

# 薄板铝合金光纤激光压焊坡口内材料的熔化行为

和 岳, 武 强, 邹江林\*, 哈 纳, 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

**摘要** 利用光纤激光扫描焊接铝合金 V 型坡口, 研究了坡口角度、透镜焦距、离焦量等对坡口内材料熔化行为的影响。结果表明, V 型坡口对光纤激光具有明显的汇聚作用。当焦距为 300 mm、离焦量为 0~10 mm、坡口角度为 5° 时, 坡口内可获得较好的熔化效果。进一步分析表明, 这与铝对光纤激光在布儒斯特角处的吸收率不高有关, 但由于每次反射会损失部分激光能量, 因此光纤激光在 V 型坡口内的反射次数不宜过多。

**关键词** 激光技术; 激光压焊; 反射; 吸收; 熔化

**中图分类号** TN249; TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0602008

## Melting Behavior of Materials in Grooves During Fiber Laser Pressure Welding of Thin-Sheet Aluminum Alloy

He Yue, Wu Qiang, Zou Jianglin, Ha Na, Xiao Rongshi

*High-power and Ultrafast Laser Manufacturing Lab, Institute of Laser Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** The effects of groove angle, focal length of lens and defocusing amount on the melting behavior of the materials in the grooves are studied by utilizing the fiber laser to scan and weld aluminum alloy V-grooves. The results show that the V-groove can focus fiber laser apparently, and the better melting effect in grooves can be obtained when the focal length is 300 mm, the defocusing amount is 0~10 mm, and the incident angle is 5°. Further analysis demonstrates that, this is attributed to the low absorptivity of aluminum to fiber laser at the Brewster angle. In addition, because of the energy losing for each laser reflection, the overmuch number of reflection of fiber laser in V-grooves is inappropriate.

**Key words** laser technique; laser pressure welding; reflection; absorption; melting

**OCIS codes** 140.3390; 060.2310; 350.3850

## 1 引 言

铝合金具有比强度高、比模量高、断裂韧度高、疲劳强度高、耐腐蚀性好等优点, 已被广泛应用于航空航天、车辆、船舶等领域<sup>[1]</sup>。与其他焊接技术相比, 激光焊接技术具有能量密度高、热输入量小、焊缝深宽比大、焊接速度快, 以及易于实现自动化控制等优点, 因此其可实现铝合金结构的高效率、高质量连接<sup>[2-3]</sup>。然而, 由于铝合金具有热导率高、熔池表面张力系数低、高温下强度与塑性低等特点, 采用激光焊接铝合金依然存在接头软化、气孔多, 以及易产生焊接热裂纹、热应力变形等传统焊接中存在的问题<sup>[4-6]</sup>。因此, 研究一种合适的铝合金激光焊接方法, 对进一步提高铝合金在航空航天、车辆、船舶等领域中的应用具有重要意义。

Behler 等<sup>[7]</sup>将垂直线偏振激光照射到两块金属材料组成的 V 型坡口内, 利用金属材料对垂直线偏振光的高反射率, 将激光导向焊接区, 并增加激光的能量密度来熔化板材, 在压力的作用下实现了板材连接。左

收稿日期: 2017-02-16; 收到修改稿日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(51475011 和 51505011)

作者简介: 和 岳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接过程检测方面的研究。E-mail: godishy@gmail.com

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zoujianglin1@163.com

铁钼<sup>[8]</sup>利用同样的原理进行了垂直线偏振 CO<sub>2</sub> 激光铝合金薄带的激光压焊实验,结果表明铝合金仅有表面极薄层金属在激光的作用下熔化,该方法极大地提高了激光能量的利用率和焊接效率,进一步降低了热输入量,并减少了焊接气孔、热应力变形及热裂纹等缺陷。Nishimoto 等<sup>[9-11]</sup>利用非偏振的 Nd:YAG 激光实现了钢与铝合金的异种金属激光压焊,并发现压焊接头强度可高于母材的。因此,采用激光压力焊接铝合金,有望解决铝合金激光焊接中存在的多种问题。

