

文章编号: 0258-7025(2008)02-0297-06

CO₂ 激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制

祁俊峰 牛 振 张冬云 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 分析了船用铝合金 T 型材的特点, 提出激光焊接船用铝合金 T 型材的方法。采用 CO₂ 激光填丝焊接方法实现了 6.0 mm 厚船用 5083 铝合金 T 形构件角焊缝的焊接。在平板扫描焊接实验的基础上, 重点研究了激光束入射角度、作用位置及焊接速度与送丝速度的匹配关系对角焊缝成形的影响。针对 6.0 mm 的 5083 铝合金, 采用 Ar 和 He 混合保护气在激光功率为 3300~3500 W, 离焦量为 0 的情况下进行焊接。激光入射角度为 22°~25°, 激光作用于竖板距横板 0.8~1.0 mm 处, 焊接速度 2.2~2.5 m/min, 送丝速度 2.5~2.8 m/min 的条件下, 能够得到满意的角焊缝成形。同时, 讨论了船用铝合金 T 型材 CO₂ 激光焊接过程中产生气孔和过程不稳定的原因。

关键词 激光技术; 焊接; 铝合金; T 形接头

中图分类号 TN 249; TG 456.7 **文献标识码** A

Control of Shaping of Welds for CO₂ Laser Welding Shipbuilding T-Section Aluminum Alloy

Qi Junfeng Niu Zhen Zhang Dongyun Zuo Tiechuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Characteristics of shipbuilding T-section aluminum alloy have been analyzed. The method of laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy has been put forward. Fillet welds of 6.0 mm thick 5083 aluminum alloy T-joints have been completed through laser beam welding with wire filler material. Based on plate welding, the influences of laser beam incident angle, working position and relationship between welding speed and wire feeding speed on shaping of welds have been studied. On the condition of 3300~3500W laser power, 0 mm defocusing length, Ar and He blending shield gas, 22°~25° laser incident angle, 0.8~1.0 mm from laser working position to the cross plate, 2.2~2.5 m/min welding speed and 2.5~2.8 m/min wire feeding speed, satisfied weld shape can be achieved. The reasons of porosities production and process instability in CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy are also discussed.

Key words laser technique; welding; aluminum alloy; T-joints

1 引 言

铝合金具有比重和弹性模量小、耐腐蚀、可焊接、易加工、无磁性和低温性能好等特点, 用于造船工业能够带来巨大收益。铝合金舰船的设计和建造需要使用大量型材, 目前广泛使用的型材主要是 T 形挤压型材, 主要用作甲板、壳板和舱室的加强板。这种 T 形型材的制造方法是通过大型挤压设备对预制铝合金坯材的挤压, 使其发生塑性变形, 从而得

到 T 形构件。这种方法一般只适用于厚度小于 4 mm 的薄壁 T 形构件的成型, 随着构件厚度的增加对挤压设备的性能要求甚高, 无法实现挤压成型。此外, 这种方法一般适用于热处理强化铝合金(如 6000 系铝合金)的成型, 对于中等厚度的变形铝合金(如 5000 系铝合金), 由于随着变形量的增加材料抵抗变形的能力显著提高, 使得其塑性成形难度增加^[1]。此外, 制造船舶的骨架 T 形构件一般要比挤

收稿日期: 2007-05-21; 收到修改稿日期: 2007-09-06

作者简介: 祁俊峰(1979—), 男, 蒙古族, 内蒙古人, 博士研究生, 主要从事轻合金及特殊材料的激光加工技术研究。

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

导师简介: 左铁钊(1941—), 女, 湖北人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程材料的激光加工及工业大功率激光器的开发研究工作。E-mail: nclt@bjut.edu.cn

压型材大,工厂通常用板材制造这类构件,在制造这种构件时,需要大量的人力,包括固定、定位,还要进行半自动或手工氩弧焊方法焊接。这种情况下,焊接过程主要通过填充金属增加角焊缝的焊脚高度来提高焊缝的连接强度,由于焊缝熔深不足而单道焊缝无法完全熔透对缝的全部缝隙,只有通过增开坡口和多道焊的方法才能实现,因此这种方法焊接而成的 T 形型材变形量大,尺寸难于保证,接头性能差,且针对不同结构的适用性差。

