

送丝速度对铝/钢激光填丝熔钎焊性能的影响

周丹¹, 李翠¹, 易鑫¹, 叶兵¹, 李斌²

(1. 武汉华工激光工程有限责任公司 激光先进制造技术湖北省重点实验室, 武汉 430223;

2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 采用光纤激光器对铝/钢异种金属搭接接头进行激光填丝熔钎焊试验研究。分析了送丝速度对焊缝成形质量、金属间化合物层厚度及力学性能的影响。试验结果表明, 选择适当的送丝速度, 利用铝和钢的不同熔点, 使铝母材刚好熔化但是钢母材不熔化, 熔化的铝母材与填充金属一起铺展在钢母材表面并与其实现钎焊连接, 可形成优质的熔钎焊接头。当送丝速度小于 3.5 m/min 时, 易形成硬脆性金属间化合物而导致焊缝开裂。金属间化合物层厚度应控制在一定范围内, 方可保证接头性能。当送丝速度为 4.5 m/min 时, 焊接接头强度有所提高, 其线载荷达到 203.5 N/mm, 约为铝合金母材抗拉强度的 83.7%。

关键词: 铝合金; 镀锌钢; 熔钎焊; 送丝速度; 金属间化合物层厚度

中图分类号: TG456.7

0 前言

汽车轻量化是当今人们关注的焦点问题, 铝合金具有较轻的特点, 在汽车行业的应用也更为广泛^[1-2]。但从强度及成本的因素考虑, 车身结构材料仍需采用高强钢, 因此, 铝/钢异种金属的连接成为必要, 可同时满足轻质及高强等度优点^[3-4]。

由于铝与钢的物理性能相差较大, 在熔融状态下原子间可无限互溶, 但在室温时, 溶解度大大降低, Fe 在 Al 中的溶解度几乎为零, 得到的焊接接头容易形成金属间化合物, 属于硬脆相, 组织不均匀, 导致性能较差^[5-6]。

现虽然有如摩擦焊等诸多方法可得到良好的铝/钢焊接接头, 但其对焊件结构均要求较高^[7]。因此, 对铝钢异种金属的激光焊研究也逐渐受到国内外更多人的关注。H. Laukant 等人^[8]受激光钎焊原理启发, 焊接过程未加任何钎剂, 采用激光填丝焊实现了铝/钢的焊接。Martinieu 等人^[9]采用 Nd:YAG 激光器、锌基焊丝实现铝合金与 GXES 钢的连接, 接头强度较高。T. Takemoto 等人^[10]通过在试板间加锌层的方式, 研究了激光束作用在钢板上的熔钎焊, 得到的接头强度明显

提高。

为了实现铝/钢异种金属的焊接, 需严格控制焊接热输入, 利用其不同的熔点, 实现铝熔化而钢不熔化, 焊丝与熔融态的铝共同铺展在钢母材表面, 从而形成良好的熔钎焊接头^[11-16]。此种方法不受接头形式和构件形状的影响, 接头质量较高, 应用较广。但在铝/钢激光填丝熔钎焊的研究中, 发现热输入会严重影响到焊缝成形, 且熔钎焊接头中易形成界面金属间化合物, 其厚度对焊接接头的性能也有十分重要的影响^[17-18]。送丝速度作为焊接过程中一项重要的参量, 是否影响着焊缝的成形及接头的力学性能, 是文中研究的关键。

文中以 E600 铝合金及汽车车身用 DP590D + Z 镀锌钢板为研究对象, 对铝/钢进行熔钎焊试验。焊接热源为光纤激光器, 焊丝选用 ER4047。通过送丝速度的改变, 对热输入进行调整, 从而控制液态金属的润湿铺展状况以及金属间化合物层厚度, 继而研究对接头力学性能的影响。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验材料为 E600 铝合金及 DP590D + Z 镀锌钢板, 铝合金试板尺寸为 100 mm × 80 mm × 0.9 mm, 镀锌钢试板尺寸为 100 mm × 80 mm × 1.8 mm, 锌层厚度约为 25 ~ 50 μm。填充材料采用直径 1.2 mm Al-Si 系列的 ER4047 焊丝。母材与焊丝的化学成分见表 1。采

