

# 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制

王红阳, 孙佳, 刘黎明\*

大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024

**摘要** 采用激光-钨极氩弧焊(TIG)复合热源对 6061-T6 铝合金进行了高速焊接,研究了焊接电弧电流、激光脉宽及脉冲频率等工艺参数对气孔形成的影响规律。结果表明,在 6061-T6 铝合金高速激光-TIG 复合焊中,焊接速度的提高使得熔池冷却速度加快,焊缝组织出现细小的等轴晶,热影响区的软化区宽度减小。熔池冷却状态的变化造成“匙孔”稳定性降低并容易坍塌,焊缝中极易形成气孔。随着激光脉宽的增大,焊缝中的气孔数量减少,尺寸减小;随着激光脉冲频率的增大,焊缝中的气孔数量先减少后增加;当电弧电流从 180 A 增大到 200 A 时,焊缝中的气孔数量明显减少。

**关键词** 激光技术; 复合焊接; 高速焊; 铝合金; 气孔

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0302001

## Formation and Controlling Mechanism of Pores in Laser-TIG Hybrid Welding of 6061-T6 Aluminum Alloys at High Peed

Wang Hongyang, Sun Jia, Liu Liming

Key laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** The 6061-T6 aluminium alloys are welded by the laser-TIG hybrid heat source at a high speed. The influences of process parameters such as arc current, laser pulse duration and laser frequency on pore formation are studied. The results show that, in the process of laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at a high speed, the increase of welding speed makes the cooling speed of molten pool increase, there exist thin isometric crystals in the weld microstructure, and the width of softening zone in the heat affected zone decreases. The change of the cooling state of the molten pool results in the reduction of keyhole stability, the easy collapse of keyholes, and the easy formation of pores in welds. With the increase of laser pulse duration, the number of pores decreases, and the diameter also decreases. With the increase of laser pulse frequency, the number of pores first decreases and then increases. When the arc current increases from 180 A to 200 A, the number of pores in welds significantly reduces.

**Key words** laser technique; hybrid welding; high speed welding; aluminium alloy; pores

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 350.3390

## 1 引 言

铝合金具有密度低、比强度高、导电性和导热性好等优点,被广泛应用于动力机械、轨道交通及航空航天等领域<sup>[1-3]</sup>。铝合金的传统焊接方法有钨极氩弧焊(TIG)<sup>[4]</sup>、熔化极稀有气体保护焊(MIG)<sup>[5]</sup>等。

然而,以 6 系铝合金为代表的热处理强化铝合金的焊接接头软化问题制约了 6 系铝合金更广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。

为了改善 6 系铝合金的软化问题,国内外已经开展了许多有关焊接方法的研究。其中,激光及激光-电弧复合焊接因具有较大的能量密度及较小的

收稿日期: 2017-10-08; 收到修改稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(11375038)

作者简介: 王红阳(1982—),男,博士,副教授,主要从事轻合金激光焊接技术方面的研究。E-mail: wang-hy@dlut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: liulm@dlut.edu.cn

热影响区而成为 6 系铝合金焊接方法的研究热点<sup>[8-10]</sup>。Wang 等<sup>[11]</sup>采用激光-MIG 复合热源焊接了 A6N01S-T5 铝合金,发现焊接热输入对热影响区软化现象有很大的影响。通过提高焊接速度可以减小复合焊的热输入,但其涉及的工艺参数较多,如果工艺参数匹配不当,高速焊接过程中会产生缺陷。在焊接过程中,熔池内流体流动模式与驼峰、咬边及气孔等缺陷密切相关,对焊缝成形及性能有较大影响。胥国祥等<sup>[12]</sup>分析了激光+熔化极电弧(GMAW)复合热源焊的流场特征,发现在高速条件下,复合焊“匙孔”明显向后方倾斜,“匙孔”壁尤其是小孔后壁受力难以平衡,从而导致“匙孔”无法稳定的存在。“匙孔”的动态稳定性对焊接过程具有关键作用,通过调整工艺参数维持“匙孔”的稳定性,对焊接接头的成形及性能具有重要影响。

