

热处理制度对 316L/Q345R 爆炸焊复合板组织及性能的影响

王 斌, 徐 明, 胡 静, 王 良, 雷菠菠

(西南石油大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:运用光学显微镜、扫描电镜和扫描电化学显微镜(SECM)等研究了经过不同热处理后 316/Q345R 复合板的力学性能、耐晶间腐蚀和点蚀的能力,以及界面处微区耐蚀性规律。结果表明,经过 900 °C × 0.5 h 保温处理的试样加工硬化消除,冲击吸收能量(155.77 J)提高,腐蚀速率比值最小(0.29),晶间腐蚀倾向小。界面能谱分析得出,在 900 °C 左右元素由高浓度向低浓度扩散,Cr 元素扩散速率较 Ni 的快。SECM 结果显示,靠近界面处的电流都比外侧的电流大,在 580 °C × 3 h、720 °C × 1.5 h、900 °C × 0.5 h 以及原始爆炸态热处理后的最大电流分别为 890、740、605、865 pA。

关键词:316L/Q345R 复合板;热处理;力学性能;扫描电化学显微镜

中图分类号:TG156 **文献标志码:**A **文章编号:**0254-6051(2017)01-0109-06

Effect of heat treatment on microstructure and properties of 316L/Q345R explosive welding clad steel plate

Wang Bin, Xu Ming, Hu Jing, Wang Liang, Lei Bobo

(College of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Mechanical properties and resistance to intergranular corrosion and pitting ability, as well as the micro district corrosion resistance at the binding interface of 316L/Q345R clad plate were investigated through OM, SEM and scanning electrochemical microscopy (SECM). The results show that work hardening of the specimen after 900 °C × 0.5 h is eliminated, impact absorbed energy (155.77 J) increases, corrosion rate(0.29) is minimum and intergranular corrosion tendency is small. Interfacial energy spectrum analysis shows that about 900 °C the elements spread from high concentration to low concentration diffusion, Cr diffusion rate is faster than that of Ni. SECM results show that the current near the interface is larger than the outer side. The maximum current of 580 °C × 3 h, 720 °C × 1.5 h, 900 °C × 0.5 h and original explosive state are 890, 740, 605 and 865 pA, respectively.

Keywords: 316L/Q345R clad plate; heat treatment; mechanical property; scanning electrochemical microscope(SECM)

316L/345R 不锈钢复合板是由 316L 不锈钢作为覆层,为材料提供优良的耐蚀性能。同时以低碳钢 Q345R 作为基层,为复合材料提供较好的综合力学性能。不锈钢复合板的使用有效降低了生产成本,尤其是材料成本。特别是在石化工业、造船等领域应用前景可观。

爆炸焊是利用炸药爆炸瞬间的高温高压而使材料紧密结合在一起。爆炸通常可以实现融化焊很难实现的异种金属的焊接,不锈钢和碳钢的复合板制造已经广泛采用爆炸焊接。如 316L/P355GH^[1]、Ti/304^[2]等爆炸复合板已有所研究。不锈钢复合板的热处理^[3-7]与不锈钢的热处理^[8-10]也有相关研究。316L 微区腐蚀研究^[11-12]也有所报道。J. Izquierdo 等^[11]研究了 304 和 316L 不锈钢在不同浓度的 HCl 溶液中的微区腐

蚀。Yuehua Yin^[12]等利用 SECM 研究了 304 不锈钢的原位腐蚀。郑远谋等^[13]、李炎等^[14]研究了不锈钢爆炸复合板,发现在界面存在 Fe、Ni、Cr 等元素的扩散。

然而覆层与基层性能差异较大,为了使材料满足使用性能要求就需要兼顾两者的理化性能来制定热处理工艺。张成玉等^[15]也研究发现通过对 316L 进行适当的热处理可以提高其耐蚀性,并且通过不同热处理制度调整复合板性能配合是一种经济效益较高的方式。本文在结合两种材料性能的基础之上,制定了几种热处理工艺,并对组织及力学性能,以及耐蚀性进行了比较,特别是对界面的微区腐蚀进行了比较,以期能够为不锈钢复合板热处理提供一些指导。

