

# 铝/钢异种金属无钎剂激光填粉熔钎焊接

赵旭东 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用宽带激光光斑和填粉焊接技术,在不使用钎剂的情况下进行 6061 铝合金/镀锌钢板的熔钎焊接实验。分析测试了接头成形、焊缝组织和接头强度,并探讨了影响接头强度的因素。结果表明,采用此方法可实现 6061 铝合金/镀锌钢板的熔钎焊连接。选用优化的焊接工艺参数获得了成形饱满,无裂纹、气孔等缺陷的焊缝。焊缝熔宽和金属间化合物层厚度随焊接热输入量的增加而增大。熔钎焊缝中金属间化合物由 Al-Fe 和 Al-Fe-Si 系统化合物组成。拉伸试样均断裂在钎料/镀锌钢界面,接头最大机械抗力为 152.5 N/mm,断口呈脆性断裂特征,钎料/镀锌钢界面为接头的薄弱环节。拉伸试样铝一侧断裂面由  $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$  和  $\alpha$ -Al 组成。焊缝熔宽、金属间化合物层厚度共同决定了接头的机械抗力水平。

**关键词** 激光技术;光纤激光;铝合金;镀锌钢;熔钎焊接;填充粉末

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0403004

## Fluxless Joining between Aluminium Alloy and Galvanized Steel by Fiber Laser Fusion Welding-Brazing with Filler Powder

Zhao Xudong Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The fluxless fusion welding-brazing result between 6061 aluminum alloy and galvanized steel with filler material is studied by using rectangular laser beam. The dependence of the mechanical properties on solidification behavior is established based on the joint formation and the weld microstructure. The results indicate that a fusion welding-brazing weld of AA6061 and galvanized steel without flux can be achieved using the welding with filler powder. By optimizing the welding parameters, the favorable weld without crack and porosity can be achieved. The weld width and the thickness of intermetallic compounds layer increase with laser energy input increasing. The intermetallic in the weld is composed of Al-Fe and Al-Fe-Si system phases. Specimens are fractured at the weld/steel interface with the brittle characteristic during tensile test. The weakness of the joint is the weld interface. The maximum intensity of 152.5 N/mm is obtained.  $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$  and  $\alpha$ -Al are found in the fracture surface on the aluminum side. The intensity of joint is both determined by weld width and the thickness of intermetallic compound layer.

**Key words** laser technique; fiber laser; aluminum alloy; galvanized steel; fusion welding-brazing; filler powder

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

汽车的轻量化已成为实现我国节能减排战略的紧迫需要。采用铝合金替代部分钢材来制造汽车零部件可以有效减轻整车重量、减少耗油量和尾气排

放,在安全性和经济性方面也较全铝结构汽车有优势。铝合金和钢在熔凝过程中生成的脆性  $Al_xFe_y$  化合物,是影响铝/钢焊接性能的主要因素。随着研究的深入,研究人员采用扩散焊、搅拌摩擦焊等固相

**收稿日期**: 2011-10-27; **收到修改稿日期**: 2012-01-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(50875005)和北京市自然科学基金(3102005)资助课题。

**作者简介**: 赵旭东(1983—),男,博士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: zxdairforce@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 肖荣诗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法及外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

(通信联系人,中国光学学会会员号:S040111702)

连接方法实现了铝合金/钢接头的焊接<sup>[1,2]</sup>。但 these 方法受工件形状和尺寸的限制,难以满足工业生产需求。

文献调研显示,采用激光可以实现铝/钢接头的焊接,主要方法是激光深熔焊和激光熔钎焊。由于激光具有热输入量小、能量精确可控的特点, Sierra 等<sup>[3]</sup>实现了铝合金/钢接头的激光深熔焊焊接,结果表明铝合金中的熔深直接影响接头的强度。在激光熔钎焊方法中,熔化的铝合金铺展在未熔化的钢表面而形成接头。Schubert 等<sup>[4]</sup>将激光光斑作用在钢板上,能量通过热传导熔化铺在下面的铝合金试板而形成接头。Peyre 等<sup>[5]</sup>将激光束直接作用在铝合金试板的边缘,熔化后铺展在钢板表面。为了提高焊接效率、改善接头成形, Mathieu 等<sup>[6,7]</sup>采用双光点激光将铝硅或锌基焊丝以及铝合金母材的一部分熔化,从而形成熔钎焊接头。在能量源变化上, Sierra 等<sup>[8]</sup>和雷振等<sup>[9]</sup>分别采用散焦大光斑、激光与电弧的复合作为热源,均实现了填充焊丝的激光熔钎焊。

