

钢/铝异种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接

王 涛 周惦武 彭 艳 张 屹 陈根余

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 Fe/Al 难熔合、易生成 Fe-Al 脆性金属间化合物是钢/铝异种金属优质高效焊接亟待解决的技术难题。对厚度分别为 5 mm、6 mm 的低碳钢和铝合金板进行了对接处开设坡口、并在界面结合处预置 Si 粉的光纤激光焊接实验研究,通过调整焊接工艺参数和预置粉末得到成形良好的焊缝。利用卧式金相显微镜、电子显微硬度仪、扫描电镜、X 射线衍射仪等设备对焊缝及母材区进行了观察与检测。结果发现:在激光功率为 1.8~2.0 kW,焊接速度 8~10 mm/s,离焦距 -2.0 mm,Ar 为保护气体且流量为 15 L/min,光斑偏向钢侧距界面结合处 0.2 mm 的工艺条件下,激光焊接钢/铝异种板材,可实现钢/铝熔合,焊接类型为热传导焊,焊缝区域晶粒细小,硬度高于两侧热影响区及母材,钢/铝结合界面分界线明显,界面处熔化金属互相扩散嵌入母材,呈齿轮式“啮合”态连接在一起。对钢/铝实施热传导焊,可有效控制熔池中 Fe、Al 熔化量;预置 Si 粉改善了熔池熔化态下的流动性,熔化金属易于在结合界面铺展,钢/铝焊缝区形成了结构稳定的 Al_9Si 、 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 化合物,抑制了 Fe-Al 脆性金属间化合物的生成。

关键词 激光技术;激光对接焊;异种金属;预置粉;热传导焊

中图分类号 TG457 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0303009

Steel-to-Aluminum Fiber Laser Butt Welding with Si Powder Pre-Filling

Wang Tao Zhou Dianwu Peng Yan Zhang Yi Chen Genyu

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Technical problems like difficulty of fusion and brittle intermetallic compounds between Fe and Al are urgently to be solved in order to get high quality steel-to-aluminum weld seam with high efficiency. Low-carbon steel and aluminum alloy sheet (thicknesses are 5 mm and 6 mm, respectively) are welded in butt way by a fiber laser. Welding conducted with Si powder as the filler placed in the end before welding is also researched. Good welding beads have been obtained through adjusting the process parameters and pre-filling Si powder. The welding bead is detected and observed by metallurgical microscope, scanning electron microscope, X-ray diffraction and some other ways. The results indicate that dissimilar steel and aluminum can be connected by laser welding under heat conduction welding mode under the conditions that laser power is 1.8~2.0 kW, welding speed is 8~10 mm/s, defocusing is -2 mm, protective gas is Ar, gas flow rate is 15 L/min and offset to crevice between steel and aluminum is 0.2 mm. The grains in weld zone are fine. Micro-hardness in weld zone is higher than those in heat affected zone and base material. The boundary between steel and aluminum is clear. Two base materials are combined by the molten metal, embedded in each other like gears. The quantities of the melting metals Fe and Al in the pool are controlled. The fluidity of the pool is improved by the Si powder filler and it is good for melting metal to spread out in the end of the sheets. Compounds of Al_9Si and $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ with better stability are found and the generation of intermetallic compounds of Fe-Al is inhibited.

Key words laser technique; laser butt welding; dissimilar metals; powder pre-filling; heat conduction welding

OCIS codes 140.3390; 000.2658; 060.3510; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2011-10-17; 收到修改稿日期: 2011-12-05

基金项目: 国家 863 计划(2007AA042006)、国家自然科学基金(50805045)和湖南大学汽车车身国家重点实验室自主课题(71075003)资助课题。

作者简介: 王 涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事车辆工程方面的研究。E-mail: lhhilu520@163.com

导师简介: 周惦武(1971—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事材料科学与工程方面的研究。

E-mail: zdwe_mail@yahoo.com.cn

1 引 言

钢/铝复合结构件发挥了两种材料的性能优势、减轻重量,在现代交通运输工具中得到广泛应用。钢/铝异种金属优质高效焊接亟待解决的主要技术难题是 Fe/Al 难熔合、易生成 Fe-Al 脆性金属间化合物。钢与铝两种金属性质上的巨大差异决定了用常规熔焊方法很难实现二者的连接。激光焊用激光束作焊接热源,具有能量密度高、热输入量大、热量集中、热源易控制、焊缝深宽比大、热影响区窄、焊接变形小以及易于与机器人或其他执行机床耦合实现自动化等诸多优点^[1],可实现钢/铝熔合,激光焊成为钢/铝异种金属优质高效连接的重要方法。

