

文章编号: 0258-7025(2008)11-1783-06

铝合金双光束焊接特性研究

李俐群 陈彦宾 陶 汪

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用双束 CO₂ 激光进行了铝合金双光束焊接工艺试验,研究了双光束并行与串行排列两种模式焊接时的焊缝成形、气孔含量及接头强度等焊接特性,同时分别从同轴、旁轴两个方向监测了双光束焊接过程中熔池表面形态与等离子体特征,并与传统单束激光焊进行了对比分析。试验结果证明,双光束焊接过程等离子体更加稳定,尺寸也更小,因而获得了很好的焊缝成形与接头性能。相比而言,双光束并行焊接获得的焊缝性能更优,但会一定程度降低焊接熔深。

关键词 激光技术;激光焊接;双光束;铝合金

中图分类号 TG 456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20083511.1783

Research on Dual-Beam Welding Characteristics of Aluminum Alloy

Li Liqun Chen Yanbin Tao Wang

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Experiments of dual-beam CO₂ laser welding aluminum alloys were conducted. The weld appearance, porosity content and joint strength with parallel and serial dual-beam laser welding were investigated. CCD and CMOS image sensors were respectively used to monitor the metal pool and plasma from both paraxial and coaxial directions. The results in above aspects of single-beam and dual-beam welding were simultaneously compared. The results indicate that dual-beam laser welding aluminum alloys can reduce the size and therefore increase the stability of plasma in comparison with single-beam laser welding, which usually results in better weld shaping. A comprehensive comparative analysis on the parallel and serial dual-beam welding shows that the former is more favorable in weld shaping, but it will decrease the penetration in some degree.

Key words laser technique; laser welding; dual-beam; aluminum alloy

1 引言

铝合金以其重量轻、比强度高等众多性能优势而被广泛地应用于各种焊接结构产品中,尤其是航空、航天与国防装备中。铝合金更是不可替代的主流材料,随着产品制作精度的提高,对铝合金焊接质量的要求也越来越高,激光精密焊接技术因此越来越多地应用于铝合金的焊接中。

不过,与一般材料相比,采用激光进行铝合金的焊接难度要大得多,由于铝合金对激光的高反射率,在未形成匙孔以前,大部分的激光能量被反射掉,尤其是波长较长的 CO₂ 激光,固态铝合金对其的反射率高达 90% 以上。而且,铝合金材料中存在的 Mg

元素在高能密度激光的辐射下,极易烧损蒸发,使得焊缝中存在大量气孔,影响焊缝强度。此外,液态铝合金的表面张力较小,匙孔不易维持,因此焊接过程不稳定,常会出现凹坑、咬边等成形缺陷^[1~3]。

随着激光器制作技术的迅猛发展,针对铝合金的激光焊接工艺技术也逐渐多样化。从传统的在铝合金表面加涂层以提高吸收率^[4],激光填丝填粉焊改进焊缝组织性能^[5~7]等工艺,到近年来以激光为主热源开展的一系列热输入方式上的技术革新。如铝合金激光热丝焊是通过预热焊丝提高焊接熔化效率^[8],电流辅助激光焊接铝合金是通过向熔池中通入 100~200 A 电流,改变熔池的流动行为,从而增

收稿日期:2008-09-10; 收到修改稿日期:2008-10-13

作者简介:李俐群(1970—),女,湖南人,副教授,博士,主要从事铝、钛合金激光焊接技术、激光焊接过程热力学行为分析、激光弯曲成形技术的研究。E-mail: liliqun@hit.edu.cn

大熔深,降低气孔^[9]。还有,采用激光-电弧复合热源焊接技术^[10,11]与激光、电弧双面焊技术^[12,13]进行铝合金的焊接,都在很大程度上提高了铝合金激光焊接过程的稳定性,同时也有效增大了激光的能量利用率。

双光束激光焊接不仅仅用于焊接高碳钢、不等厚板材料^[14,15],在铝合金焊接中也有很大的优势^[16,17],当双光束激光作用于一个熔池中时,可以形成一个较大的熔池与匙孔,保持匙孔的稳定性,改善焊缝成形,而且可以改善熔池的流动性,有利于内部气泡的上浮,降低气孔。由于双光束焊接需要两个激光器同时作业,或专用分光系统,在国内这方面的研究还很少。