虽然上述研究采用的实验方法各有特点,但都在焊接中使用钎剂来改善铝合金在钢表面的浸润性。由于钎剂对环境及操作人员有害,所以它在工业生产中的应用将受到限制。Laukant 等<sup>[10]</sup>在不

使用钎剂的情况下实现了铝/钢搭接和卷边对接接头的熔钎焊接,并获得了令人满意的接头强度。Saida 等<sup>[11]</sup>采用双光束也实现了铝/钢搭接接头的焊接。而 Takemoto 等<sup>[12]</sup>则以 Zn 钎料作为过渡层,能量透过钢板而熔化 Zn 钎料和铝合金母材,完成铝/钢搭接接头的焊接。

研究表明,影响铝/钢熔钎焊接头性能的主要因素是连接界面的脆性金属间化合物<sup>[13]</sup>。在不同焊接条件下,化合物层厚度为 5~20  $\mu\text{m}$ <sup>[3,5~7]</sup>。化合物层厚度和接头成形对接头性能有直接影响<sup>[7]</sup>。除此之外,卷边对接接头在焊缝根部易出现工艺气孔<sup>[6,7]</sup>。

本文提出采用宽带激光光斑和填粉焊接技术,在不使用钎剂的情况下对 6061 铝合金/镀锌钢搭接接头进行熔钎焊接实验。并分析测试了接头成形、焊缝组织和接头强度,探讨了影响接头强度的因素。

## 2 实验条件及设备

试样选用 6061 铝合金,板厚为 1.2 mm。镀锌钢板的基材为低碳钢,板厚为 1.5 mm,镀锌层厚度约 10  $\mu\text{m}$ 。钎料选用厚度为 0.15 mm 的 BA188Si。填充粉末的成分为 AlSi12,颗粒直径约为 45  $\mu\text{m}$ 。所用实验材料的化学组成如表 1 所示。

表 1 实验所用材料的化学组成(原子数分数, %)

Table 1 Chemical composition of experimental materials (atomic fraction, %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA6061-T6	0.52	0.5	0.18	0.09	0.84	0.22	0.16	0.13	Bal.
BA188Si	12	—	—	—	—	—	—	—	Bal.
Filler powder	12	—	—	—	—	—	—	—	Bal.
	C	Si	P	S	Mn	Zn	Fe		
Galvanized steel	0.08	0.03	0.025	0.02	0.40	75 g/m <sup>2</sup>	Bal.		

实验采用 IPG Photonics 公司出品的 YSL-6000 型掺镱光纤激光器,最大输出功率为 6000 W,波长为 1060 nm。激光束经焦距为 200 mm 的铜质积分镜整形为矩形匀强光斑。光斑能量分布使用 PRIMES 公司出品的 Focus Monitor 测量,结果如图 1 所示。根据整形后的矩形光斑尺寸设计了与之配套的宽带送粉喷嘴,粉末出口宽度为 6 mm。焊接接头为搭接形式:铝板在上,镀锌钢板在下,两板之间夹入钎料,焊接中未使用钎剂。焊前使用丙酮擦拭试板表面的油污。激光束垂直照射在铝合金试板表面,粉末送入方向与焊接方向相同,实验装置如图 2 所示。表 2 中列出了焊接工艺参数取值范围。

