



激光-MIG复合热源钢/铝异种金属深熔钎焊

刘云祺, 王伟, 朱宗涛*

西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 610031

*联系人, E-mail: zongtaozhu@163.com

收稿日期: 2019-05-31; 接受日期: 2019-07-03; 网络出版日期: 2019-09-18

国家自然科学基金(编号: 51405398)和四川省重点研发计划(编号: 2019YFG0288)资助

摘要 采用激光-MIG(Melt Inert-Gas)电弧复合热源实现了4和6 mm厚的钢/铝异种金属对接接头深熔钎焊, 并利用扫描电子显微镜观察力接头界面微观组织特征. 通过有限元软件分析电弧熔钎焊、激光熔钎焊、激光-MIG复合深熔钎焊三种焊接方法所获接头温度场, 同时分析了激光偏转角度对激光-MIG复合深熔钎焊接头温度分布的影响. 结果表明, 激光-MIG复合深熔钎焊接头温度分布相较于电弧、激光熔钎焊而言较为均匀, 接头下部的温度得到明显的提高, 可有效增加液态金属在钢表面的润湿铺展程度, 有利于获得较为良好的焊缝成形. 在激光-MIG复合深熔钎焊过程中, 可以通过调整激光偏转角度提高接头界面下部温度, 改善界面温度梯度, 有利于生成均匀的金属间化合物层. 4 mm厚钢/铝激光-MIG复合深熔钎焊焊接接头有着典型的熔钎焊特征, 成型质量良好且无明显缺陷生成. 界面层化合物为 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 和 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, 焊缝由 $\alpha\text{-Al}$ 和 Al-Si 共晶相组成. 激光-MIG复合深熔钎焊可实现6 mm对接接头连接, 但界面处存在微裂纹.

关键词 异种金属, 激光-MIG复合深熔钎焊, 温度场, 温度梯度, 金属间化合物

PACS: 11.10.Wx, 05.70.Fh, 07.10.Cm, 07.60.Pb

1 引言

钢/铝轻量化复合结构在航空航天和汽车制造领域有着良好的应用前景, 是实现能源节约, 生态环保的重要手段^[1]. 但是铝和钢两种材料的物理及化学性质差异显著, 采用传统的熔焊方式会使得界面处形成厚度较大的脆性金属间化合物层, 难以获得有效连接^[2,3]. 而对于较厚的钢/铝异种金属焊接, 由于其对热输入更加敏感, 容易造成应力集中产生热裂纹, 使钢/铝的连接更加困难.

近年来, 熔钎焊方法成为熔点差别较大的异种材料焊接的研究热点, 各国学者采用不同的热源进行了钢/铝熔钎焊研究, 研究重点在于对界面化合物层进行调控. 电弧熔钎焊具有适应性强、成本低的优势, 但由于熔深较小使得该方法在进行厚板焊接时受到限制, 且电弧熔钎焊热输入较大, 加剧了界面反应程度^[4]. 激光熔钎焊利用了激光能量集中, 作用位置精确的特点, 可以有效地控制焊接热输入^[5], 但激光作为一个局部热源, 倘若直接作用于钢侧, 将使得钢熔化进而产生大量金属间化合物, 将激光向铝侧偏移又会导致钢侧

引用格式: 刘云祺, 王伟, 朱宗涛. 激光-MIG复合热源钢/铝异种金属深熔钎焊. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 034207

Liu Y Q, Wang W, Zhu Z T. Deep-penetration welding-brazing of aluminum/steel dissimilar metal using laser-MIG arc hybrid heat source (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 034207, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0204

受热不良,造成液态金属在焊缝正面及背面的铺展差,且在钢/铝焊接接头内部会产生较大的温度梯度,产生不均匀的金属间化合物层^[6].激光-MIG(Melt Inert-Gas)复合热源深熔钎焊应用于较厚的钢/铝焊接时,不仅能利用电弧的预热作用促进钎料向钢表面铺展实现较好的桥接,还可通过激光的深熔焊机制实现大的熔深,并且通过改变两个热源的相对空间位置,可以改变界面处的温度场分布,从而实现对接界面化合物层均匀性的调控,实现对较厚的钢/铝异种金属的焊接^[7-9].

本文借助有限元软件,计算了钢/铝接头深熔钎焊的温度场分布,对比分析了不同热源作用下界面处的温度分布特征,并提出了减小界面处温度梯度,提高界面化合物层均匀性的有效措施.