1 试验材料与方法

试验用爆炸焊接 316L/Q345R 复合板主要化学成分见表 1,规格为 10 mm + 3 mm(Q345R + 316L)。利用线切割机将大的坯料切成 100 mm × 200 mm 的板材,然后在感应加热炉中热处理。分别设置了 4 组热处理制度,580 °C × 3 h、720 °C × 1.5 h、900 °C × 0.5 h

收稿日期:2016-06-05

作者简介:王 斌(1965—),男,副教授,博士,高级工程师,主要从事金属材料焊接及腐蚀防护,联系电话:028-83037405, E-mail: wangbin989@163.com

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2017.01.025

以及原始的爆炸态。

表 1 试验复合板的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of the tested
clad plate(mass fraction, %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Q345R	0.150	0.34	1.38	0.020	0.0100	—	—	—	余量
316L	0.015	0.52	1.11	0.022	0.0011	0.12	17.11	2.10	余量

对试样进行金相观察,用 4% 硝酸酒精对 Q345R 进行侵蚀,用王水对 316L 进行侵蚀。然后在 J55 型金相显微镜下进行金相观察,同时也在牛津 EVO MA15 扫描电子显微镜下进行观察,并配合能谱(EDS)对界面进行了线扫描元素分析。利用 SHT4605 万能试验机进行了拉伸测试,用冲击试验机对复合板进行了冲击试验并对断口进行了分析。利用上海辰华 CHI900C 扫描电化学显微镜(SECM)进行了微区扫描,其中探针电压为 0.5 V,对电极为 Pt 丝,参比电极为 Ag/AgCl/KCl(3 M)。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

经过不同温度热处理后 Q345R 的显微组织如图 1 所示,尽管经过了不同的热处理,但是其 4 种状态的组织均是由铁素体与珠光体构成。图 1(a)~(d)中,均是以铁素体为基体,珠光体呈现出了不同的形态。在

图 1(a)中,铁素体和珠光体呈现出较为明显的条状,其带状分布特征主要归因于其中的 Mn 元素的扩散速度较慢。图 1(a)中珠光体块较大,这比较不利于在受力时使各个晶粒均匀受力,容易导致断裂失效。在铁素体内可观察到许多细小的亚晶界,这是由于在爆炸过程中巨大的冲击波对晶粒的物理作用。在图 1(b)~(d)中可以发现在图 1(b)中还存在很弱的带状组织形态,但是其组织明显变细小,尤其是珠光体晶粒变得很细小。因为复合板中力学性能主要由低碳钢提供,所有这非常有利于提高复合板的力学性能。

图 2 为不同热处理后 316L 侧的显微组织,组织均为单一的奥氏体晶粒,几种方式的热处理后对晶粒的形态几乎没有影响,这是因为奥氏体在这几组温度内均不会发生相变也不会发生再结晶,故而呈现出较为相似的组织形态。在奥氏体晶粒内分布有较多的孪晶,这些孪晶在较高温度发生再结晶时会提供较多的形变能。在晶界处也分布着夹杂颗粒,根据其相变动力学分析应该为 Cr 的化合物,这种化合物对其耐腐蚀性影响较为敏感。

2.2 复合板力学性能

表 2 列出了 4 种状态的抗拉强度、规定塑性延伸强度、伸长率和冲击吸收能量。可以发现爆炸态的抗拉强度和规定塑性延伸强度较热处理态高出很多,且规定塑性延伸强度仅比抗拉强度低 9.8%,两者很接

