

文章编号: 0258-7025(2010)04-1132-06

连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金

石 岩¹ 张 宏¹ 渡部武弘² 唐敬国²

(¹ 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022; ² 千叶大学工学部机械系, 日本 千叶 263-8522)

摘要 随着汽车轻量化越来越得到重视, 钢-铝合金异种金属焊接结构成为研究的重点。采用 YAG 连续(CW)和脉冲(PW)两种激光设备, 对连续-脉冲双激光束复合热源焊接工艺进行了研究, 并借助扫描电镜(SEM)、电子探针微区分析(EPMA)、显微硬度计、拉伸实验机等设备对焊缝进行了分析与测试。实验结果表明, 连续激光匹配适当的脉冲激光进行双激光焊接, 可以有效地减少或避免气孔的产生, 同时可以使用低功率的连续激光实现较深的焊接, 扩大低功率激光设备使用范围。双激光束焊接过程中, 由于脉冲激光的作用, 焊缝中的 Fe 穿入 Al 中, 在焊缝底部 Fe-Al 交界处形成了钩状的不规则结构, 这种结构的产生可以增强 Fe, Al 两种材料的连接强度。在焊缝底部 Fe-Al 交界处形成了高硬度、高脆性的 Fe-Al 金属间化合物。钢-铝合金双激光搭接焊缝剪切强度为 128 MPa, 剪切断裂断面呈现为准解理型断裂形貌。

关键词 激光技术; 双激光束焊接; 钢-铝合金; 剪切强度

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1132

CW/PW Dual-Beam YAG Laser Welding of Steel/Aluminum Alloy Sheets

Shi Yan¹ Zhang Hong¹ Takehiro Watanabe² Tang Jingguo²

¹ College of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Department of Electronics & Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

Abstract The development of a new welding method for dissimilar metals is strongly required for weight reduction of automobiles. The most popular and important combination of dissimilar metals is steel and aluminum. The lap joining of steel/aluminum alloy is carried out using the continuous wave-pulse wave (CW-PW) dual-beam YAG laser welding method. The tests are also performed for the lap joints using scanning electron microscopy (SEM), electron probe microzone analysis (EPMA), micro-hardness tester, tensile testing machine. The results show that the CW laser matching the appropriate PW laser for dual-beam laser welding can effectively reduce or avoid the produce of pores, as well as the deeper penetration can be obtained using the low-power CW laser, which expands the scope of the low-power CW laser equipments. In the dual-laser beam welding process, the Fe penetrates into the Al due to the role of pulsed laser. And the irregular hook-like structure produced in the bottom of welding seam, which can enhance the Fe/Al joint strength. A brittle Fe-Al intermetallic compound (IMC) layer formed at the join interface. The shearing strength of the lap joint is 128 MPa, and the morphology is quasi-cleavage fracture.

Key words laser technique; dual-beam laser welding; steel/aluminum alloy; shearing strength

1 引 言

近年来, 从节约能源和保护环境的角度考虑, 汽车轻量化越来越得到重视。因此在汽车工业中, 铝钢异种金属焊接结构成为汽车轻量化的首选方案。但铝钢两者之间的固溶度较低, 热物理性能差异较大, 并且两者极易反应生成脆性的金属间化合物, 这种脆

性的金属间化合物会极大地降低焊接接头的力学性能, 这些问题给铝钢异种金属焊接带来了困难。目前铝钢之间的焊接主要有滚焊、爆炸焊、摩擦焊、搅拌摩擦焊、钎焊、电子束焊、激光焊以及氩弧焊等^[1~7]。由于激光焊接具有热源和光路容易操控、控制简单、工件变形小、热影响区小、精确性和自动化程度高等独

收稿日期: 2009-06-19; 收到修改稿日期: 2009-07-15

作者简介: 石 岩(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: shiyan@cust.edu.cn

特的优点,在汽车等工业生产中得到广泛应用^[8~14]。但在铝钢异种金属连续(CW)激光焊接尤其是铝钢搭接非穿透焊接过程中,由于激光焊接速度快,焊缝中容易产生较多的气孔等缺陷,使焊缝强度降低。而脉冲(PW)激光具有峰值功率高,能实现深穿透,通过控制参数可以有效地搅拌焊接处熔池,使焊接过程中产生的气孔有效排出,防止焊接缺陷的产生。本文充分利用 YAG 连续和脉冲激光焊接的优点,将两者有机地结合并应用于钢-铝合金薄板的焊接。