随着激光器输出功率、光束质量的不断发展,利用激光焊接船用铝合金中厚板(4.0~8.0 mm)已成为可能,为激光技术在造船业中的应用开拓了新的领域^[2,3]。本文采用板条 CO₂ 激光器,通过研究激光束入射角度、作用位置对焊缝成形的影响,以及焊接速度与送丝速度的匹配问题,实现了 6.0 mm 厚度

的船用 5083 铝合金 T 型材的角焊缝焊接。

2 实验材料、设备及方法

实验材料为 5083 铝镁合金,供货状态为 H321。这种合金不仅具有良好的机械性能,较高的抗疲劳强度和良好的冷热加工工艺性能等,更重要的是具有优良的耐海水腐蚀性能和焊接性。填充材料为含 Zr 的 ER5183 铝合金焊丝,直径 1.2 mm。材料成分如表 1 所示。试样尺寸为:横板 1000 mm × 100 mm,竖板 1000 mm × 60 mm,厚度均为 6.0 mm。焊接前,首先用 320[#] 砂纸打磨待焊边缘和端面,去除距边缘 10 mm 范围内的氧化膜;然后用毡轮打磨待焊边缘,去除砂纸打磨过程中残留的砂粒及污物;最后焊接前 30 min 用丙酮擦洗待焊部位,去除油污。

表 1 5083 铝合金及填充焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 5083 alloy and filler material (mass fraction)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Else	Al
5083	0.4	0.4	0.1	0.4~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	—	0.15	0.20	Bal.
ER5183	0.25	0.40	0.05	0.7~1.1	4.5~5.2	—	0.25	0.05~0.15	0.15	0.15	Bal.

实验采用德国 Rofin-Sinar 公司生产的扩散冷却板条 CO₂ 激光器,为射频(RF)激励,输出的 CO₂ 激光束经整形变为圆对称的光束,由导光系统传输到加工位置,经无氧铜抛物面反射镜聚焦。最大输出功率为 3500 W,光束模式为近 TEM₀₀ 模,光束直径 17 mm,光束聚焦特征参数 $K_f = 3.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,采用焦距为 300 mm 的铜抛物镜聚焦,焦斑直径为 0.26 mm,光束发散角为 52.01 mrad(全角),焦深为

5.00 mm,光束质量因子 M^2 为 1.01。

采用激光填丝焊接方法分别实现船用铝合金 T 形接头两侧角焊缝的焊接,焊接方法示意图如图 1 所示。试样无需开坡口,激光束与横板成 10°~45° 角度倾斜入射,焊丝、激光束和喷嘴在同一平面内互成 30°~60° 布置,激光束与工件的作用点位于竖板上,且与横板上表面存在偏移量。

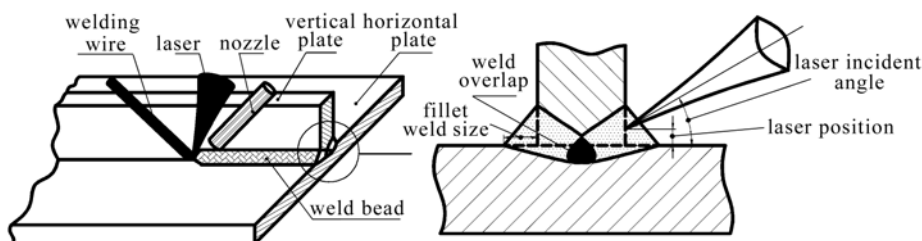


图 1 船用铝合金 T 型材激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser welding aluminum alloy T joints

3 实验结果及分析

在平板扫描焊接实验的基础上,考察激光功率、焊接速度、送丝速度及工作气体对焊缝成形的影响,得出 CO₂ 激光填丝焊接工艺参数如表 2 所示,焊缝表面及横截面见图 2。

3.1 激光束入射角度对焊缝成形的影响

由于激光深熔焊缝的深宽比大,图 2 所示接头

的深宽比大于 2.2,因此焊缝的侧面熔合能力不强,对于板材厚度较大(3 mm 以上)的 T 形接头角焊缝而言,激光束入射角度(激光束与横板间夹角)的变化对焊缝能否焊透具有重要影响。图 3 为激光束作用于接缝处,在不同入射角度下得到的焊缝横截面成形。随着激光与横板间夹角的减小,角焊缝的有效连接面积增加,而焊缝的有效连接面积在一定程