钢/铝异种金属焊接过程中,由于铁在铝中的固溶度几乎为零,实现钢/铝熔合,必然导致 Fe 与 Al 形成 FeAl、FeAl₂、FeAl₃、Fe₂Al₅ 等一系列硬而脆的金属间化合物,从而严重恶化钢/铝接头的力学性能^[2]。采用激光焊接,如合理调整工艺参数或添加特殊合金材料,通过有效控制熔池中 Fe、Al 熔化量,可抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物生成,从而获得优质高性能焊接接头,钢/铝添加材料激光焊成为近年研究的热点课题^[3~10]。合金材料采用填丝^[11,12]

或喷粉添加方式存在诸多不足,预置粉末具有成分配比易调整、加入量易控制等优点。为实现 Fe/Al 熔合、抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物的生成,本文采用厚度分别为 5 mm、6 mm 的低碳钢和铝合金板作为研究对象,利用热传导焊接原理,采用对接处开设坡口、并在结合处预置 Si 粉,将光斑中心偏向钢材一侧的方式,进行钢/铝光纤激光焊接实验,期望控制熔池中 Fe、Al 熔化量,改善焊池熔化态下的流动性,使熔化金属易于在钢/铝结合界面铺展,同时抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物生成。本文研究结果为异种金属激光焊接提供了一种新的研究思路,为钢/铝异种金属结构激光焊接的推广应用提供理论和试验基础。

2 实验条件与方法

实验采用光束质量高的光纤激光器作为焊接热源,激光器主要技术参数见表 1。执行机构为 ABB 的机器人。将厚度分别为 5 mm、6 mm 的低碳钢和铝合金板线切割加工成尺寸为 80 mm×24 mm 的试样,并在两试样对接处开设 80°坡角,如图 1 所示。

表 1 激光器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the laser

Parameter	Laser power /kW	Laser mode	Divergence angle α /rad	Focal length f /mm	Focal spot diameter d /mm	Wavelength λ /nm
Value	≤ 4.0 (continuous)	TEM ₀₀	$< 0.15 \times 10^{-3}$	200	0.4	1070

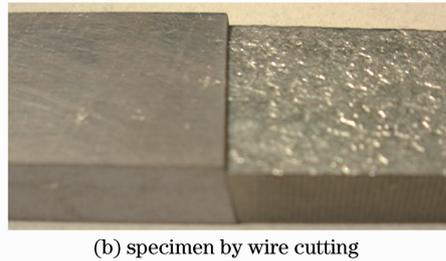
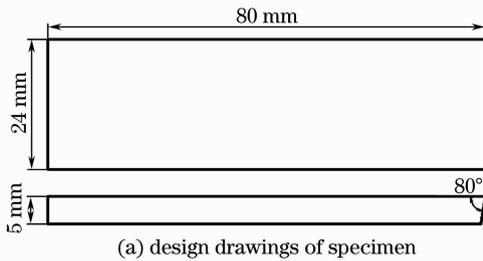


图 1 焊接试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding specimen

实验前对线切割试样用 W500 号砂纸打磨接触表面,去除表面氧化层,接着用丙酮溶液清洗试样,以除去其他杂质。试样制备好后,将其对接放置在组合夹具上,调整结合面间间隙以保证两结合面接触良好,预置 Si 粉时保证整个界面均有粉末填充。对接焊时,将光斑中心偏向钢材一侧,距离结合缝隙存在一定间距 d (如图 2 所示),通过光斑的偏移引起的热输入差来控制钢、铝的熔合比。焊接完成后,利用体视显微镜分析焊缝的成形性与表面质量;线

切割取样、打磨、抛光至镜面,制取检测试样,分别以 3% 的硝酸酒精溶液腐蚀钢侧,以开勒试剂腐蚀铝合金侧制备金相试样,采用金相显微镜观察焊缝区及热影响区的金相组织;采用 JSM-6700F 场发射扫描电镜 (SEM) 观测焊缝的微观形貌,并利用其自带能谱仪 (EDS) 检测分析焊缝区元素的混合情况;采用 D8 ADVANCE X-射线能谱仪 (XRD) 分析焊缝区的主要物相。

