

激光与光电子学进展

激光深熔焊条件下添加 Ti 粉双相钢/铝合金接头组织和性能

徐少华, 周惦武*, 刘金水

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 以 DP590 双相钢、6016 铝合金为研究材料, 通过“钢在上部、铝在下部”的搭接模式, 进行了激光深熔焊接试验, 比较了两者之间添加 Ti 粉前后接头组织以及性能的改变。结果显示, 在气流为 15 L/min 的 Ar 气保护氛围下, 当离焦量为 +1.0 mm, 1600 W 的激光束以 35 mm/s 的速度焊接时, 添加 Ti 粉得到的焊缝成形质量较优, 线载荷的平均值为 110 N/mm, 并且相比于未加粉末情况下增大了 10%; 加入 Ti 粉可以细化晶粒, 同时在焊接过程中, Ti 元素大部分会扩散到液态铝附近, 并与 Fe 发生反应得到延性相 Fe_2Ti , 进而提高接头性能。

关键词 材料; 激光熔焊; 钢/铝; 添加 Ti 粉; 冶金反应

中图分类号 TG442

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0314007

Microstructure and Mechanical Properties of Adding Ti Powder Weld Joint in Dual-Phase Steel to Aluminum Alloy Under Process Condition of Laser Deep Fusion Welding

Xu Shaohua, Zhou Dianwu*, Liu Jinshui

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

Abstract DP590 dual-phase steel and 6016 aluminum alloy were used as test materials. A laser deep fusion welding test was conducted using Ti powder in the lap mode of “steel at the top and aluminum at the bottom,” and the microstructure and properties of the joint before and after adding the Ti powder between them were compared. The test results show that under a laser power of 1600 W, a welding speed of 35 mm/s, a defocus amount of +1.0 mm, and back protection using the Ar protective gas of 15 L/min, the welding quality is improved by the addition of the Ti powder, and the average line load is 110 N/mm, which is 10% higher than the condition without the addition of the powder. The addition of the Ti powder can refine the grain size. During the welding process, the Ti powder will be absorbed into the liquid aluminum and react with Fe to form a ductile phase Fe_2Ti , which will improve the property of weld-joint.

Key words materials; laser fusion welding; steel/aluminum; add Ti powder; metallurgical reaction

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51674112)

通信作者: *ZDWe_mail@126.com

1 引言

21 世纪以来汽车行业日益发展,随之而来的环境污染问题也开始引起人们的重视,同时汽车轻量化技术被视为能够有效解决该问题的手段之一。钢/铝复合结构件可以大大降低材料的重量,在交通运输领域能够占据一席之地^[1]。焊接被看作是能够达成这一目标的有效解决方案^[2-4],其中钢和铝的物理特性有很大的不同,想要采用传统的焊接工艺将这两种材料完美地连接在一起,具有较大的技术难度^[5-11]。针对这一问题,目前学术界提出了激光深熔焊技术,它具备了焊接效率高、稳定性强、高度聚焦等优点,但该工艺条件中,这两种金属的熔池会相互混合,Fe 和 Al 发生化学反应而得到 Fe-Al 化合物,这种脆性化合物会破坏接头的性能。

从目前报道的相关文献来看,除了气孔、裂纹、接头组织这些因素外,脆性 Fe-Al 化合物也被看作是影响焊缝性能的重要因素。针对激光深熔焊钢/铝面临的这一难题,本文通过采用“钢在上部、铝在下部”的搭接模式,利用光纤激光器对 DP590 双相钢和 6016 铝合金施加焊接,比较了在两者之间添加 Ti 粉前后接头组织以及性能的变化。本文研究内容旨在为钢/铝异种金属的成功连接提供一些新的思路。

2 试验

试验使用的光纤激光器型号为 YLS-4000-CL,最高功率为 4000 W,波长为 1070 nm,连续的输出激光模式为 TEM₀₀。试验材料为 DP590 双相钢和 6016 铝合金,双相钢的元素组成(质量分数)为 C(0.15%),Si(0.60%),Mn(2.50%),S(0.015%),P(0.04%),Fe(余量),6016 铝合金的元素组成为 Si(1%~1.5%),Cu(0.2%),Mn(0.2%),Mg(0.25%~0.6%),Fe(0.5%),Al(余量),两者的母材尺寸分别是 1.4 mm×100 mm×30 mm 和 1.2 mm×100 mm×30 mm。焊接过程中,将钢材放置在铝材的上端(图 1)。加 Ti 粉时,要先放到丙酮中充分溶解,再等量涂抹在铝材表面,涂抹尺寸 0.04 mm×30 mm×30 mm,同时材料的上下两个表面都要用氩气来保护。试验的宗旨是取得成形良好的焊缝表面,优化参数后发现,在气流为 15 L/min 的 Ar 气保护氛围下,当离焦量为 +1.0 mm,功率为 1600 W 的激光束以 35 mm/s 的速度焊接时,添加 Ti 粉得到