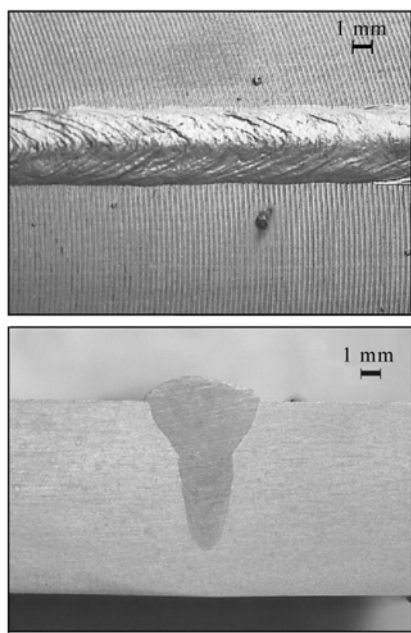


图 2 表 2 工艺条件下得到的焊缝成形
Fig. 2 Weld shape on the condition of Table 2

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Laser welding parameters

Power /W	3500
Welding speed /(m/min)	3.0~3.5
Wire feeding speed /(m/min)	1.8~2.0
Working gas	He+Ar
The flow rate of working gas /min ⁻¹	15+3
Focal position	On the vertical plate, 3 mm from the surface of cross plate

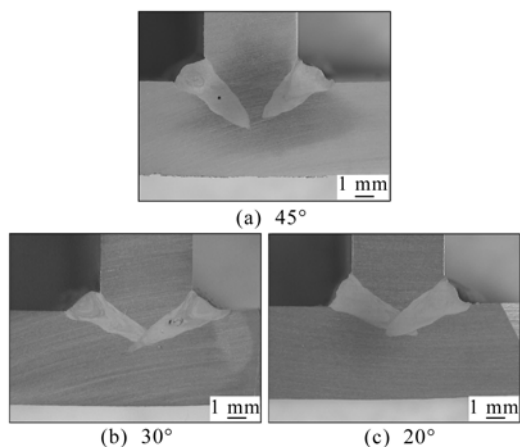


图 3 激光入射角度对焊缝成形的影响
Fig. 3 Influence of laser incident angles on formation of weld

度上决定了接头的强度。图 4 为两板间未熔透部分长度随激光入射角度的变化情况。可见,当激光入射角度为 15°时,两板间未熔透部分长度已小于

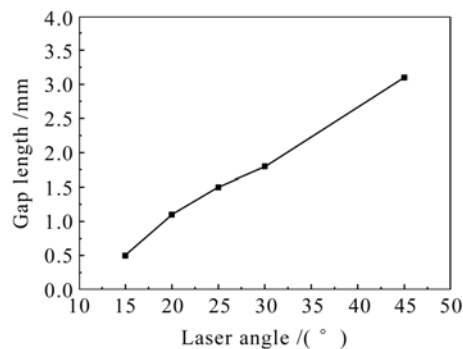


图 4 两板间未熔透部分长度随激光入射角度的变化
Fig. 4 Relationship between laser incident angle and gap length of two plates

0.5 mm,但由于激光入射角度太小,焊接加工头的合理布置受到空间的制约,同时深熔小孔倾斜角度太大,导致焊接过程稳定性下降。

3.2 激光束作用位置对焊缝成形的影响

从空间限制及焊接效果来看,激光入射角度不能太小,因此在确定激光入射角度的基础上,通过调节激光束与工件的作用位置,也可以增加焊缝的有效连接面积。图 5 为入射角度为 25°,激光束偏向竖板 0.5 mm,0.8 mm 和 1.2 mm 时,焊缝的横截面成形,可见两板间的间隙基本上被完全熔合。实验过程中发现,激光作用于竖板上,有利于焊接过程稳定性的提高。这主要是由于当激光作用于对缝处时,试样边缘几何尺寸的变化会引起深熔小孔状态波动^[4],从而使焊缝成形质量变差,甚至无法形成连续焊缝。但是,激光束偏移量不能太大,由于深熔焊缝熔宽不大(约为 2.8~3.2 mm),若作用点偏移量较大,则会导致角焊缝焊脚尺寸不对称,甚至在横板一侧形成咬边缺陷,如图 5(c)所示。

