

双面超薄不锈钢复合板激光焊接接头组织性能研究

王文先^{1,2} 张亚楠² 崔泽琴^{1,2} 闫兴贵²

(¹新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)
(²太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 以高 Cr、Ni 合金粉为填充材料, 采用 Nd:YAG 脉冲激光对 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm 双面超薄不锈钢复合板进行对接焊, 对焊接接头的组织、抗拉强度、焊缝区显微硬度以及焊缝表面耐腐蚀性能进行了研究。结果表明, 激光焊接的表面成形性好、变形小、无缺陷, 焊缝金属与覆层不锈钢及基层碳钢连接良好; 焊缝中心为晶粒取向不规则的细小等轴晶, 其他区域为柱状晶, 几乎看不到热影响区, 焊缝表面为奥氏体+少量铁素体+少量马氏体组织; 焊接接头的抗拉强度达到了母材的 92%, 伸长率为母材的 25%; 焊缝区显微硬度与母材相比有显著提高; 不锈钢复合板焊缝表面和母材覆层抗电化学腐蚀性能接近。

关键词 激光技术; 超薄不锈钢复合板; 激光焊接; 力学性能; 抗腐蚀性能

中图分类号 TG456.7; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0503002

Study on Microstructure and Properties of Double Ultra-thin Stainless Steel Clad Plate by Laser Welding

Wang Wenxian^{1,2} Zhang Yanan² Cui Zeqin^{1,2} Yan Xinggui²

¹Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan, Shanxi 030024, China

²College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract Nd:YAG pulse laser is used to weld 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm double-sided ultra-thin stainless steel clad plate with high chromium-nickel alloy powders as filling materials. The microstructure, tensile strength, micro hardness of welded joints, and corrosion resistance of welding surface are studied. The results show that it has good welding appearance, little deformation, non-defect, and the connecting among weld metal, stainless steel layer and the base are fine; weld center is small equiaxed of the grain orientation without regularity, and other regional is columnar crystal, barely seeing the heat affected zone (HAZ), and weld microstructure is austenite+a little ferritic+a little martensite; tensile strength of welded joint has reached 92% of the base metal, and elongation is 25% of base metal; the micro hardness of weld zone has been significantly improved than the base metal; electrochemical corrosion of the weld surface is similar to the composite layer of the base metal.

Key words laser technique; ultra-thin stainless steel clad plate; laser welding; mechanical properties; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.3900; 180.0180

1 引 言

不锈钢复合板是以碳钢材料为基层, 以不锈钢材料为覆层的复合钢板, 具有碳钢承受载荷的能力和不锈钢抗腐蚀的功能, 是纯不锈钢板的最佳替代材料。与不锈钢板相比不仅节约了大量稀有贵金属, 而且可以降低成本的 30%~50%^[1]。

目前, 覆层厚度大于 1 mm 的不锈钢复合板的对接焊工艺都已成熟, 而对于覆层厚度不大于 0.5 mm 的超薄不锈钢复合板, 尤其是双面覆层不锈钢复合板的对接焊仍然存在较大问题, 其焊缝表面抗腐蚀性能低, 制约了不锈钢复合板的广泛应用^[2]。

本文利用 Nd:YAG 激光器波长短、吸收率高,

收稿日期: 2010-11-08; 收到修改稿日期: 2011-01-17

作者简介: 王文先(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事材料连接及其界面行为、焊接结构强度与断裂性能等方面的研究。E-mail: wwx960@126.com

具有聚焦光斑功率密度高、熔化量小、精密成型、控制简单、精确性和自动化程度高,特别适合焊接特殊难焊的同种或异种金属等优点^[3~7],采用 Nd:YAG 脉冲激光对 0.1 mm 不锈钢+0.8 mm 碳钢+0.1 mm 不锈钢的双面超薄不锈钢复合板进行对接焊,分析了焊接工艺和焊缝金属的组织性能,特别是焊缝金属表面的抗腐蚀性能。

2 焊接方法设计与填充材料的选择

2.1 试验材料

试验采用 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm 的双面超薄不锈钢复合板,试样尺寸为 150 mm×75 mm×1 mm。覆层为 0.1 mm 的 304 不锈钢,基层为 0.8 mm 的 Q235 碳钢,填充材料为 300 目(48 μm)的高 Cr、Ni 合金粉,其化学成分见表 1。

