

双金属复合板光纤激光焊接及其接头腐蚀性能分析

苟宁年, 张建勋, 李振岗

(西安交通大学 金属强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对 DSS2205/X65 双金属复合板进行激光对接焊试验, 观察焊接接头的金相组织, 通过能谱法分析 Cr 元素在焊接接头中的分布, 测试了母材 DSS2205 和焊接接头的极化曲线。结果表明: 焊接接头中金相组织沿厚度方向上出现了明显的分层特征; 激光焊接时熔池中上下 2 个部位的熔态金属流动符合 Marangoni 对流特征, 熔池中部的液态金属更趋向于向上流动扩散, 而受重力影响较少; 焊接接头复层的极化曲线表明它们和母材 DSS2205 具有相当的自腐蚀电位, 但点蚀电位均低于母材 DSS2205, 并且采用小光斑激光焊接具有更好的抗点蚀能力。

关键词: 双金属复合板; 激光焊; 熔池流动; 极化曲线

中图分类号: TG401

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)07-1760-05

双金属复合板是将基层(10~60 mm 的碳钢或低合金钢)与复层(1~5 mm 的不锈钢或钛合金等)在一定的高温高压下冶金地结合在一起, 使其成为一种具有特殊性能的整体新型材料, 已广泛用于石油化工、海洋开发、造船等工业领域。

使用双金属复合板的主要目的在于充分利用其基层材料的高强度、高塑韧性和复层的耐热、耐磨、耐腐蚀等性能, 然而, 在结构制造中, 由于 2 种不同的材料属性给其焊接带来了新的问题。例如, 焊接接头过渡层易生成脆性相而使接头的塑韧性下降、接头界面合金元素碳的迁移使接头力学性能和耐腐蚀性能下降等。目前, 针对双金属复合板基本焊接工艺是采用不同焊接材料分别对其复层和基层进行焊接, 同时, 为了防止基层焊缝对复层焊缝组织和性能的影响, 还要在其复层和基层焊缝之间再添加一层过渡层^[1-4], 因此, 从实际焊接中, 其焊接工艺复杂, 焊接效率较低。

本研究基于光纤激光穿透焊接时, 熔池内上下 2 个部位的液态金属在金属蒸气摩擦和温度梯度的作用下在各自的位置上进行 Marangoni 对流, 而彼此之间发生相对较少的对流交换的特点^[5,6], 提出了采用光纤激光焊接技术直接进行双金属复合板对接焊新思路。通过对焊接接头的复层、过渡层以及基层的显微组织、合金元素分布特征以及焊缝复层区的腐蚀性能分析, 评价了焊接工艺的合理性和可靠性, 讨论了光纤激光焊接双金属复合板的熔池流动行为及其接头成形机理。

1 实验

实验材料为爆炸成型的 X65/DSS2205 双金属复合板。焊接试板通过机加工保留其基层厚度为 2 mm、复层厚度 2 mm。试验分组及焊接工艺见表 1。试验分为 A 和 B 2 组, A 组采用的激光光斑直径为 0.6 mm, B 组为 0.3 mm。为了研究焊接时重力对熔池内部液态金属流动行为的作用, 每组试验包含 2 种焊接方式(图 1a, 1b 所示)。光纤激光焊接设备为 Ytterblum laser System-4000 型。激光功率 3500 W, 焊接速度 1.5 m/min, 离焦量-2 mm。

焊接接头的金相组织浸蚀方法为: 以 Kalling's 2 号腐蚀剂(100 mL 乙醇+100 mL HCl+5 g CuCl₂), 在室温下进行浸蚀, 时间约为 30 s。采用 NIKON MA200 金相显微镜对组织进行观察, 采用 photoshop 软件对金相照片进行处理, 分离出铁素体和奥氏体。在常温下测量复合板复层金属 DSS2205 以及 4 种接头复层一侧的动电位极化曲线, 腐蚀介质为 3.5%NaCl 溶液, 电位扫描范围为-200 mV~1.5 V, 扫描速率为 1 mV/s。试样电极的工作面规格为 4 mm×4 mm, 由于激光焊缝很窄, 很难将 HAZ 区分出来, 所以电极工作面包括整个焊缝、HAZ 和一部分母材, 示意图如图 3 中插图所示。

2 结果与讨论

图 1b, 1c, 1e, 1f 分别为复合板 4 种焊接接头横截面上的宏观形貌。由图可见, 4 种接头焊缝区的宏

收稿日期: 2015-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375370); 国家高技术研究发展计划(“863”)计划(2013AA031303HZ)

作者简介: 苟宁年, 男, 1982 年生, 博士生, 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049, E-mail: wakin_1982@163.com