本文将以 CO₂ 激光为主热源,通过分光系统分为两束光,研究铝合金双光束激光填丝焊的工艺特性,试验研究不同光束排布方式(串行、并行)对焊缝成形、气孔含量、接头性能的影响规律及其等离子体特征,并与铝合金单光束焊接的焊接特性进行对比分析,为铝合金双光束焊接技术的工业应用打下试验基础。

2 试验条件及方法

选择航空航天常用铝镁合金 5A06 为试验材料,试件尺寸 250 mm×25 mm×6 mm。填充焊丝型号 5356,直径 1.2 mm。母材及焊丝主要成分如表 1、2 所示。

表 1 母材 5A06 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 5A06 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Ti
0.4	0.4	0.1	0.5~0.8	5.8~6.8	0.2	0.0001~0.005	0.01~0.20

表 2 焊丝 5356 化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 5356 feeding wire (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.25	0.4	0.1	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.1	0.06~0.20

试验过程采用旁轴的 CCD 图像采集系统和同轴的 CMOS 视觉传感系统分别对等离子体及熔池表面图像进行检测。CCD 图像采集频率 25 frame/s, CMOS 传感系统采集频率 1000 frame/s。焊接过程氩气正反面保护,正面旁轴保护气流量 $R_g = 15$ L/min,背面保护气流量 $R_g = 18$ L/min。

双光束采用光学镜片分光获得,两束光的焦点中心间距为 $d_b = 0.6$ mm,保证双光束作用于一个熔池中,两束光的能量分配为 1:1。双光束的排布

分为串行、并行两种模式,试验工作原理图如图 1 所示。

3 焊缝成形特征

激光焊接过程中,在金属蒸气反作用力与液态金属表面张力作用下,匙孔处于一个剧烈波动的状态,当匙孔壁的液态金属出现坍塌时,匙孔就会闭合,影响焊接过程的稳定性。液态铝合金的表面张力很小,焊接过程中不断出现 Mg 元素的烧损,很容易因匙孔易坍塌、液态金属上溢、合金烧损等因素影响焊缝表面成形,凹坑、咬边、不规则鱼鳞纹、飞溅等情况时有发生。一般来说,如果铝合金表面成形较好,便意味着焊接过程匙孔与等离子体较稳定,焊缝内部缺陷也相对较少。

图 2 所示为双光束串行、并行排列与单束激光三种焊接条件下获得的典型铝合金激光焊焊缝。

可以看到,单光束时,焊缝鱼鳞纹间距不均匀,同时还存在咬边飞溅。采用双光束焊接后,无论是串行排列还是并行排列,焊缝表面成形都有较大改善,鱼鳞纹更加细致均匀,咬边大大减轻,飞溅根本不存在。同等输出功率下,并行排列的双光束焊接时焊缝表面成形更好一些,但是焊接熔深会有所降

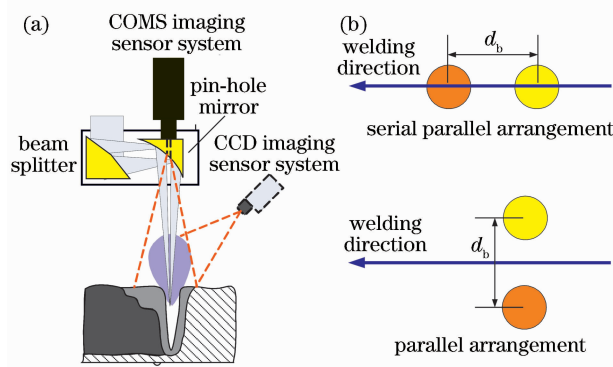


图 1 试验原理。(a) 试验系统;(b) 双光束排布方式
Fig. 1 Experimental principle. (a) experimental set-up;
(b) dual-beam arrangement mode parallel arrangement