表 1 母材及焊材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and welding materials (mass fraction, %)

Base metal /Welding materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
Stainless steel 304 for cladding	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.00~19.00	8.00~11.00	Bal.
Carbon steel Q235 for basement layer	≤0.22	0.12~0.30	≤0.70	≤0.045	≤0.045	—	—	Bal.
Cr, Ni metal powders	≤0.03	≤0.70	≤1.40	≤0.025	≤0.022	36.00~37.00	16.00~17.00	Bal.

2.2 焊接方法及填充材料

对于超薄不锈钢复合板的焊接有多种工艺方法,其最终目标是焊缝金属表面具有与覆层同等的抗腐蚀性能。

对于 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm 的双面超薄不锈钢复合板,如果直接对接焊,基层与覆层熔化形成的焊缝金属,其 Cr、Ni 含量远低于覆层含量,焊缝金属不具有覆层的抗腐蚀性能。如果中间添加与覆层 304 相同材质的不锈钢材料,基层碳钢的稀释作用使焊缝金属的 Cr、Ni 含量降低,而达不到抗腐蚀性要求^[8]。如果中间添加高 Cr、Ni 的不锈钢丝材,其冶炼和制备将是复杂和高成本的。因此本文利用高 Cr、Ni 的粉体材料作为填充材料,依据熔池大小,调节高 Cr、Ni 粉末的含量,使其焊缝金属 Cr、Ni 含量与覆层不锈钢 Cr、Ni 含量相一致,从而达到等同的抗腐蚀性能。

试验采用 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm 的双面超薄不锈钢复合板,依据前期激光单面焊熔池横断面形状,如图 1 所示,设计了如图 2 所示的对接部位,间隙 0.2 mm。为了方便计算,设置焊缝截面为双梯形,如图 3 所示。间隙内应填充的金属面积为 0.5 mm×0.2 mm,覆层不锈钢熔化面积为 0.065 mm²,基层碳钢熔化面积为 0.100 mm²。基层碳钢、覆层不锈钢分别位于舍弗勒图(图 4)中的 H、J 点。若无填充材料,则根据基层碳钢和覆层不锈钢熔化面积,利用杠杆定律,可以在舍弗勒图中找出焊缝组织位于 K 点。为了保证填充材料焊接后

的焊缝表面与覆层不锈钢有相同或者相近的耐腐蚀性,则焊缝的 Cr、Ni 当量与覆层不锈钢相同或者相近。已知舍弗勒图中的 K、J 点,覆层不锈钢、基层碳钢和填充材料的面积,利用杠杆定律,可以推算出填充材料在舍弗勒图中的位置,即得出了 C_r、N_i 当量分别为 36.5、16.5,即 P 点,如表 2 所示。