2 激光-MIG复合熔钎焊过程

本文采用6061-T6铝合金和304不锈钢作为母材,试板尺寸为200 mm×100 mm,6和4 mm不锈钢母材加工45°坡口并分别保留4和1 mm钝边.焊丝采用直径为1.2 mm的ER4043.焊前对试样焊接区域进行机械清理,去除表面油污和氧化膜后再用酒精擦拭.母材与焊丝的化学成分见表1.为防止焊接时焊缝氧化及提高液态金属润湿铺展性,焊前将Nocolok钎剂溶于酒精至黏稠状并均匀地涂于不锈钢待焊部位.

试验使用的设备是TruDisk 10002型碟片式固体激光器,最大输出功率为10 kW, MIG焊机为Transpils synergic 4000焊机.6061-T6铝合金和304不锈钢激光-MIG复合深熔钎焊试验过程示意如图1所示.光丝间距和焊枪倾角分别为2 mm和55°,焊接保护气体为99.999%的高纯氩气,气体流量为25 L/min.为了防止钢侧发生熔化,将激光和MIG焊枪向铝侧整体偏移1 mm,因铝板反射率高,激光前倾角为10°,以防焊接时因高反损伤光路器件.通过设置不同的激光侧倾角

来改善钝边下部的受热条件进而获得沿界面的化合物层,侧倾角变化的范围为0°-20°.4和6 mm厚钢/铝激光-MIG深熔钎焊试验参数见表2.

焊接完成后,对接头进行取样.采用光学显微镜观察焊缝宏观形貌;采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察界面处金属间化合物层的微观结构,并通过能谱分析仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)测试界面处的微区成分.

3 温度场计算模型

3.1 有限元模型

通过ABAQUS有限元模型软件计算铝/钢激光-MIG复合深熔钎焊接头的温度分布并获取界面不同位置的热循环曲线.计算模型尺寸为200 mm×100 mm×6 mm,模型网格划分如图2所示.模型网格采用八节点六面体单元.为了确保计算精度和缩短运算时间,焊缝附近采用尺寸较细的网格,远离焊缝的区域网格较粗.本模型中热源功率与试验参数一致.

3.2 热源模型

基于对激光焊接能量传递过程的分析,采用柱状体热源模拟实际激光热源^[10]:

$$q(r, z) = \frac{9\eta Q_{\text{laser}}}{\pi H(1 - e^{-3})(r_c^2 + r_c r + r_i^2)} \cdot \exp\left[-\frac{3(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right], \quad (1)$$

$$r_0(z) = r_c - (r_c - r_i) \frac{z_c - z}{z_c - z_i}, \quad (2)$$

式中, η 为工件对激光的有效吸收系数; Q_{laser} 为激光功率; r_c 和 r_i 分别为柱状体热源上部分和下部分的半径; z_c 和 z_i 分别为热源顶部和底部的空间Z向坐标; H 为热源高度.

表1 母材和填充材料的化学成分(wt.%)

Table 1 Base metal and filler-metal compositions (wt.%)

材料	Al	Fe	Si	Cr	Ni	Mg	Mn	C	Zn	Ti
304SS	-	Bal.	≤0.1	17.0-20.0	8.0-10.5	-	≤0.2	≤0.08	-	-
6061-T6	Bal.	0.7	0.4-0.8	0.10-0.35	-	1.0	0.15	-	0.25	0.1
ER4043	Bal.	≤0.6	4.5-6.0	-	-	≤0.05	≤0.05	-	≤0.1	0.1

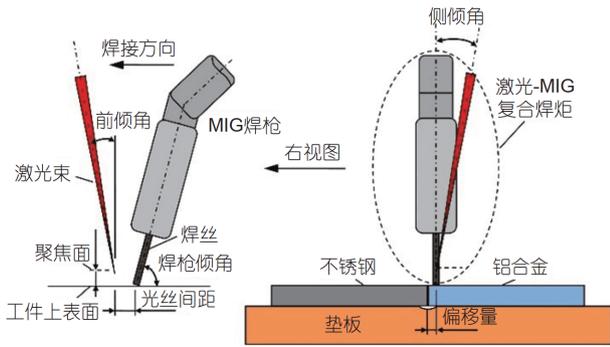


图 1 (网络版彩图)激光-MIG复合深熔钎焊示意图
Figure 1 (Color online) Schematic of laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing apparatus.

表 2 钢/铝激光-MIG复合深熔钎焊试验参数

Table 2 Parameters of steel/aluminum laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing

母材厚度 (mm)	激光功率 (kW)	焊接速度 (mm/s)	送丝速度 (m/min)	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)
4	3.2	15	4.5	88	15.4
6	4.8	15	5	95	17.5

由于电弧功率较小, 采用高斯面热源模拟电弧热源, 热源能量分布为^[10]

$$q_f(x,y) = \frac{3Q_{arc}}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{3(x^2+y^2)}{R^2}\right), \quad (3)$$

式中, Q_{arc} 为有效电弧功率; R 为热源的有效半径. 激光-MIG复合热源模型如图3所示^[10].