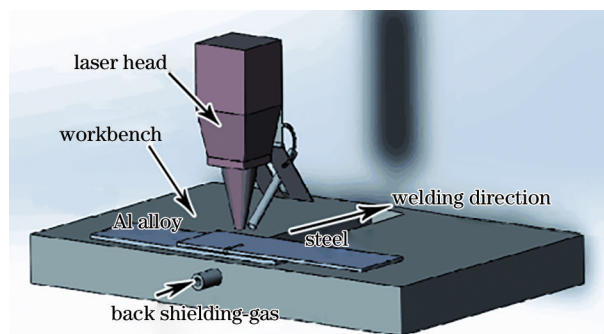


图 1 钢/铝激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic of steel/Al laser welding

的焊缝成形质量较优。为比较在两者之间加入 Ti 粉前后接头组织以及性能的变化,试验中添加 Ti 粉前后的焊接条件一致。

试验中光谱仪的型号为 HR2000+,光谱检测与焊接试验同步运作。试验中将光谱仪的六个光纤探头全部依附在激光头上,并且探头之间的距离要保持相等。这是考虑到光谱仪输出光线的波长区间大,避免检测到的光谱信号有偏差。同时为避免由于光谱信号过大而得到不正确的结果,要在探头和光谱仪之间安装衰减器。传入计算机中的信号会对焊接光谱信息元素特征谱线开始判辨,对比补充粉末前后光谱强度的变化以及与表面成形的关联性。

在前期的焊接试验后,试样要遵循 GB/T2651-2008 的标准开始制备拉伸试样,并以焊缝为中心加工成规范的剪切试样。观察接头组织前要镶样,并完成磨抛和腐蚀,腐蚀液为 4% 的硝酸乙醇溶液。选择 XJG-05 型金相显微镜,查看接头的微观结构;选择 FEI Quanta200 扫描电镜,检测接头的断口形貌、界面元素的分布及其晶粒大小。选择 D500X 射线衍射仪(XRD),探究焊缝区关键物相;选择 C_{ss}-225 型万能试验机,检验试样线载荷的平均值。

3 分析与讨论

3.1 显微组织

图 2 为在焊接参数优化的前提下,Ti 粉添加前后焊缝的表面形貌。对比发现,Ti 粉添加前后都能得到平整、连贯的焊缝,并且焊缝表面的飞溅较少。图 3 为 Ti 粉添加前后焊缝的截面形貌,从图中并没有看到气孔、裂纹等缺陷,两种工艺方案下得到的焊缝深宽比较大,表现出明显的“激光深熔焊”特性。

图 4 为添加 Ti 粉前后钢/铝界面元素的分布

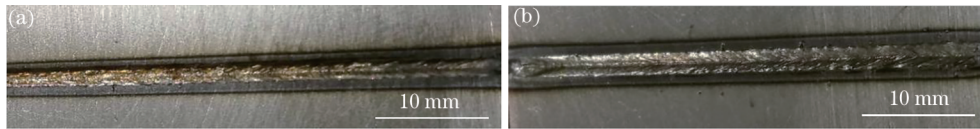


图 2 钢/铝焊缝表面宏观形貌。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 2 Macroscopic morphology of steel/Al weld surface. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

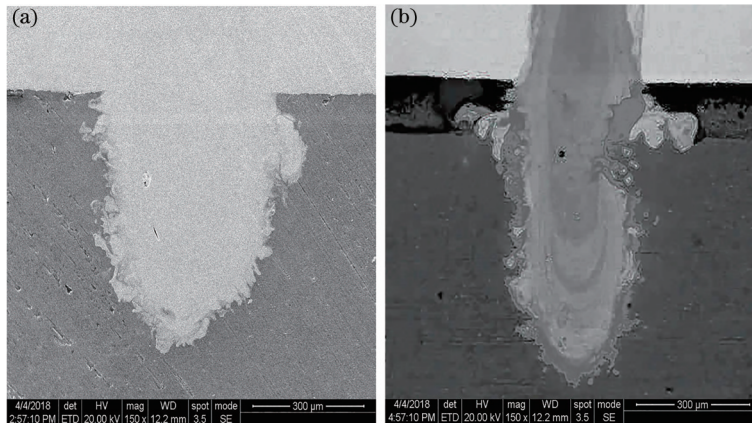


图 3 钢/铝接头金相组织。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 3 Microstructures of steel/Al joint. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