焊接试样经切割、磨抛等处理后采用 Keller 试

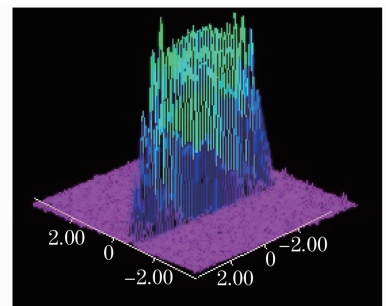


图 1 矩形光斑激光功率分布

Fig. 1 Power distribution of square spot

剂腐蚀。通过光学显微镜观察了焊缝截面形貌,采用电子探针分析了金属间的化合物组成及其含量。选择适当的焊接参数焊接了拉伸试样,其尺寸为

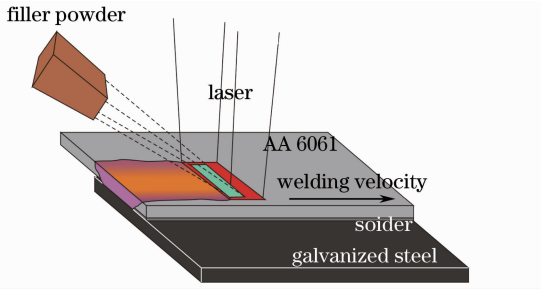


图 2 熔钎焊接实验布置图

Fig. 2 Schematic diagram of laser fusion welding-brazing experiment setups

26 mm×160 mm, 拉伸试验由 MTS-810 型材料测试系统进行, 拉伸速度为 1 mm/min, 并采用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 观察分析了拉伸断口的形貌和组成。

表 2 熔钎焊接工艺参数

Table 2 Laser fusion welding-brazing parameters

Processing parameter	Value
Laser power /kW	4.0~6.0
Defocusing distance /mm	+20, +30
Welding velocity/ (m/min)	0.12~0.60
Distance between spot and powder steam /mm	0
Powder feeding speed / (g/min)	2.5
Angle of powder nozzle / (°)	45
Ar gas flow rate / (l/min)	5

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 焊缝成形

采用上述实验方案和焊接工艺参数(激光功率为 6000 W, 焊接速度为 0.48 m/min, 离焦量为 +30 mm) 获得了成形饱满、无裂纹气孔等缺陷的焊缝, 图 3(a) 为典型的焊缝截面成形, 图 3(b) 为图 3(a) 中的 A 区域, 在铝合金母材熔合线下方, 钎料呈典型熔凝组织, 但其未与钢表面浸润而形成冶金连接。故定义在连接界面的有效连接宽度为熔钎焊接头的熔宽, 如图 3(a) 所示。

图 4 为采用不同焊接工艺参数时, 熔宽随焊接热输入量变化的曲线。随着注入能量的增加, 熔池中的高温区域增大, 高温区域存在的时间也相应变长, 使钎料可以充分熔化并铺展, 因而熔宽明显增加。相同热输入量下, 离焦量为 +30 mm 时的焊缝熔宽较离焦量为 +20 mm 时的更宽。离焦量为 +20 mm 时的熔宽变化较离焦量为 +30 mm 时的剧烈。当热输入量增大到一定值后, 因裂纹问题而无法形成焊缝。分析认为这是由于采用不同离焦量时, 熔池体积有差异, 在相同热输入量的作用下, 较小的熔池升温较快, 故

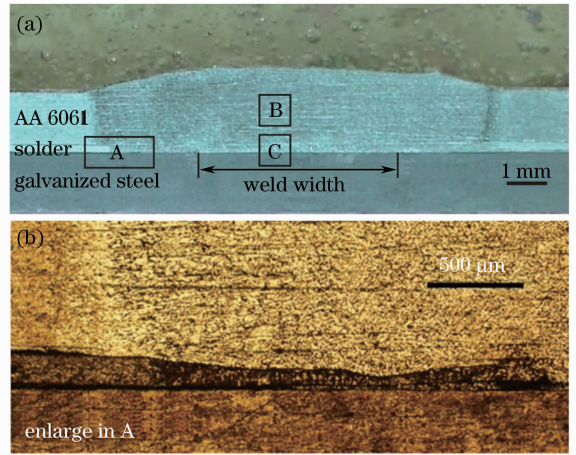


图 3 6061 铝合金/镀锌钢板熔钎焊缝横截面成形 (a) 和横截面中 A 区 (b)

Fig. 3 Cross section of 6061 aluminum alloy/galvanized steel joint (a) and area A (b)