4 结果与讨论

4.1 不同焊接方法接头温度场分布特征

为了探究不同热源作用下, 钢/铝熔钎接头内部

的温度场分布特征, 分别进行了单电弧、单激光、激光-MIG复合3种熔钎焊方法的温度场计算, 对应热源模型分别为第3节介绍的高斯面热源、柱状体热源、复合热源. 温度场计算结果如图4所示, 图中灰色区域的温度在铝合金熔点以上, 代表实际焊接时的熔池区域. 图5为接头界面处不同位置的热循环曲线.

如图4(a)所示, 电弧熔钎焊过程中, 温度场关于焊缝中心呈非对称分布, 由于电弧热源穿透能力有限, 能量无法传递到熔池下部, 如图5(a)所示, 钝边下部数据采集点(点3, 点4)温度分别为564和532°C, 低于铝合金的熔点, 实际焊接时会导致接头中出现未焊透缺陷.

激光熔钎焊温度场分布如图4(b)所示, 由于光斑直径较小, 导致熔池体积较小, 焊缝熔宽较小, 实际焊接时并不利于熔融金属流动向钢侧铺展. 坡口顶部及焊缝背部温度较低, 如图5(b)所示, 坡口上部(点1)峰值温度为616°C, 低于铝合金的熔点; 钝边下部(点4)的峰值温度为679°C, 而坡口与钝边的交点位置(点2)峰值温度达到883°C, 此时沿界面各点温差最大为267°C.

激光-MIG复合深熔钎焊的温度场及界面各点热循环曲线如图4(c)和5(c)所示. 由图4(c)可知, 激光-MIG复合深熔钎焊兼备单电弧及单激光的能量分布特点, 焊缝上部在电弧热源的作用下熔宽较大, 使得熔融金属能够向钢侧坡口铺展, 而在激光热源的作用下焊缝熔深较大, 钝边下部界面被熔融金属包围, 为铁、铝原子的界面反应提供了热力学及动力学条件. 由图5(c)可知, 界面处各点温度值分别为920, 1020, 1059, 864和751°C, 其中温度最高位置与温度最低点分别为1059和751°C(点2, 点4), 二者相差308°C, 与电弧熔钎焊及激光熔钎焊相比, 采用激光-MIG复合熔钎焊可有效增加焊缝熔宽及熔深, 增加焊缝熔融金属量,

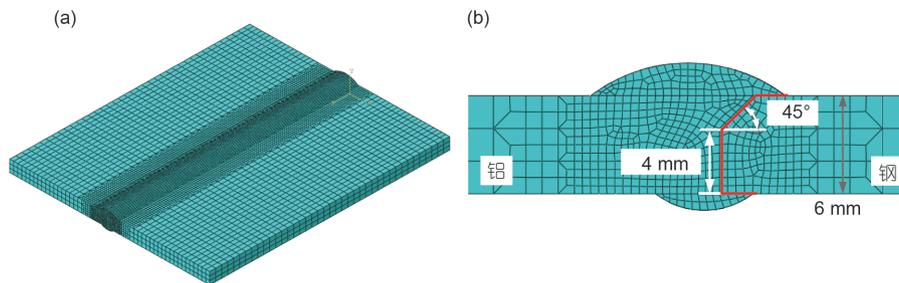


图 2 (网络版彩图)激光-MIG复合深熔钎焊接头有限元网格划分. (a) 立体划分; (b) 横截面划分

Figure 2 (Color online) Generated mesh of laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing joint. (a) Whole generated mesh; (b) generated mesh of cross-section.

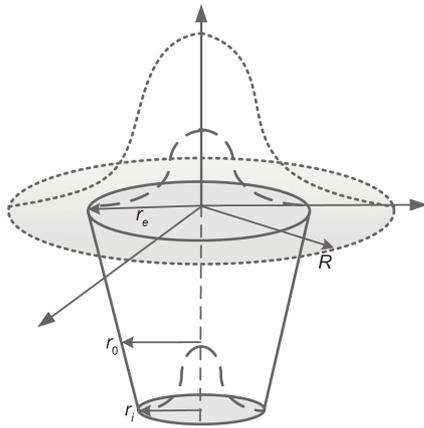


图3 激光-MIG复合深熔钎焊热源模型
Figure 3 Laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing heat source model.