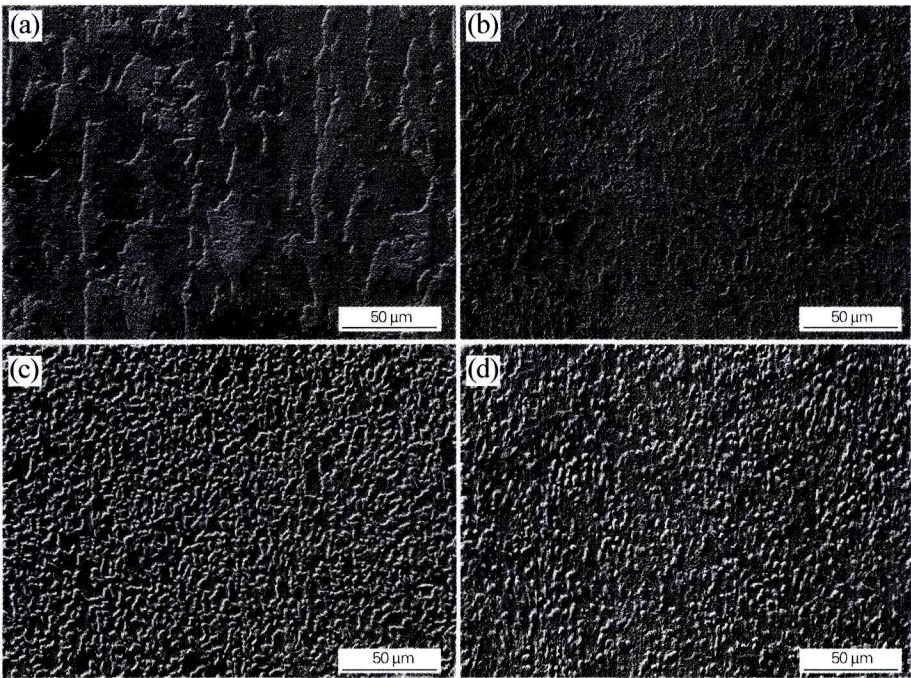


图 1 复合板不同热处理后 Q345R 侧 SEM 显微组织

Fig. 1 SEM images of the Q345R side after different heat treatment

(a) explosive state(爆炸态); (b) 580 °C × 3 h; (c) 720 °C × 1.5 h; (d) 900 °C × 0.5 h

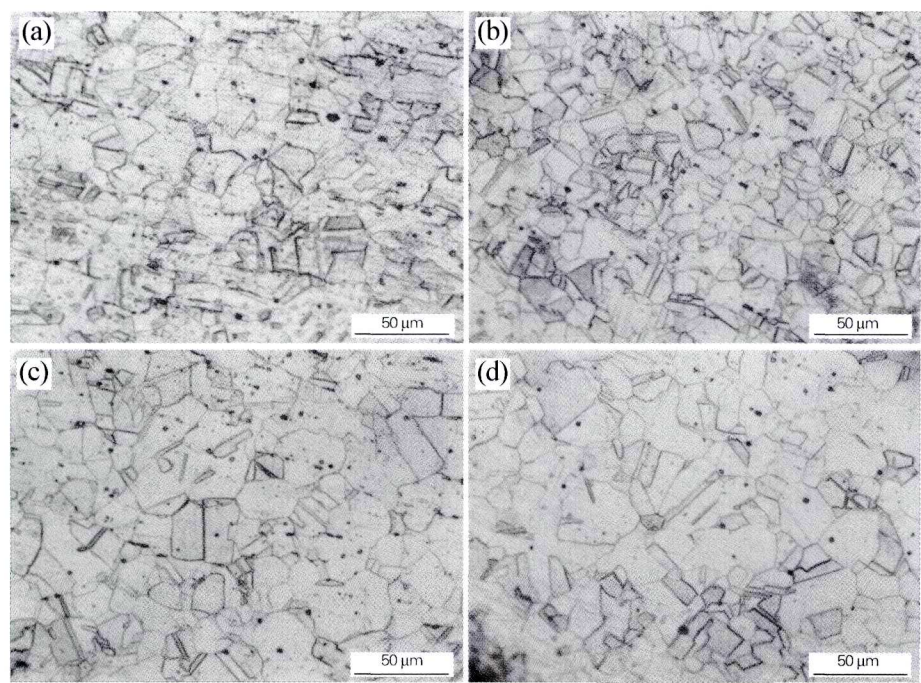


图 2 不同热处理后 316L 钢侧 SEM 显微组织
Fig. 2 SEM images of the 316L side after different heat treatment
(a) 爆炸态(explosive state); (b) 580 °C ×3 h; (c) 720 °C ×1.5 h; (d) 900 °C ×0.5 h