考虑到粉末的密实度,焊接时粉末应高出 0.2 mm,宽 1.5 mm,宽度可以直接由激光光斑控制。

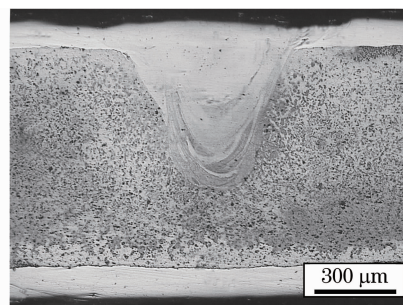


图 1 单面焊熔池横截面图

Fig. 1 Cross-sectional of molten pool by single-sided welding

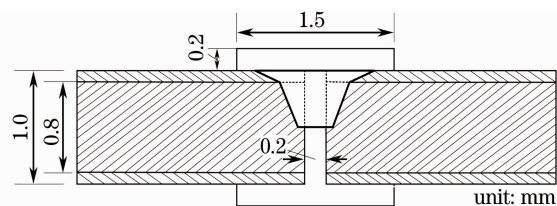


图 2 试板对接焊示意图

Fig. 2 Schematic diagram of butt welding of test plate

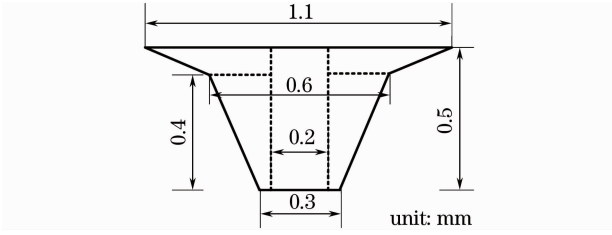


图 3 计算填充材料尺寸图

Fig. 3 Diagram of calculation of filling materials

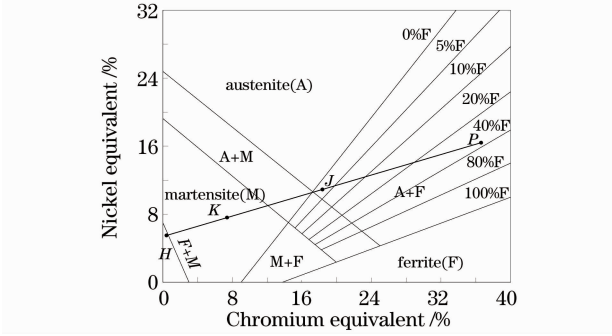


图 4 焊缝舍弗勒图

Fig. 4 Schaeffler diagram of welded metal

表 2 母材和焊缝的 Cr 和 Ni 当量

Table 2 Cr and Ni equivalent of base metal and welded metal

Materials	Chromium equivalent /%	Nickel equivalent /%	Area / mm ²	Point field
Carbon steel for basement layer	0.5	5.5	0.100	H
Stainless steel for cladding	18.5	11	0.065	J
Filling materials	36.5	16.5	0.100	P
Welded metal	18.5	11	0.265	J

3 试验方法与工艺

3.1 试验方法

激光焊接试验所用激光器为 500 W 的 Nd:YAG 脉冲激光器,激光束采用镜组传输,聚焦透镜焦距为 100 mm,最小光斑直径为 0.2 mm。焊接方法采用预铺高 Cr, Ni 合金粉的平板对接双面激光

焊接。焊后接头形式如图 5 所示。

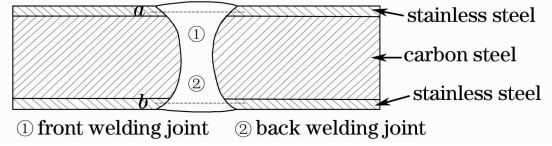


图 5 焊后接头示意图

Fig. 5 Schematic diagram of welded joint

3.2 对接焊工艺

经过试验,确定激光双面焊接超薄不锈钢复合板的最佳工艺参数如表 3 所示。为了去除深熔焊接过程中产生的等离子体云、防止焊接过程中工件表面氧化^[9],选用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气体。气体保护方式为正面、侧面和背面 3 面同时保护;顶吹气流量为 20 L/min,与激光束同轴,喷嘴直径为 8 mm;侧吹气体流量为 10 L/min,与顶吹气流成 45° 夹角,喷嘴直径为 5 mm,喷嘴在焊接平面上 1.5 mm 处;背面置于充满氩气的槽内,气流方向与焊接方向相反,气体流量为 10 L/min。

表 3 焊接工艺方法及主要参数

Table 3 Welding methods and welding parameters

Welding method	Pulse energy E / J	Pulse width t / ms	Pulse frequency f / Hz	Peak power P / W	Welding speed v / (mm · s ⁻¹)
Laser welding	5.60	4.5	30	1244.4	5.0

使用光学显微镜观察母材、焊缝的显微组织,金相取样覆盖焊缝全厚度,试样尺寸取 10 mm × 10 mm × 1 mm,焊缝横截面被打磨到 1500 #,然后抛光,先用质量分数为 4% 硝酸乙醇腐蚀基层碳钢,然后用王水腐蚀覆层不锈钢和焊缝组织。