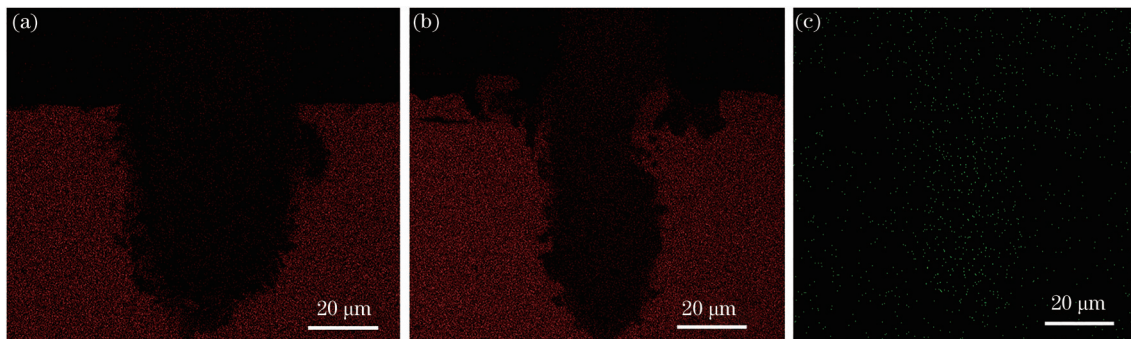


图 4 钢/铝接头元素分布。(a)未添加 Ti 粉时的 Al 分布;(b)添加 Ti 粉时的 Al 分布;(c)添加 Ti 粉时的 Ti 分布

Fig. 4 Elements distributions of steel/Al joint. (a) Al distribution without Ti powder; (b) Al distribution with Ti powder;

(c) Ti distribution with Ti powder

图。当未添加 Ti 粉时,下层铝侧熔池内 Al 元素含量较添加 Ti 粉时减少,熔池边界混合层中 Al 元素含量变化不连续;当添加 Ti 粉时,熔池存在分层现象,熔池边界 Al 含量呈渐变式减少,边界混合层厚度变薄。Ti 元素在熔池边界分布较多,在熔池内部分布均匀。

图 5 为 Ti 粉添加前后焊缝内晶粒尺寸及分布图。在补充 Ti 粉之前,焊缝内晶粒大小的平均值为 $1.514 \mu\text{m}$,晶粒大小散布在 $0.89\sim 4.9 \mu\text{m}$ 区间中,集中处于 $0.82\sim 1.2 \mu\text{m}$,上下限差距较大[图 5(a)];而在补充 Ti 粉之后,焊缝内晶粒大小的平均值为 $0.992 \mu\text{m}$,晶粒大小散布在 $0.792\sim 2.2 \mu\text{m}$ 区间中,集中处于 $0.792\sim 1.02 \mu\text{m}$ [图 5(b)];因此两

种情况对比会发现,补充 Ti 粉焊缝内晶粒变小,区间变窄。

3.2 焊接元素特征谱线

图 6 为 Ti 粉有无添加两种条件下焊接过程中的元素特征谱线。可以看出,金属蒸气/等离子体光谱为连续谱上叠加的一连串分立谱线。当波长为 403.13 nm ,金属蒸气/等离子体光谱相对强度先后在 11070.01 和 13567.58 处陡增到极限值。由于波长在 $370\sim 410 \text{ nm}$ 区间内有清晰的元素特征谱线,所以要对这一部分的谱线进行深度探究(图 7),结果表明,成分大多为 Fe 元素和少许 Ti 元素,这说明焊接过程中熔池温度极限可升至 Ti 的沸点 ($3260 \text{ }^\circ\text{C}$),超过了钢材的沸点

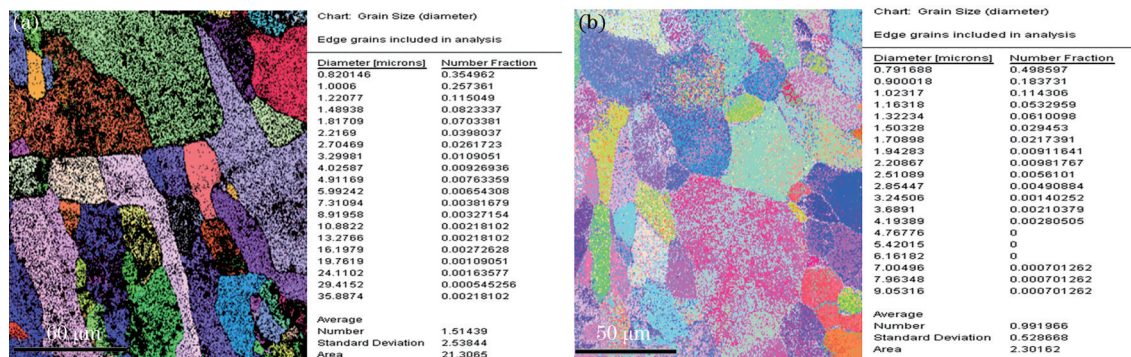


图 5 钢/铝接头焊缝区晶粒尺寸及分布。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 5 Grain size and distribution in weld zone of steel/Al joint. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