目前,国内外对于激光压焊的研究鲜有报道。相比于 CO<sub>2</sub> 激光和 Nd:YAG 激光,高功率光纤激光具有更大的连续输出功率、高电光转化效率、低运行成本、高光束质量等优点,并且可以通过光纤传输,加工柔性好<sup>[12-14]</sup>。本文采用光纤激光焊接预置的纯铝 V 型坡口,研究压焊坡口角度、透镜焦距、离焦量等对 V 型坡口内材料熔化行为的影响规律。

## 2 实验材料与方法

为了简化理论计算过程,实验材料选用 A1060 工业纯铝,其中铝的质量分数为 99.6%,试样尺寸为 50 mm×30 mm×1 mm。焊前使用 NaOH 溶液去除试样表面的氧化膜,焊接中两片铝组成 V 型坡口。实验中光轴中心与坡口中心重合,实验示意图如图 1 所示。美国 IPG 公司生产的 YLS-6000 光纤激光器的波长为 1070 nm,额定功率为 6 kW,采用芯径为 200 μm 的光纤传输,输出耦合准直镜焦距为 200 mm。输出激光的偏振态为随机线偏振光(等效为非偏振光)。实验中采用的聚焦镜焦距为 200,250,300 mm 三种,聚焦后获得光斑半径分别为 0.102,0.110,0.154 mm;瑞利长度分别为 1.38,1.73,3.07 mm;聚焦光束的发散角分别为 3.2°,2.5°和 1.7°。

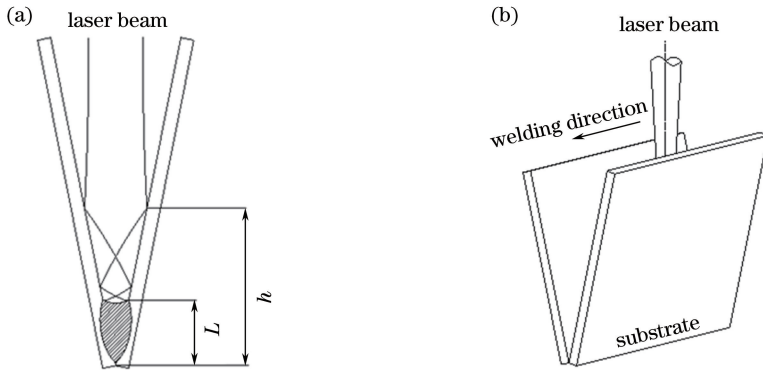


图 1 V 型坡口扫描焊接示意图。(a)坡口内光束反射示意图;(b)三维示意图

Fig. 1 Schematic diagram of V-groove scanning and welding. (a) Schematic diagram of beam reflection in V-groove; (b) three-dimensional diagram

实验中激光输出功率为 1.5 kW,焊接速度为 10 m/min,可变参数为 V 型坡口的角度、激光束的离焦量以及光路系统中聚焦透镜的焦距。定义坡口内激光焦点光斑边缘与坡口两侧刚好接触时为离焦量为 0,焦点位于该接触面的下方为负离焦,反之为正离焦。采用日本 PHOTRON 公司生产的 Fastcam 1024R2 高速摄像在坡口前方观察坡口内的羽辉形貌,采集帧数设置为 2000 frame/s。焊后接头横向切割取样,制备金相试样,化学腐蚀后采用日本 OLYMPUS 公司生产的 GX51 光学显微镜观察焊缝形貌,并对熔化长度  $L$  (坡口内熔化区域在光束方向上的长度)以及熔化面积进行测量。实验中每个参数重复三次,并取平均值。实验中,入射光束第一次接触坡口处的宽度等于光束直径,因此有:

$$h = \frac{r}{\tan(\theta/2)}, \quad (1)$$

$$r = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}, \quad (2)$$

式中坡口深度  $h$  为光束第一次接触坡口处时平面距坡口顶端在光束方向上的长度, $r$  为激光第一次接触坡口处的光斑半径, $\theta$  为坡口角度, $r_0$  为光斑焦点半径, $Z_R$  为光束瑞利长度, $z$  为离焦量。坡口深度  $h$  与实验测