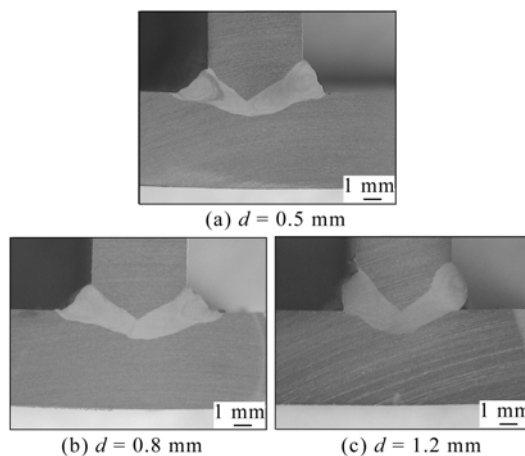


图 5 激光束作用位置对焊缝成形的影响
Fig. 5 Influence of laser working positions on formation of weld

3.3 送丝速度与焊接速度的关系

送丝速度与焊接速度的匹配问题,一方面影响焊缝成形质量,另一方面决定了角焊缝焊脚的长度。通过实验,在功率为3500 W,离焦量为0,工作气体为 He 和 Ar,通过速率分别为15 L/min和3 L/min,激光作用于竖板上距横板上表面0.8 mm条件下,得到焊接速度和送丝速度与焊缝表面成形质量的关系,如图6所示。在保证焊缝熔深的前提下,确定焊接速度为2.2~2.5 m/min,得到送丝速度对焊脚长度的影响如图7所示。在优化焊接速度和送丝速度的基础上,得到 T形角焊缝激光填丝焊接试样及焊缝表面,见图8。

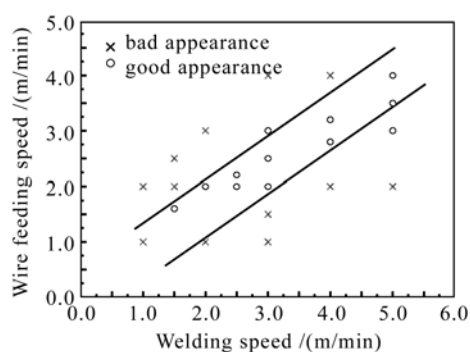


图6 焊接速度和送丝速度与焊缝表面成形质量的关系

Fig. 6 Relationship between welding speed, wire feeding speed and weld appearance

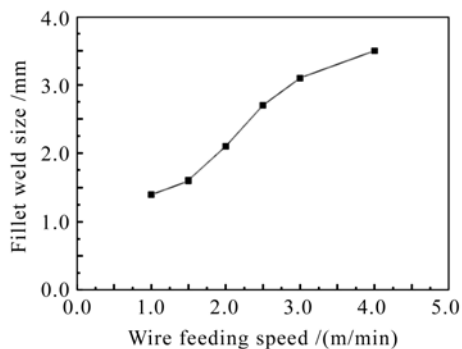


图7 送丝速度对焊脚尺寸的影响

Fig. 7 Influence of wire feeding speed on fillet weld size

4 讨论和分析

在平板扫描焊接实验得出的激光填丝焊接工艺参数基础上,通过调节激光入射角度、作用位置以及焊接速度与送丝速度的匹配关系,能够有效控制船用铝合金 T型材的角焊缝成形。但是,仍然存在有待进一步解决的问题。