熔宽变化较剧烈, 裂纹对焊接性的影响也较明显。

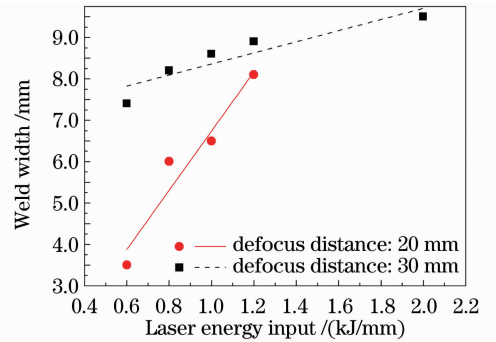


图 4 热输入量与焊缝宽度的关系

Fig. 4 Relation between the weld width and the laser energy input

#### 3.2 焊缝组织

图 3 中所标注的 B、C 两处的微观组织形貌如图 5 所示。焊缝中部铝合金组织呈细小等轴晶, 如图 5 中 B 位置所示。钎料熔化后与铝合金母材充分地冶金结合, 在镀锌钢的连接界面生长有一层金属间化合物, 向上生长的枝状晶化合物与铝合金形成混合组织。定义金属间化合物层厚度为界面上连续层的厚度。对在不同焊接条件下获得的焊缝进行测量, 结果表明采用不同热输入量时, 金属间化合物层厚度也随之变化, 如图 6 所示。随着热输入量的增加, 化合物层厚度逐渐增大。离焦量较大时, 金属间化合物层较厚, 且增厚趋势更为显著。

采用电子探针对连续层和枝状晶化合物的不同位置 [如图 5 中 C 位置所示] 进行元素组成及含量分析。结果表明在连续层化合物内 (位置 3), Al 与 Fe 元素的含量相当, 枝状晶部分 (位置 1 和 2) 主要



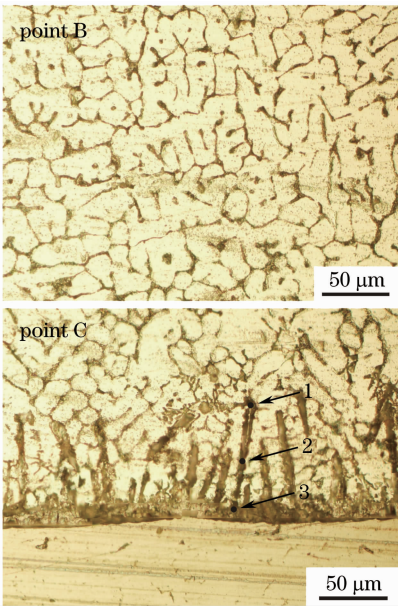


图 5 焊接接头的显微组织

Fig. 5 Microstructure of the welded joint

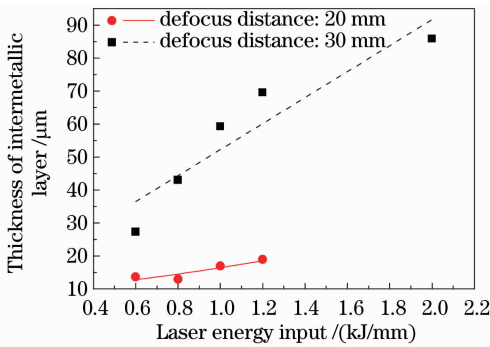


图 6 热输入量与金属间化合物层厚度的关系

Fig. 6 Relation between the laser energy input and the thickness of intermetallic compounds layer

以 Al 元素为主,且 Fe 元素含量逐渐降低,如表 3 所示。根据不同位置的各种元素含量并对照 Al-Fe-Si 三元相图<sup>[14]</sup>在 727 °C 的等温截面图(如图 7 所示),分析认为金属间化合物层组织由 FeAl<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 组成。FeAl<sub>3</sub> 是最先开始生长的 Al-Fe 化合物,随着温度的升高 FeAl<sub>3</sub> 开始转变为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>。由于 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 中约有 30% 的空位,Si 和 Fe 原子都能利用这些空位进行扩散,逐渐向上生长成枝状晶组织。随着枝状晶中 Si 含量的增加,FeAl<sub>3</sub> 与 Si 元素结合形成 α-AlFeSi(Al<sub>7.4</sub>Fe<sub>2</sub>Si)。在枝状晶组织中,部分 FeAl<sub>3</sub> 则以 Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 的形式存在。枝状晶中部的 Fe 元素含量较顶端部分高得多,FeAl<sub>3</sub> 或 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 与 Si 形成 τ1(Al<sub>2</sub>Fe<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>)相。总之,6061 铝合金/镀锌钢熔钎焊缝中金属间化合物是由 Al-Fe 和 Al-Fe-Si 系统化合物组成的混合组织。