(2861 °C), 而且补充 Ti 粉是在激光深熔焊的情况下进行的。

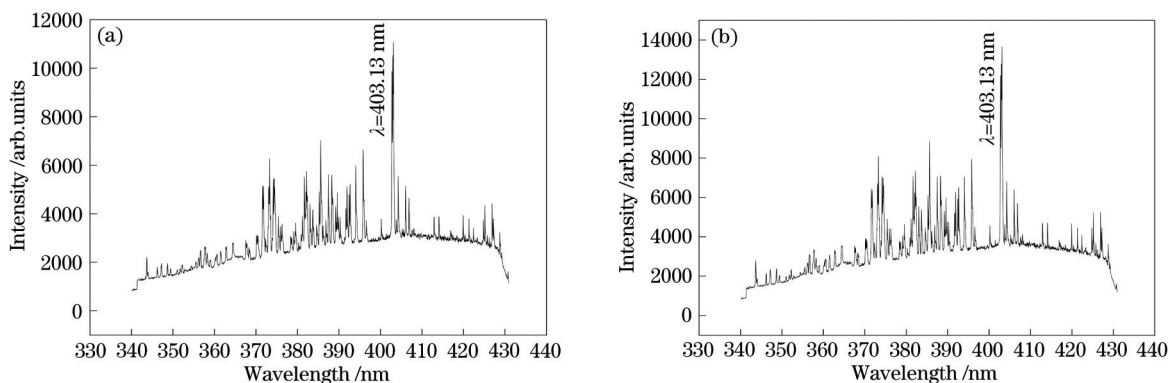


图 6 元素特征谱线。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 6 Element characteristic spectral line. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

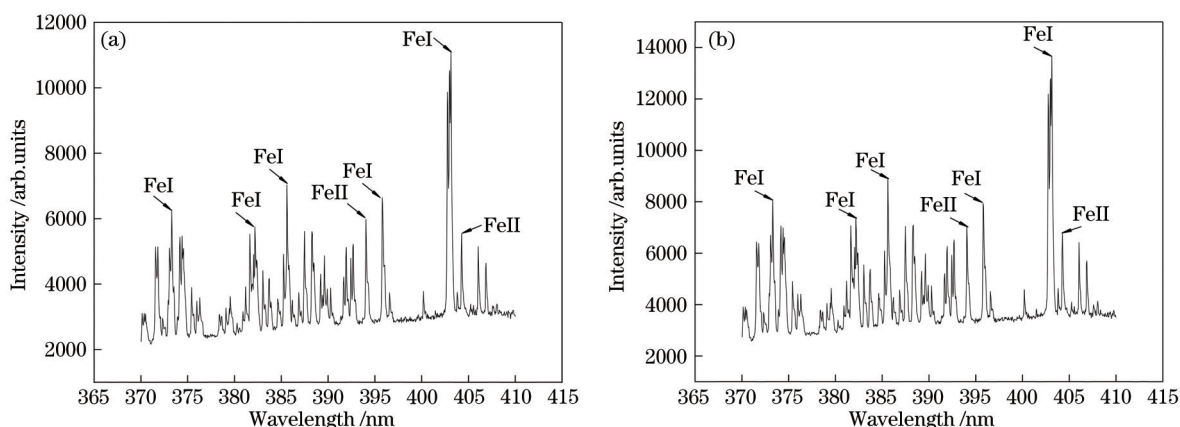


图 7 370~410 nm 区间元素特征谱线。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 7 Elements characteristics spectral lines in the band of 370–410 nm. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

此外,从图 7 可以看出,FeI403.13 的光谱相对强度最大,剩余的是 FeI373.30、FeI382.18、FeI385.60、FeI394.05、FeII395.79 和 FeII404.27,通过比较谱线的最大值可以看出,相对于未补充 Ti 粉的情况,补充 Ti 粉后形成的光谱相对强度会增大。

有无添加 Ti 粉两种条件下 FeI403.13 的峰值周围的数据点检测谱线展宽,谱线线型是洛伦兹型^[12],计算金属蒸气/等离子体电子密度时,采用洛伦兹函数的表达式,