收稿日期: 2018 - 06 - 30

基金项目: 高档数控装备及工艺在导弹大型整体舱段集成制造中的示范应用(2015ZX04002202)

doi: 10.12073/j.hj.20180630001

用 WDW-200E 微机控制电子式万能试验机对铝合金及镀锌钢板分别进行拉伸试验,试验结果,见表 2。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

类别	Si	Fe	Cu	Mn	Mo	Mg	Cr	Zn	Co	Ti	C	Al
E600	0.6~1.0	≤0.5	0.6~1.1	0.2~0.8	—	0.8~1.2	≤0.10	≤0.25	—	≤0.25	—	余量
DP590D+Z	—	35.4	—	0.672	0.174	—	0.135	63.23	0.327	—	余量	—
ER4047	11~13	≤0.8	≤0.3	≤0.15	—	≤0.1	—	≤0.2	—	—	—	余量

表 2 母材的力学性能

类别	屈服强度 R_{eH}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
E600	265	271	24.2
DP590D+Z	483	601	25.5

1.2 试验设备

试验设备主要由光纤激光器、机器人控制系统、焊接头、Fronius 全数字化 MIG 焊机、工作台及夹具组成。激光器为 10 kW, IPG-10000 多模光纤激光器, 纤芯直径为 0.4 mm, 焦斑直径为 0.96 mm。运动机构为 KU-KA KR60HA 机器人, 焊接头为普雷茨特 YW52 激光焊接头, 依靠机器人夹持以控制激光的运动轨迹。送丝机为 Fronius TPS4000 系列, 在该试验中其仅提供稳定送丝功能, 未提供焊接热源。

1.3 试验方法

送丝速度是填丝熔钎焊中较重要的一项影响因素。送丝速度过慢或过快, 会导致焊丝熔滴过渡的堆积或欠缺, 影响焊缝成形。试验采用铝上钢下的搭接接头形式, 如图 1 所示。在其他焊接参数不变时: 即激光功率 $P=3400\text{ W}$, 焊接速度 $v=25\text{ mm/s}$, 离焦距 $\Delta f=+2\text{ mm}$, 激光中心与试板边缘偏移量 $\delta=0.6\text{ mm}$, 单因素改变送丝速度进行试验。

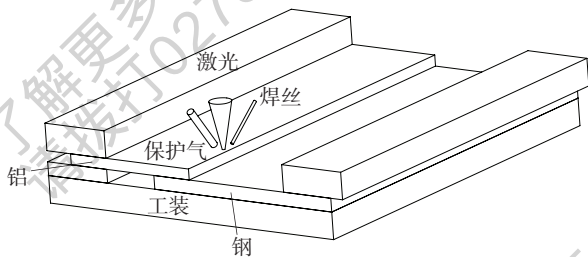


图 1 激光焊接过程示意图

对 E600 铝合金及镀锌板按上图组装并用焊接夹具夹紧, 进行激光填丝熔钎焊。焊前先对铝合金待焊

区域进行激光清洗以去除氧化膜, 然后用丙酮清洗各试板的待焊表面, 去除表面油污。保护气体采用高纯氩气(99.999%), 流量为 25 L/min。焊接时激光束偏移试板法向约 8° , 以防止铝合金对光产生反射而损坏光纤。

焊后对焊缝的宏观及微观形貌进行观察。线切割取样、打磨抛光及用凯勒试剂腐蚀后制备金相试样。采用 Dino-lite Digital Microscope 电子显微镜观察焊缝形貌; KEYENCE VK-X100 系列显微镜观察焊缝组织并测量金属间化合物层厚度。WDW-200E 微机控制电子万能试验机对其进行力学性能测试, 拉伸试验时采用垫板保证试样两端等厚。XJL-03 显微硬度仪分析接头显微硬度, 对每组送丝速度下的焊接接头进行显微硬度测试, 测量方向如图 2 所示。从铝材侧穿过焊缝到达钢材侧, 以金属间化合物界面为 0 位置, 每隔 0.2 mm 取一个点测量, 并在边界附近测多点取平均值, 得到不同参数下的接头显微硬度分布。