表 1 试验分组及其焊接工艺参数
Table 1 Test group and welding parameters

Test group	Spot diameter, Φ /mm	Welding manner	Laser power /W	Welding speed/ $m \cdot min^{-1}$	Focal point position/mm	Shielding gas
A1# A2#	0.6	X65 up, DSS2205 under DSS2205 up, X65 under	3500	1.5	-2	Ar
B1# B2#	0.3	X65 up, DSS2205 under DSS2205 up, X65 under				

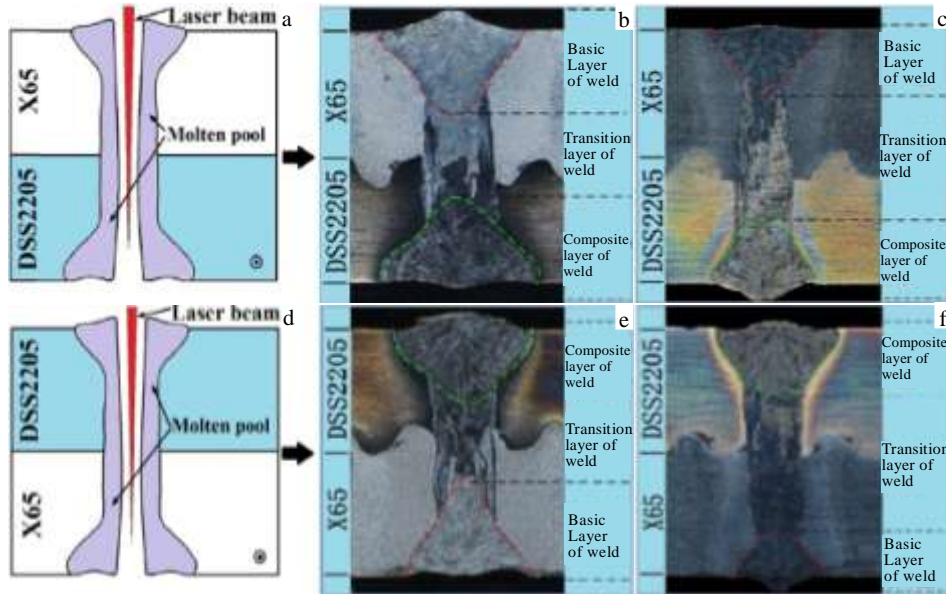


图 1 复合板激光焊接方式示意图及接头横截面宏观形貌

Fig.1 Welding manner: (a) mode 1; (d) mode 2; macroscopic picture of cross section of welded joint: (b) sample A1#; (c) sample B1#; (e) sample A2#; (f) sample B2#

观形貌都具有上下对称的双钉字头形貌，可以分为上中下 3 个区域。如 A1#接头，焊缝上部宏观组织形态与复合板上部的基层金属 X65 表现为相同的组织形态，而焊缝下部宏观组织形态与复合板下部复层金属 DSS2205 表现为相同组织形态，而焊缝中部区域的宏观组织形态表现为上下 2 种组织形态的交错混合状态，基于以上宏观组织形态特征，对焊缝中的 3 个区域定义如下：在复合板基层 X65 一侧的焊缝区域定义为焊缝基层；在复合板复层一侧的焊缝区域定义为焊缝复层；焊缝中间部位定义为焊缝过渡层。

2.1 金相组织分析

图 2 为 4 种复合板焊接接头中部分区域的微观组织形貌，图 2a~2d 分别为接头 A1#、A2#、B1#、B2# 中焊缝复层区域的显微组织。由图可见，其金相组织均为铁素体+奥氏体双相特征，其中灰色为铁素体、白色为奥氏体。大部分奥氏体是从灰色的铁素体相边界析出的，其形貌具有羽毛状或树枝状特征，而在铁素体晶粒内部也析出了大量分散的奥氏体，其形貌具有

细条状、点状和块状特征。

通过 photoshop 软件分离出铁素体和奥氏体，得出 4 种接头焊缝复层区的奥氏体体积分数：A1#为 32.8%、A2#为 36.6%、B#1 为 49.5%、B2#为 52.5%。结果表明，相对于母材而言，A1#和 A2#试样焊缝复层区域的奥氏体含量大幅度减小，这是因为激光焊接时极快的冷却速度所致，H. C. Wu 等人通过研究激光焊接 DSS2205 的过程，发现焊接热循环的峰值温度和快速冷却可促使 DSS2205 的组织铁素体化，使得铁素体含量增加^[7]。而在相同的热输入条件下，采用光斑直径为 0.3 mm 的 B 组试样焊缝复层区域的奥氏体含量要高于采用光斑直径为 0.6 mm 的 A 组试样，这是因为在相同的激光功率下，光斑直径越小，激光束能量密度越大，焊接温度峰值越高^[8]，焊缝停留在奥氏体形成和长大温度区间的时间更长，所以焊缝复层区奥氏体含量更多。图 2e 为 A1#接头焊缝过渡层区域的显微组织形貌。由图可见，基层组织和复层组织的界限非常明显，如图中黑色虚线所示，在虚线左侧是

