围,C-276 无明显钝化区;Mo 元素偏析是造成焊缝中性环境中的枝晶间腐蚀的重要原因之一。

3) 在碱性环境中,从热力学角度评价,腐蚀趋势

从大到小的顺序为 316L、焊缝、C-276; 从动力学角度评价, 焊缝的腐蚀速度和 316L 的相当, 但明显小于 C-276 的; 焊缝的钝化现象并不明显, 316L 的稳定钝化区很小, 而 C-276 中没有观察到稳定钝化区; 晶格缺陷是造成焊缝在碱性溶液中点蚀的重要原因。

REFERENCES

- [1] 朱智, 张立文, 顾森东. Hastelloy C-276 合金应力松弛试验及蠕变本构方程[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1063–1067.
ZHU Zhi, ZHANG Li-wen, GU Sen-dong. Stress relaxation test of Hastelloy C276 alloy and its creep constitutive equation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1063–1067.
- [2] SINGH V B, GUPTA A. The electrochemical corrosion and passivation behavior of Monel 400 in concentrated acids and their mixtures[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(6): 1433–1442.
- [3] ZHANG Qiang, TANG Rui, YIN Kai-ju, LUO Xin, ZHANG Le-fu. Corrosion behavior of Hastelloy C-276 in supercritical water[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2092–2097.
- [4] KHALID S E, MALAHY A L, HODGKIESB T. Comparative studies of the seawater corrosion behavior of a range of materials[J]. Desalination, 2003, 158 (3): 35–42.
- [5] HOJONG K, MITTON D B, LATANISION R M. Corrosion behavior of Ni-base alloys in aqueous HCl solution of pH 2 at high temperature and pressure[J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 801–809.
- [6] MA Guang-yi, WU Dong-jiang, GUO Dong-ming. Segregation characteristics of pulsed laser butt welding of Hastelloy C-276[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, 42(13): 3853–3857.
- [7] 焦少阳, 朱冠妮, 董建新. Hastelloy C-276 中碳化物析出及晶界贫 Mo 规律研究[J]. 材料工程, 2011(1): 47–52.
JIAO Shao-yang, ZHU Guan-ni, DONG Jian-xin. Carbide evolution and Mo deplet ion law in Hastelloy C-276[J]. Materials Engineering, 2011(1): 47–52.
- [8] LU Yan-ling, LIU Jin-xi, LI Xiao-ke, LIANG Jian-ping, LI Zhi-jun, WU Guan-yuan, ZHOU Xing-tai. Hot deformation behavior of Hastelloy C-276 superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): s84–s88.
- [9] MICHELI L D, BARBOSA C A, ANDRADE A H P. Electrochemical behaviour of 254SMO stainless steel in comparison with 316L stainless steel and Hastelloy C276 in HCl media[J]. British Corrosion Journal, 2000, 35(4): 297–300.
- [10] REFAEY S A M, TAHA F, EL-MALAK abd A M. Inhibition of stainless steel pitting corrosion in acidic medium by 2-mercaptobenzoxazole[J]. Applied Surface Science, 2004, 236(1): 175–185.
- [11] ALAN T, ANTHONY W, SHENGQI Z. Corrosion and electrochemical behaviour of 316L stainless steel in acetic acid solutions[J]. Corrosion Science, 2003, 45(5): 1051–1072.
- [12] SUDESH T L, WIJESINGHE L, BLACKWOOD D J. Electrochemical & optical characterization of passive films on stainless steels[J]. Journal of Physics, Conference Series, 2006, 28(1): 74–78.
- [13] 葛红花, 周国定, 解群. 304、316L 不锈钢耐氯离子和硫离子性能比较[J]. 华东电力, 2005, 33(9): 13–15.
GE Jong-hua, ZHOU Guo-ding, XIE Qun. Comparison of anti-corrosion behavior to chloride ions and sulfide ions between 304 and 316L stainless steel[J]. East China Electric Power, 2005, 33(9): 13–15.
- [14] 张金钟, 廖芸, 郑初. Cl⁻浓度对 316L 不锈钢点蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 71–73.
ZHANG Jin-zhong, LIAO Yun, ZHEN Chu. The influence of Cl concentration to 316L stainless steel spot corrosion behavior[J]. Corrosion and Corrosion Protection, 2012, 33(1): 71–73.
- [15] LIN Bi-lan, LU Xin-ying, LI Long. Corrosion behaviors of arc spraying single and double layer coatings in simulated Dagang soil solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(6): 1556–1561.
- [16] 程学群, 李晓刚, 杜翠薇. 316L 不锈钢在含氯高温醋酸溶液中的电化行为[J]. 金属学报, 2006, 42(3): 299–304.
CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang, DU Cui-wei. Electrochemical behavior of 316L stainless steel in Cl containing acetic acid solution under high temperature[J]. Metal Journal, 2006, 42(3): 299–304.
- [17] 程学群, 李晓刚, 杜翠薇. 316L 不锈钢在含氯高温醋酸溶液中的自钝化行为[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(9): 840–844.
CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang, DU Cui-wei. Passivation behavior of 316L stainless steel in Cl containing acetic acid solution under high temperature[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(9): 840–844.
- [18] TANG Jun-lei, ZUO Yu, TANG Yu-ming, XIONG Jin-ping. Composition and corrosion resistance of palladium film on 316L stainless steel by brush plating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 97–103.
- [19] 李成涛, 李晓刚, 程学群, 董超芳. 316L 不锈钢、690 合金在氢氧化钠溶液中的电化性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4): 352–355.
LI Cheng-tao, LI Xiao-gang, CHENG Xue-qun, DONG Chao-fang. Electrochemical properties of 316L stainless steel and 690 alloy in NaOH solution[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(4): 352–355.
- [20] 吴东江, 刘士博, 张天武, 马广义. Hastelloy C-276 / 316L 脉

- 冲激光异质焊接微观组织研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(11): 2120–2124.
- WU Dong-jiang, LIU Shi-bo, ZHANG Tian-wu, MA Guang-yi. Microstructure of pulse laser welding on dissimilar materials Hastelloy C-276 and 316L[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(11): 2120–2124.
- [21] OLSSON C O A, LANDOLT D. Passive films on stainless steels—Chemistry, structure and growth[J]. Electrochimica Acta, 2003, 48: 1093–1104.
- [22] YANG W P, COSTA D, MARCUS P. Resistance to pitting and chemical composition of passive films of a Fe-17%Cr alloy in chloride-containing acid solution[J]. J Electrochem Soc, 1994, 141(10): 2669–2676.
- [23] GOODLET G, FATY S, CARDOSO S. The electronic properties of sputtered chromium and iron oxide films[J]. Corrosion Science, 2004, 46(6): 1479–1499.
- [24] 林玉珍, 杨德钧. 腐蚀和腐蚀控制原理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 140–141.
- LIN Yu-zhen, YANG De-jun. Corrosion and corrosion control principle[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 140–141.
- [25] 姚 星, 段红平, 李 光, 夏 原. 异种不锈钢激光焊接相结构变化对腐蚀特性的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(2): 72–76.
- YAO Xing, DUAN Hong-ping, LI Guang, XIA Yuan. Effects of microstructure change on corrosion resistance of dissimilar stainless steel joint by laser welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(2): 72–76.
- (编辑 龙怀中)