4 试验结果

4.1 焊缝的宏观形貌及显微组织

激光焊接过程中没有飞溅,焊缝表面光滑平整,成形性好,宽度均匀。焊接试样变形很小,未发现裂纹等缺陷,焊缝成白亮的鱼鳞纹状,如图 6 所示。

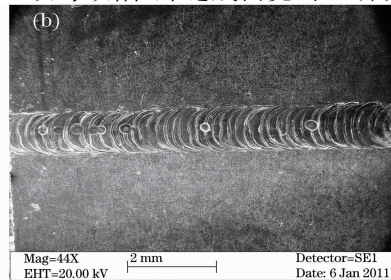
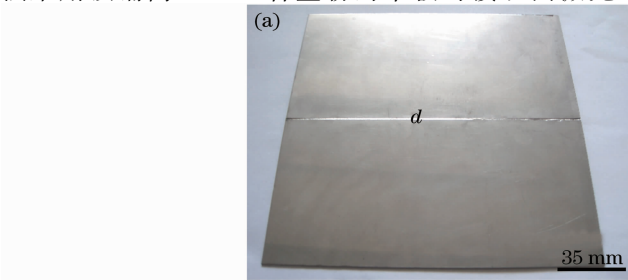


图 6 双面超薄不锈钢复合板激光对接焊。(a)宏观形貌,(b)d 区焊缝

Fig. 6 Laser butt welding of double ultra-thin stainless steel clad plate. (a) macroscopic appearance, (b) the weld zone of d

激光双面焊接超薄不锈钢复合板的焊缝非常窄,焊缝金属与覆层不锈钢及基层碳钢连接良好,如图7所示。利用光学显微镜测得激光焊缝最宽为1.0 mm,最窄为0.45 mm,正面焊缝的熔深为0.65 mm,背面焊缝的熔深为0.64 mm,热影响区宽度小于0.05 mm。

从图7中焊缝的整体形貌可以看出,焊缝区域具备激光深熔焊特征,具有明显的束腰和穿透深度^[10],激光对接焊的接头形式与 Komeil Kazemi等^[11]模拟304不锈钢深熔焊的熔池形状相似也呈“钉子”形,由于填加材料的加入焊缝表面呈微凸状。

各个区域的显微组织如图8所示。

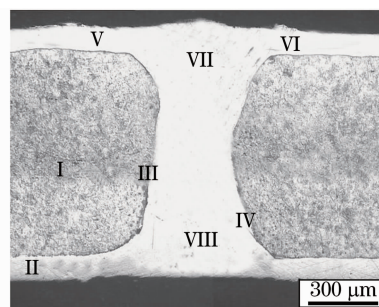


图7 激光焊接双面超薄不锈钢复合板焊缝截面图
Fig. 7 Weld cross-section of laser butt welding of double-sided ultra-thin stainless steel cladding plate