近,而其余 3 种状态都低 40% 以上,这主要是由于在爆炸过程中,巨大的能量使得基体发生了加工硬化,使得规定塑性延伸强度和抗拉强度增加。但是其伸长率为 20.7%,低于复合板伸长率的最低要求,其余 3 种状态的各项力学数据均能满足要求。就冲击吸收能量而言,经过热处理后均提高了,但是在 720 °C 处理时发生了下降,这主要是因为 在 700 °C 左右进行保温时 Q345R 内的珠光体发生了退化,珠光体内部的渗碳体逐渐球化,但是由于其处在珠光体临界相变温度附近,内部球化程度低,并且分布不均匀,且会导致部分珠光体组织片层间距增大,故而冲击吸收能量下降,随着温度的升高,渗碳体能够更加快速地进行球化,在图 1 (d)中可以看到,球化的组织很明显,所以很大程度地提高了冲击性能。

表 2 复合板的力学性能
Table 2 Mechanical properties of the clad plate

试样	抗拉强度/ MPa	规定塑性延伸 强度/MPa	伸长率/ %	-30 °C 冲击 吸收能量/J
爆炸态	685	618	20.7	40.63
580 °C ,3 h	517	313	43.2	148
720 °C ,1.5 h	495	303	46.5	99.63
900 °C ,0.5 h	518	307	38.1	182

2.3 复合板界面

对所有 4 组试样进行了界面的能谱分析,发现均存在不同程度的元素扩散,图 3 中列出了原始爆炸态和经 900 °C 处理后的试样的线扫描结果,可以发现 Cr、Fe、Mn、Ni 等元素均发生了明显的扩散,这主要是因为热处理过程中的高温促进了元素的进一步扩散,Cr、Ni 在不锈钢侧含量较高,它们向含量较低的 Q345R 一侧扩散,而 Fe 元素含量在不锈钢中含量相对较低,所以碳钢向其扩散了 Fe,而这几种元素的扩散对于 316L 钢的耐蚀性都是不利的。Cr 元素扩散了大概 10 μm,Fe 元素大概扩散了 8 μm。Ni 元素大概扩散了 7 μm,而 Mn 元素扩散范围很小。

界面处的这种元素扩散不但不利于 316L 的耐蚀性,还与界面的结合强度密切相关,如图 4 所示,在对 900 °C 处理过后的试样进行冲击试验后在断口的界面处观察到了沿晶断裂,这是因为界面处元素不仅是单纯的扩散,而是同时在晶界形成了化合物,它使得晶界弱化,而在两种材料的结合界面处正是元素扩散行为最活跃的地方。

2.4 覆层 316L 耐蚀性

2.4.1 晶间腐蚀与点蚀评价

在本文中所采用的热处理温度虽然不会使 316L 中的奥氏体发生相变,但是会使其中的析出相发生变化,所以采用 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀

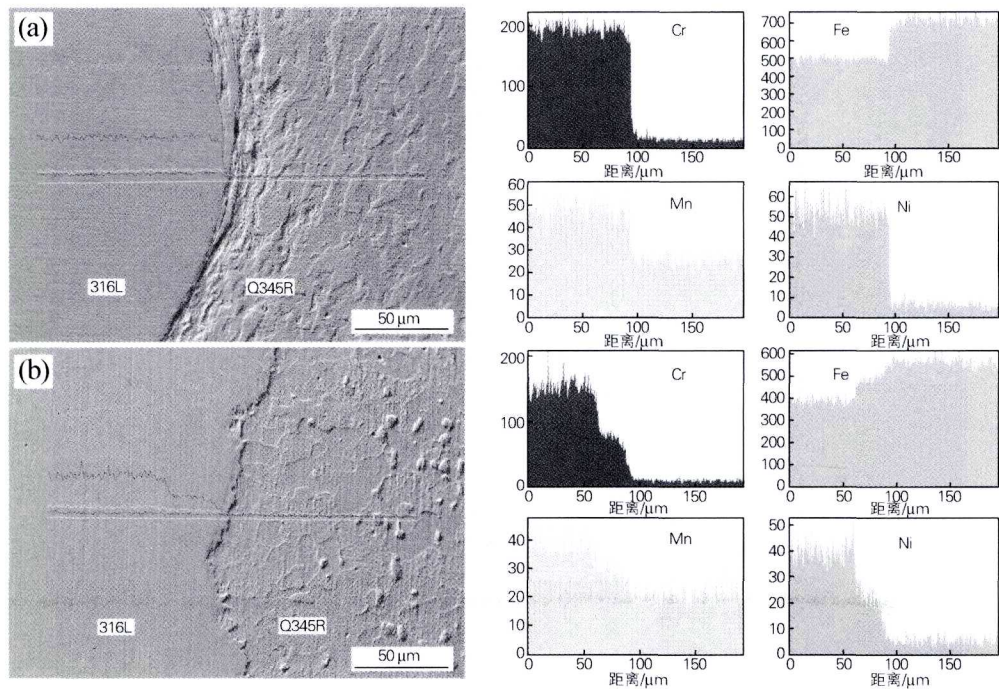
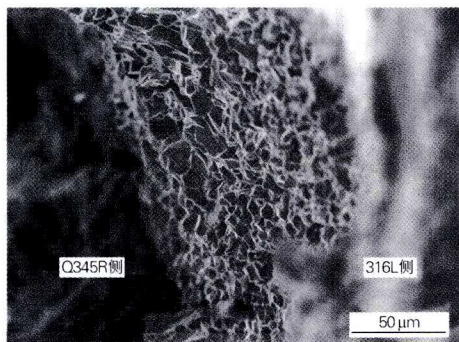


图 3 复合板两种热处理状态的界面元素分布

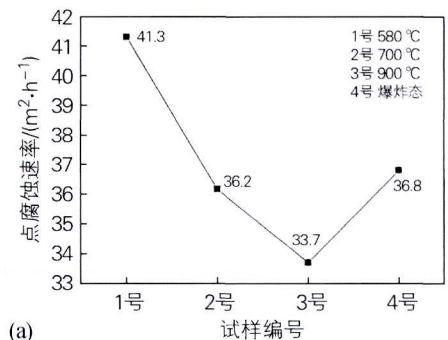
Fig. 3 Element distribution of the clad plate at interface under two kinds treatment state

(a) explosive state(爆炸态); (b) 900 °C × 0.5 h

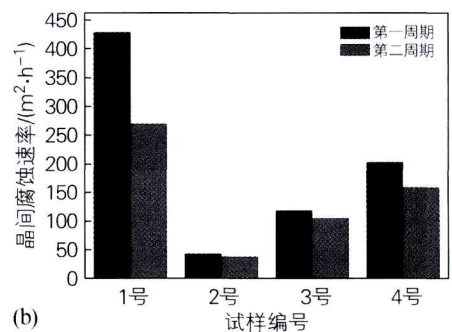
图 4 经过 900 °C × 0.5 h 处理后
试样的结合处断口 SEM 照片Fig. 4 Charpy impact fracture SEM photograph
of the sample by 900 °C × 0.5 h treatment

不锈钢晶间腐蚀试验方法》中的 D 法对 316L 进行了耐晶间腐蚀评价, 结果见图 5(a)。按照 GB/T 17897—1999《不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法》对 316L 进行了 FeCl_3 浸泡试验, 结果如图 5(b)。

可以发现, 在经过 580 °C 处理后的腐蚀速率最快, 远远高于经过 720 °C 和 900 °C 处理后的试样, 甚至比爆炸态的腐蚀速率还快, 主要是因为 580 °C 完全处在 316L 的敏化区间内, 其晶界会析出 Cr 的化合物, 降低其耐晶间腐蚀能力。在图 5(b) 中, 几种状态的耐点蚀能力强弱对比与耐晶间腐蚀相似, 因为在晶界处析出的化合物容易成为点蚀的萌生点。



(a)



(b)