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(x - x_c) + w^2}, \quad (1)$$

式中: w 为谱线半峰全宽; x_c 为中心波长; y_0 为背景发射; A 为谱线积分面积。通过洛伦兹函数拟合, 其余条件相同的情况下, 有无补充 Ti 粉双相钢/铝合金激光焊接的特征谱线, 如图 8 所示, 所得到的有无中间层 Ti 的平均半峰全宽分别为 0.14118 nm 和

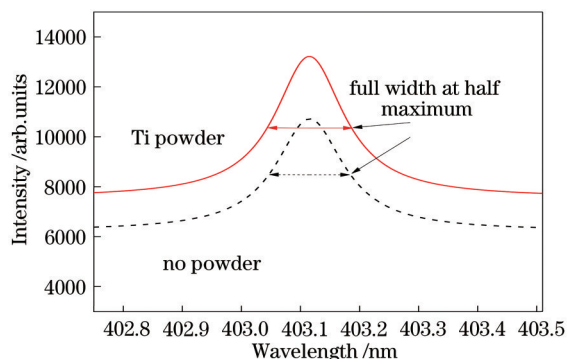


图 8 添加 Ti 粉前后谱线拟合结果

Fig. 8 Spectral line fitting results with and without Ti powder

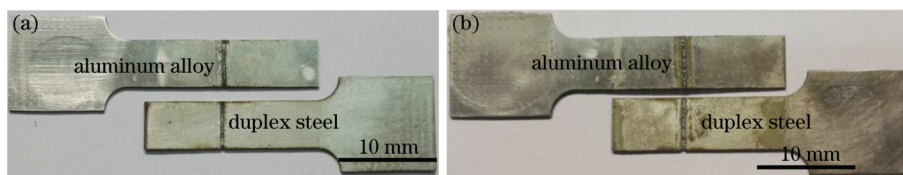


图 9 钢/铝接头剪切试样断裂位置。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 9 Fracture positions of shear specimen of steel/Al joint. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

图 10(a) 为未 Ti 粉时钢/铝接头的断口微观形貌, 凹凸不平的理解台阶和锋利的撕裂棱角能够明显看到, 非常符合脆性断裂的情况。图 10(b) 为补

0.13869 nm。补充 Ti 粉后, 激光焊接的半峰全宽增大。采用洛伦兹函数计算得到补充 Ti 粉后激光焊孔外金属蒸气/等离子体电子密度由 $1.315 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $1.343 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。通过比较焊接过程是否补充 Ti 粉的焊接小孔外等离子体/金属蒸气密度可以看出, 在其他焊接工艺参数相同的情况下, 在钢/铝中间层添加 Ti 粉, 等离子体/金属蒸气从小孔中迸发, 其密度大于未添加 Ti 粉, 结果显示, 添加 Ti 粉能够提升激光与焊件的能量耦合效率, 使得更多的母材汲取来自热源的能量, 导致熔池蒸发现象明显。

3.3 力学性能与断口形貌

图 9 为 Ti 粉添加前后钢/铝剪切试样的断裂位置。对比发现, 试样都在焊缝区且在钢铝搭接界面处断裂。未补充 Ti 粉时, 试样线载荷的平均值为 100 N/mm; 补充 Ti 粉时, 线载荷的平均值为 110 N/mm, 比前者提高了 10%。

充 Ti 粉时钢/铝接头的接头微观断口形貌, 从图 10 可以看到, 断口中出现了韧窝, 这是明显的韧性断裂。

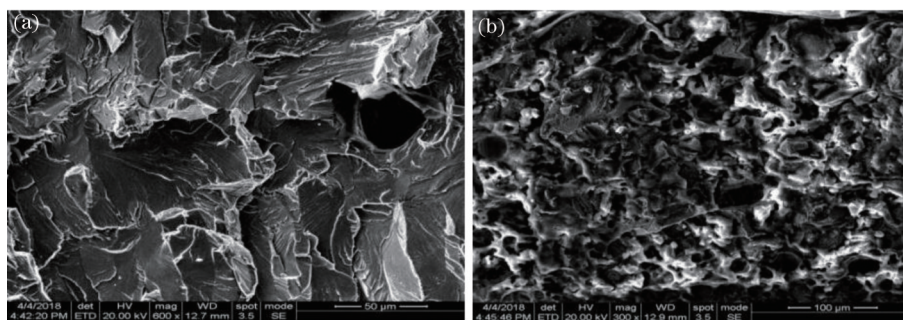


图 10 钢/铝接头剪切试样断口形貌。(a)未添加 Ti 粉;(b)添加 Ti 粉

Fig. 10 Fracture morphologies of shear specimen of steel/Al joint. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