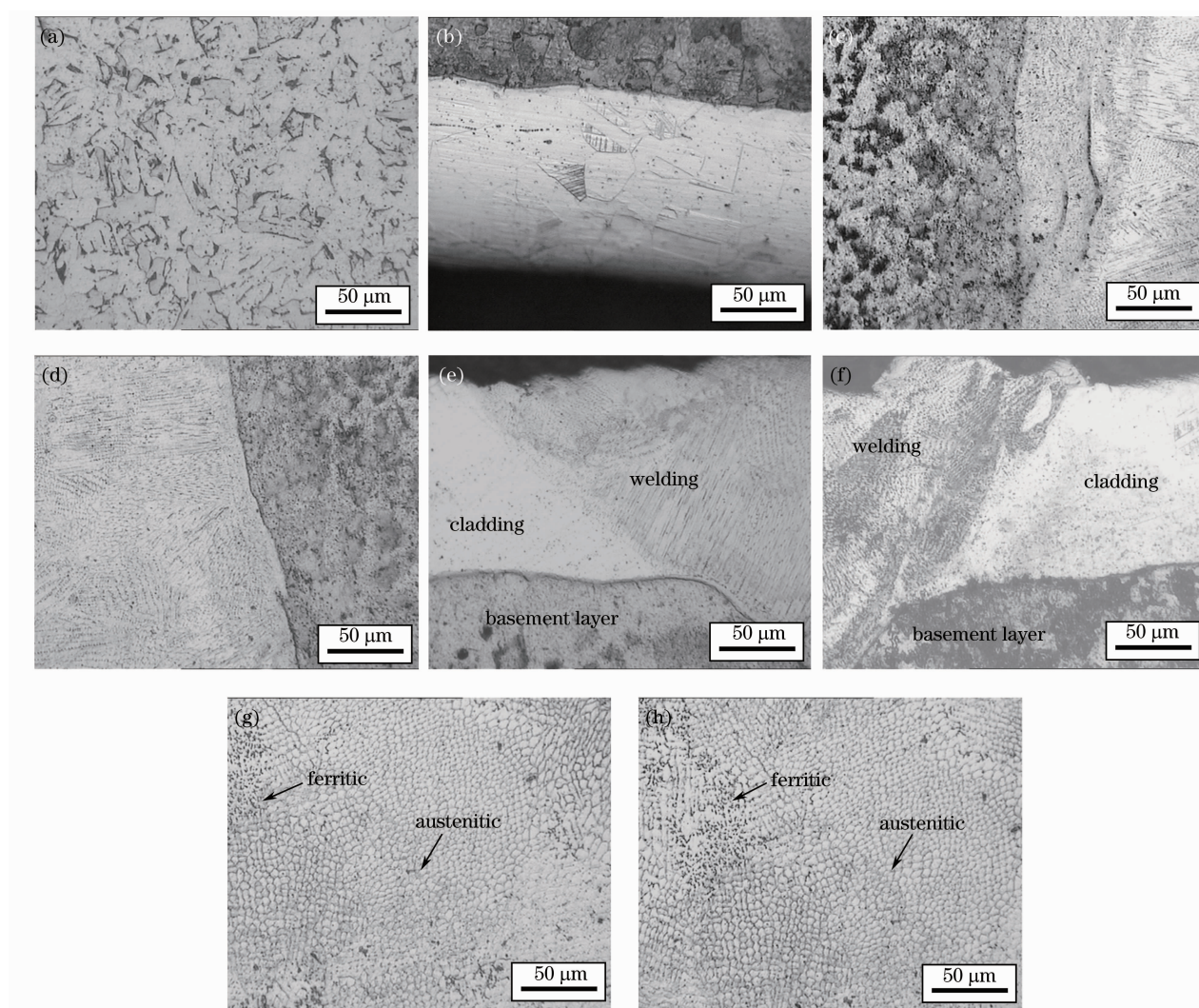


图8 焊缝截面中各个区域的显微组织。(a)I区,(b)II区,(c)III区,(d)IV区,(e)V区,(f)VI区,(g)VII区,(h)VIII区

Fig. 8 Weld cross-section microstructures of the various regions. (a)~(h) are regions from I to VIII, respectively

从图8中(a),(b)与(g),(h)比较可以看出激光焊缝中心的晶粒尺寸明显比母材小,从(g),(h)可以看出近表面的焊缝中心为细小的等轴晶,并且晶粒取向不规则;从(c),(d),(e),(f)可以看出均为柱

状晶,晶粒生长方向垂直于熔合线,几乎看不到热影响区(HAZ)。母材中基层显微组织均为铁素体+珠光体,覆层显微组织为奥氏体+少量铁素体,焊缝表面为覆层不锈钢和填加材料,组织中含有高Cr、

Ni,主要形成奥氏体组织;由于激光焊缝凝固时间十分短暂,大约0.1 s,冷却速度高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C/s}^{[12]}$,因此奥氏体转变过程中抑制了过冷奥氏体向铁素体的转变,发生非扩散型的马氏体转变。所以焊缝表面就形成了奥氏体+少量铁素体+少量马氏体的组织,与图4相符。

激光能量密度高,焊接时只有焊接接头局部区域受热,母材受到的热作用非常小,因此热影响区非常小;由于激光焊接快速冷却的特点,加之不锈钢复合板母材的4/5是低碳钢,低碳钢的导热率约为不锈钢的3倍,在熔合线处形成了很大的过冷度,焊缝的凝固是母材的外延生长,由于垂直于熔合线方向的散热速度最快,所以垂直于熔合线的晶粒向液相生长容易,优先深入到液态金属中,就形成了柱状晶区;对于薄板焊接,焊接夹具起了重要的传热作用,表面热量通过焊接夹具迅速传导,在焊缝表面和心部形成温度梯度,从图8(e),(f)中可以看出,使晶粒有向表面生长的趋势^[13],随着柱状晶的不断生长,温度梯度逐渐变小,从图8(g),(h)中可以看出,就形成了等轴晶区。