得熔化长度  $L$  相减即为激光到达熔化位置时,激光在坡口内反射的距离。根据几何光学原理,结合光束的发散角、坡口角度及离焦量,算得光斑边缘光线达到熔化位置的反射次数。考虑到整个光斑面积中,不同区域反射的次数(光斑边缘光线反射次数最多,而光斑中心光线直接达到熔化位置、不经过反射),计算每次反射激光能量衰减时,均考虑光线入射角的变化和该角度对应的吸收率。

### 3 实验结果

#### 3.1 V型坡口对材料熔化的增强作用

设定坡口角度为  $10^\circ$ ,离焦量为 0,聚焦镜焦距为 300 mm,在 V 型坡口和单边坡口(单边坡口焊接时,整个光斑均作用在铝板上)条件下进行对比焊接实验,获得结果如图 2 所示。可见 V 型坡口内可发现明亮的羽辉,坡口顶端出现了明显的熔化现象。然而,以同样参数作用于单边坡口上,坡口内既没有羽辉产生,也没有发现明显的熔化迹象。该现象表明 V 型坡口的形成确实有助于激光能量的汇聚。

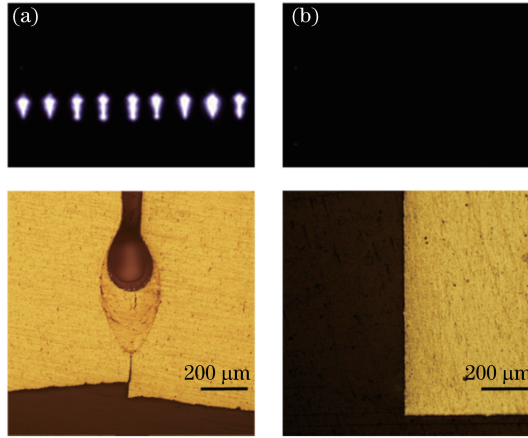


图 2 不同坡口形式下的羽辉及焊缝形貌。(a) V 型坡口;(b) 单边

Fig. 2 Plumes and weld appearance under different groove types. (a) V-groove; (b) single side

#### 3.2 坡口角度对熔化面积的影响

离焦量为 0,聚焦镜焦距为 300 mm。当坡口角度为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时,不同坡口角度下焊缝形貌如图 3 所示。可见在坡口顶端,铝均出现了不同程度的熔化。沿光束方向,横截面形貌为长条形。

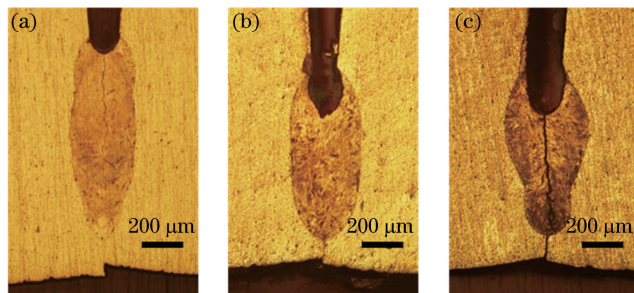


图 3 不同坡口角度下的焊缝形貌。(a)  $5^\circ$ ;(b)  $10^\circ$ ;(c)  $15^\circ$

Fig. 3 Weld appearance under different groove angles. (a)  $5^\circ$ ; (b)  $10^\circ$ ; (c)  $15^\circ$

测得该参数下坡口内材料的熔化面积和熔化长度随坡口角度的变化规律如图 4 所示。可见当坡口角度为  $5^\circ$  时,坡口顶端熔化面积为  $0.364 \text{ mm}^2$ ;坡口角度为  $10^\circ$  时,熔化面积为  $0.345 \text{ mm}^2$ ;而当坡口角度为  $15^\circ$  时,熔化面积为  $0.295 \text{ mm}^2$ 。即随着坡口角度的增加,熔化面积呈现出逐渐减小的趋势。熔化长度随着坡口角度的增加,从 1.28 mm 降低到 0.91 mm,呈现出与熔化面积相同的变化规律。