2 实验材料、设备与方法

2.1 实验材料

实验材料采用厚度为 1.2 mm 的 A6111-T4 铝合金板和厚度为 0.8 mm 的 JSC270CC 钢板。A6111-T4 铝合金板具有良好的可加工性和可焊性,广泛用于汽车行业。JSC270CC 钢板是种非常好的结构钢,具有良好的可焊性和成形性,在汽车工业中得到了广泛的应用。两种材料的化学成分和材料特性如表 1~3 所示。将板材裁剪成 20 mm×100 mm 的试样用于焊接实验。使用前将试样浸泡于丙酮中,超声波清洗 10 min,以去除表面的污垢和油脂。

表 1 A6111-T4 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of A6111-T4

Elements	Mass fraction / %
Si	0.3~0.7
Fe	0.50
Cu	0.10
Mn	0.03
Mg	0.35~0.80
Cr	0.03
Zn	0.01
Al	Bal.

表 2 JSC270CC 钢化学成分

Table 2 Chemical composition of JSC270CC

Elements	Mass fraction / %
C	≤0.032
Si	≤0.01
Mn	≤0.18
P	≤0.009
S	≤0.006
Cr	≤0.01
Fe	REM

表 3 材料特性

Table 3 Characteristics of materials

Materials	A6111-T4 JSC270CC	
Melting point / °C	660	1535
Thermal expansion coefficient / (10 ⁻⁶ /K)	2.410	1.210
Thermal conductivity / [W/(m·K)]	273	80
Relative density / (g/cm ³)	2.68	7.8
Boiling point / °C	2467	2750

2.2 实验设备与方法

钢-铝合金双激光束焊接实验总体布置如图 1 所示。脉冲激光器采用 PSL 公司 PYS-2003 型 YAG 激光发生器,最大平均功率 75 W,最大输出能量为每脉冲 75 J,连续激光器采用 NEC 公司 SL117-2B 型 YAG 激光发生器,最大输出功率 600 W。两束激光束经光纤传输,通过透镜和棱镜后形成距离为 15 mm 的平行激光束,经直径为 60 mm,焦距为 70 mm 的聚焦镜聚焦后,在焊接试样表面聚集成一点。

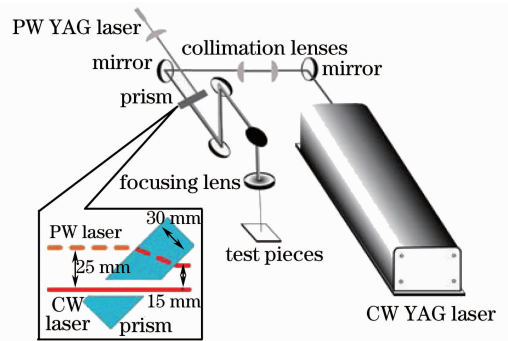


图 1 双激光束焊实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

相对于钢材料,铝的熔点低,导热性好,因此将 JSC270CC 钢板置于 A6111-T4 铝合金板上部,用压板压紧后进行 YAG 连续和脉冲双激光束搭接焊实验。激光束、聚焦镜和焊接试样之间的位置关系如图 2 所示。

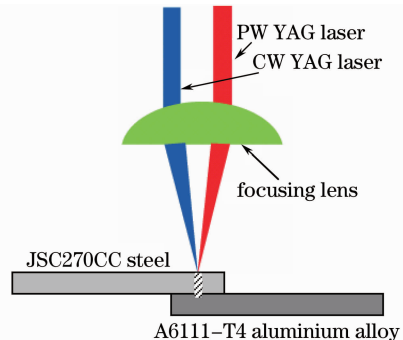


图 2 激光束、聚焦镜与试样之间位置关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the position relation between focusing lens, laser beam and samples

将不同焊接工艺条件下的焊接试样,沿焊缝方向在焊缝中部纵向剖开,经研磨抛光后制成金相试样,在 AMRAY-1000B 型扫描电镜(SEM)上观察焊缝微观形貌,并进行电子探针微区分析(EPMA)。显微硬度在 Π MT-3 型显微硬度计上进行,载荷 20 g。拉伸实验采用 MTS810 型液压万能实验机,试件断裂后用扫描电子显微镜观察分析断口形貌。