图 5 复合板热处理后的晶间腐蚀速率(a)和
点腐蚀速率(b)Fig. 5 Intergranular corrosion rate (a) and points corrosion
rate (b) of the clad plate after heat treatment

2.4.2 SECM 微区耐蚀性分析

本文利用了 CHI900C 扫描电化学显微镜 (SECM)

对几种热处理状态的 316L 不锈钢进行了界面微区耐蚀性研究。扫描速率为 $30\ \mu\text{m}/\text{s}$, 探针与试样平面距离为 $10\ \mu\text{m}$ 。本试验分析了最靠近界面的约 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 范围的微观腐蚀。

对 4 种热处理状态进行的 SECM 观察结果见图 6, 其中, 图 6(a) ~ (d) 中的左侧为靠近界面的位置。在图 6(a) ~ (d) 均可以观察到靠近界面处探针和试样间的电流都比外侧的电流大, 且大电流的范围在图 6(b) 中最大, 大约为 $30\ \mu\text{m}$, 经过 $580\ ^\circ\text{C}$ 处理的界面大电流范围约为 $20\ \mu\text{m}$ 。图 6(a)、(b) 中电流分区明显, 而经过 $900\ ^\circ\text{C}$ 处理后, 电流较大的区域和较小的区域分界变得模糊, 但是仍然可以看出靠近界面处的电流大, 这也反映出界面处元素的扩散, 以及由界面元素扩散导致的界面处析出物的变化。而在图 6(d) 中, 结合

图 3(a) 可以认为刚刚经过爆炸复合的板材虽然有元素扩散, 但是相对不明显, 故其电流较大的区域内电流没有图 6(a)、(b) 中那么明显, 也没有图 6(b)、(c) 中的范围大。图 6(a) ~ (d) 中的最大电流分别为 890、740、605、865 pA, 可以认为, 电流越大的发生腐蚀的倾向越大, 即发生腐蚀的倾向大小依次为, (a) > (d) > (b) > (c)。这也和前文所述的耐晶间腐蚀和点蚀结果吻合。经过 $580\ ^\circ\text{C}$ 处理后的试样发生了敏化, 晶界析出相使得其电流增大, 增加了腐蚀倾向, 经过 $720\ ^\circ\text{C}$ 、 $900\ ^\circ\text{C}$ 处理过的试样最大电流分别约为 700、575 pA, $900\ ^\circ\text{C}$ 处理的试样电流小的原因可能是由于 $900\ ^\circ\text{C}$ 时晶界处的析出物较 $720\ ^\circ\text{C}$ 时少。而原始的爆炸态同样具有很高的腐蚀倾向, 这与其内部存在的高应力有关。