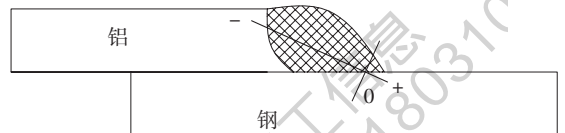


图 2 显微硬度测量位置

2 试验结果及分析

2.1 焊缝成形

送丝速度对焊缝成形的影响如图 3、图 4 所示。从表中可见, 当送丝速度为 3.0 m/min 时, 填充焊丝较少, 大部分激光能量聚集在母材上, 热输入过大, 导致焊缝有明显裂纹产生; 当送丝速度为 3.5 m/min 时, 钢侧母材熔化形成熔池; 当送丝速度大于 4.0 m/min 时, 母材上热输入相对减小, 焊缝成形有明显改善, 熔池在钢板表面的润湿铺展情况良好, 焊缝表面光滑, 从而形成稳定的熔钎焊接头; 随着送丝速度的进一步增大, 大部分的激光能量会被填充焊丝所吸收, 工件单位长度

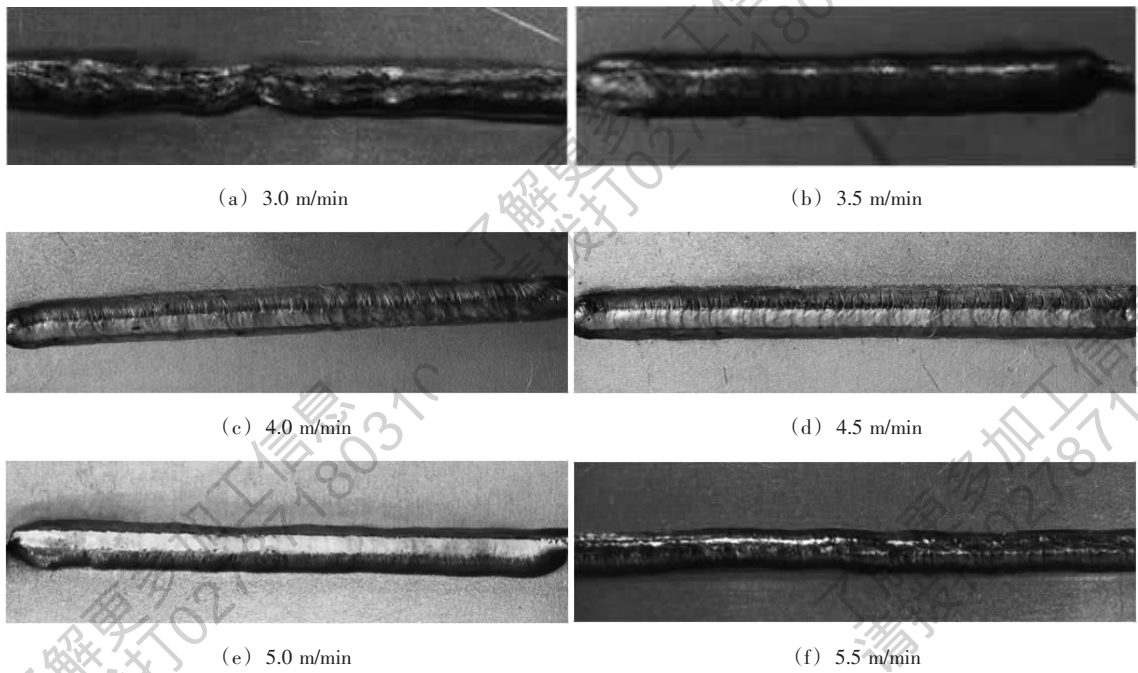


图3 不同送丝速度下焊缝宏观形貌

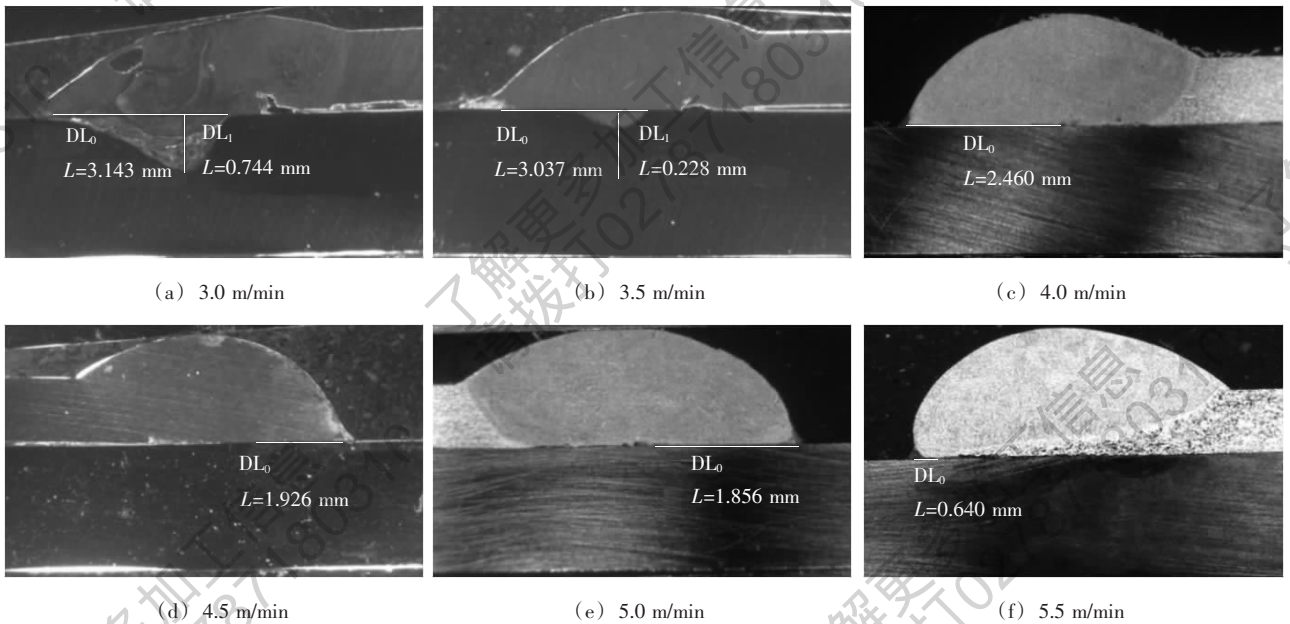


图4 不同送丝速度下焊缝截面形貌

的热输入减小,熔池在钢侧铺展性降低,焊缝有效连接宽度减小,余高增大,降低裂纹产生。

2.2 焊缝金属间化合物层厚度

不同送丝速度下金属间化合物层厚度如图5、图6所示。可知,当送丝速度大于4 m/min时,镀锌板侧未熔化,铝合金与镀锌板之间有一层金属中间层,主要为铝和焊丝熔化而成。

当热输入控制较精确时,仅铝材和焊丝熔化,钢未

熔化,以形成熔钎焊接头。因此,热输入是影响其焊接效果的主要参量,即对钢侧界面 Al-Fe 金属间化合物层厚度进行控制,其主要成分为 $FeAl_2$ 和 $FeAl_3$ 。测量可知,当送丝速度大于4.0 m/min时,金属间化合物层厚度均在 $2\ \mu m$ 范围内。当送丝速度为4.5 m/min时,金属间化合物层厚度均值最小,此时与送丝速度匹配的热输入控制较准,铝与铁互溶性较好,所产生的金属间化合物层厚度最小。当送丝速度为5.0 m/min时,金