一方面焊接气孔是铝合金 T形接头激光焊接过程中所需要解决的主要问题,如图9所示。气孔

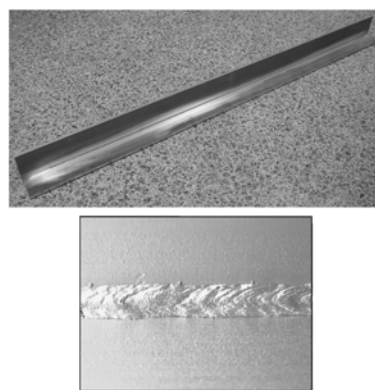


图8 T形焊接试样及焊缝表面成形

Fig. 8 T-joint sample and weld appearance

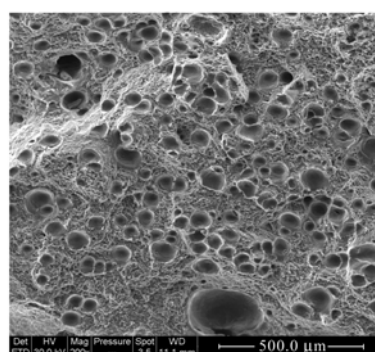


图9 焊缝中的气孔

Fig. 9 Porosities in welds

的来源有:过饱和氢的自发形成;环境气体的卷入;低沸点合金元素(Mg)的烧损;深熔小孔的不稳定性。前两者可以通过对焊接材料的严格清洗和熔池的有效保护得到一定程度的抑制。低沸点合金元素的烧损,特别是 Mg 元素,其沸点为1107 °C,焊接过程中深熔小孔中的 Mg 蒸气可能残存于高温液态熔池,在随后的快速冷却过程中液态金属来不及填充,形成气孔。通过对高 Mg 含量铝合金焊后气孔壁的能谱分析可以证实气孔壁上 Mg 平均含量要高于焊缝。

在激光焊接过程中,深熔小孔的存在是不断波动变化的过程,J. Kroos 等^[5,6]通过求解深熔小孔压力平衡和能量平衡方程,计算得到表面张力、蒸气压力和小孔半径的变化关系,如图10所示。图中横坐标为匙孔半径 a 与聚焦光斑半径 r_0 的比值,纵坐标为匙孔压力 P ,大气压 P_0 之和与大气压的比值。由图可见,表面张力项和蒸气压力项有两个解,一个在较小的匙孔直径处 A 点,另一个在较大的匙孔直径处 B 点。进入匙孔的激光功率先是随着匙孔半径的增加而增加,对于高斯光束,随着半径的进一步增加功率趋于饱和,结果吸收的能量和蒸气压力达到

最大。蒸气压力和表面张力的交点决定匙孔半径的平衡值。对于 A 点左边,表面张力大于蒸气压力,匙孔的半径减小,容易导致匙孔塌陷;在 A 点右侧,蒸气压力超过表面张力,匙孔将持续扩大,一直到 B 点,这个过程是稳定状态;同样,B 点左侧蒸气压力大于表面张力,匙孔半径将增大,右侧小于表面张力,匙孔半径减小,当蒸气压力不足以维持匙孔时,焊接过程由深熔焊过渡到热导焊。因此,B 点是相对稳定的,而 A 点则始终处于不稳定状态,即匙孔的末梢极不稳定,容易塌陷产生气孔。

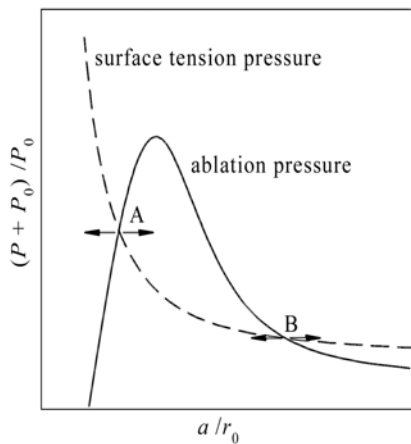


图 10 蒸气压力及表面张力与匙孔半径关系示意图

Fig. 10 Sketch of relationship between ablation, surface tension pressure and radius of keyhole

对于船用铝合金 T 形接头的焊接,这类气孔更容易出现,这是因为 T 形接头焊接过程中,激光束与横板夹角较小,液态熔池金属的受力状态与平焊相比更容易形成小孔的塌陷闭合,并且由于熔池的空间位置与平焊不同,也不利于焊接过程中熔池内气体的逸出;同时由于两板间或多或少必然存在一定的间隙,导致熔池中的液态金属在存在间隙的地方得不到四周固态金属的支撑,在小孔内的金属蒸气压力和等离子体压力的作用下,液态金属势必向间隙处流动,从而破坏了小孔内压力的平衡^[7,8],导致小孔闭合形成较大的孔洞。图 11 为由间隙引起焊缝中产生气孔过程的示意图。因此,对船用铝合金 T 型材的激光焊接而言,要求在满足完全熔透的条件下激光入射角度尽可能大,这样既有利于减少气孔又能够提高焊接过程稳定性。此外,实验过程中发现当激光束作用在对缝处时,要比作用在竖板上更容易产生气孔。这是由于当激光束作用在对缝处时,光束作用位置会因为试样边缘尺寸的变化而发生变化,有时作用在横板上,有时作用在竖板上,导