激光焊接组织之间呈现明显的层带结构,但是这种层带结构仍然是以冶金结合的方式结合在一起的,并未影响组织生长和晶粒取向的连续性,这就保证了各层之间的结合强度^[14]。

4.2 力学性能

采用 DNS-100 型拉伸试验机按 GB/T2651-2008 测定焊接接头的抗拉强度,试验结果取母材和焊接接头各 2 个;采用 HVS-1000 型显微硬度计测焊缝区域的显微硬度,测量载荷 100 g,加载时间 15 s,硬度测定位置按图 5 中所示的 a, b 两条线进行,测试点间隔 0.1 mm。测得的硬度曲线、抗拉强度(σ_b)如图 9、表 4 所示。

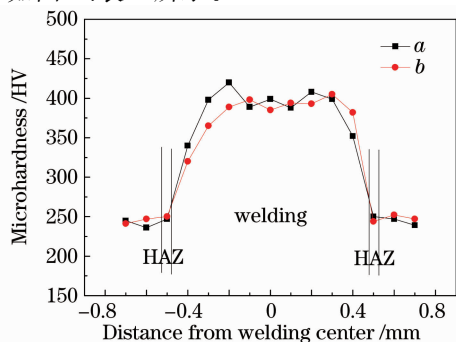


图9 沿图5中a线和b线测得的显微硬度曲线
Fig.9 Hardness curves of the joint tested along a and b lines in Fig. 5

表4 焊接接头的抗拉强度
Table 4 Tensile strength of welded joints

Specimen	Tensile strength σ_b /MPa	Average tensile strength σ_b /MPa	Elongation δ /%	Broken position
Base metal 1	400	403	44.4	Parallel length
Base metal 2	406		44.8	Parallel length
Welded joint 1	375	371	10.5	Welding
Welded joint 2	367		10.0	Welding

从图9可见,沿a线和b线测得的显微硬度曲线分布非常接近,母材的覆层组织的平均硬度为245.4 HV,覆层一侧焊缝的硬度最大值为420.0 HV,最小值为320.0 HV。

焊缝区的硬度明显高于母材,主要有两方面的原因:1)是激光焊缝的晶粒明显细化,从显微组织中可以明显看到;2)焊缝组织中的少量马氏体及一些硬质强化相也提高了焊缝的硬度。

从表4可以得出,焊接接头的抗拉强度达到了母材的92%,伸长率为母材的25%。

4.3 电化学腐蚀试验

覆层不锈钢与焊缝表面电化学腐蚀试验的结果如图10和表5所示^[15]。

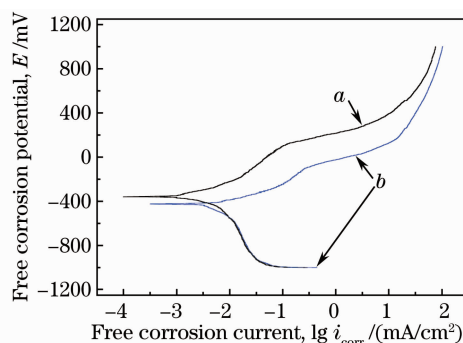


图10 焊缝及母材在质量分数为3.5%NaCl溶液中的极化曲线

Fig.10 Cyclic polarization curves of base metal and welding metal in 3.5% (mass fraction) NaCl aqueous solution

表5 电化学动力参数

Table 5 Electrochemical kinetics parameters

Specimen	Free corrosion potential E /mV	Free corrosion current i_{corr} / (mA/cm ²)
Base metal a	-337.6	0.0067
Welded metal b	-452.7	0.0098

利用 Tafel 外推法得出,母材覆层自腐蚀电流小于焊缝表面。表明焊缝表面抗腐蚀性小于母材覆层,但焊缝表面与母材覆层的自腐蚀电流相差很小。

说明采用激光双面焊接工艺, 不锈钢复合板焊缝表面和母材覆层抗电化学腐蚀性能相当。

5 结 论

1) 通过试验确定了焊缝形状, 精确计算得出填充材料的 Cr、Ni 合金粉的准确含量。确定了双面激光焊接 0.1 mm+0.8 mm+0.1 mm 双面超薄不锈钢复合钢板的最佳工艺参数: 脉冲能量 $E=5.6$ J, 脉冲宽度 $t=4.5$ ms, 脉冲频率 $f=30$ Hz, 峰值功率 $P=1244.4$ W, 扫描速度 $v=5.0$ mm/s, 保护气体为氩气, 采用正面、侧面和背面 3 面同时保护。