#### 3.3 离焦量对熔化面积的影响

当坡口角度为  $10^\circ$ 、聚焦镜焦距为 300 mm 时,熔化面积和熔化长度随离焦量的变化规律如图 5 所示。可见离焦量从  $-10 \text{ mm}$  增加到  $+15 \text{ mm}$  时,熔化面积呈现出先增大后减小的趋势。当离焦量为  $+5 \text{ mm}$

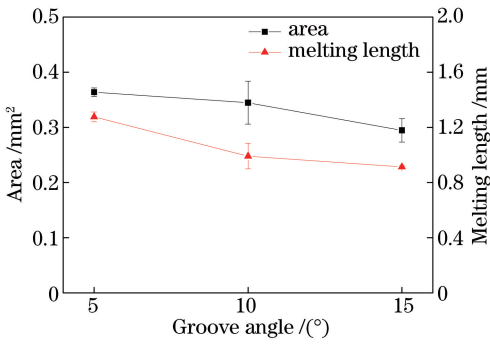


图 4 坡口角度对熔化面积及熔化长度的影响  
Fig. 4 Influence of groove angle on melting area and melting length

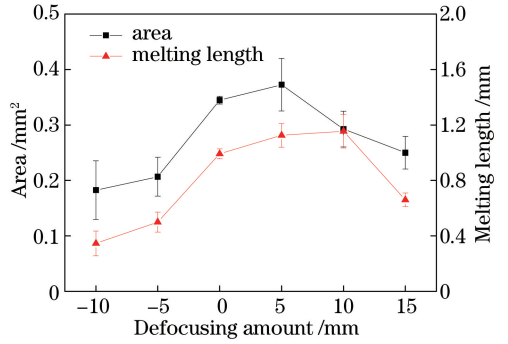


图 5 离焦量对熔化面积及熔化长度的影响  
Fig. 5 Influence of defocusing amount on melting area and melting length

时,试样熔化面积最大,为  $0.373 \text{ mm}^2$ ,表明此时激光能量的耦合效率最高。此外,随着离焦量的变化,熔化长度与熔化面积的变化规律大致相同。

### 3.4 透镜焦距对熔化面积的影响

设定坡口角度为  $10^\circ$ ,采用不同聚焦镜进行实验,研究光束的聚焦情况(光束发散角)对坡口内熔化面积的影响规律。为了保证初始功率密度一致,使三种不同聚焦镜下入射坡口内的初始光斑面积相同,即  $300 \text{ mm}$  聚焦镜下焊接时为零离焦,  $250 \text{ mm}$  聚焦镜下采用  $+1.4 \text{ mm}$  离焦量,  $200 \text{ mm}$  聚焦镜下采用  $+1.6 \text{ mm}$  离焦量。实验获得的熔化面积及熔化长度随焦距的变化规律如图 6 所示。可见随着透镜焦距的增加,熔化长度和熔化面积依然表现出相同的趋势,均随着焦距的增加而逐渐增大。其中,当使用  $300 \text{ mm}$  聚焦镜时,熔化面积为  $0.345 \text{ mm}^2$ ;采用  $250 \text{ mm}$  聚焦镜时熔化面积为  $0.309 \text{ mm}^2$ ;采用  $200 \text{ mm}$  聚焦镜时熔化面积最小,为  $0.225 \text{ mm}^2$ 。

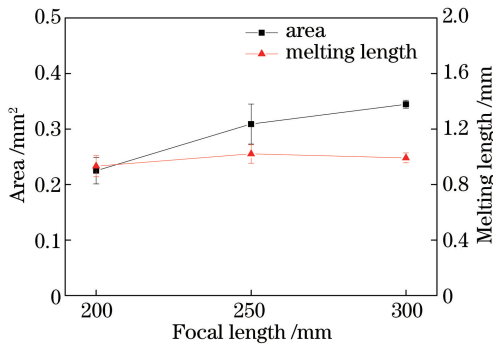


图 6 透镜焦距对熔化面积及熔化长度的影响  
Fig. 6 Influence of lens focal length on melting area and melting length