而且其温度场分布更有利于界面反应程度相当, 从而获得均匀的化合物层。

4.2 不同激光偏转角度下接头温度场分布

由4.1节可知, 钢/铝激光-MIG复合深熔钎焊接头界面温度分布较单激光及单电弧熔钎焊有了较大改善, 但坡口位置由于两个热源的耦合作用将使得该区域温度高于钝边下部。因此结合激光-MIG复合热源的特点, 可通过改变激光、电弧两个热源的相对空间位置, 对界面温度场分布进行调控。针对钝边下部温度较低的问题, 通过将激光侧偏一定角度进行焊接, 其

中不同侧偏角度(5°, 10°, 15°, 20°)下接头温度场分布云图及界面不同区域热循环曲线如图6和7所示。

由图7(a)可知, 当激光侧偏角度为5°时, 坡口下部点2和点3的峰值温度较高分别为1028和1083°C, 而钝边底部点4和点5的温度分别为907和799°C, 沿界面峰值温差最大为284°C, 相较于激光侧偏角度为0°(图4(c)和5(c))时, 钝边下部的温度得到了一定程度的提高。当激光侧偏角度增大为10°时, 如图6(b)所示, 界面处温度梯度进一步减小, 界面温度最低点(点5)处峰值温度提高至844°C。当激光侧偏角度进一步增大到15°时, 钝边下部点4和点5峰值温度分别提高到1038和1002°C, 沿界面温度最高点(点3)与温度最低点(点5)峰值温差减小到132°C, 温度梯度的减小将更加有利于生成均匀的金属间化合物层。随着激光侧偏角度增大到20°, 此时, 钢侧背部熔化金属增多(图6(d)), 钝边下部(点5)的峰值温度上升到1270°C(图7(d)), 已经超过坡口上部各测量点的峰值温度, 为界面中温度最高的点。在不同侧偏角度下, 坡口处各点峰值温度变化范围较小, 而钝边下部温度则随侧偏角度的增大而显著增加, 表明使用激光侧偏这一措施可实现对界面温度场有效且准确地调控, 为获得均匀的界面化合物层提供了良好的指导作用。

4.3 钢/铝焊接接头成形和界面层形貌

4 mm钢/铝对接接头的焊缝成形和横截面形貌如

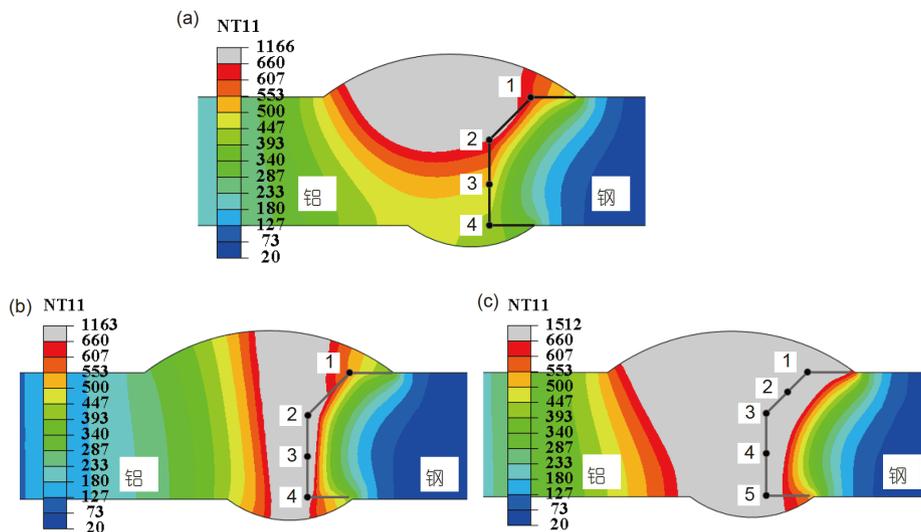


图4 (网络版彩图)钢/铝熔钎焊接头横截面温度场分布云图。(a) 单电弧; (b) 单激光; (c) 激光-MIG复合
Figure 4 (Color online) Temperature distribution of Al/steel welding-brazing joint. (a) MIG; (b) laser; (c) laser-MIG hybrid.