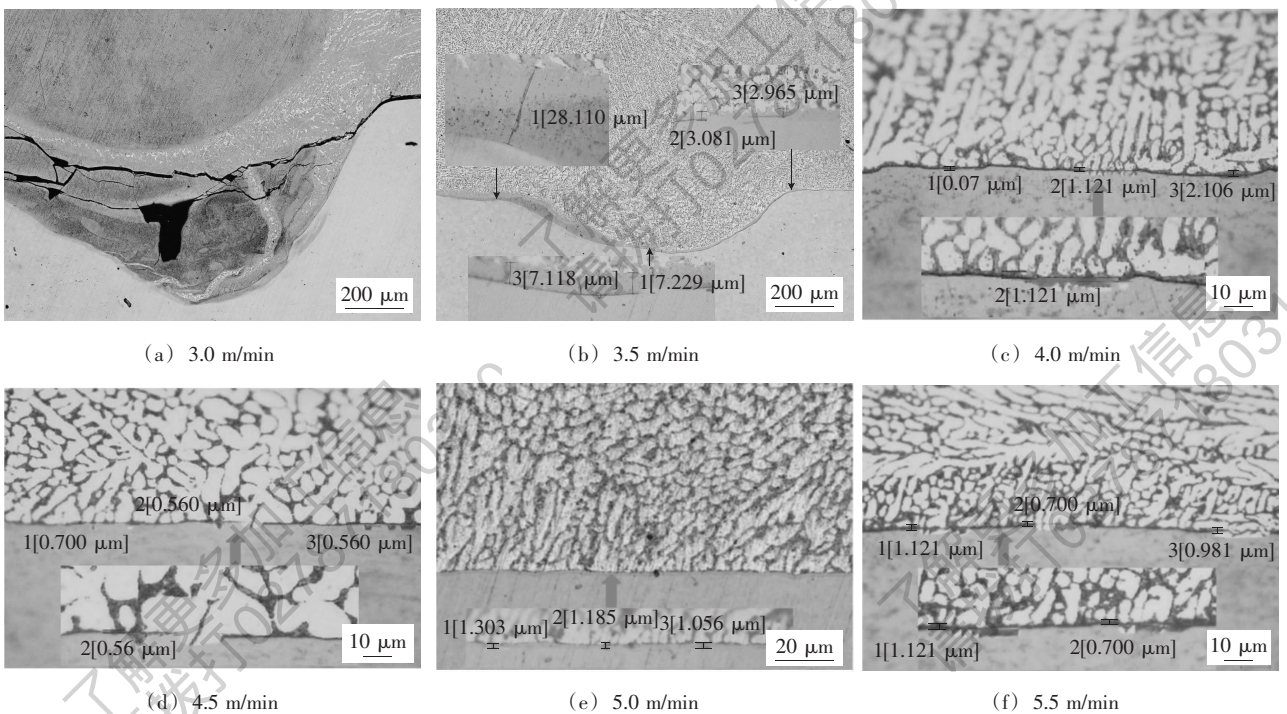


图5 不同送丝速度下金属间化合物层厚度

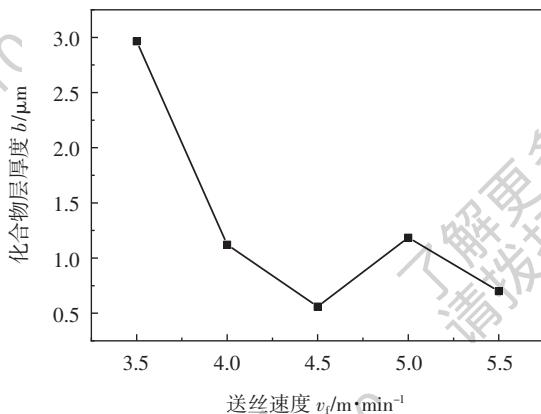


图6 不同送丝速度下金属间化合物层厚度曲线

属间化合物会有小范围的升高,此时热输入虽然较大,但焊丝量的提升会导致其达到熔融态需要更多的热量。因此,对铝钢的热输入会有所影响,从而可能导致此时化合物厚度有所加大。