## 4 分析与讨论

在不形成 V 型坡口的单边试样上,激光只在试样上作用一次,并且斜入射的激光在坡口上的作用面积远大于光斑面积,即这种条件下激光的功率密度很低,并低于铝的熔化阈值,故板材没有出现熔化现象。而在 V 型坡口中,经过一侧高反射率铝试样反射的激光又会作用到另一侧的试样上,这样激光与材料发生多次反射作用,激光向坡口内传输,经过数次叠加可极大提高激光的功率密度,如图 7 所示。这就导致了坡口内的激光功率密度较初始入射时的得到大幅度提高,故当功率密度大于铝的熔化阈值时,坡口内便出现了熔化现象。

作用于 V 型坡口内的激光存在较大的入射角,因此计算每次反射损失的激光能量时必须考虑到吸收率随入射角度的变化。由金属对光的吸收率与入射角的关系以及室温下纯铝的物理参数<sup>[15]</sup>,可以算出室温下铝对光纤激光的吸收率随入射角的变化规律如图 8 所示。可见使用随机线偏振(等效于非偏振激光)的光纤激光作用于材料表面时,纯铝的布儒斯特角为  $84.3^\circ$ ,此时的吸收率最大,为  $12.3\%$ 。

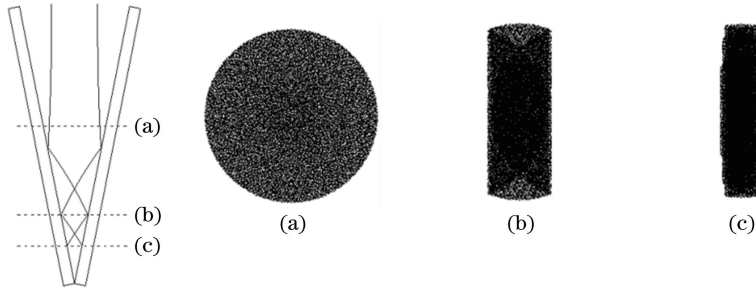


图 7 多次反射后激光功率密度分布示意图, (a) 0 次反射; (b) 1 次反射; (c) 2 次反射

Fig. 7 Schematic diagram of laser power density distribution after multiple reflection. (a) Non-reflection; (b) single reflection; (c) double reflections

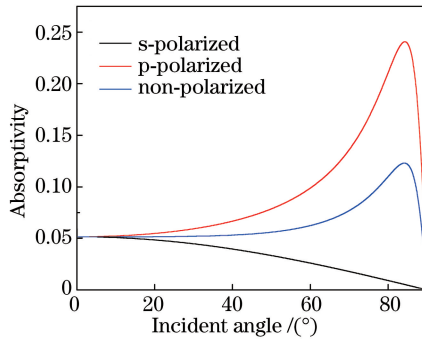


图 8 室温下纯铝对光纤激光的吸收率随入射角变化规律

Fig. 8 Fiber laser absorptivity versus incident angle at room temperature

采用 5°、10°和 15°三种坡口角度时,根据前文方法算得光斑边缘光束均仅反射一次便达到熔化位置。考虑不同坡口角度对应坡口侧壁对入射激光的吸收率不同,并近似认为光束能量为平均分布,结合光束在坡口内传输到熔化区域的距离,可确定整个光斑中发生一次反射的区域。结合图 8 计算获得 5°、10°和 15°三种坡口角度下,激光到达熔化位置后还剩余的激光能量:坡口角度为 5°时,激光入射角为 87.5°,对应吸收率为 9.29%,激光能量剩余 1.42 kW;坡口角度为 10°时,激光入射角为 85°,对应吸收率为 12.3%,激光能量剩余 1.39 kW;坡口角度为 15°时,激光入射角为 82.5°对应吸收率为 11.98%,激光能量剩余 1.39 kW。可见坡口角度越小,传输中消耗的激光功率也越小。然而,不同坡口角度下熔化位置的宽度是不同的,算得 5°、10°和 15°三个角度对应的剩余功率密度分别为  $4.08 \times 10^3$ ,  $3.30 \times 10^3$ ,  $2.56 \times 10^3$  kW/cm<sup>2</sup>。可见随着坡口角度的减小,在熔化位置处的功率密度明显增大,且坡口角度越小,剩余的激光能量越多。这是坡口角度越小,坡口内熔化面积越大的原因。