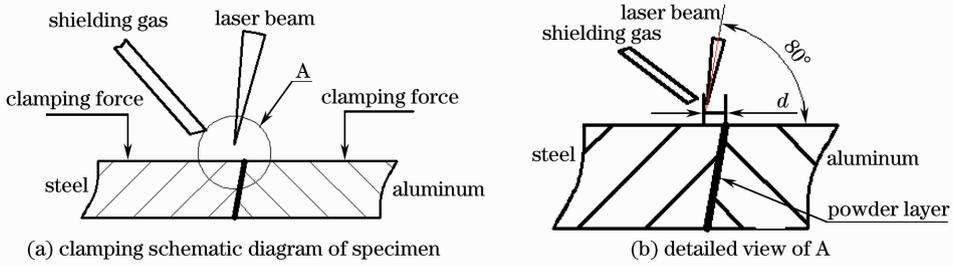


图 2 激光对接焊接实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser butt welding

3 结果分析与讨论

3.1 焊缝成形性分析

保证钢/铝熔合,同时抑制 Fe-Al 脆性金属间化合物产生,需要严格控制激光热输入量^[13],因此激光焊接工艺参数的合理选取至关重要。激光焊接工艺参数通常包括激光功率 P 、焊接速度 V 、离焦量 f 、偏移距离 d 等。在调整工艺参数的过程中发现:激光器功率过大时,不能实现热传导焊,所得焊缝表面不连续,存在飞溅等缺陷[图 3(a)],过小则不能得到足够的熔深;焊接速度过快时,试样表面线能量

过小,导致焊接熔深不够[图 3(b)];偏移距离 d 过于靠近铝侧(如选取 0.1 mm、0.15 mm),会使熔铝量过多并且会发生铝元素烧损行为,过于靠近钢侧(如选取 0.25 mm、0.4 mm),铝侧熔化量少又会导致焊接接头无法熔合。优化调整的工艺参数如表 2 所示。该工艺条件下,焊缝塌陷情况明显改善,焊缝连续均匀,试样背部未焊透,如图 3(c) 所示。预置 Si 粉后,焊缝表面成形良好[图 3(d)和 3(e)],为连续、规则的鱼鳞状焊斑,且无飞溅、夹杂、宏观裂纹,焊缝背面亦熔透,具有均匀的熔化宽度[图 3(f)]。

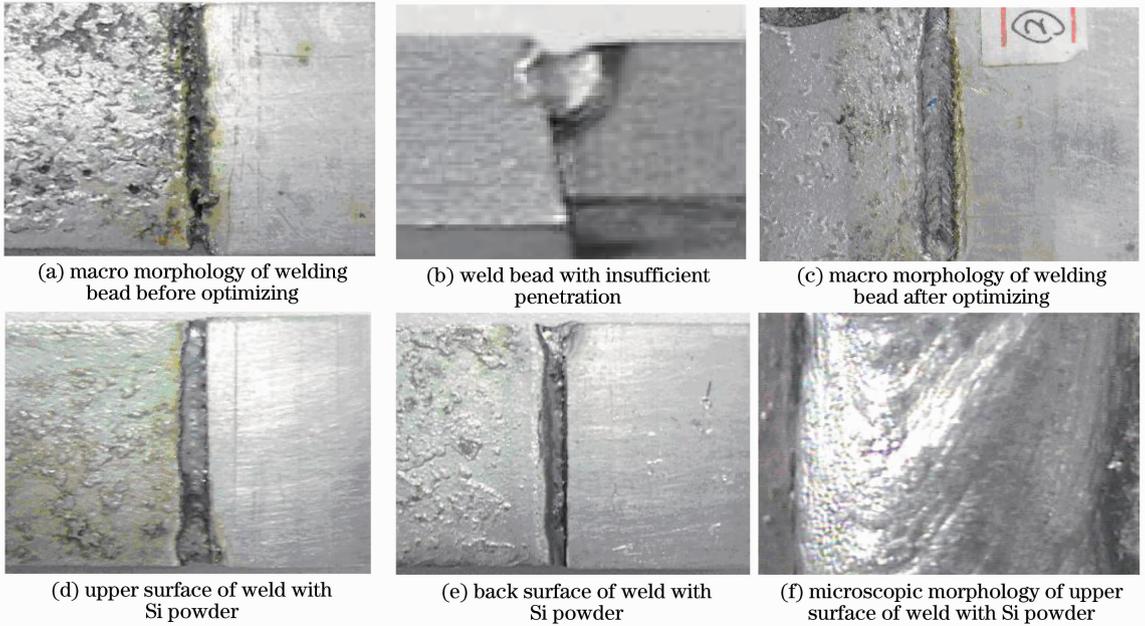


图 3 焊缝外观形貌

Fig. 3 Appearance of weld

表 2 钢-铝激光对接焊接优化工艺参数

Table 2 Optimized process parameters of steel-to-aluminium laser butt welding

Laser power P /kW	Defocusing f /mm	Welding speed V /(mm/s)	Offset d /mm	Protective gas type and flow rate Q /(L/min)
1.8~2.0	-2.0	8~10	0.2	Ar/15