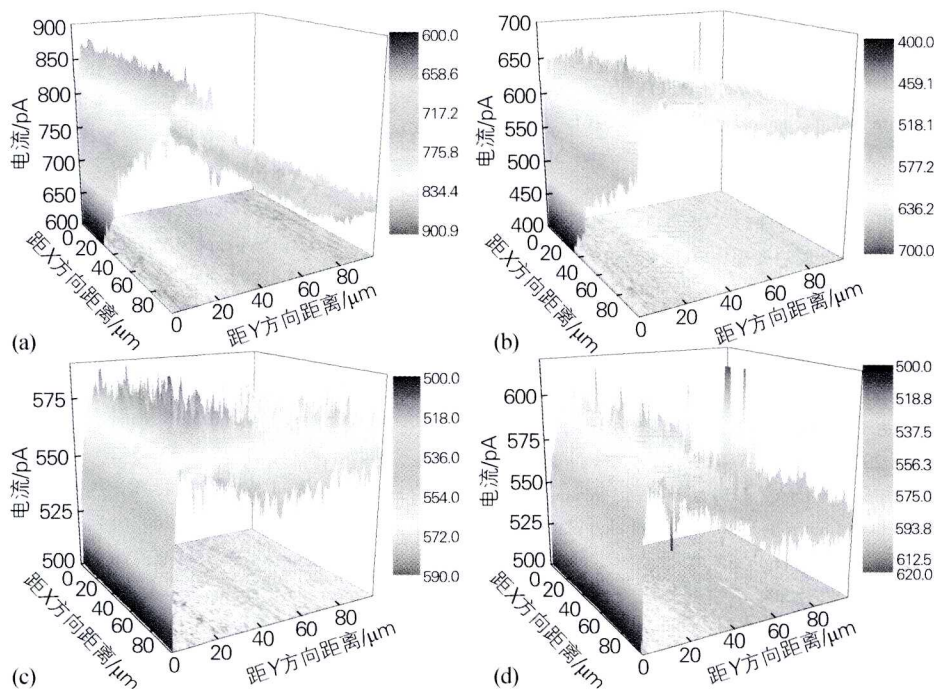


图 6 复合板不同热处理状态界面(316L 侧)SECM 图

Fig. 6 SECM diagram of interface (316L side) of the clad plate under different heat treatment state
(a) $580\ ^\circ\text{C} \times 3\ \text{h}$; (b) $720\ ^\circ\text{C} \times 1.5\ \text{h}$; (c) $900\ ^\circ\text{C} \times 0.5\ \text{h}$; (d) explosive state(爆炸态)

3 结论

1) 本文对 316L/Q345R 复合板设置了 4 组热处理制度($580\ ^\circ\text{C} \times 3\ \text{h}$ 、 $720\ ^\circ\text{C} \times 1.5\ \text{h}$ 、 $900\ ^\circ\text{C} \times 0.5\ \text{h}$ 以及原始爆炸态)。试验得出, 经过 $900\ ^\circ\text{C} \times 0.5\ \text{h}$ 保温处理的试样加工硬化消除, 冲击吸收能量 ($155.77\ \text{J}$) 提高, 腐蚀速率比值 (0.29) 最小, 结合面的最大电流为 605 pA, 晶间腐蚀倾向小。

2) 界面能谱分析得出, 在 $900\ ^\circ\text{C}$ 左右元素由高浓度向低浓度扩散, Cr 元素扩散速率较 Ni 的快。另外

在 $900\ ^\circ\text{C}$ 处理后的试样断口界面处观察到了沿晶断裂, 这是因为界面处元素不仅是单纯的扩散, 而是同时在界面形成了化合物, 它使得晶界弱化。