当坡口角度为 10°时,光纤激光在坡口内反射一次时所对应的入射角为 85°,接近于纯铝的布儒斯特角 84.3°,但是坡口内材料的熔化面积并没有明显不同。这是由于即使入射角为布儒斯特角,铝对光纤激光反射一次时所对应的吸收率也仅为 12.3%,与另外两种坡口角度反射一次时所对应的吸收率(15°时反射一次所对应的入射角为 82.5°,吸收率为 11.98%;5°时反射一次所对应的入射角为 87.5°,吸收率为 9.29%)差别不大。因此,纯铝在非偏振态光纤激光压焊中,坡口内材料的熔化效果与入射角是否匹配布儒斯特角没有直接关系。从熔化面积的变化规律可知,坡口角度越小,对激光的汇聚作用越显著。

根据熔化长度(图 5)、坡口形状和光束发散角,算得光斑边缘光线反射到熔化位置的次数随离焦量的变化规律如图 9 所示。可见离焦量较小时,最边缘光线到达熔化位置的反射次数也相对较少。随着离焦量的增加,反射次数也呈增加的趋势。对比图 5 和图 9 可知,光斑边缘光线的反射次数随离焦量的变化规律呈现出与熔化面积相反的趋势。

坡口角度相同,坡口的几何形状也相同。当激光的离焦量为 0~+10 mm 时,光斑边缘光线在坡口内仅通过 1~2 次反射便可使试样熔化。而在此范围之外,光斑边缘光线的反射次数明显增加,可达到 5 次。考虑到多次反射时坡口内入射角和吸收率的变化,以及光斑整个面积中反射不同次数对应的区域,算得大离焦

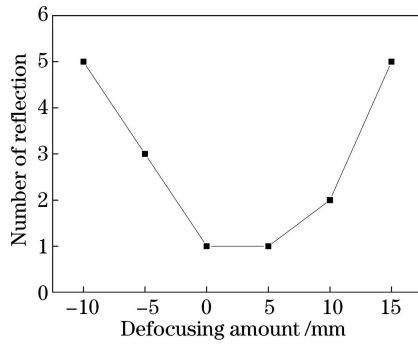


图 9 离焦量对反射次数的影响

Fig. 9 Influence of defocusing amount on number of reflection

焊接时光斑边缘光线在坡口内经 3~5 次反射损失的能量比仅一次反射损失的能量增加了 112.5%。这是后者对应的熔化长度更长、熔化面积更大的主要原因。可见在非偏振态光纤激光压焊中,坡口内合适的光斑边缘光线的传导次数为 1~2。

根据图 6 中测得的熔化长度、坡口角度和发散角,算得采用 300 mm 聚焦镜时,光斑边缘光线仅经过一次反射便作用到熔化位置,而采用 200 mm 及 250 mm 聚焦镜时光斑边缘光线需经过两次反射才可作用于熔化位置。聚焦镜焦距越小,光束的发散角越大,使得激光在坡口上的入射角越小。这将导致光斑边缘光线经过第一次反射后达到第二次反射点的距离(在光束方向上的长度)远小于长聚焦光束光斑边缘光线到达第二次反射点的距离。坡口角度相同时,激光束初次接触坡口时的功率密度(光斑大小)一致。而焦距越小,光束向坡口内传输时光束的功率密度衰减就越快。故短焦距焊接时,光斑边缘光线经一次反射后还不足以达到铝的熔化阈值。这是短焦距焊接时,光斑边缘光线在坡口内发生两次反射才实现熔化的原因。而使用 300 mm 聚焦镜时,边缘光线只需经过一次反射。在坡口几何形状相同的条件下,反射次数越少,传输过程中损耗的激光能量越小。这是长焦距下坡口内熔化面积更大的原因。