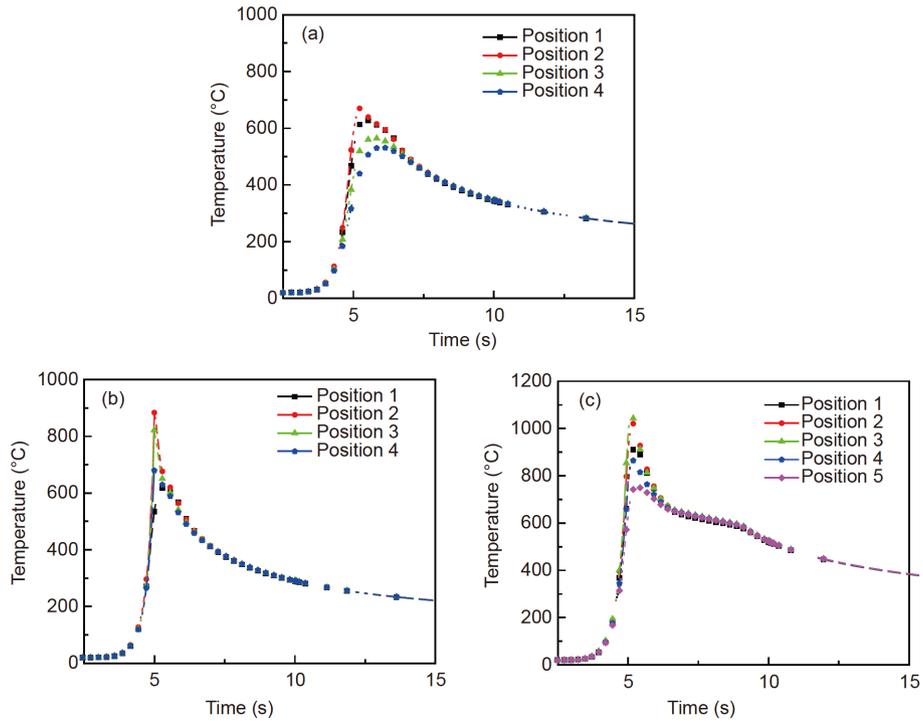


图5 (网络版彩图)钢/铝熔钎焊界面热循环曲线. (a) 单电弧; (b) 单激光; (c) 激光-MIG复合
Figure 5 (Color online) Thermal cycle of Al/steel welding-brazing interface. (a) MIG; (b) laser; (c) laser-MIG hybrid.

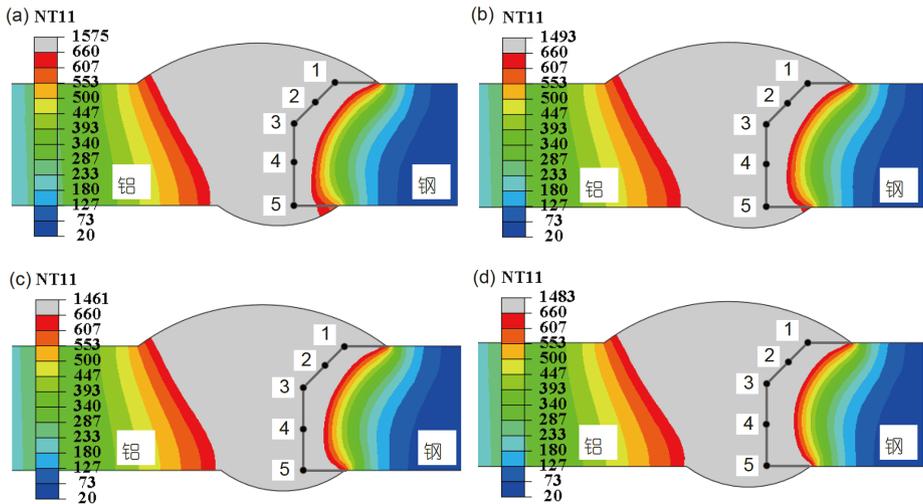


图6 (网络版彩图)不同激光偏转角度下接头温度场分布云图对比. (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°
Figure 6 (Color online) Temperature distribution of Al/steel laser-MIG hybrid welding-brazing joint with different laser deviation angle. (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°.

图8所示. 从图8(a)和(b)可以观察到, 焊接接头起弧和收弧区域成形较差, 但是在激光-MIG复合热源的作用下, 正面和背面焊缝成形质量较好, 未发现气孔、裂纹等缺陷. 如图8(c)所示, 在不锈钢一侧, 熔融金属完全润湿铺展到不锈钢表面形成钎焊界面层. 由于成型槽

的限制和接头背部不充分的受热, 填充金属在焊接接头背面的铺展宽度要小于正面的铺展宽度. 同时在激光-MIG热源附近, 有少量位于角落的不锈钢发生了熔化. 在铝合金一侧, 6061-T6铝合金和ER4043焊丝形成了熔焊接头.