3.2 焊缝微观形貌与显微硬度分析

图 4 和图 5 分别为钢/铝对接激光焊预置 Si 粉前后的金相组织。可以看出,焊缝熔池上部宽下部窄,呈

“V”字型,深宽比小,无深熔焊接时的指状“匙孔”,为热传导焊接的特征^[14,15]。

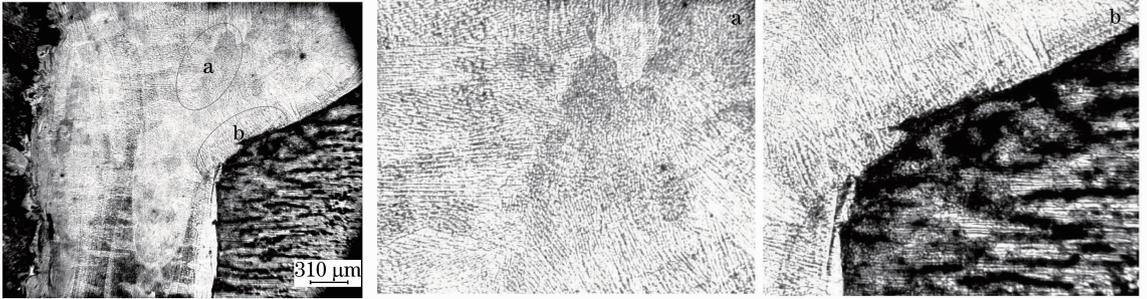


图 4 无预置粉焊缝区金相组织

Fig. 4 Crystalline phase of weld without filler

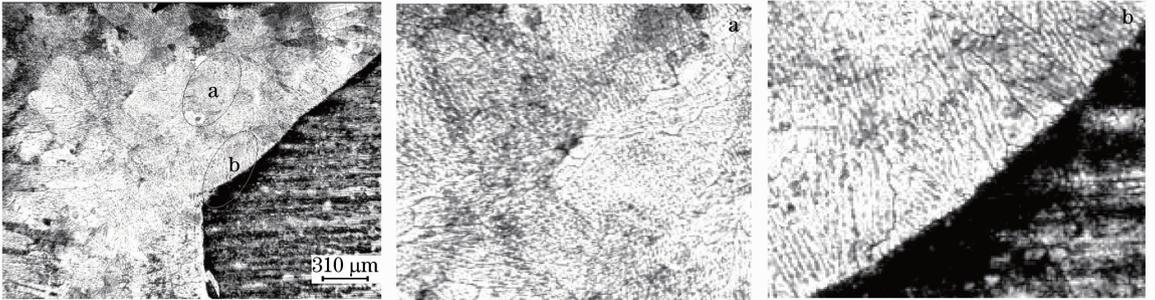


图 5 预置 Si 粉焊缝区金相组织

Fig. 5 Crystalline phase of weld with Si filler

焊缝区组织以中心轴线为对称轴,两侧组织近似对称分布。焊缝整个熔池区为等轴树状晶,且晶粒细小。靠近熔池边界,晶粒逐渐增大,呈方向性。图 6 和图 7 分别为激光焊预置 Si 粉前后钢/铝对接

界面的扫描电镜照片。可以看出,钢、铝结合界面处分界线明显,两母材在结合界面处熔化的金属互相扩散嵌入母材,呈齿轮式“啮合”态连接在一起。由于激光光源热量集中,在热传导焊接模式下,热输入