3.4 能谱仪和 XRD 分析

图 11 为添加 Ti 粉前后钢/铝接头的能量色散 X 射线谱(EDS)扫描结果。可以看出, 未添加 Ti 粉时, 铝侧熔池中 Fe 和 Al 的含量变化剧烈[图 11(b)], 表明这些区域 Fe 和 Al 之间存在相互作用; 添加 Ti 粉时, 铝侧熔池中也出现 Fe 和 Al 的混合, 但 Fe 和 Al

元素的分布宽度较未添加 Ti 粉时的分布宽度有所减小[图 11(e)]。

图 12 为有无添加 Ti 粉的钢/铝界面的扫描电子显微镜(SEM)图像, 界面各区域的 EDS 分析结果如表 1 所示。未添加 Ti 粉时, 钢/铝接头界面 Fe 和 Al 发生反应, 熔合区与铝合金之间形成厚度约为

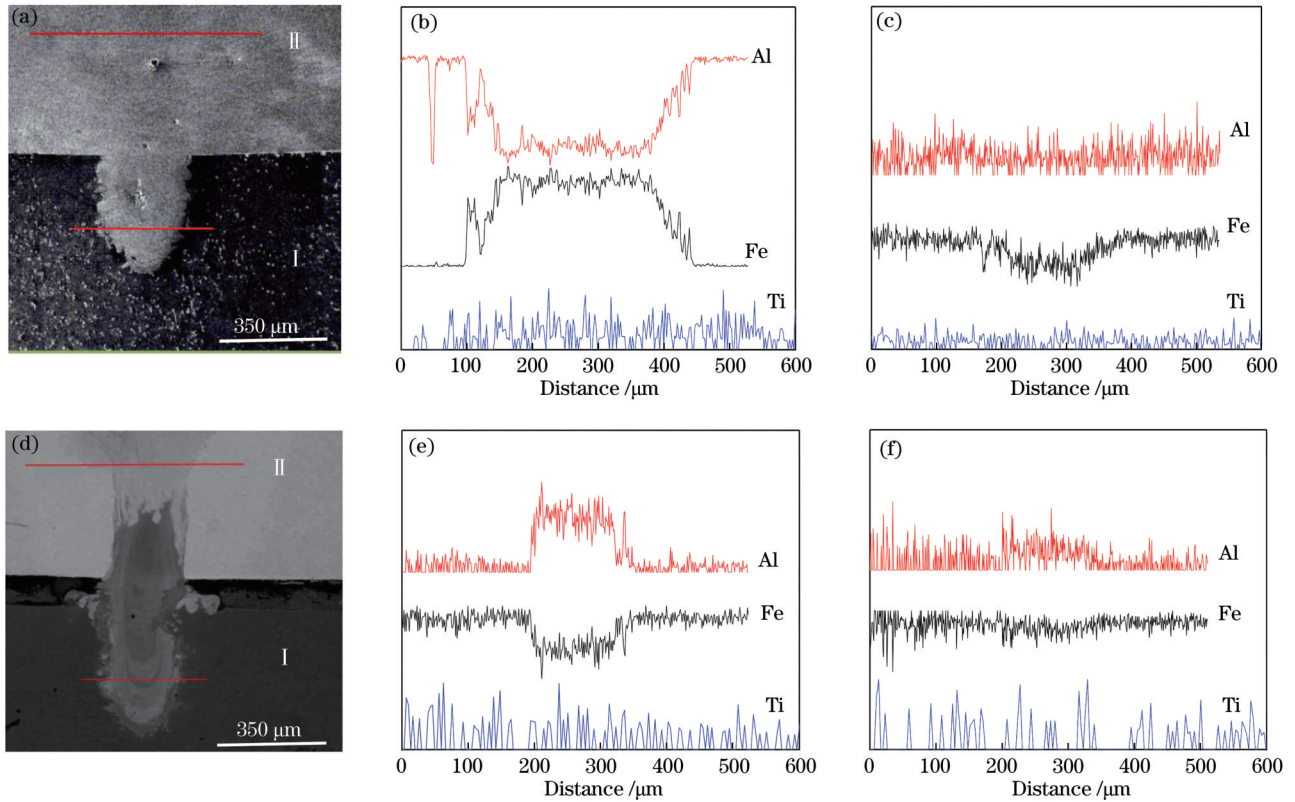


图 11 钢/铝接头不同位置的EDS分析。(a)(d)有无添加Ti粉扫描位置;(b)(e)扫描线 I ;(c)(f)扫描线 II
 Fig. 11 EDS analysis of different positions of steel/Al joint. (a) (d) Scanning positions with and without Ti powder;
 (b) (e) scanning line I ; (c) (f) scanning line II