3 实验结果与分析

3.1 脉冲激光峰值功率与脉宽对焊缝形貌的影响

图 3 是在连续激光功率为 390 W,脉冲激光脉冲频率为 5 Hz,焊接速度为 1.0 mm/s 的条件下,不同脉冲峰值功率与脉宽对双激光焊接焊缝纵向焊接形貌的影响。上部白亮区为 JSC270CC 钢,下部灰暗区为 A6111-T4 铝合金。

在低峰值功率和宽脉冲条件下,焊透深度较浅,并有大量气孔生成,如图 3(a)所示。随着脉冲激光功率的增大和脉冲宽度的减小,焊接深度逐渐增加,气孔明显减弱,如图 3(b)和(c)所示。在图 3(c)中明显出现了由脉冲激光而形成的穗状和钩状焊缝形貌。

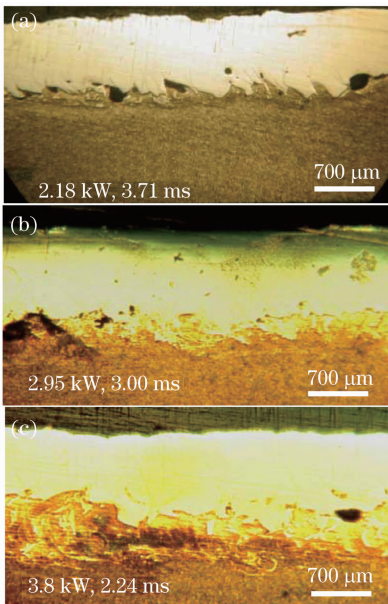


图 3 脉冲峰值功率与脉宽对焊缝的影响

Fig. 3 Effect of pulse peak power and pulse width on the weld seam

在脉冲激光功率较低时,复合热源能量不足,焊接不充分,在焊缝底部产生大量气孔,并且由于脉宽较宽,单脉冲的穿透能力减弱,脉冲激光的作用没有得到体现。随着脉冲激光功率的增大,焊接区得到充分的能量,形成良好的焊接形貌,同时随着脉冲激光脉宽的变窄,单脉冲的穿透能力增强,单脉冲的冲

击和搅拌,在焊缝底部形成穗状和钩状的焊接形貌。

3.2 脉冲激光峰值功率与频率对焊缝形貌的影响

图 4 是在连续 YAG 激光功率为 390 W,脉冲 YAG 激光脉冲宽度为 3.0 ms,焊接速度为 1.0 mm/s 的条件下,不同脉冲峰值功率与频率对双激光焊接焊缝纵向焊接形貌的影响。

在高脉冲激光功率、低脉冲频率条件下,焊缝表面极不平整,焊缝较浅,焊缝内部裂纹、气孔等缺陷很多,由脉冲激光在焊缝底部产生连续的弧状凸起,如图 4(a)所示。但随着脉冲激光功率的降低和脉冲频率的升高,焊缝断面平整,缺陷减少,焊缝底部生成明显的穗状和钩状的焊接形貌,如图 4(b)所示,但随着功率的降低,焊缝深度变浅,如图 4(c)所示。

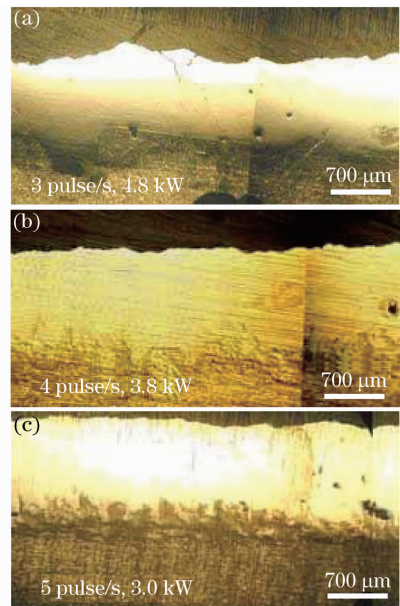


图 4 脉冲峰值功率与频率对焊缝的影响

Fig. 4 Effect of pulse peak power and pulse frequency on the weld seam

在脉冲激光功率较高而脉冲频率又很低时,每个脉冲会在金属表面产生较高的功率密度及冲击,导致焊缝区金属产生较大的飞溅,导致焊缝区金属减少,产生焊缝凹陷、变浅、不平整等特征。随着脉冲激光功率的降低和频率的增大,焊缝区得到较合适的脉冲激光功率密度,焊接过程中飞溅显著减弱,焊缝平整,脉冲激光穿透焊缝熔融区,在焊缝底部产生穗状和钩状的焊接形貌,其在复合热源中的作用得以体现。但较低的脉冲激光功率会使复合热源能量降低,导致焊接深度变浅。