2) 激光焊接的表面成形性好, 焊缝金属与覆层不锈钢及基层碳钢连接良好。焊缝中心为细小的等轴晶, 并且晶粒取向不规律; 其他区域为细小的柱状晶区。基层显微组织均为铁素体+珠光体, 覆层显微组织为奥氏体+少量铁素体, 焊缝表面组织为奥氏体+少量铁素体+少量马氏体。

3) 焊接接头的抗拉强度达到了母材的 92%, 伸长率为母材的 25%; 焊缝区的硬度明显高于母材; 焊缝表面与母材覆层的自腐蚀电流相差很小, 不锈钢复合板焊缝表面和母材覆层抗电化学腐蚀性能接近。

参 考 文 献

- 1 L. Karlsson. Welding of dissimilar metal[J]. *Welding in the World*, 2005, **36**(6): 125~132
- 2 Zhang Junwang. Study on the Weldability of Clad Plate with Double Ultra-thin Stainless Steel [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003
张俊旺. 双面超薄不锈钢复合板焊接性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003
- 3 B. Shirvani, R. Clarke, J. Dufflou *et al.*. Yb:YAG disc laser welding of austenitic stainless steel without filler material[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, **410-411**: 87~96
- 4 Liu Huixia, Xiang Baozhen, Xu Zhenkai *et al.*. Process parameters optimization of Nd:YAG pulsed laser welding based on Taguchi method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 350~357
刘会霞, 向宝珍, 许贞凯等. 基于田口方法的 Nd:YAG 脉冲激光焊接工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 350~357
- 5 Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao *et al.*. Dissimilar metal of K418

- and 42CrMo full penetration laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1122~1126
庞 铭, 虞 钢, 刘 兆等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1122~1126
- 6 Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1132~1137
石 岩, 张 宏, 渡部武弘等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- 7 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268
虞 钢, 赵树森, 张永杰等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268
- 8 Zhao Yangtun, Li Yuping, Fan Shuning *et al.*. Welding of double ultra-thin stainless steel clad plate with TIG filling-wire[J]. *Chinese Hi-tech Enterprises*, 2009, (1): 191~192
赵阳囤, 李玉平, 范述宁等. 双面不锈钢复合薄板 TIG 填丝焊接[J]. *中国高新技术企业*, 2009, (1): 191~192
- 9 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
伍 强, 陈根余, 王 贵等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 10 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777
吴东江, 尹 波, 张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 11 Komeil Kazemi, John A. Goldak. Numerical simulation of laser full penetration welding[J]. *Computational Materials Science*, 2009, **44**(3): 841~849
- 12 Sun Xiqing, Hong Yongchang, Zhang Wu. Research on pulse laser welding technology of DC04 thin steel sheet[J]. *Electric Welding Machine*, 2010, **40**(5): 130~134
孙希庆, 洪永昌, 张 武. DC04 薄钢板的脉冲激光焊接工艺研究[J]. *电焊机*, 2010, **40**(5): 130~134
- 13 Lin Xin, Yang Haiou, Chen Jing *et al.*. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, **42**(4): 361~368
林 鑫, 杨海欧, 陈 静等. 激光快速成形过程中 316L 不锈钢显微组织的演变[J]. *金属学报*, 2006, **42**(4): 361~368
- 14 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
杨洗陈, 王 雨, 应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870
- 15 Wang Wenxian, Wang Yifeng, Liu Mancai *et al.*. Microstructure and corrosion resistance of butt joint of stainless steel composite plate 1Cr18Ni9Ti+Q235[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(6): 89~92
王文先, 王一峰, 刘满才等. 1Cr18Ni9Ti+Q235 复合钢板对接焊缝组织和抗腐蚀性能分析[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(6): 89~92