致焊接过程稳定性下降而产生孔洞。通过合理调节激光焊接工艺参数(如工作气体配比、焊接速度等)虽然能在一定程度上减少产生气孔的数量和大小,但尚无法完全避免气孔的产生,更为有效的控制方法有待进一步研究。

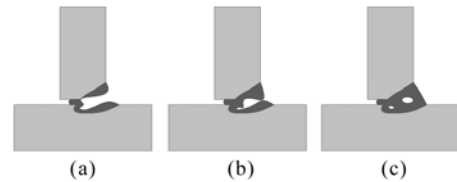


图 11 小孔塌陷形成气孔的过程示意图

Fig. 11 Schematic of porosities produced by key-hole collapse

另一方面是船用铝合金 T 形构件角焊缝 CO₂ 激光焊接过程的稳定性问题。CO₂ 激光深熔焊接过程中伴随产生的光致等离子体的状态和行为对焊接过程的稳定性有重要影响。如果等离子体控制得不好,会直接导致焊缝表面成形变差,甚至中断焊接过程。文献[2~4,9,10]报道了采用侧吹 He 和 Ar 以压缩和稀释等离子体,从而有效控制等离子体的方法。在 T 形构件角焊缝的焊接过程中,由于试板对气体有拘束作用,有利于压缩等离子体的体积;同时激光倾斜入射,使得光致等离子体爆发波的传播方向与入射激光不同轴,将减小等离子体对激光的负面作用。这种情况下,会造成等离子体对熔池表面的附加热效应减少,焊缝深宽比增加,侧面熔合能力减弱,对间隙的敏感性增加。通过实验得到 5083 铝合金激光填丝平板对接焊的间隙允许量 d 为:板厚 4.0 mm 时, $d \leq 0.3$ mm;板厚 6.0 mm 时, $d \leq 0.5$ mm。因此,焊前对试样边缘必须进行严格处理,最好进行机加工,或者等离子切割后使用自动砂轮机打磨平整,从而保证焊接过程的稳定进行。

5 结 论

1) 采用 CO₂ 激光填丝焊接方法,实现了 6 mm 厚度 5083 船用铝合金 T 形构件的角焊缝焊接;

2) 激光束入射角度、作用位置及焊接速度与送丝速度的匹配对 T 形构件角焊缝成形影响重大,在优化参数下,对 6 mm 厚的板材进行焊接,能够得到满意的焊缝成形。

3) 焊缝气孔是铝合金 T 形接头激光焊接存在的主要问题,由 T 形接头焊接过程中小孔和熔池的特殊受力状态及两板间的间隙引起。

参 考 文 献

- 1 Guo Zeliang. Applications of laser welding in shipbuilding industry [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, **27**(4):81~84
郭泽亮. 激光焊接技术在舰船建造中的应用[J]. 舰船科学技术, 2005, **27**(4):81~84
- 2 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 103~110
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2001. 103~110
- 3 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Current situation of laser welding of high strength aluminum alloy in T-joint [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(4):77~78
张盛海,陈 铠,肖荣诗等. 高强铝合金 T 型接头激光焊接的研究现状[J]. 激光杂志, 2005, **26**(4):77~78
- 4 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**(Suppl.):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**(增刊):439~444
- 5 J. Kroos, U. Gratzke, G. Simon. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**(3):474~480
- 6 J. Kroos, U. Gratzke, M. Vicanek *et al.*. Dynamic behaviour of the keyhole in laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**(3):481~486
- 7 W. A. Sudnik, V. A. Erofeev. Computational simulation of laser fillet and tailored blank welding [C]. *SPIE*, 2006, **6053**:605315-1~605315-9
- 8 G. Casalino, F. Curcio, A. D. Ludovico *et al.*. FEM simulation of metal sheets laser welding with wire filler material [C]. *SPIE*, 2005, **5958**:59581V-1~59581V-11
- 9 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 激光焊接铝合金的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(11):1571~1576
- 10 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. High power CO₂ laser powder of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):714~718
张盛海,陈 铠,肖荣诗等. 铝合金高功率 CO₂ 激光粉末焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):714~718