## 5 结 论

在本文实验条件下,可获得如下结论:

- 1) V 型坡口的形成有助于激光能量的汇聚,并且坡口的角度越小,对激光的汇聚作用越明显;
- 2) 入射角等于布儒斯特角时,铝对非偏振光纤激光的吸收率较小,但不可忽略,因此,非偏振光纤激光不宜在坡口内经过多次反射传输;
- 3) 离焦量为 0~+10 mm 时,坡口内材料的熔化效果较好;
- 4) 在保证光斑面积相同的条件下,聚焦透镜的焦距越长,坡口对激光的汇聚作用越明显。

## 参 考 文 献

- [1] Lin Kaili, Yang Wuxiong, Lü Junxia, *et al.* Laser beam welding study of 2198-T851 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103007.  
林凯莉, 杨武雄, 吕俊霞, 等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103007.
- [2] Cai Hua. Microstructural and mechanical properties of fiber laser beam welded thin sheet 2524 high strength aluminum alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.  
蔡 华. 薄板 2524 高强铝合金光纤激光焊接接头组织及力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [3] Dong Bizhe, Yang Wuxiong, Wu Shikai, *et al.* Numerical analysis on the deformation controlling of T-joint LBW with auxiliary heat source for high strength aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0803002.  
董丽喆, 杨武雄, 吴世凯, 等. 高强铝合金壁板结构 T 型接头辅助热源变形控制数值分析[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0803002.
- [4] Pakdil M, Cam G, Kocak M, *et al.* Microstructural and mechanical characterization of laser beam welded AA6056 Al-alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(24): 7350-7356.
- [5] Nélias D, Jullien J F, Deloison D. Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding

- induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(12): 3025-3039.
- [6] Bayraktar F S, Staron P, Kocak M, *et al.* Analysis of residual stress in laser welded aerospace aluminum T-joints by neutron diffraction and finite element modeling[C]. *Materials Science Forum*, 2008, 571: 355-360.
- [7] Behler K, Beyer E, Wolf N, *et al.* Method for welding at high processing speed with polarized laser beam[C]. *Proceedings of European Conference on Laser Treatment of Materials*, 1990: 721-730.
- [8] Zuo Tiechuan. *Laser materials processing of high strength aluminum alloys*[M]. 2nd edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 133-137.  
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008: 133-137.
- [9] Nishimoto K, Fujii H, Katayama S. Laser pressure welding of Al alloy and low C steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(2): 224-231.
- [10] Nishimoto K, Okumotoa Y, Haranoand T, *et al.* Laser pressure welding of aluminium and galvanized steel[J]. *Welding International*, 2009, 23(10): 734-743.
- [11] Nishimoto K, Haranoand T, Okumotoa Y, *et al.* Mechanical properties of laser-pressure-welded joint between dissimilar galvanized steel and pure aluminium[J]. *Welding International*, 2009, 23(11): 817-823.
- [12] An Na, Zhang Xinyi, Wang Qiming, *et al.* Fiber laser welding of 2060 aluminum-lithium alloy with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003009.  
安娜, 张心怡, 王启明, 等. 2060 铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003009.
- [13] Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.* Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0503004.  
李飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0503004.
- [14] Wei Jing, Wang Huan, Shi Shaojian, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0303003.  
魏菁, 王欢, 石少坚, 等. 10CrSiNiCu 船用高强度钢光纤激光焊接接头组织和性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303003.
- [15] Zou Jianglin. *Investigation on characterization of deep penetration welding with high power fiber laser welding*[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.  
邹江林. 高功率光纤激光深熔焊接特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.