3.3 脉冲频率和脉宽对焊缝形貌的影响

图 5 是在连续 YAG 激光功率为 390 W,脉冲 YAG 激光峰值功率为 2.95 kW,焊接速度为 1.0 mm/s

的条件下,不同脉冲频率与脉宽对双激光焊接焊缝纵向焊接形貌的影响。

在低脉冲频率和宽脉宽的条件下,焊缝表面不平整,缺陷较多,如图 5(a)所示。随着脉冲频率的增加和脉宽的减小,焊缝熔深增加,焊缝平整,在焊缝底部出现了穗状和钩状的焊接形貌,如图 5(b)所示。但过高的脉冲频率和过窄的脉宽会导致焊缝熔深过浅,如图 5(c)所示。

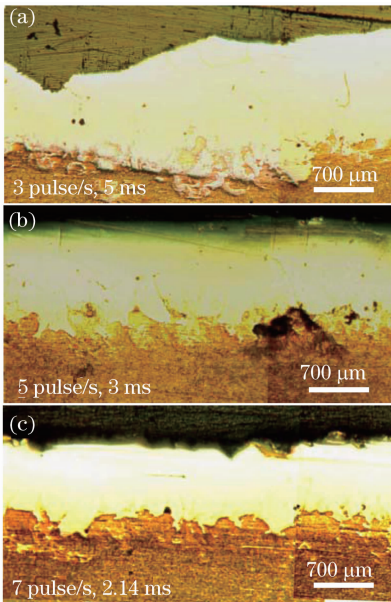


图 5 脉冲频率与脉宽对焊缝的影响

Fig. 5 Effect of pulse frequency and pulse width on the weld seam

3.4 连续激光功率对焊缝形貌的影响

图 6 是在脉冲激光峰值功率为 2.95 kW,频率为 5 Hz,脉宽为 2.0 ms,焊接速度为 1.0 mm/s 的条件下,不同连续激光功率对双激光焊接焊缝纵向焊接形貌的影响。

较低的连续激光功率会造成焊接能量不足,焊接不充分,焊缝底部产生大量的气孔等缺陷,如图 6(a)所示。随着焊接功率的升高,焊缝平整,焊接充分,缺陷消失,在焊缝底部产生穗状和钩状的焊接形貌,如图 6(b)所示。过高的激光功率虽然可以增加焊缝深度,但焊缝金属产生飞溅,焊缝表面变得不平整,在焊缝底部产生微气孔缺陷,并且较高的连续激光功率导致脉冲激光的作用减弱,焊缝底部的穗状和钩状焊接形貌消失,产生弧状过渡区,如图 6(c)所示。

3.5 双激光束焊接焊缝微观形貌特征

双激光束焊接过程中,脉冲激光的存在一方面起到搅拌熔池,减少气泡的作用;另一方面,由于脉冲激

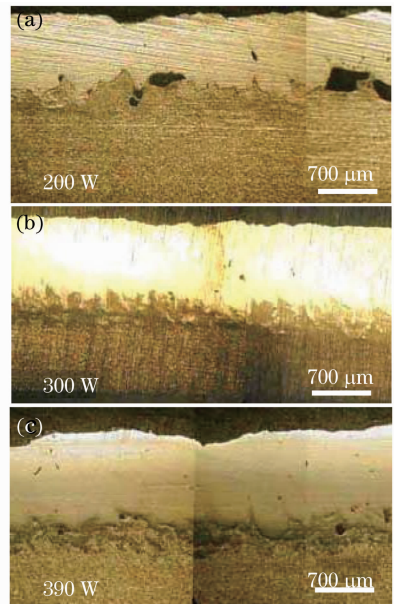


图 6 连续激光功率对焊缝的影响

Fig. 6 Effect of CW laser power on the weld seam

光的穿透与搅拌作用,Fe 穿入 Al 中,在焊缝底部 Fe-Al 交界处形成了钩状的不规则结构。图 7 是在连续激光功率为 390 W,脉冲激光峰值功率为 2.61 kW,频率为 5 Hz,脉宽为 2.0 ms,焊接速度为 1.0 mm/s 的条件下,双激光焊接焊缝钢铝交界处的扫描电镜图形貌,这种不规则钩状穿入结构的产生对增强 Fe 和 Al 两种材料的连接强度是有益的。