当送丝速度大于4.0 m/min时,随着速度的增加,金属间化合物层厚度虽然有所波动,但总体变化并不明显,其较小的厚度值为形成稳定熔钎焊接头的必要条件。

当送丝速度小于3.5 m/min时,大部分激光能量聚集在母材上,钢侧均形成“小孔”。从左侧开始小孔前端金属间化合物厚度在正常范围内,其对力学性能也几无影响。而随着往“小孔”下部蔓延,熔池进入钢

材侧破坏了镀锌层,高温熔池开始融化镀锌板,小孔区域金属间化合物层厚度显著增大,脆性金属间化合物在接头处已经形成微裂纹并沿“小孔”边缘向外扩展。当送丝速度低至3.0 m/min时,有明显的裂纹贯穿整个钎焊接头,影响接头的力学性能。因此,送丝速度是较重要的影响因素;同时,应严格控制金属间化合物的生长,以避免产生裂纹源而降低接头的力学性能。

2.3 焊接接头显微硬度

不同送丝速度下焊接接头的显微硬度曲线如图7所示。可知,铝合金的显微硬度约为70 HV,镀锌钢板显微硬度约为200 HV。对比图中每组送丝速度下的显微硬度曲线,可知其大体变化规律相同,在焊缝处的显微硬度略高于铝合金母材。不填丝的铝合金焊缝会存在合金元素烧损等因素,从而导致接头软化,其焊缝显微硬度低于母材。试验焊丝ER4047为Al-Si系列,有效改善熔池流动性,限制金属间化合物的生长,使其具有一定的抗裂性能。同时,合金元素的加入能弥补并带入一些对焊缝接头组织有改善作用的元素,使其显微硬度有小幅提升。当送丝速度分别为3.0 m/min, 3.5 m/min时,焊缝与钢的结合面即金属间化合物界面处显微硬度有明显的提高。由于填充焊丝较少时,大部分激光能量会聚集在母材上,能量过大则导致金属间化合物生成几率增大,这些硬脆性物质便是上面所发现的裂纹源。