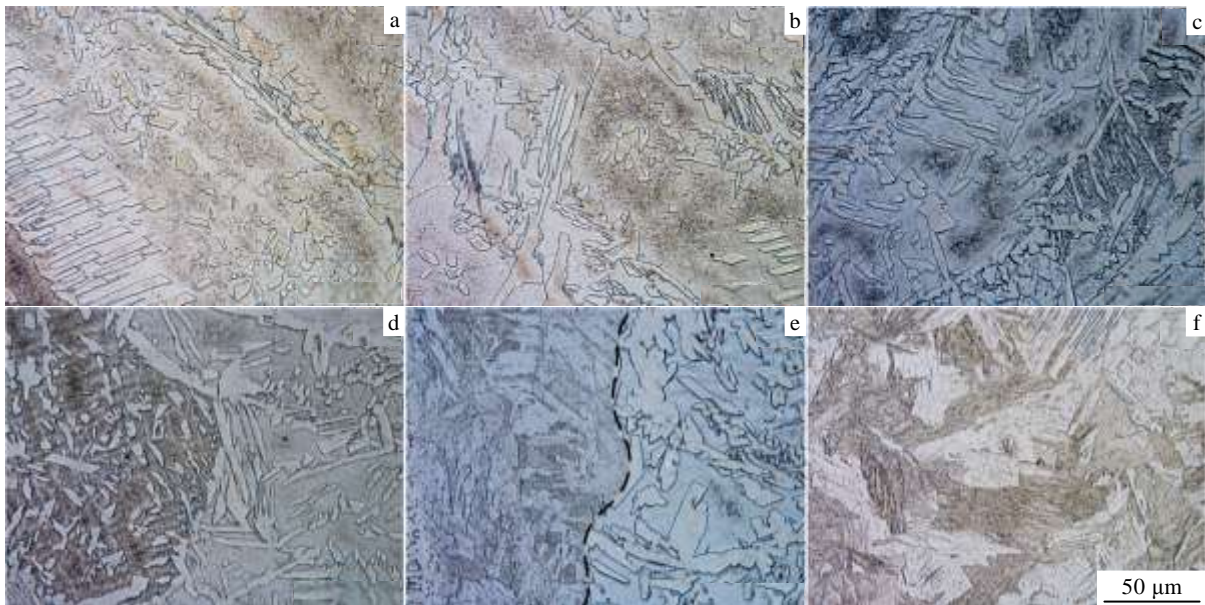


图 2 焊接接头微区金相组织

Fig.2 Microstructure of composite layer of weld A1# (a), composite layer of weld A2# (b), composite layer of weld B1# (c), composite layer of weld B2# (d), transition layer of weld A1# (e), and basic layer of weld A1# (f)

基层组织形貌，灰色区域为珠光体组织杂乱的分布在白色的铁素体基体上面，虚线右侧为复层不锈钢组织，表现为双相组织特征。图 2f 为 A1#接头焊缝基层的显微组织，表现为先共析块状铁素体、珠光体和针状铁素体组成，是典型的 X65 焊缝组织形貌特征。

2.2 焊缝中 Cr 分布及熔池流动行为分析

在激光深熔焊接时熔池流动行为是一个复杂的过程，是多种驱动力相互作用的结果，其主要特征是金属蒸发形成的反冲压力促进了匙孔的形成和动态变化，匙孔内沿着孔壁向上喷射的金属蒸气产生的摩擦力抵消了大部分重力作用并带动孔壁周围的液态金属向上部流动，同时，在熔池上下表面存在的温度梯度引起的表面张力又促使液态金属形成由中心向外的 Marangoni 对流^[9,10]。显然，熔池的这一流动行为必然引起焊缝金属成分和组织分布特征的变化，从而决定了焊接接头的质量。因此，对复合板焊接过程中的熔池流动行为研究分析具有重要意义。表 2 为在扫描电镜下用 EDS 测得的 4 种接头中焊缝基层、焊缝过渡层和焊缝复层中 Cr 含量。从表中可以看出，A1#和 A2#试样焊缝基层中的 Cr 含量分别比 B1#和 B2#试样高，而焊缝复层却恰好相反。这说明采用小光斑直径焊接时，焊缝熔池内上下 2 个部分熔态金属发生相互对流扩散的量更少。通过比较 A1#和 A2#试样焊缝复层区的 Cr 含量发现，复合板复层置于下方焊接时，焊缝复层 Cr 含量减少量要大于其置于上方焊接，观察比较