3) 根据 SECM 结果显示, 靠近界面处的电流都比外侧的电流大, 在 $580\ ^\circ\text{C} \times 3\ \text{h}$ 、 $720\ ^\circ\text{C} \times 1.5\ \text{h}$ 、 $900\ ^\circ\text{C} \times 0.5\ \text{h}$ 热处理后以及原始爆炸态的最大电流分别为 890、740、605、865 pA, 且大电流的范围在 $720\ ^\circ\text{C} \times 1.5\ \text{h}$ 热处理的, 最大, 大约为 $30\ \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] Kacar R, Acarer M. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel[J]. Materials Processing Technology, 2004, 152: 91-96.
- [2] Mousavi S A A A, Sartangi P F. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. Material Design, 2009, 30: 459-68.
- [3] 王小华. 热处理制度对 S11306-Q345R 复合钢板组织和性能的影响[J]. 压力容器, 2011, 28(5): 2-7.
Wang Xiaohua. Effect of heat processing on metallurgical structure and mechanical behavior of S11306-Q345R clad plate[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(5): 2-7.
- [4] 喻兰英, 罗宏, 李新跃. 退火对 2205 双相不锈钢-16MnR 爆炸复合板性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(3): 50-53.
Yu Lanying, Luo Hong, Li Xingyue. Effect of annealing process on properties of explosive clad plates of 2205 duplex stainless steel-16MnR steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(3): 50-53.
- [5] 金贺荣, 张春雷, 韩雪艳, 等. 热处理对 316L/Q345R 不锈钢复合板显微组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 952-958.
Jin Herong, Zhang Chunlei, Han Xueyan, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L/Q345R stainless steel clad plate[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 952-958.
- [6] 白允强, 邓家爱, 王章忠, 等. 热处理对 2205-Q345 爆炸焊复合板界面组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(11): 60-62.
Bai Yunqiang, Deng Jiaai, Wang Zhangzhong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of explosive clad plates of 2205 duplex stainless steel-Q345 carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(11): 60-62.
- [7] 刘会云, 张心金, 李龙. 热处理对热轧不锈钢复合板组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(6): 67-70.
Liu Huiyun, Zhang Xinjin, Li Long. Effects of heat treatment on microstructure and properties of hot rolled stainless steel clad plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(6): 67-70.
- [8] 黄仲佳, 刘明朗. 热处理工艺对 304 不锈钢管胀管性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(7): 18-21.
- Huang Zhongjia, Liu Minglang. Effect of heat treatment on expanding of 304 stainless steel tube[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(7): 18-21.
- [9] 柏永青, 陈明明, 陈慧琴. 316LN 热变形行为及动态再结晶晶粒的演变规律[J]. 太原科技大学学报, 2009, 30(5): 424-427.
Bai Yongqing, Chen Mingming, Chen Huiqin, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization behaviors of 316LN[J]. Journal of Taiyuan University of Science & Technology, 2009, 30(5): 424-427.
- [10] 项建英, 宋仁伯, 任培东. 316L 不锈钢动态再结晶行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 1555-1559.
Xiang Jianying, Song Renbo, Ren Peidong. Dynamic recrystallization behavior of 316L stainless steel[J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2009, 31(12): 1555-1559.
- [11] Izquierdo J, Martín-Rufz L, Fernández Bibiana, et al. Imaging local surface reactivity on stainless steels 304 and 316 in acid chloride solution using scanning electrochemical microscopy and the scanning vibrating electrode technique[J]. Electrochimica Acta, 2014, 134: 167-175.
- [12] Yin Yuehua, Niu Lin, Lu Min, et al. In situ characterization of localized corrosion of stainless steel by scanning electrochemical microscope[J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 9193-9199.
- [13] 郑远谋, 张胜军. 不锈钢-钢爆炸复合板结合区的研究[J]. 钢铁研究, 1998(1): 30-34.
Zheng Yuanmou, Zhang Shengjun. Study on bonding zone in stainless steel-carbon steel explosive welding composite plate[J]. Research on Iron & Steel, 1998(1): 30-34.
- [14] 李炎, 祝要民, 周旭峰, 等. 316L/16MnR 热轧复合板界面组织结构的的研究[J]. 金属学报, 1995, 31(12): 537-542.
Li Yan, Zhu Yaomin, Zhou Xufeng, et al. Interfacial microstructures of hot-rolled 316L/16MnR composite plate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(12): 537-542.
- [15] 张成玉, 戴晨, 余海洲, 等. 热处理对 316L 不锈钢组织和性能的影响[J]. 南方金属, 2007(1): 31-34.
Zhang Chengyu, Dai Sheng, Yu Haizhou, et al. Influence of heat-treatment on the microstructure and properties of 316L stainless steel[J]. Southern Metals, 2007(1): 31-34.

全国热处理学会 2017 年会员募集和缴纳会费工作开始啦

新的一年,我会会员将享受更多贴心服务,购书优惠享包邮,参加活动优惠多,精品培训来充电,资讯期刊免费得。更多服务详情及入会流程,请浏览热处理学会网站 www.chts.org.cn,现在加入,将获得精美实用彩页一份,限量赠予,先到先得,期待您的加入!

个人会员会费 100 元/年(须一次性缴纳两年或两年以上会费,免费获得《中国热处理》,团体会员会费 1000 元/年,(免费获得我会三种期刊、享受热处理学会网站添加企业团体会员链接服务;还可定制团体会员标牌,需另收取费用 380 元费用),付款方式可通过银行汇款或邮局邮寄。

银行汇款方式

户名:中国机械工程学会热处理分会,开户行:北京工商银行东升路支行(行号:102100000626),

账号:0200006209014463944

邮局汇款方式:北京 907 信箱,热处理学会,邮编:100083,联系人:韩冲、付丛伟

期待您的加入! 欢迎来电垂询:010-82755375,62920613;详情请浏览热处理学会网站 www.chts.org.cn。