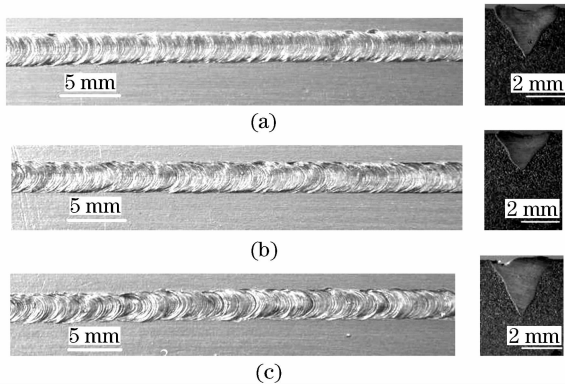


图 2 不同光束作用模式下的铝合金焊缝表面成形与截面形态。(a) 双光束串行焊接;(b) 双光束并行焊接;(c) 单光束焊接

Fig.2 Aluminum alloys weld appearances and section crosses with different beam mode ($P = 2200 \text{ W}$, $V = 2.0 \text{ m/min}$). (a) serial dual-beam welding; (b) parallel dual-beam welding; (c) single-beam laser welding

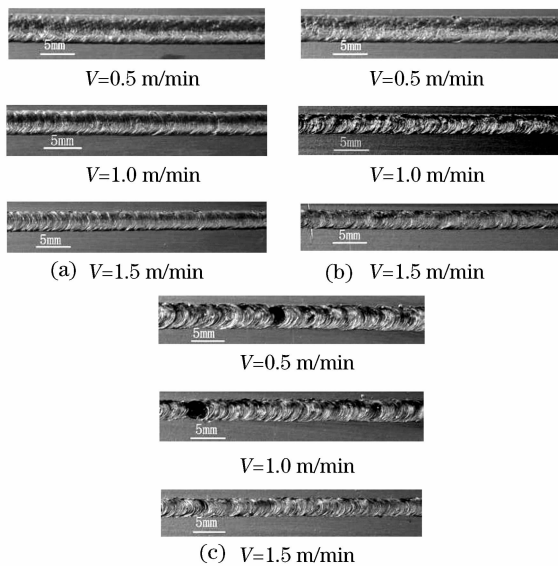


图 3 焊接速度对焊缝成形的影响。(a) 双光束串行焊接;(b) 双光束并行焊接;(c) 单光束焊接

Fig.3 Influence of welding speed on weld appearance ($P = 2200 \text{ W}$). (a) serial dual-beam welding; (b) parallel dual-beam welding; (c) single-beam welding
低,若双光束串行排列,获得的焊接熔深则与单光束焊接结果基本相同。

图 3 给出一组不同焊接速度下双光束串行、并行焊接与单光束焊接的焊缝表面照片。焊接速度的变化,意味着热输入与散热情况发生变化,匙孔内部金属蒸气的反作用力与匙孔的波动情况都会因此而发生改变。从结果可以看出,串行排列的双光束焊接对焊接速度,即热输入变化有较强的适应性,焊接

速度在 $0.5 \sim 1.5 \text{ m/min}$ 之间变化时,都可以获得较好的焊缝成形,不过焊缝中心会出现凹槽,主要是由于合金元素烧损所致,这往往是应力集中位置所在。双光束并行排列焊接虽然对焊接速度的变化适应性略逊,但是表面没有凹槽,且焊接过程中一般焊接速度与热输入大小不会随意更改,作者认为这一热输入方式最有利于焊缝表面成形的稳定性。相比而言,单光束焊接铝合金时,凹坑与不规则鱼鳞纹在焊接速度发生变化时常常出现,焊缝状态很不稳定。

从图 4 所示的熔池图像可以看出,与单光束焊接熔池相比,双光束焊接熔池更大,两束光形成的匙孔已基本连为一体,形成一个拉长的大匙孔,使得匙孔在剧烈的波动状态下不易坍塌,大大提高了焊接过程的稳定性。