Ascari 等<sup>[13]</sup>发现,激光-GMAW 复合焊的电弧电流对 AA6082 铝合金气孔的形成具有重要影响,而热源间距对气孔影响很小。Ola 等<sup>[14]</sup>发现,激光能量和激光束直径会影响 AA6061-T6 铝合金“匙孔”的形状和尺寸,进而影响了气孔的数量和尺寸。气孔的存在限制了焊接速度的提高并产生了软化问题。激光-电弧复合焊充分结合了激光焊接和电弧焊接的优点,可以实现能量密度及梯度的协调控制,对同时解决铝合金软化及气孔问题提供了参考。

本文以 6061-T6 铝合金为研究对象,采用脉冲 YAG 激光-TIG 复合热源进行了激光焊接,分析了

焊接工艺参数对试样焊接接头气孔形成规律的影响,讨论了气孔产生的机理,从而为控制气孔产生,减少焊接缺陷,提高焊接质量提供了实验依据。

## 2 实验材料与方法

实验材料为 1.5 mm 厚的 6061-T6 铝合金板材,其化学成分见表 1。采用波长为 1.064 μm 的脉冲 Nd:YAG 激光器进行焊接实验,焦距为 120 mm,焦点光斑直径为 0.6 mm。采用交流电弧进行焊接,使用高纯氩作为焊接保护气体。采用激光在前、电弧在后的焊接方式,焊接装置示意图如图 1 所示,其中  $D_{la}$  为激光作用点与钨极之间的距离,焊接参数见表 2。

表 1 6061-T6 铝合金的主要化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Main chemical compositions of 6061-T6 aluminium alloys (mass fraction, %)

Element	Si	Fe	Mn	Mg	Al
Content	0.70	0.70	0.10	1.00	Bal.

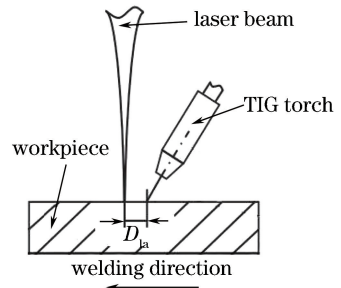


图 1 激光-TIG 复合焊示意图

Fig. 1 Schematic of laser-TIG hybrid welding

表 2 激光-TIG 复合焊工艺参数

Table 2 Process parameters of laser-TIG hybrid welding

Parameter	Welding speed / ( $m \cdot min^{-1}$ )	Torch angle /( $^{\circ}$ )	Defocusing /mm	Laser-arc distance /mm	Shielding gas flow / ( $L \cdot min^{-1}$ )
Value	3	60	-1	2	20

采用两种方法观测气孔。1) 横截面观测:在垂直于焊缝方向截取焊缝横截面,在焊缝中间每隔 5 mm 取一个试样,共截取 9 个横截面试样,经研磨、抛光、腐蚀后用 Keller 试剂腐蚀,用金相显微镜观察气孔及接头宏观形貌。2) 纵截面观测:将焊接试样沿焊缝纵向切开,研磨到焊缝中心后进行抛光、腐蚀,用金相显微镜观察并测量气孔的数量及大小。

## 3 结果与分析

### 3.1 高速复合焊气孔的形成

在激光-TIG 复合焊中,高能量密度激光束照射

金属材料,高温蒸气和等离子体膨胀,通过反冲压力形成“匙孔”并推动周围的熔融材料。“匙孔”由非平衡蒸发颗粒产生的反冲压力保持打开状态。早期研究表明,“匙孔”的稳定或坍塌是由“匙孔”上的不同作用力共同决定的。“匙孔”的形状和尺寸因外部条件的变化而变化,主要包括激光功率、焊接速度和材料特性<sup>[15]</sup>。在焊接过程中金属蒸气产生的压力过大会引起“匙孔”不稳定并发生塌陷,同时将“匙孔”根部的金属蒸气、保护气等卷入熔池形成气孔<sup>[16-18]</sup>。在激光-TIG 复合焊接的过程中,电弧和激光束在材料上的相同区域同时对“匙孔”产生作用。