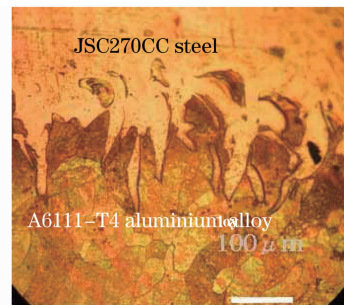


图 7 焊缝钢与铝交界处的钩状形貌

Fig. 7 Morphology in the Al/Fe interface

3.6 熔合区金属间化合物分析

图 8 是在连续激光功率为 390 W,脉冲激光峰值功率为 2.61 kW,频率为 5 Hz,脉宽为 2.0 ms,焊接速度为 1.0 mm/s 的条件下,双激光焊接焊缝铝钢交界处的 EPMA 分析结果。根据 Fe-Al 元素成分百分比,对照 Fe-Al 合金相图,发现激光焊接后,焊缝区上部白亮区仍然以 Fe 为主,下部黑色区域为 Al,只是在 Fe-Al 交界处形成了几微米到几十微米的 FeAl, Fe₃Al 等 Al, Fe 金属间化合物。

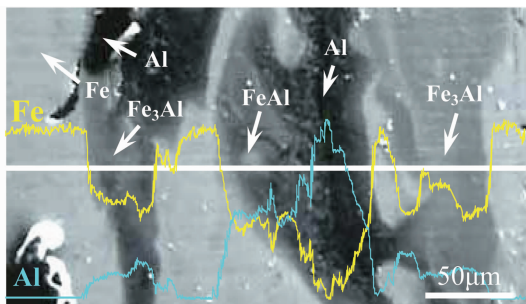


图 8 焊缝铝钢交界处 EPMA 分析图

Fig. 8 EPMA curve of the Al/Fe interface

3.7 焊缝显微硬度测试

图 9 是从焊缝表面到底部的显微硬度曲线。由于钢-铝双激光焊接是钢板在上铝板在下,所以焊缝上部为 Fe,底部为 Al,在焊缝交界处由于形成了高硬度的 Fe-Al 金属间化合物,硬度突然升高。由于其脆性较高,这种金属间化合物的产生不但不会提高材料的力学性能,反而使焊缝区域的强度大大降低。

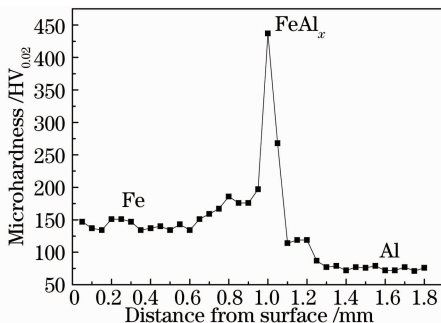


图 9 焊缝区域显微硬度

Fig. 9 Microhardness of welding seam

3.8 搭接焊焊缝剪切强度测试

图 10 为异种材料焊接焊缝剪切强度与 Al, Fe 母材剪切强度的对比图。激光焊接 128 MPa, 铝合金 244 MPa, 钢 381 MPa。激光搭接焊焊缝剪切强度低于母材,主要是由于在激光焊接过程中,焊缝熔

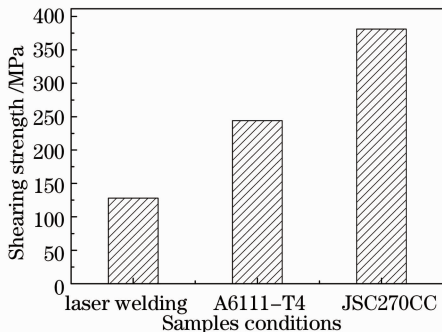


图 10 双激光束焊接 Fe/Al 剪切强度对比图

Fig. 10 Shearing strength histogram of dual-beam laser welding on the Fe/Al sheets

池底部 Fe 与 Al 的交界处,两元素反应形成了脆性 Al, Fe 金属间化合物,这种脆性的金属间化合物极大地降低了焊接接头的力学性能。

图 11 为剪切实验断口 SEM 形貌。断口位于焊缝底部 Fe, Al 交界处。断口为准解理型断裂,断裂面具有局部的塑性变形。因塑性变形,贯通两个小断面的台阶形成撕裂棱。准理解断裂起源于晶粒内部,断面位置和方向并不与理解面严格对应。大量短而弯曲的撕裂棱从中央向四周放射,断面有凹凸变形即二次裂纹。