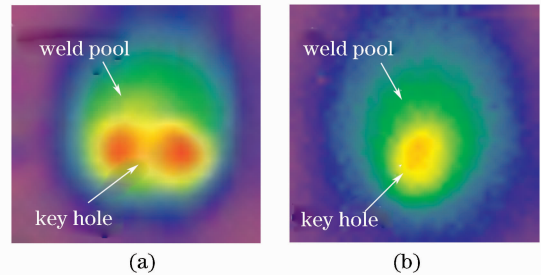


图 4 铝合金激光焊接熔池表面形态

(a) 双光束焊接 ($d_b = 0.6 \text{ mm}$);(b) 单光束焊接

Fig.4 Weld pool surface of aluminum alloy by laser welding. (a) dual-beam laser welding ($d_b = 0.6 \text{ mm}$); (b) single-beam laser welding

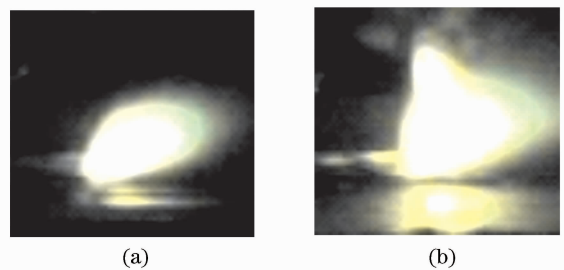


图 5 双光束、单光束焊接时的等离子体形态

(a) 双光束焊接;(b) 单光束焊接

Fig.5 Plasma shape in dual-beam and single-beam laser welding ($P = 2200 \text{ W}$, $V = 1.5 \text{ m/min}$). (a) dual-beam laser welding; (b) single-beam laser welding

与一般金属相比,铝合金焊接的等离子体较大,尤其采用 CO_2 激光焊接时,产生的等离子体尺寸更大于 YAG 激光。图 5 所示为双光束与单光束焊接铝合金时等离子体的形态变化。可以看出,双光束焊接可以获得比单束光焊接更小的等离子体,也就

是说,等离子体对激光的屏蔽作用要更小。单光束焊接时,虽然匙孔较小,但喷发出的等离子体尺寸较大,这是由于同等激光输出功率条件下,单光束的能量密度更高,使得熔池金属产生了更严重的蒸发与电离。一般我们更为关注的是焊接过程中等离子体的稳定性,等离子体越稳定,也就反应了焊接过程匙孔越稳定。

本文采用图像处理方法提取等离子体的轮廓尺寸,更精确地计算对比双光束、单光束的等离子体尺寸与稳定性。对焊接过程中1 s内获得的 25 幅连续变化的等离子体图像尺寸进行分析对比,首先采用图像处理方法从等离子体的原始图像进行灰度、滤波、二值化等处理,而后以统计等离子体图像的像素点方法计算等离子体面积,图 6 所示为双光束、单光束焊接1 s内的等离子体尺寸的变化情况。为更直接地反映等离子体尺寸的稳定性,本文同时采用面积方差(像素点)来计算图 6 中等离子体面积(像素点)的波动情况,面积方差越大,说明等离子体波动越大,计算结果如表 3 所示。

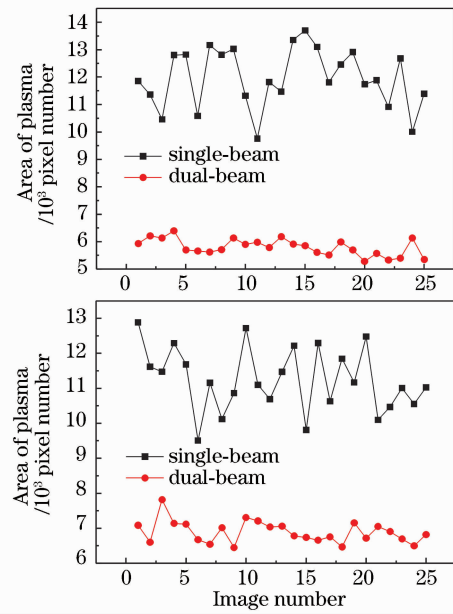


图 6 双光束、单光束焊接过程中等离子体尺寸的变化
Fig. 6 Variation of plasma size in dual-beam and single-beam welding process. (a) $V = 1.5$ m/min; (b) $V = 0.5$ m/min

表 3 等离子体面积方差(像素点)计算结果

Table 3 Calculation results of plasma area variance (pixel point)