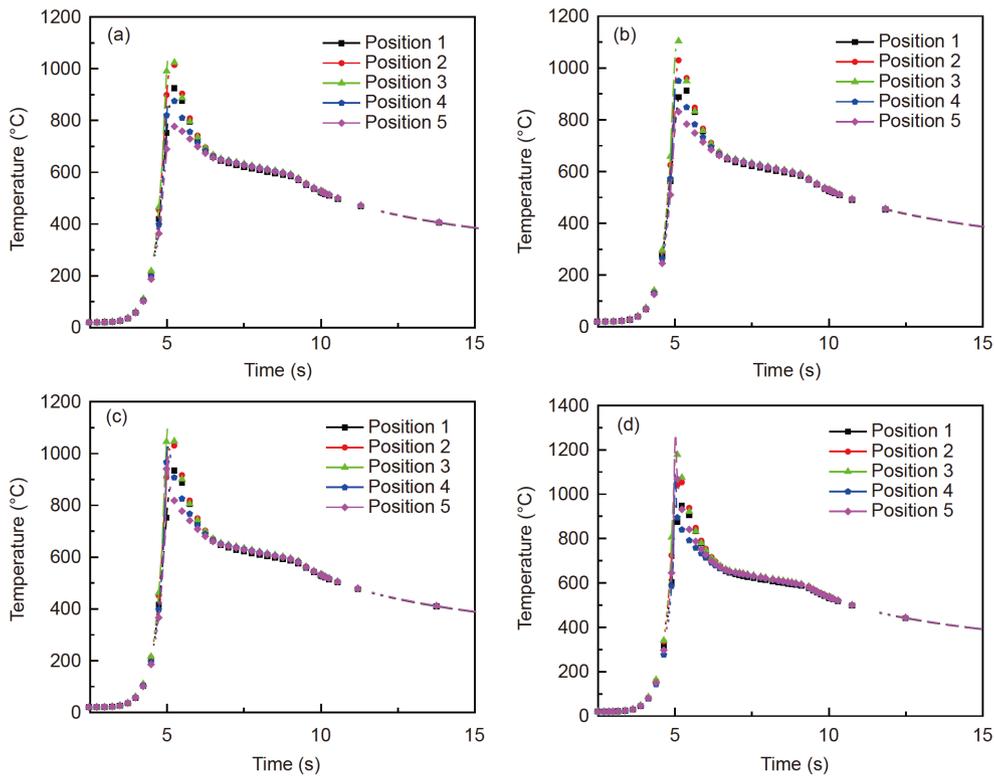


图7 (网络版彩图)不同激光偏转角度下接头界面热循环曲线. (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°
 Figure 7 (Color online) Thermal cycle of Al/steel laser-MIG hybrid welding-brazing interface with different laser deviation angle. (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°.

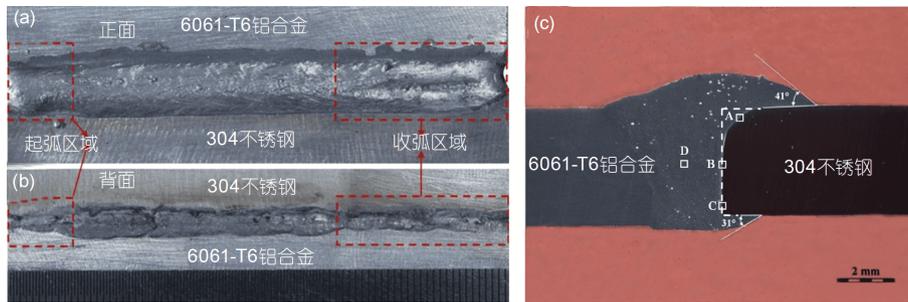


图8 (网络版彩图)4 mm钢/铝异种对接接头的焊缝成形和横截面形貌. (a) 正面; (b) 背面; (c) 横截面形貌
 Figure 8 (Color online) Appearance and typical cross-section of a 4-mm aluminum-steel dissimilar butt joint. (a) Front; (b) back; (c) cross-sectional morphology.

钢/铝激光-MIG复合深熔钎焊接头的连接主要取决于不锈钢和熔化区界面处生成的金属间化合物层种类及其形貌. 图9为图8(c)中A-D区域界面层的SEM图像. 如图9(a)-(c)所示, 在激光-MIG深熔钎焊过程中, 由于激光-MIG混合热源具有低热输入、高焊接速度和沿着对接接头温度均匀分布的优点, 不锈钢和焊缝之间形成了连续金属间化合物层. 锯齿状金属间

化合物沿着界面均匀分布, 同时存在少量的金属间化合物分布在接近界面的焊缝区域. 如图9(d)所示, 第二相均匀地分布在焊缝区域. 对图9中1-10点的相结构进行EDS分析, 见表1. 由于生成Al-Fe-Si三元相的吉布斯自由能小于生成Al-Fe二元相的吉布斯自由能, 在远离激光-MIG复合热源的区域, 如点4和点7, 熔融金属与固态不锈钢反应生成了 Al_8Fe_2Si . 然而, 在点1, 由于其