数值模拟结果表明,在不同的焊接速度下,“匙孔”的形状基本相同,但“匙孔”的开孔尺寸差异较大,焊接速度越快,热输入越小,“匙孔”开口直径越小<sup>[19]</sup>。

### 3.2 激光脉冲参数对气孔的影响

通过对 6061-T6 铝合金气孔敏感性的观察可知,影响“匙孔”行为并导致“匙孔”尺寸变化的任何因素都将影响接头气孔的形成。当电弧电流为 180 A,焊接速度为 3000 mm·min<sup>-1</sup>时,不同脉宽下得到的焊缝纵截面气孔形貌如图 2 所示。由图可知,随着脉宽的增大,气孔数量逐渐减少,气孔半径及面积呈减小趋势。当脉宽为 5 ms 时,气孔数量最少。

这主要是因为,在高速焊接过程中,熔池冷却时间很短,激光“匙孔”的直径较小,存在的时间较短,稳定性下降;“匙孔”内的金属蒸气不能及时喷溅出去,从而在焊缝中形成了气孔。在激光与铝合金板材作用

的过程中,激光的热扩散距离与脉宽的关系为

$$L = (4DT)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中  $L$  为热扩散距离, $D$  为铝合金的热扩散率, $T$  为脉宽。

由(1)式可以看出,热扩散距离和脉宽成正比。当脉宽较小时,热扩散距离较小,热量在母材的较小区域内大量聚积,增大了反冲压力。反冲压力<sup>[20]</sup>表示为

$$P_R = \frac{A_0 B_0}{\sqrt{T_S}} \exp(-U_R/T_S), \quad (2)$$

其中

$$U_R = m_a H_{lg} / (N_a k_b), \quad (3)$$

式中  $P_R$  为反冲压力, $A_0$  为数值系数, $B_0$  为蒸发常数, $T_S$  为表面温度, $m_a$  为原子质量, $H_{lg}$  为蒸发潜热, $N_a$  为阿伏伽德罗常数, $k_b$  为玻尔兹曼常数。

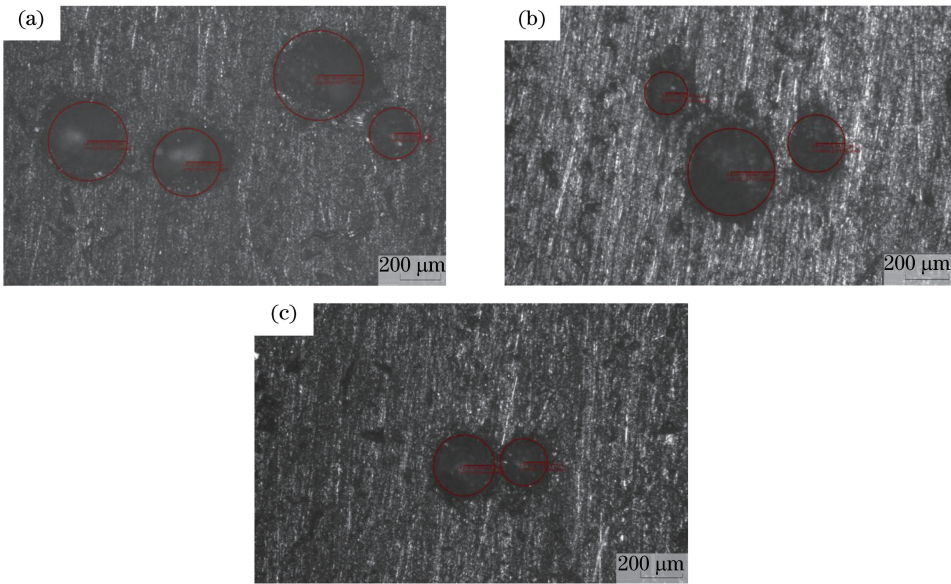


图 2 不同激光脉宽下的焊缝纵截面气孔形貌。(a) 3 ms;(b) 4 ms;(c) 5 ms

Fig. 2 Morphologies of pores in vertical section of welds under different pulse durations. (a) 3 ms; (b) 4 ms; (c) 5 ms