Welding method	$V = 0.5$ m/min	$V = 1.0$ m/min	$V = 1.5$ m/min	$V = 2.0$ m/min	$V = 2.5$ m/min
Dual-beam welding	317.1	245.7	303.7	367.6	349.1
Single-beam welding	914.2	839.3	1082.0	827.0	784.1

表 4 铝合金激光焊接头的气孔含量

Tabel 4 Porosity content in aluminum alloy joints by laser welding

Welding method	Results of X-ray detection and image processing	$f/\%$	Grade
Serial dual-beam weeding (1400 W, 1.9 m/min)		0.2	B
Parallel dual-beam welding (1400 W, 1.5 m/min)		1.5	B
Single-beam welding (1300 W, 0.9 m/min)		5.1	C

B: $f \leq 3\%$; C: $3\% \leq f \leq 6\%$; D: $f \leq 10\%$ (B is the top class)

不难算出,单光束等离子体面积方差约为双光束焊接的 3~4 倍,尺寸约为双光束的 1.5~2 倍。

可见,双光束激光焊接铝合金,等离子体的稳定性明显高于单光束,采用双光束来增大匙孔尺寸使焊接

过程的稳定性得到了很大提高,而且降低了等离子体对激光的能量损耗。

4 接头气孔与强度

目前我国没有铝合金激光焊接接头质量评定的统一标准,本文参考“欧洲 ISO13919-2:2001 铝合金激光焊质量等级标准”对接头气孔含量进行了计算与比较。为更清晰观测焊缝中气孔的分布情况,对 X 射线拍摄到的焊缝气孔分布照片进行图像处理,并计算气孔百分比 f

$$f = \frac{\sum S_p}{S_w} \times 100\%, \quad (1)$$

式 S_p 为气孔总面积, S_w 为焊缝面积。

表 5 激光焊接铝合金接头拉伸强度与延伸率

Tabel 5 Tensile strength and elongation of aluminum alloy joints by laser welding

Welding method	Welding parameter	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fraction position
Serial dual-beam welding	1600 W, 1.8 m/min	314.6	8.906	Weld
	1600 W, 1.6 m/min	312.2	10.230	Weld
	2000 W, 2.2 m/min	321.3	7.919	Weld
Parallel dual-beam welding	1400 W, 1.0 m/min	328.9	12.52	Weld
	1400 W, 1.5 m/min	332.1	19.02	Weld
	2000 W, 3.5 m/min	343.6	14.68	Weld
Single-beam welding	1300 W, 0.9 m/min	306.5	10.219	Weld
	2200 W, 2.0 m/min	298.7	11.548	Weld
Base metal		350.9	24.43	—

拉伸试样的焊接接头均从焊缝熔合线附近发生正断型断裂,即宏观断面的取向与最大正应力相垂直,如图 7 所示。这也说明了熔合区附近是焊接接头中一个薄弱地带。

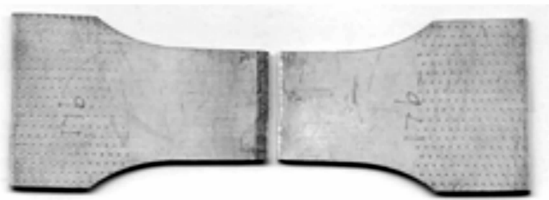


图 7 拉伸断裂的接头试样

Fig. 7 Joint sample with tensile fracture

5 结 论

1) 采用双光束焊接铝合金可以获得非常美观的焊缝成形,无飞溅、凹坑等缺陷,对焊接参数的适应性也比单光束更宽些。相比而言,双光束并行焊接对参数的适应性更好,但获得的焊缝熔深要浅些。

2) 当双光束同时作用于一个熔池并形成较大的匙孔时,同等能量输入条件下,焊接过程形成

不同光束模式下工艺优化后的焊接接头气孔测试结果如表 4 所示,测试选取焊缝长度为 35 mm。

从探伤测试结果可以看出,采用双光束焊接,焊缝中气孔含量远远低于单光束焊接结果。其中,采用串行排布的双光束进行焊接,焊缝内部的气孔寥寥无几,且尺寸很小。

选取 8 种不同参数下的试件进行拉伸试验,所选试件的参数及试验结果如表 5 所示。6 个双光束焊接试样的平均抗拉强度能达到母材的 92.7%,平均延伸率为母材的 50%,而且,双光束并行焊接接头的拉伸强度与延伸率都要高于串行焊接接头。而 2 个单光束焊接试样的平均抗拉强度只有母材的 86.2%,平均延伸率则为母材的 44.5%。