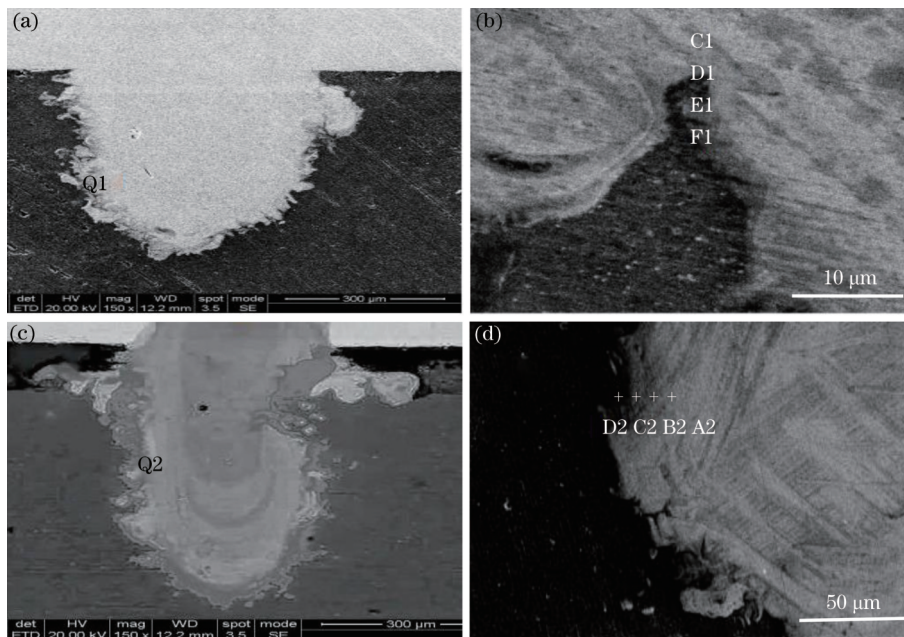


图 12 钢/铝接头界面层SEM图像。(a)(c)未添加粉末;(b) Q1区域放大;(d) Q2区域放大
 Fig. 12 SEM images of interface layer of steel/Al joint. (a) (c) Without powder; (b) enlarged view of area Q1;
 (d) enlarged view of area Q2

20 μm 的金属间化合物(IMCs)层,其中C1区域,铝含量少,主要是Fe基体,D1和E1区域,Fe/Al比值

分别接近 2:5 和 1:3,显示对应区域分别形成 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 化合物;添加 Ti 粉时,焊接熔池深度明显增

表 1 钢/铝接头不同区域的 EDS 分析
Table 1 EDS analysis of different areas of steel/Al joint

Zone	Molar concentration / %			Phase
	Fe	Al	Ti	
C1	84.47	15.38	—	Unknown
D1	34.16	65.71	—	Fe ₂ Al ₅
E1	14.39	85.31	—	FeAl ₃
F1	97.45	2.55	—	Fe-rich
A2	57.20	42.61	0.19	FeAl
B2	35.23	64.46	0.31	Fe ₂ Al ₅
C2	29.91	69.84	0.25	Fe ₂ Al ₅
D2	0.77	98.93	0.30	Fe ₂ Ti, Al-rich

加, IMCs 层厚度减少, 约 9~10 μm, 其中 A2、B2 和 C2 区域, Fe/Al 比值分别接近 1:1、2:5 和 2:5, 由此可知, A2~C2 层分别由 FeAl、Fe₂Al₅、Fe₂Al₅ 组成, 而 D2 区域的 Fe/Ti 比值接近 2:1, 因此, 推测该区域生成了 Fe₂Ti 化合物。

为更深入推断钢/铝接头金属间化合物相结构的类型, 对补充 Ti 粉前后钢/铝接头实施 XRD 分析, 情况如图 13 所示。补充 Ti 粉时, 焊缝除形成 FeAl、Fe₂Al₅ 等 Fe-Al 化合物外, 还形成了延性相 Fe₂Ti^[13], 与前文的能谱分析情况大致相同。