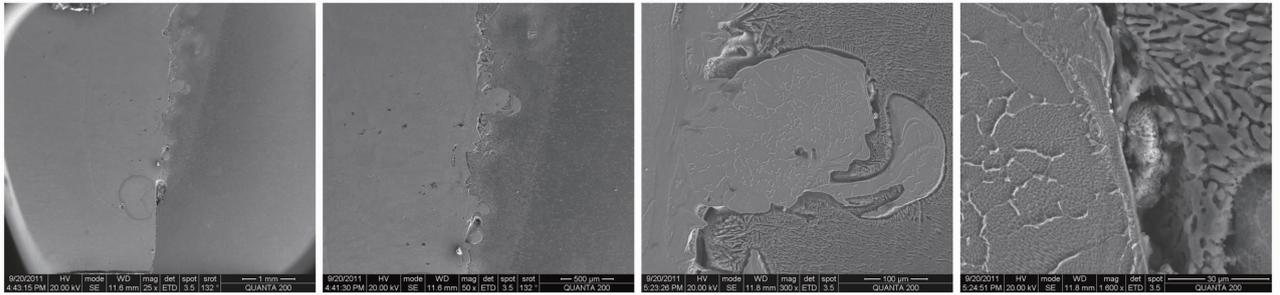


图 6 无预置粉焊缝区扫描电镜照片

Fig. 6 SEM of weld without filler

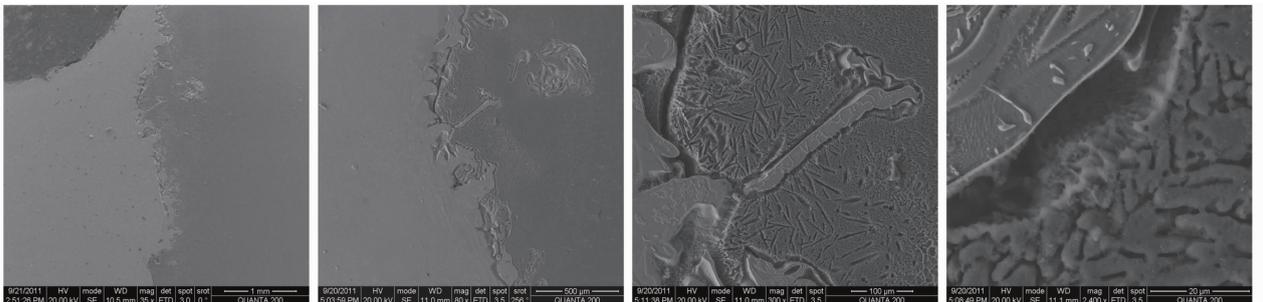


图 7 预置 Si 粉焊缝区扫描电镜照片

Fig. 7 SEM of weld with Si filler

少,钢对激光吸收率高,而铝本身导热性好,在这些因素综合作用下,使得由焊缝中心区向焊缝两侧温度梯度较大,因此,中心轴线附近区域易于形成晶核^[16],但受快速冷却的影响,晶粒长大的趋势受到抑制,这种抑制作用向两侧衰减。在优化的焊接工艺条件下,熔池存在的时间较长,两侧温度梯度小,因而光束照射下熔池温度高、温度梯度大、冷却速度快,熔池边界处温度低、温度梯度小、冷却速度慢,因

此,焊缝两侧晶粒长大趋势大于焊缝中心区域。从钢/铝对接激光焊预置 Si 粉前后的显微硬度(图 8)可看出,焊缝区域(图中 WZ)硬度均高于两侧热影响区及母材,添加 Si 粉后焊缝的显微硬度整体高于添加前的,焊缝中心处硬度高,是由于在激光热源集中作用和快速冷却的条件下,焊缝中心区晶粒得以细化,从而导致显微硬度值增大。

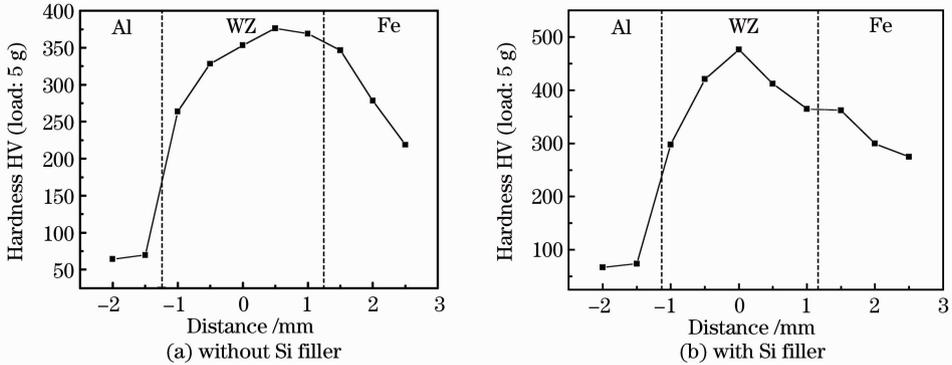


图 8 焊缝显微硬度

Fig. 8 Micro-hardness of weld

3.3 焊缝区域 EDS 与 XRD 物相分析

图 9 为未预置粉焊缝区 EDS 扫描结果。可以看出,位于熔池上层的 a 线与下层的 b 线 Fe、Al 混合区宽度分别约为 100 μm 、10 μm ,上层 Fe、Al 元素混合宽度大于下层。这表明在热传导焊接模式

下,母材的熔化量不及深熔焊,熔池流动性差,上层部分熔池较多,下层较少,因此上层部分熔化的 Fe、Al 扩散活动较强,下层部分扩散活动相对较弱,因而上层部分混合区域宽度大于下层部分。