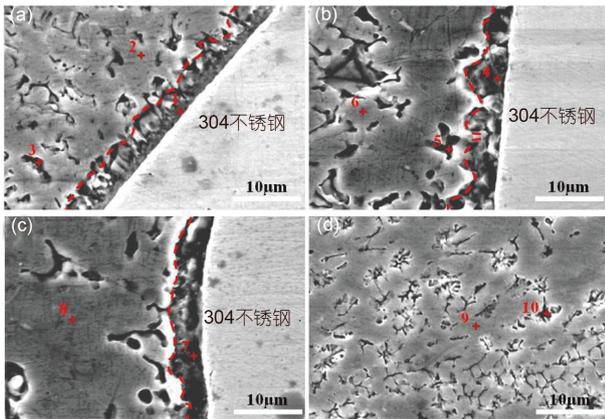


图9 (网络版彩图)图8(c)中钢/铝对接接头不同区域的SEM图像. (a) A区域; (b) B区域; (c) C区域; (d) D区域

Figure 9 (Color online) SEM images of different regions in the 6061-T6/SUS304 joint shown in Figure 8(c). (a) Region A; (b) region B; (c) region C; (d) region D.

更高的温度和更快的冷却速度, 生成了 Fe_4Al_{13} 相. 同时从表1可知, 焊缝由 α -Al(点2, 6, 8, 9)和Al-Si共晶相(点3, 5, 10)组成.

6 mm激光-电弧复合热源钢/铝深熔钎焊焊接接头横截面形貌如图10所示. 接头正面有明显的下塌现象, 熔融金属均匀铺展在不锈钢坡口和背面, 但是在不锈钢和焊缝之间界面处可以观察到裂纹的生成, 这是因为随着板厚的增加, 焊接所需的热输入增大, 钢/铝界面应力也会随之增大, 容易造成钢/铝界面化合物层局部出现开裂, 通过调整焊接参数、增大坡口、保留间隙等方法可以减少裂纹的生成.

表3 图9中点1-10 EDS分析结果

Table 3 EDS analysis results of locations 1-10 shown in Figure 9

位置	化学成分 (at%)						推测相
	Mg	Al	Si	Cr	Fe	Ni	
1	0.10	77.06	1.92	3.27	16.54	1.12	Fe_4Al_{13}
2	0.47	98.29	0.79	0.22	0.22	0.01	α -Al
3	0.37	96.13	1.52	0.39	1.54	0.06	Al-Si共晶
4	0.09	79.24	6.01	5.46	8.82	0.38	Al_8Fe_2Si
5	0.29	94.72	0.98	1.19	2.64	0.19	Al-Si共晶
6	0.36	98.62	0.60	0.15	0.27	-	α -Al
7	0.11	81.12	8.20	2.87	7.26	0.44	Al_8Fe_2Si
8	0.86	96.91	1.95	-	0.21	0.08	α -Al
9	0.54	98.29	0.97	-	0.18	0.03	α -Al
10	0.41	94.30	1.76	0.75	2.60	0.18	Al-Si共晶

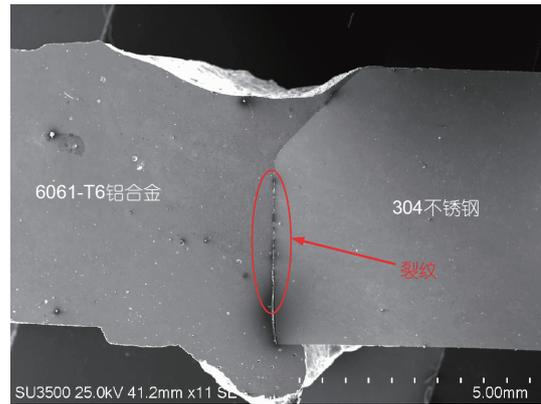


图10 (网络版彩图)6 mm钢/铝异种对接接头的横截面形貌
Figure 10 (Color online) typical cross-section of a 6-mm aluminum-steel dissimilar butt joint.

5 结论

(1) 钢/铝电弧熔钎焊接头温度场呈非对称分布, 电弧能量无法传递到熔池下部. 钢/铝激光熔钎焊接头界面温度梯度较大, 同时接头底部受热不充分. 激光-MIG复合深熔钎焊弥补了电弧熔钎焊和激光熔钎焊能量分布的缺陷, 有效增加焊缝熔宽及熔深, 其温度场分布有利于界面反应.

(2) 激光-MIG复合深熔钎焊过程中, 通过调整激光偏转角度, 可以显著改善接头界面温度分布, 实现对界面温度场有效的调控.