表 2 焊缝基层、过渡层和复层的 Cr 含量

Table 2 Cr contents of composite layer, transition layer and basic layer in four welded joints (ω/%)

Test group	Basic layer of weld	Transition layer of weld	Composite layer of weld
A1#	5.12	13.19	14.60
A2#	6.15	10.17	17.78
B1#	3.03	13.13	15.82
B2#	5.45	12.35	18.30

B1#和 B2#试样，发现其具有相同的特征，这说明在激光熔池中，液态金属在向上喷射的金属蒸气摩擦力的作用下更趋向于向上流动，而重力对熔池流动行为的影响不大^[5,11]。同样，通过比较过渡层的 Cr 含量发现，焊接时复合板复层置于下方的 A1#和 B1#试样过渡层区域 Cr 含量分别高于其置于上方的情况，这说明激光熔池中更多的复层金属在金属蒸气摩擦力的作用下向上流向了焊缝过渡层，这与前面复层 Cr 元素分布特征得出的结论具有一致性。

2.3 复层焊缝耐腐蚀性能分析

图 3 为常温下复合板复层以及 4 种接头复层在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线。由图可见，从自腐蚀电位 E_{corr} 来看，不论复合板复层还是 4 种接头复层都在 -264~-300 mV 之间，这说明它们与复合板复层具有相当的耐腐蚀性能。从点蚀电位 E_{br} 来看，复合板复层为 1058 mV，A1#为 64.3 mV，A2#为 250 mV，B1#为 418 mV，B2#为 572 mV。从点蚀电位 E_{br} 的数值来看，复

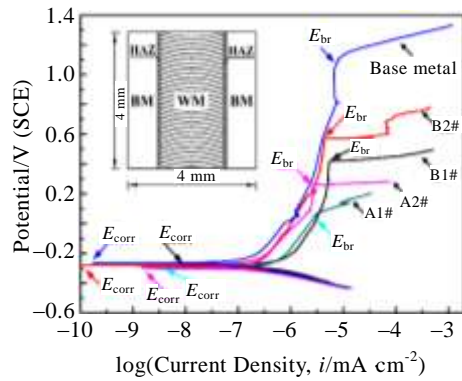


图3 DSS2205及4种接头的复层在3.5%NaCl溶液中的极化曲线, 图中插图为接头试样电极的工作面示意图

Fig.3 Polarization curves of composite layer of welded joints and base metal 2205 in 3.5% NaCl solution. The inset is the model of the investigated area on the welded joint

合板复层 > B2# > B1# > A2# > A1#; 从钝化区 (E_{br} - E_{corr}) 来看, 复合板复层的钝化区宽度要大于4种接头复层的钝化区宽度, 表明接头复层生成钝化膜的稳定性要比复合板复层差。对于4种接头来说, 采用小光斑激光焊接的B组接头复层的钝化区宽度要明显大于采用大光斑激光焊接的A组接头复层。而单就A组接头或B组接头而言, 焊接时复合板的复层置于上方的钝化区宽度要大于焊接时在其置于下的情况。钝化区宽度关系为: 复合板复层 > B2# > B1# > A2# > A1#, 说明4种接头的抗点蚀性能都比复合板复层差, 在4种接头之中采用小光斑直径焊接的B组试样具有更好的抗点蚀性能。双相不锈钢的耐腐蚀性能很大程度上取决于铁素体(α)和奥氏体(γ)两相比例, 在焊接时要求母材、焊缝和HAZ中的铁素体含量控制在30%~60%之间, 焊接接头才具有较好的耐点蚀性能, α/γ 相比例越接近于1时, 耐点蚀性能就越好^[12]。从表2中分析表明, B组试样焊缝复层中的 α/γ 相比例接近于1, 和母材相当, 但图3显示其点蚀电位却比母材要低。分析认为, 这是因为焊接时焊缝最高温度处于 α 相固溶线以上, 组织全部转化为 α 相, 在随后的降温冷却过程中, 由于热作用的变化, 合金元素的分布发生变化, 从而生成大量Cr含量比一次奥氏体低3%左右的二次奥氏体, 而热力学计算也表明二次奥氏体的含氮量也较低^[13], 因此, 二次奥氏体的耐点蚀性能较差, 点蚀敏感性较高^[14]。这就导致了虽然B组试样焊缝复层中的 α/γ 相比例接近母材, 但却有较差的耐点蚀性能。至于采用小光斑激光焊接的A组试样而言, 因为在其接头复层中奥氏体含量只占到30%左右, 所以其点蚀电位相对于B组试样就要低, 更易于发生点蚀现象。