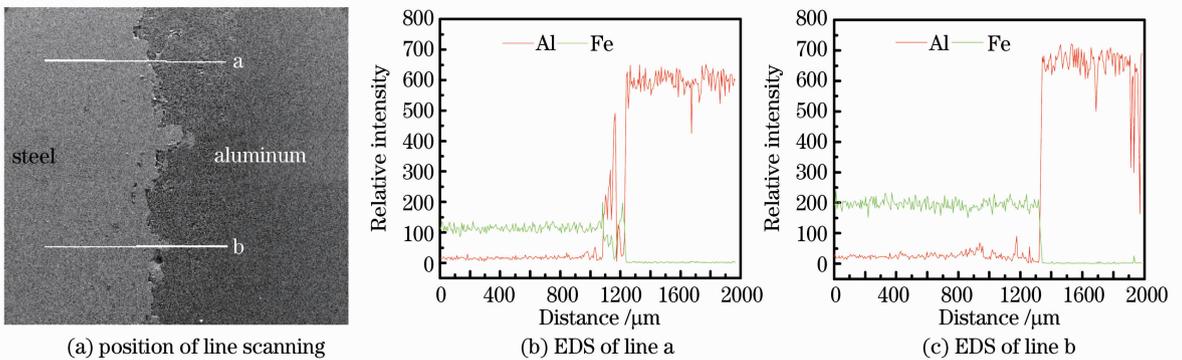


图 9 无预置粉焊缝区 EDS 扫描结果

Fig. 9 EDS of weld without filler

图 10 为所取试样横截面 X 射线衍射检测结果。可以看出,焊缝区的主要物相为 Fe、Al,未发现 Fe-Al 金属间化合物。在热传导焊接模式下,由于熔池区的温度在主要元素的气化温度以下,未产生大量等离子体,等离子体对激光吸收增强的作用在本实验中表现不明显,试样对激光的吸收被维持在一定的水平,钢、铝熔化量得到一定控制,因此抑制了 Fe-Al 脆性金属间化合物的生成。

图 11 为预置 Si 粉焊缝区 EDS 扫描结果。可以看出,位于熔池上层的 a 线与下层的 b 线 Fe、Al 混合区的宽度分别为 10 μm 、1000 μm ,钢、铝两侧还出现了少量 Si。对比 a 线和 b 线可看出,熔池上层 Fe、Al 元素混合宽度比下层窄。通常 Al-Si 合金焊料具有极好的铸造性能、抗腐蚀性、抗热裂性和流动性,焊料中的 Si 元素能够降低焊丝熔点,增强液态焊丝在钢表面的润湿性和铺展性^[17-23],Si 元素是

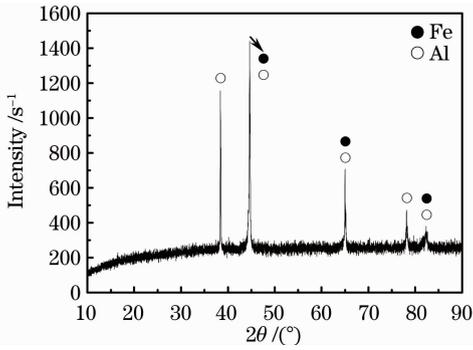


图 10 无预置粉焊缝区 XRD 结果
Fig. 10 XRD of weld without filler

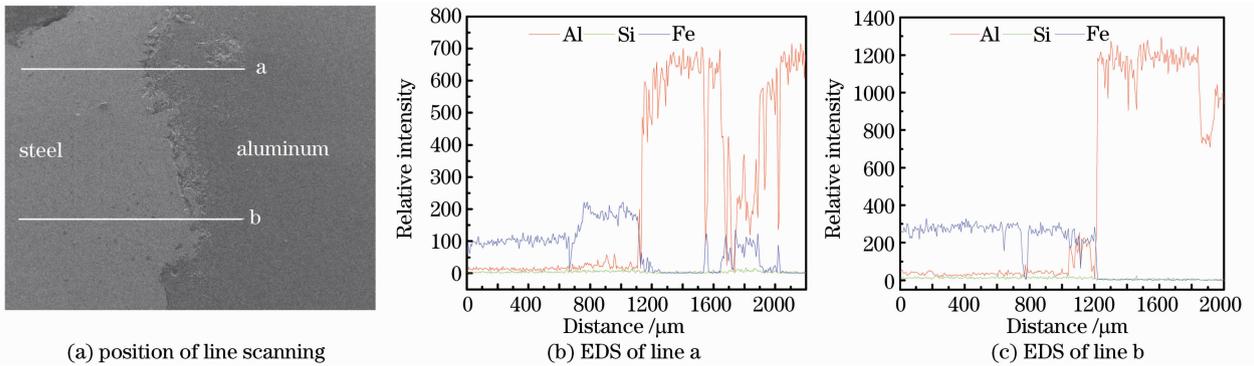


图 11 预置粉焊缝区 EDS 线扫描结果
Fig. 11 EDS of weld with Si filler

图 12 为预置 Si 粉后 XRD 结果,焊缝区主要物相为 Fe、Al,未见 Fe-Al 金属间化合物,但发现 Si 在 Al 母材基体中形成了 Al_9Si 化合物,在 Fe 侧形成了 Fe-Si 化合物 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 。Kobayashi 等^[24]通过金属间化合物生成焓 ΔH 和熵变 ΔS 计算了 293~938 K (933 K 为铝的熔点)温度区间 Fe-Al 和 Fe-Si 化合物的 Gibbs 自由能,发现 Fe-Al 化合物的生成难易顺序为 $FeAl_3 \rightarrow Fe_2Al_5 \rightarrow FeAl_2 \rightarrow FeAl$;而 Fe-Si 化合物的生成难易顺序为 $FeSi_2 \rightarrow FeSi \rightarrow Fe_5Si_3 \rightarrow Fe_3Si$,并且 FeSi、 Fe_5Si_3 、 Fe_3Si 三种化合物的 Gibbs 自由能比任何一种 Fe-Al 化合物要小得多(均为负值),