表 3 金属间化合物层中不同位置上各种元素的化学组成(摩尔分数,%)

Table 3 Chemical composition of each element at different position of the intermetallic layer (mole fraction, %)

Position	Al	Si	Fe	Phases
1	88.6	6.0	5.4	FeAl <sub>3</sub> + α(Al <sub>7.4</sub> Fe <sub>2</sub> Si) + Fe <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>
2	61.7	5.6	32.7	FeAl <sub>3</sub> + τ1(Al <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> ) + Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>
3	49.2	4.9	45.9	FeAl <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>

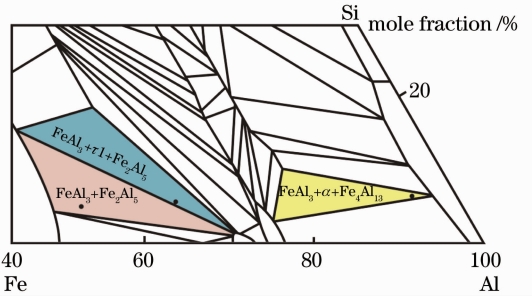


图 7 727 °C 时铝角的 Al-Fe-Si 三元相图等温截面图

Fig. 7 Partial isotherm of the Al-Fe-Si system of Al corner at 727 °C

### 3.3 接头性能

选择适当的焊接工艺参数焊接拉伸试样,每个焊接参数切取 3 个拉伸试样。拉伸结果显示断裂均发生在钎料/镀锌钢界面,最大机械抗力为 152.5 N/mm。图 4 和图 6 的分析结果表明焊接时热输入量对焊缝熔宽和金属间化合物层厚度有直接的影响,文献[5~8]和实验结果均表明这两项参数又与熔钎焊接头的力学性能有密切的关系。图 8 为焊接时热输入量与接头机械抗力的关系。结果表明,随着热输入量的增大,机械抗力先增大后减小。分析认为当热输入量较小时,焊缝熔宽较窄,金属间化合物层较薄,接头性能有限,随着注入能量的增加,在熔宽增大的同时金属间的化合物层也变厚,焊

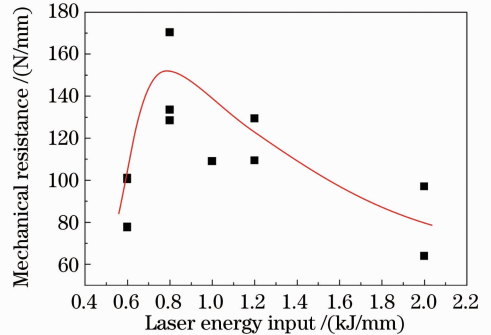


图 8 线能量与机械抗力的关系

Fig. 8 Relation between the laser energy input and the mechanical resistance

缝机械抗力增加。当焊接热输入量继续增大时,较宽的熔宽固然有利于增加接头强度,但较厚的金属间化合物层则不利于提高接头强度,在两者综合作用下,接头机械抗力反而降低。因此,6061 铝合金/镀锌钢熔钎焊接头的力学性能由焊缝熔宽和金属间化合物层厚度共同决定。

采用扫描电子显微镜观察铝一侧的断裂界面,发现断口平整而光亮,呈典型脆性断裂特征,如图 9 所示。对不同强度的铝一侧拉伸断口进行 X 射线衍射分析,结果发现断口表面的化合物为  $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Zn}_{0.4}$  和  $\alpha\text{-Al}$ ,如图 10 所示。拉伸试验表明接头的薄弱环节在连接界面。界面上连续层金属间化合物由  $\text{FeAl}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  组成,这两种化合物的组成和物理性能相似,但在硬度与韧性上与钢母材中的  $\alpha\text{-Fe}$  有较大差异。在拉伸力的作用下,接头极易在连接界面开裂。