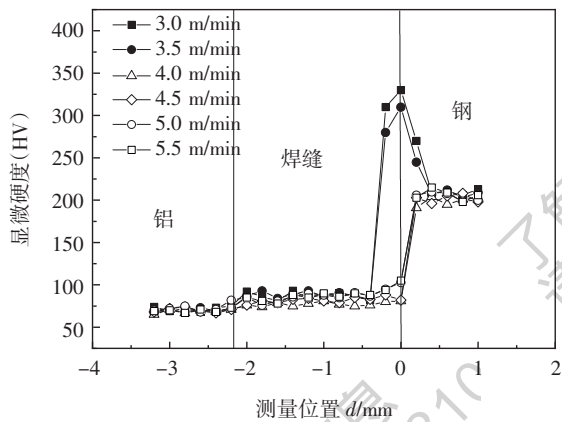


图7 不同送丝速度下显微硬度曲线

2.4 焊接接头力学性能试验分析

拉伸试验结果见表3,拉伸断裂形貌如图8所示,不同送丝速度下焊接接头有效连接宽度和线载荷曲线如图9所示。

可知,焊缝有效宽度与送丝速度近似呈正比关系。

当送丝速度小于3.5 m/min时,可知“小孔”边缘存在裂纹源并沿界面扩展,尽管此时焊缝有效宽度较大,但焊缝在较小拉力作用下,裂纹便从界面处扩展而发生断裂。当送丝速度为4.0~4.5 m/min时,焊接接头断裂部位位于铝合金热影响区,接头抗拉强度为母材的80%~85%,受限于铝合金的自身性能的影响,焊缝有效宽度的变化对其无影响。当送丝速度大于5.0 m/min时,母材上热输入较小,熔池在钢侧的铺展减小,焊缝有效宽度减小,试样的剪切面积也随之减小,因而焊接接头线载荷也越小。当送丝速度为4.5 m/min时,断裂位置为铝合金侧热影响区,其线载荷达到203.5 N/mm,接头性能良好。综上分析,当形成稳定金属间化合物层时,即金属间化合物层不提供裂纹源的情况下,焊缝的线载荷大小主要取决于有效连接宽度。因此,在控制金属间化合物层厚度不过大的情况下,尽量增加接头有效连接宽度是提高接头线载荷的有效手段。

表3 拉伸试验结果

送丝速度 $v_f / (m \cdot min^{-1})$	线载荷 $F / (N \cdot mm^{-1})$	换算成铝合金抗拉强度 R_m / MPa	相对于母材(%)	断裂部位
3	30	33.3	12.3	FZ
3.5	80	88.9	32.9	FZ
4	197.6	219.6	81.3	HAZ
4.5	203.5	226.1	83.7	HAZ
5	190.5	211.6	78.4	FZ
5.5	71.2	79.1	29.3	FZ

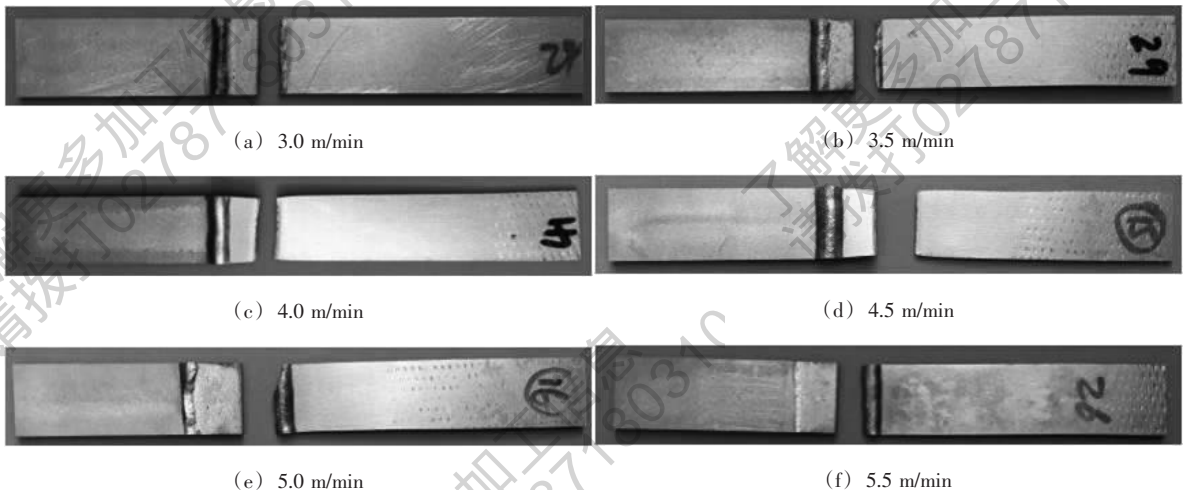


图8 不同送丝速度下拉伸断裂形貌

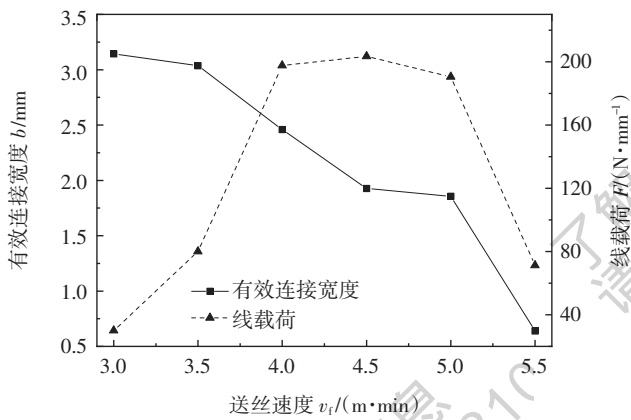


图9 不同送丝速度下有效宽度和线载荷曲线

3 结论

(1) 利用激光填丝熔钎焊能够实现 E600 铝合金和 DP590D + Z 镀锌钢板的有效连接, 形成稳定的熔钎焊接头。合适的焊接工艺范围为: 激光功率 3 400 W, 焊接速度 25 mm/s, 离焦量 +2 mm, 激光中心与试板边缘偏移量 0.6 mm, 送丝速度 4 ~ 5 m/min。