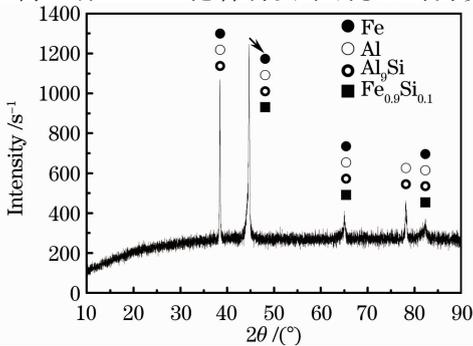


图 12 预置 Si 粉后焊缝区 XRD 结果
Fig. 12 XRD of weld with Si filler

钢/铝异种金属焊接材料中的主要元素,由于 Si 具有润湿液态钢、铝的作用,增加熔池的流动性,熔融金属在重力作用下,自上层向下层发生流动,导致 Fe、Al 元素的混合宽度,在熔池下层部分,较未预置粉时有所增大(无预置粉时为 10 μm ;预置 Si 粉后为 1000 μm)。此外,工艺参数选用负离焦量,表层金属熔化后,热源集中在表面以下 2 mm 处,先熔化的高温熔融金属在流动时加速了其他区域的熔化,这种作用在重力方向表现得更为明显,因此预置 Si 粉后,熔池下层 Fe、Al 混合宽度大于上层。

由于 Gibbs 自由能的值越小,表明该体系的相结构越稳定,因此对本实验而言,可能由于预置 Si 粉,钢/铝焊缝区生成 Al_9Si 、 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 化合物的结构比 Fe-Al 金属间化合物更稳定,这样从合金能量学的角度考虑,焊缝区 Al_9Si 、 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 化合物的形成与出现,抑制了 Fe-Al 金属间化合物的生成^[24~29]。

4 结 论

1) 激光功率为 1.8~2.0 kW,焊接速度 8~10 mm/s,离焦量 -2.0 mm,Ar 为保护气体且流量为 15 L/min,光斑偏向钢侧距界面结合处 0.2 mm 的工艺条件下,激光焊接钢/铝异种板材,可实现钢/铝熔合,焊接类型为热传导焊。

2) 焊缝区域晶粒细小,硬度高于两侧热影响区及母材,钢/铝结合界面分界线明显,界面处熔化金属互相扩散嵌入母材,呈齿轮式“啮合”态连接在一起。

3) 对钢/铝实施热传导焊,可有效控制熔池中的 Fe、Al 熔化量;预置 Si 粉改善了熔池熔化态下的流动性,熔化金属易于在结合界面铺展,钢/铝焊缝区形成了结构稳定的 Al_9Si 、 $Fe_{0.9}Si_{0.1}$ 化合物,抑制了 Fe-Al 脆性金属间化合物的生成。