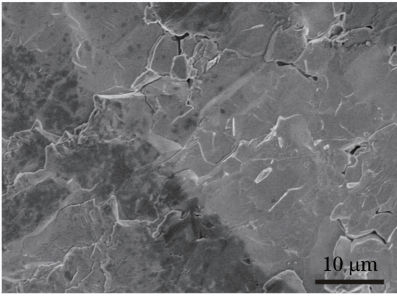


图 9 断裂界面的 SEM 观察

Fig. 9 SEM image of the fracture surface

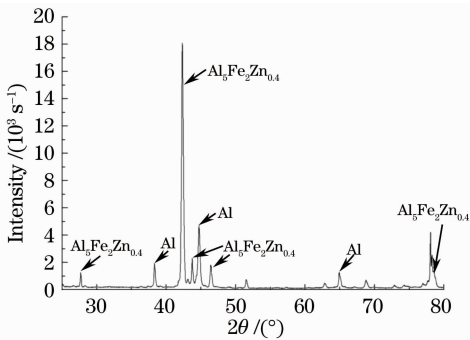


图 10 不同拉伸强度的铝一侧断口 X 射线衍射分析

Fig. 10 X-ray diffraction analysis of fracture surface at aluminum alloy side

## 4 结 论

采用铝板在上、镀锌钢板在下,并在其间放置钎料的接头布置形式,以及宽带光纤激光和与之匹配的宽带送粉系统,在不使用钎剂的情况下,实现了 6061 铝合金与镀锌钢板的熔钎焊连接。选用优化的焊接工艺参数获得了成形饱满、无裂纹气孔等缺陷的焊缝。拉伸实验中,拉伸试样均断裂在钎料/镀

锌钢界面,最大机械抗力为 152.5 N/mm,断口呈现脆性断裂特征,连接界面为接头的薄弱环节。焊缝熔宽和金属间化合物层厚度随焊接热输入量的增加而增大。焊缝熔宽、金属间化合物层厚度共同决定了接头的机械抗力水平。能谱分析表明熔钎焊缝中的金属间化合物由 Al-Fe 和 Al-Fe-Si 系统化合物组成,拉伸试样断裂面铝一侧则由  $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Zn}_{0.4}$  和  $\alpha\text{-Al}$  组成。

## 参 考 文 献

- 1 H. Uzun, C. Dalle Donne, A. Argagnotto *et al.*. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2005, **26**(1): 41~46
- 2 K. Nishimoto, K. Saida, S. Kuroda. Removing of surface oxide film of SUS316 and improvement of diffusion-bondability of A6061 aluminum alloy to SUS316 stainless steel using surface-activated pre-coating technique[J]. *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, 2000, **18**(4): 563~571
- 3 G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux-Beaume *et al.*. Steel to aluminum key-hole laser welding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **447**(1-2): 197~208
- 4 E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. *Materials Processing Technology*, 2001, **115**(1): 2~8
- 5 P. Peyre, G. Sierra, F. Deschaux-Beaume *et al.*. Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **444** (1-2): 327~338
- 6 A. Mathieu, S. Pontevicci, J. Viala *et al.*. Laser brazing of a steel aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si) [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **435-436**: 19~28
- 7 A. Mathieu, R. Shabadi, A. Deschamps *et al.*. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 652~661
- 8 G. Sierra, P. Peyre, F. D. Beaume *et al.*. Steel to aluminium braze welding by laser process with Al-12Si filler wire[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, **13** (5): 430~437
- 9 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang *et al.*. Fusion brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and Zn 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
- 10 H. Laukant, C. Wallmann, M. Muller *et al.*. Fluxless laser beam joining of aluminium with zinc coated steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(2): 219~226
- 11 K. Saida, H. Ohnishi, K. Nishimoto. Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using a tandem beam-dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels[J]. *Welding International*, 2010, **24**(3): 161~168
- 12 T. Takemoto, S. Kimura, Y. Kawahito *et al.*. Fluxless joining of aluminium alloy to steel by laser irradiation method [J]. *Welding International*, 2009, **23**(5): 316~322
- 13 Xiao Rongshi, Dong Peng, Zhao Xudong. Progress in laser fusion welding-brazing of dissimilar alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601004
- 肖荣诗, 董 鹏, 赵旭东. 异种合金激光熔钎研究进展[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601004
- 14 V. Raghavan. Al-Fe-Si (aluminum-iron-silicon)[J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2009, **30**(2): 184~188

栏目编辑:宋梅梅