由(2)式可知,反冲压力和温度有关,表面温度越高,反冲压力越大。热量聚积,反冲压力增大,“匙孔”底部向下运动,“匙孔”深度增大,此时“匙孔”壁底部温度较高,产生的反冲压力推动“匙孔”后方的金属回流,形成速度极快的涡流,影响熔池金属的稳定性。在强烈的回流作用下,靠近“匙孔”壁后上方的金属沿着“匙孔”壁向前流动,导致“匙孔”坍塌,被卷入“匙孔”中的金属蒸气来不及喷出,从而形成气孔。

同时,在激光-TIG 复合焊的过程中,脉冲频率对焊缝成形具有重要影响,脉冲激光对熔池的搅拌作用影响着气孔的形成。在高速焊条件下,脉冲激光频率必须和焊接速度相匹配,激光-TIG 复合焊气孔率如

图 3 所示。从图中可以看出,当频率为 40,50,60,80 Hz 时,气孔率分别为 12.8%,6.7%,3.5%,10.6%。

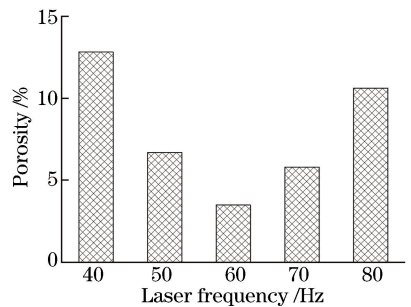


图 3 激光-TIG 复合焊的气孔率

Fig. 3 Porosity of laser-TIG hybrid welding



脉冲重叠系数与频率的关系为

$$K = 1 - \frac{V}{fD}, \quad (4)$$

式中  $K$  为重叠系数,  $f$  为相邻两个焊点的距离,  $D$  为焊点直径,  $V$  为焊接速度。由(4)式可以看出, 激光脉冲频率越大, 脉冲重叠度越高。当激光脉冲频率太小时, 脉冲重叠度太低, 容易造成熔池的不搭接, 且脉冲频率太低, 金属蒸气的动压不足以让液态金属快速流动, 在焊缝中形成气孔; 脉冲频率过高, 金属蒸气动压大, 蒸汽较多, 容易在“匙孔”中残留而形成气孔。因

此, 在高速焊接过程中需要合适的激光频率, 当激光频率为 60 Hz 时, 焊缝中气孔数量最少。

### 3.3 电弧电流对气孔的影响

电弧电流为 180 A 和 200 A 下的 9 个焊缝横截面气孔形貌分别如图 4 和图 5 所示, 其中黑点为气孔位置。当电弧电流为 180 A 时, 可以发现, 图 4(a)和图 4(c)~(f)及图 4(h)所示的横截面上都存在焊接气孔。当电弧电流为 200 A 时, 只在图 5(h)所示的横截面上出现了焊接气孔。因此, 当电弧电流小于 180 A 时, 焊缝不能实现完全焊透。