(3) 4 mm钢/铝激光-MIG复合深熔钎焊焊接接头

成形质量较好, 无气孔、裂纹等缺陷生成. 焊接接头在不锈钢侧界面处有均匀的金属间化合物生成, 主要由 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 和 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ 两种相组成. 焊缝由 α -Al 和 Al-Si 共

晶相组成.

(4) 激光-电弧复合深熔钎焊可以实现 6 mm 钢/铝对接接头焊接, 但在不锈钢侧界面处出现了裂纹.

参考文献

- 1 Ma M T, Yi H L, Lu H Z. On the lighting weight of automobile (in Chinese). *Eng Sci*, 2009, 11: 20–27 [马鸣图, 易红亮, 路洪洲. 论汽车轻量化. *中国工程科学*, 2009, 11: 20–27]
- 2 Zheng Q X, Feng X M, Shen Y M, et al. Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal. *J Alloys Compd*, 2016, 686: 693–701
- 3 Zhou L, Li Z Y, Song X G, et al. Influence of laser offset on laser welding-brazing of Al/brass dissimilar alloys. *J Alloys Compd*, 2017, 717: 78–92
- 4 LÜ S X, Jing X J, Huang Y X. Investigation on temperature field and interfacial microstructure of Ti/Al arc welding-brazing joint (in Chinese). *Trans China Weld Inst*, 2012, 33: 13–16 [吕世雄, 敬小军, 黄永宪. Ti/Al 异种合金电弧熔钎焊接头温度场与界面微观组织. *焊接学报*, 2012, 33: 13–16]
- 5 Kreimeyer M, Wagner F, Vollertsen F. Laser processing of aluminum-titanium-tailored blanks. *Optics Lasers Eng*, 2005, 43: 1021–1035
- 6 Chen S, Li L, Chen Y, et al. Improving interfacial reaction nonhomogeneity during laser welding-brazing aluminum to titanium. *Mater Des*, 2011, 32: 4408–4416
- 7 Sierra G, Peyre P, Deschaux-Beaume F, et al. Steel to aluminium key-hole laser welding. *Mater Sci Eng-A*, 2007, 447: 197–208
- 8 Chen S H, Huang J H, Chen Y B. The present situation and prospect on laser welding-brazing of dissimilar alloys (in Chinese). *Welding*, 2011, 4: 27–33 [陈树海, 黄继华, 陈彦宾. 异种合金激光熔钎焊技术的现状与展望. *焊接*, 2011, 4: 27–33]
- 9 Gao M, Chen C, Gu Y, et al. Microstructure and tensile behavior of laser arc hybrid welded dissimilar Al and Ti alloys. *Materials*, 2014, 7: 1590–1602
- 10 Bunaziv I, Akselsen O M, Frostevarg J, et al. Laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel. *J Mater Process Tech*, 2018, 259: 75–87

Deep-penetration welding-brazing of aluminum/steel dissimilar metal using laser-MIG arc hybrid heat source

LIU YunQi, WANG Wei & ZHU ZongTao*

School of Materials Science & Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Deep-penetration welding-brazing process without gap of steel/aluminum dissimilar metal butt joint with a thickness of 4 and 6 mm was achieved using laser-MIG hybrid heat source. The welding parameters were optimized to obtain a sound joint and the microstructure of the interfacial layer was observed by scanning electron microscopy (SEM) and experimental validation. The joint temperature distribution of three welding methods: MIG welding-brazing, laser welding-brazing, and laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing were investigated by finite element method (FEM) numerical simulation. Moreover, the effect of laser deflection angle on the temperature distribution of the laser-MIG deep-penetration welding-brazed joint was investigated. The results indicated that the temperature distribution of laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazed joint was more uniform than MIG welding-brazing and laser welding-brazing. The temperature of the lower part of the joint was increased, which was beneficial to improve wetting and spreading of the liquid metal on the stainless steel and obtain better weld formation. In the laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing process, the temperature of the lower part of the joint interface and the interface temperature gradient could be improved by adjusting the laser deflection angle, which was beneficial to the formation of uniform intermetallic compound layer. Typical welding-brazing joint characteristic with the thickness of 4 mm using laser-MIG hybrid heat source was found. The main phases of interface layer compounds were composed of $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ and $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, and the weld metal consisted of α -Al and Al-Si eutectic. The 6-mm steel/aluminum joint was also achieved by using laser-MIG hybrid heat source, but some cracks at the interface were observed.

dissimilar metal, laser-MIG hybrid deep-penetration welding-brazing, temperature field, temperature gradient, intermetallic compound

PACS: 11.10.Wx, 05.70.Fh, 07.10.Cm, 07.60.Pb

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0204](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0204)