而对于A1#和A2#或者B1#和B2#接头之间而言, 极化曲线表明焊接时复合板复层置于上方的A2#接头和B2#接头的点蚀电位要分别大于焊接时复合板复层置于下方的A1#接头和B1#接头, 原因有: 激光焊匙孔壁上的液态金属在向上喷射的金属蒸气摩擦力的作用下更多的趋向于向上流动; 焊缝上部具有更高的热循环峰值温度^[8]。

3 结论

1) 对X65/DSS2205双金属复合板进行对接激光一次穿透焊接成型, 焊缝横截面微观组织特征表明焊缝上下部金属组织特征具有各自的独立性, 过渡层组织为混合状态。

2) 采用小直径光斑激光焊接的复合板对接焊接接头复层具有含量更高的奥氏体, α 与 γ 相的比例接近1, 具有更好的耐点蚀性能。

3) 小直径光斑有利于抑制熔池中复层和基层金属的互相对流和扩散。

参考文献 References

- [1] Tian Caigang(田彩刚). *Petroleum Engineering Construction* (石油工程建设)[J], 2012, 38(2): 48
- [2] Zhao Chenguang(赵晨光), Peng Qinghua(彭清华), Ma Hongwei(马宏伟) et al. *Welded Pipe and Tube*(焊管)[J], 2013, 36(1): 60
- [3] Xu Aihua(许爱华), Yuan Zhengang(阮振刚), Yang Guang(杨光) et al. *Natural Gas and Oil*(天然气与石油)[J], 2010, 28(6): 22
- [4] Zhang Lijun(张立君), Zhang Yanfei(张燕飞), Guo Chongxiao(郭崇晓). *Welded Pipe and Tube*(焊管)[J], 2009, 32(4): 30
- [5] Katayama S, Kawahito Y. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*[C]. San Jose, CA: SPIEDL, 2009
- [6] Du Hanbin(杜汉斌), Hu Lunji(胡伦骥), Wang Dongchuan(王东川) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2005, 26(12): 65
- [7] Wu H C, Tsay L W, Chen C. *Transactions of The Iron Steel Institute of Japanese*[J], 2004, 44(10): 1720
- [8] Capello E, Chiarello P, Previtali B et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 351: 334
- [9] Katayama S, Kawahito Y. *Physics Procedia*[J], 2010(5): 9
- [10] Kawahito Y, Mizuntani M, Katayama S. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2007, 40(19): 5854
- [11] Wang Hong(王宏), Huo Houzhi(火候志), Wang Linyun(王

- 林云). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S4): 35
- [12] Wu Jiu(吴 玖), Jiang Shizhen(姜世振). *Duplex Stainless Steel*(双相不锈钢)[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004: 271
- [13] Wong K W, Shek C H, Zhang W *et al. Materials Letters*[J], 2008, 62(2): 3991
- [14] Moura V S, Lima L D, Pardal J M *et al. Materials Characterization*[J], 2008, 59: 1127

Fiber Laser Welding of Bimetallic Plates and Corrosion Property of the Joints

Gou Ningnian, Zhang Jianxun, Li Zhengang

(State key Laboratory of Mechanical Behavior for Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The DSS2205/X65 bimetallic plates were welded by fiber laser, and the microstructure of the welded joint was observed by OM. The distribution of the Cr element in the welded joint was studied to infer the fluidity of molten pool. The potentiodynamic scanning method was employed to measure the anodic polarization curves of DSS2205 base metal and the welded joint. The results show that the microstructure of the welded joint exhibits a hierarchical characteristic along thickness direction of the welded joint. The Cr distribution in the welded joint indicates that the fluidity of molten pool possess the characteristics of Marangoni convection, the molten metal in molten pool tends to spread upward flow, and is less affected by gravity. Polarization curves reveal that the corrosion potential between the composite layer of the joint and the DSS2205 base metal is similar, but the pitting potential of the welded joint is lower than that of the base metal DSS2205. The joint welded by laser beam with a small focusing spot size shows a better point corrosion resistant ability compared with the joint welded by laser beam with a big focusing spot size.

Key words: bimetallic plate; laser welding; melt pool flow; polarization curve

Corresponding author: Zhang Jianxun, Professor, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: jxzhang@mail.xjtu.edu.cn