的等离子体尺寸要明显小于单光束焊接,而且等离子体的稳定性大大提高。

3) 采用双光束焊接铝合金可大大减少焊缝中的气孔,尤其是双光束并行焊接时,焊缝中的气孔百分比仅为 0.2%。双光束焊接铝合金获得的焊缝平均强度达母材的 92% 以上,平均延伸率为母材的 50%,双光束并行焊接的焊缝性能更加优越。

参 考 文 献

- 1 Chen Yanbin. Modern Laser Welding Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005. 88~90
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京:科学出版社, 2005. 88~90
- 2 Hong Lei, Wu Gang, Chen Wuzhu. Influence of shielding gas flow on welding quality for CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(11):1571~1576
洪蕾,吴钢,陈武柱. 保护气流对 CO₂ 激光焊铝合金的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(11):1571~1576
- 3 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun et al.. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(3):456~461
许良红,田志凌,彭云等. 高强铝合金的激光焊接头组织与力学性能[J]. 中国激光, 2008, 35(3):456~461
- 4 Fan Ding, Zhang Ruihua, K. Nakata. YAG laser welding with surface activating flux [J]. China Welding, 2003, 12(2):83~

- 86
- 5 Chen Yanbin, Li Liqun, Peng Xiaoyun. Joint performance in laser welding Al alloy with filler wire [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, **15**(Special. 2):87~91
- 6 Chen Kai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi. Laser welding of some aluminum alloys with powder [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(4):222~226
陈 铠,杨武雄,肖荣诗. 几种高强铝合金的激光填粉焊接[J]. *应用激光*, 2005, **25**(4):222~226
- 7 Yu Shurong, Fan Ding, Xiong Jinhui. CO₂ laser welding of tailored 5A02 aluminum alloy sheets with different thickness using filler powder [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(3):25~28
余淑荣,樊 丁,熊进辉. 铝合金 5A02 不等厚板的 CO₂ 激光填粉拼焊[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(3):25~28
- 8 Zuo Tiechuan. Laser Process for High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 189~190
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 189~190
- 9 Xiao Rongshi, Zuo Tichuan, G. Ambrosy. Investigation on current enhanced CO₂ laser welding of aluminum [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):359~362
肖荣诗,左铁钊,G. Ambrosy. 电流强化铝合金 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):359~362
- 10 F. Shigeki, O. Ryoji, K. Seiji. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system [C]. *SPIE*, 2003, **4831**:301~308
- 11 Zhang Xudong, Chen Wuzhu, Shuang Yuanqing. Coaxial hybrid CO₂ laser-MIG welding system and its application in welding of aluminum [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(1):1~3
张旭东,陈武柱,双元卿. CO₂ 激光-MIG 同轴复合焊方法及铝合金焊接的研究[J]. *应用激光*, 2005, **25**(1):1~3
- 12 Miao Yugang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Joint characteristics of laser-arc double sides welding for aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(12):85~88
苗玉刚,李俐群,陈彦宾 等. 铝合金激光-电弧双面焊接头特征分析[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(12):85~88
- 13 Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun *et al.*. Characteristics of laser-TIG double-side welding for aluminum alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1716~1720
陈彦宾,苗玉刚,李俐群 等. 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊接特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1716~1720
- 14 J. Xie. Dual beam laser welding [J]. *Welding Journal*, 2002, **81**(10):223~230
- 15 Y. N. Liu, E. Kannatey-Asibu Jr.. Finite element analysis of heat flow in dual-beam laser welded tailored blanks [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1998, **120**(5):272~278
- 16 A. Haboudou, P. Peyre, A. B. Vannes. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA 5083 aluminium alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **363**:40~52
- 17 I. Takakuni. Dual focus technique for high-power Nd:YAG welding aluminum alloys[C]. *SPIE*, 1999, **3888**:348~358