参 考 文 献

- 1 Seiji Katayama, Yousuke Kawahito, Masami Mizutani. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects [J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**: 9~17
- 2 Li Yajiang, Wu Na. Current research status of dissimilar materials welding between steel and aluminum [J]. *Welding & Joining*, 2010, (3): 5~12
李亚江, 吴 娜. 钢/铝异种金属焊接的研究现状 [J]. 焊接, 2010, (3): 5~12
- 3 C. Dharmendra, K. P. Rao, J. Wilden *et al.*. Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**(3): 1497~1503
- 4 S. B. Lin, J. L. Song, C. L. Yang *et al.*. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal [J]. *Materials and Design*, 2010, (31): 2637~2642
- 5 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang *et al.*. Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 94~98
雷 振, 秦国梁, 林尚扬 等. 基于激光-MIG 复合热源的 5A02 铝合金/镀锌钢熔-钎焊 [J]. 机械工程学报, 2009, **45**(3): 94~98
- 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 Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1375~1379
卢兵兵. 白车身车顶侧激光焊接工艺参数分析与优化 [J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1375~1379
- 8 Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2091~2097
梅丽芳, 陈根余, 金湘中等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2091~2097
- 9 Zhang Mingjun, Chen Genyu, Li Shichun *et al.*. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel [J]. *Chinese J. Laser*, 2011, **38**(6): 0603010
张明军, 陈根余, 李时春 等. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究 [J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603010
- 10 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603013
陈根余, 陈 飞, 张 屹 等. 对接间隙对车用高强度光纤激光焊接的影响 [J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603013
- 11 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 860~863
张盛海, 陈 铠, 肖荣诗 等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响 [J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 860~863
- 12 Yin Jie, Li Liqun, Tao Wang *et al.*. Weld microstructure characteristics of dual laser beam multi-layer welded high strength steel with filler wire [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1361~1367
尹 杰, 李俐群, 陶 汪 等. 高强度双光束填充丝多层焊的焊缝组织特征 [J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1361~1367
- 13 Wu Qiang, Yang Yongqiang, Xu Lanying. Determination of critical power density of laser deep-penetration welding [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **37**(8): 71~75
- 伍 强, 杨永强, 徐兰英. 激光深熔焊接下临界功率密度的确定 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, **37**(8): 71~75
- 14 Zhang Guoshun. Modern Laser Manufacturing Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 107~134
张国顺. 现代激光制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 107~134
- 15 Reinhart Popraw. Laser Manufacturing Technology [M]. Zhang Dongyun Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 200~208
Reinhart Popraw. 激光制造工艺 [M]. 张冬云译. 北京: 清华大学出版社, 2008. 200~208
- 16 Li Yulong, Jiang Zhichao, Yu Yexiao. Microstructure and mechanical properties of the welding-brazed joint for the aluminium and galvanized steel sheet [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010, (10): 82~85
李玉龙, 姜智超, 禹业晓. 铝合金与镀锌钢薄板熔钎焊接头组织与力学性能 [J]. 材料工程, 2010, (10): 82~85
- 17 Li Heng, Huang Anguo, Wang Yongyang *et al.*. Study on elements distribution in weld seam of laser welding of aluminium alloy [J]. *Electric Welding Machine*, 2009, **39**(8): 56~59
李 恒, 黄安国, 汪永阳 等. 铝合金激光焊接焊缝元素分布的研究 [J]. 电焊机, 2009, **39**(8): 56~59
- 18 Hu Wenjin, Dong Honggang, Yang Liqun *et al.*. Effects of Si and Cu additions on properties of dissimilar aluminum-galvanized steel weld [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2011, **31**(11): 9~12
胡文金, 董红刚, 杨丽群 等. Si 和 Cu 元素对铝-镀锌钢 GTAW 接头性能的影响 [J]. 焊接学报, 2011, **31**(11): 9~12
- 19 Wang Changqin, Zhao Yutao, Zhang Songli *et al.*. Effects of Si and Mg content and alloying elements on mechanical properties of A356 alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2010, **30**(1): 88~91
汪长勤, 赵玉涛, 张松利 等. Si、Mg 含量及合金元素对 A356 合金力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, **30**(1): 88~91
- 20 Li Liqun, Tao Wang, Wang Bin. Characteristics and microstructure of laser brazing SiP/Al composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, **21**(9): 2139~2145
- 李俐群, 陶 汪, 汪 彬. SiP/Al 复合材料激光钎焊特性与组织形态 [J]. 中国有色金属学报, 2011, **21**(9): 2139~2145
- 21 Fei Sanlin, Zhou Lixin, Pan Mingxu *et al.*. Cause of poor fluidity casting liquid of bearing steel GCr15 and improving measure [J]. *Special Steel*, 2011, **32**(2): 41~43
费三林, 周立新, 潘明旭 等. 轴承钢 GCr15 连铸钢水流动性差的原因和改进措施 [J]. 特殊钢, 2011, **32**(2): 41~43
- 22 Reinhold Braun. Nd:YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **426**(1): 250~262
- 23 Qi Huarong, Yang Gang, Shi Qingnan. Effect of Si and Mg on A356 alloy fluidity performance [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2007, **35**(2): 19~22
起华荣, 杨 钢, 史庆南. Si、Mg 对铝轮毂用 A356 合金流动性的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2007, **35**(2): 19~22
- 24 S. Kobayashi, T. Yakou. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, **238**(1): 44~53
- 25 L. J. Vendra, A. Rabiei. A study on aluminum-steel composite metal foam processed by casting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **465**(2): 59~67
- 26 B. P. Gearing, H. S. Moon, L. Anand. A plasticity model for interface friction: application to sheet metal forming [J]. *International Journal of Plasticity*, 2001, **17**(2): 237~271
- 27 H. R. Shahverdi, M. R. Ghomashchi, S. Shabestari *et al.*

- Microstructural analysis of interfacial reaction between molten aluminium and solid iron[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **124**(3): 345~352
- 28 T. Hunalm. Novel continuous casting progress for clad steel with level magnetic field[J]. *Ironmaking and Steel Making*, 1997, (3): 257~263
- 29 G. Eggeler, W. Auer, H. Kaesche. On the influence of silicon on the growth of the alloy layer during hot dip aluminizing[J]. *Journal of Materials Science*, 1986, **21**(9): 3348~3350

栏目编辑:宋梅梅