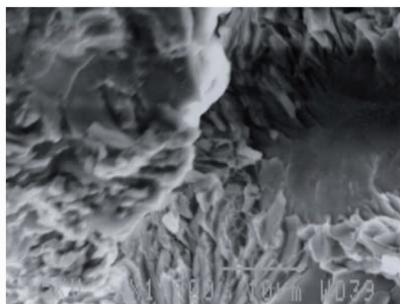


图 11 断口形貌

Fig. 11 Fracture morphology

4 结 论

连续激光匹配适当的脉冲激光进行双激光焊接,可以使用低功率的连续激光实现较深的焊接,扩大低功率激光设备使用范围。同时可以有效地减少或避免气孔的产生。双激光束焊接过程中,由于脉冲激光的作用,焊缝中的 Fe 穿入 Al 中,在焊缝底部 Fe-Al 交界处形成了钩状的不规则结构,这种结构的产生增强了 Fe 和 Al 两种材料的连接强度。在焊缝底部 Fe-Al 交界处形成了高硬度、高脆性的 Fe-Al 金属间化合物。双激光铝-钢搭接焊焊缝剪切强度达到 128 MPa,剪切断裂断口呈现为准解理型断裂形貌。

参 考 文 献

- 1 V. S. Sedykh. Mechanical properties of explosion welding steel-aluminium joints[J]. *Welding Production*, 1985, **32**(2): 28~30
- 2 P. D. Calderon, D. R. Walmsley, Z. A. Munlr. An investigation of diffusion welding of pure and alloyed aluminium to type 316 stainless steel [J]. *Welding Journal*, 1985, **64**(4): 104~114
- 3 M. Marya, S. Liu. The search for filler metal for the dissimilar metal joining of iron-to-titanium [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, **6**(4): 240~246
- 4 H. Laukant, E. Wallmann, M. Müller *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
- 5 M. Marya, S. Marya, D. Priem. On the characteristics of

- electromagnetic welds between aluminium and other metals and alloys [J]. *Welding in the World*, 2005, **49**(5~6): 74~84
- 6 M. Kimchi, H. Shao, W. Cheng *et al.*. Magnetic pulse welding aluminium tubes to steel bars [J]. *Welding in the World*, 2004, **48**(3~4): 19~22
- 7 Tomokatsu Aizawa, Mehrdad Kashani, Keigo Okagawa. Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheets joints [J]. *Welding in the World*, 2005, **49**(9): 212~222
- 8 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268
虞 钢, 赵树森, 张永杰等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 261~268
- 9 Huang Rui, Chen Kai, Zhang Song *et al.*. Experimental study of dual-beam laser welding [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(5): 66~67
黄 瑞, 陈 铠, 张 松等. 双光束激光焊接的试验研究 [J]. 激光杂志, 2007, **28**(5): 66~67
- 10 Qi Junfeng, Tian Sheng, Chen Hong *et al.*. Slab CO₂ laser welding of 7075-T6 high strength aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s1): 439~444
祁俊峰, 田 胜, 陈 虹等. 板条 CO₂ 激光焊接 7075-T6 高强铝合金 [J]. 中国激光, 2006, **33**(s1): 439~444
- 11 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Nd: YAG laser welding of 1420 aluminum-lithium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 239~241
肖荣诗, 杨武雄, 陈 铠. 1420 铝锂合金 YAG 激光焊接 [J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 239~241
- 12 Sun Fujuan, Liu Hongjun, Zhang Danfeng. Technology of LY12CZ's laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 273~277
孙福娟, 刘洪军, 张丹峰. LY12CZ 铝合金激光焊接工艺 [J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 273~277
- 13 Shi Yan, Zhang Hong, Xu Chunying. Comparison of laser hardening and medium frequency induction hardening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 23~26
石 岩, 张 宏, 徐春鹰. 激光淬火与中频感应淬火对比研究 [J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 23~26
- 14 Shi Yan, Zhang Hong, Xu Chunying. Laser surface modification of copper-based powder metallurgy friction materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1246~1250
石 岩, 张 宏, 徐春鹰. 铜基粉末冶金摩擦材料激光表面改性处理 [J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1246~1250