(2) 金属间化合物层厚度小于一定值时接头性能较稳定。当送丝速度小于 3.5 m/min 时, 大部分激光能量聚集在母材上, 易形成硬脆性金属间化合物而导致焊缝开裂。

(3) 拉伸试验结果表明, 当送丝速度为 4.5 m/min 时, 断裂位置为铝合金侧热影响区, 其线载荷达到 203.5 N/mm, 换算成铝合金抗拉强度为 226 MPa, 相当于母材强度的 83.7%。

参考文献

- [1] 樊丁, 王斌, 李春玲, 等. 铝/钢异种金属电弧辅助激光对接熔钎焊方法[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 15-18.
- [2] Meco S, Pardo G, Ganguly S, et al. Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminum joints for thick structural components [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 22-30.
- [3] 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.
- [4] Meco S, Ganguly S, Williams S, et al. Effect of laser processing parameters on the formation of intermetallic compounds in Fe-Al dissimilar welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(9): 3361-3370.
- [5] 高伟. 钢/铝异种金属对接接头光纤激光填丝熔钎焊研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 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, 6(6): 1-6.

- [7] El-Hebeary M R, Megahed H, Elziady N. Investigation on electron beam welded copper to AISI 316 stainless steel joints [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2002, 41(10): 90-91.
- [8] Laukant H, Wallmann E, Müller M, et al. Fluxless laser beam joining of aluminum with zinc-coated steel [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(2): 219-226.
- [9] Martinieu A, Shabadi R, Deschamps A, et al. Dissimilar material joining using laser aluminum to steel using zinc-based filler wire[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 652-661.
- [10] Takemoto T, Kimura S, Kawahito Y, et al. Fluxless joining of aluminium alloy to steel by laser irradiation method [J]. Journal of Light Metal Welding and Construction, 2008, 46(7): 300-308.
- [11] 石常亮, 何鹏, 冯吉才, 等. 镀锌钢板 CMT 熔钎焊界面组织与接头性能[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 61-64.
- [12] 宋建岭, 林三宝, 杨春利, 等. 铝与钢异种金属电弧熔钎焊研究与发展现状[J]. 焊接, 2008(6): 6-9.
- [13] 林三宝, 马广超, 宋建岭, 等. 铝合金/镀锌钢 TIG 熔钎焊接头界面组织及力学性能[J]. 焊接, 2009(2): 34-37.
- [14] 宋建岭, 林三宝, 杨春利, 等. 特种钎剂辅助铝/钢异种合金 TIG 熔钎焊[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 45-48.
- [15] 石珩, 何翠翠, 黄健康, 等. 几种铝钢异种金属熔钎焊工艺的对比与分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 1-4.
- [16] Zhu Z T, Wan Z D, Li Y X, et al. Intermediate layer, microstructure and mechanical properties of aluminum alloy/stainlesssteel butt joint using laser-MIG hybrid welding-brazing method[J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31(16-19): 1-7.
- [17] Yang J, Li Y L, Zhang H. Microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded Al/steel dissimilar joint [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 994-1002.
- [18] 李猛, 陈树海, 杨磊磊, 等. 铝合金/碳钢激光-TIG 复合热源熔钎焊工艺与接头显微结构分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 21-24.

第一作者简介: 周丹, 1988 年出生, 硕士, 工艺工程师; 主要从事激光焊接技术及工程应用研究; 已发表论文 1 篇。