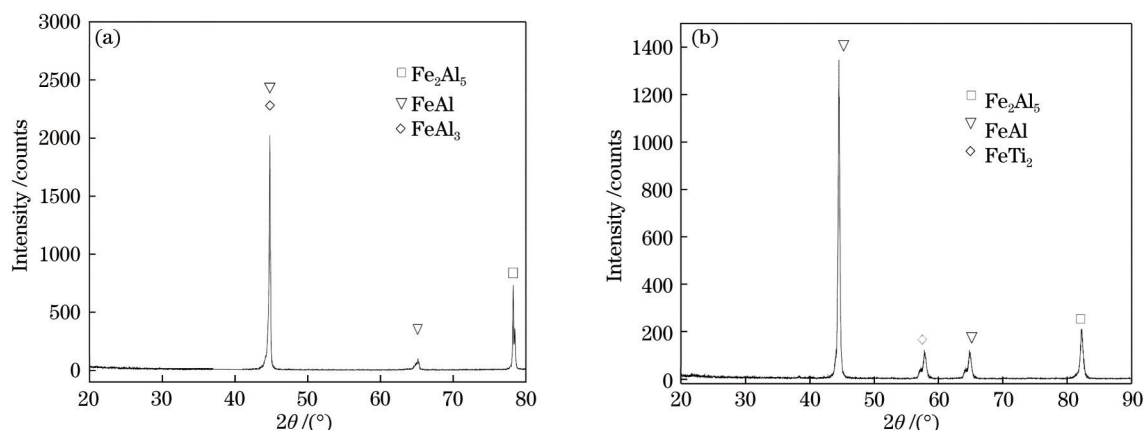


图 13 钢/铝焊接接头的 XRD 谱。(a) 未添加 Ti 粉; (b) 添加 Ti 粉

Fig. 13 XRD spectra of steel/Al joint. (a) Without Ti powder; (b) with Ti powder

4 结 论

在气流为 15 L/min 的 Ar 气保护氛围下, 当离焦量为 +1.0 mm, 功率为 1600 W 的激光束以 35 mm/s 的速度焊接时, 添加 Ti 粉得到的焊缝成形质量较优, 线载荷的平均值为 110 N/mm, 并且相比于粉末未添加情况下增大了 10%。

添加 Ti 粉可以细化晶粒, 同时在焊接过程中, Ti 元素大多会扩散到液态铝附近, 并与 Fe 发生反应得到延性相 Fe₂Ti, 达到提高接头性能的目的。

参 考 文 献

[1] Fan Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology

[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 1-16.

范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16.

[2] Liedl G, Bielak R, Ivanova J, et al. Joining of aluminum and steel in car body manufacturing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 150-156.

[3] Fan J, Thomy C, Vollertsen F. Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminum-steel overlap joints[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 134-141.

[4] Dharmendra C, Rao K P, Wilden J, 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.

- [5] Zhang B G, He J S, Zeng R C, et al. Microstructures and formation of EBW joint of aluminum alloy LF2 to steel Q235 with transition metal Cu[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007, 28: 37-42.
张秉刚, 何景山, 曾如川, 等. LF2 铝合金与 Q235 钢加入中间 Cu 层电子束焊接接头组织及形成机理[J]. 焊接学报, 2007, 28: 37-42.
- [6] Huang P F, Lu Z Y, Gao W N, et al. Low energy welding technology in bonding steel with aluminum [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (11): 295-299.
黄鹏飞, 卢振洋, 高文宁, 等. 钢铝异种金属的低能量焊接法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 295-299.
- [7] Lei Z, Qin G L, Lin S Y, et al. Research and developments of dissimilar metals welding of aluminum and steel[J]. Welding & Joining, 2006(4): 16-20.
雷振, 秦国梁, 林尚扬, 等. 铝与钢异种金属焊接的研究与发展概况[J]. 焊接, 2006(4): 16-20.
- [8] Dong H G, Hu W J, Duan Y P, et al. Effects of Si and Cu additions on properties of dissimilar aluminum-galvanized steel weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 9-12, 113.
董红刚, 胡文金, 段玉平, 等. Si 和 Cu 元素对铝-镀锌钢 GTAW 接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 9-12, 113.
- [9] Bozzi S, Helbert-Etter A L, Baudin T, et al. Intermetallic compounds in Al6016/IF-steel friction stir spot welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(16/17): 4505-4509.
- [10] Shen Y F, Zhang S H. Current research status and development trends of laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s1): 103002.
沈以赴, 张盛海. 激光深熔焊接技术的研究与动向[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): 103002.
- [11] Li J Z, Liu Y B, Sun Q J, et al. Effects of laser beam wobble on weld formation characteristics, microstructure, and strength of aluminum alloy/steel joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402010.
李军兆, 刘一搏, 孙清洁, 等. 激光摆动模式对铝/钢焊接接头成形特征及组织、强度的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402010.
- [12] Needleman A, Tvergaard V. An analysis of ductile rupture in notched bars[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984, 32(6): 461-490.
- [13] Li T, Zhou D W, Yan Y, et al. Effect of Ti foil on microstructure and mechanical properties of laser fusion welding of DP590 dual-phase steel to 6022 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 796: 139929.