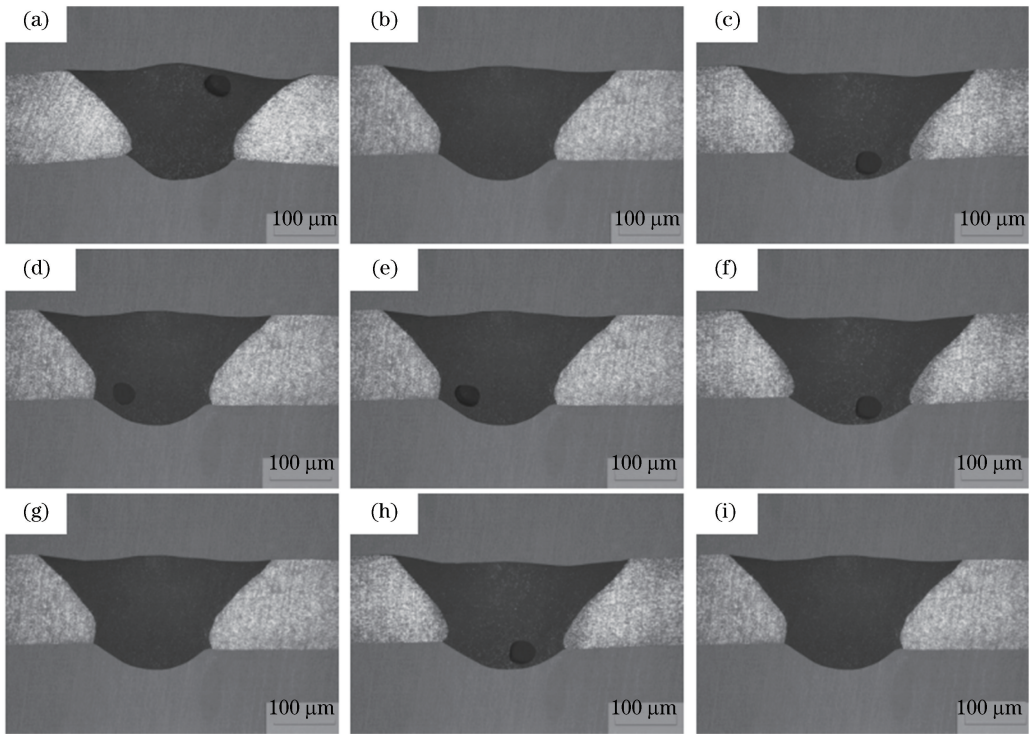


图 4 电弧电流 180 A 下的 9 个焊缝横截面气孔形貌

Fig. 4 Morphologies of pores in 9 cross sections of welds at arc current of 180 A

当电弧电流从 180 A 增大到 200 A 时, 接头内部气孔明显减少。这是由于在激光-TIG 复合焊的过程中, 激光“匙孔”上部与下部的直径不同, “匙孔”内的直径更小。由于焊接速度增大, 焊接热输入减小, “匙孔”张开较小, “匙孔”内的表面张力较大, “匙孔”稳定性下降, 从而容易形成气孔。增大电弧电流可以提高熔池温度, “匙孔”开口程度增大, 即增大了“匙孔”直径, 并减小了“匙孔”内部的金属蒸气压力, 使“匙孔”不易坍塌, 避免形成气孔。此外, 复合焊中 TIG 热源作用于焊缝上部, 焊接过程中焊缝上部温度较高, 但焊接速度增大后热输入减小, 焊接熔池表面温度降低, “匙孔”内部的金属蒸气不易喷射出去, 未喷射出的金属蒸汽冲击“匙孔”后壁, 使“匙孔”后壁局部向熔

池内部凹陷, 导致“匙孔”根部瞬时失稳, 金属蒸气、保护气体等被卷入熔池, 从而形成气孔。因此, 通过增大电弧电流来提高熔池表面温度, 可以避免缺陷的产生。同时, 在高速焊条件下, 试样上方的环境温度降低, “匙孔”中喷出的等离子体冷却速度加快, 金属蒸气易形成小颗粒覆盖在“匙孔”上, 阻止“匙孔”内的等离子体继续喷出; “匙孔”内的等离子体密度和内部压力逐渐增大, 使得焊缝内容易产生气孔。

综上所述, 增大电弧电流和提高环境温度会使等离子体更容易向外扩散, 等离子体密度减小, 气孔形成趋势降低。然而, 进一步增大焊接电流会使焊缝容易产生烧穿或明显咬边的现象, 无法获得连续稳定的接头。



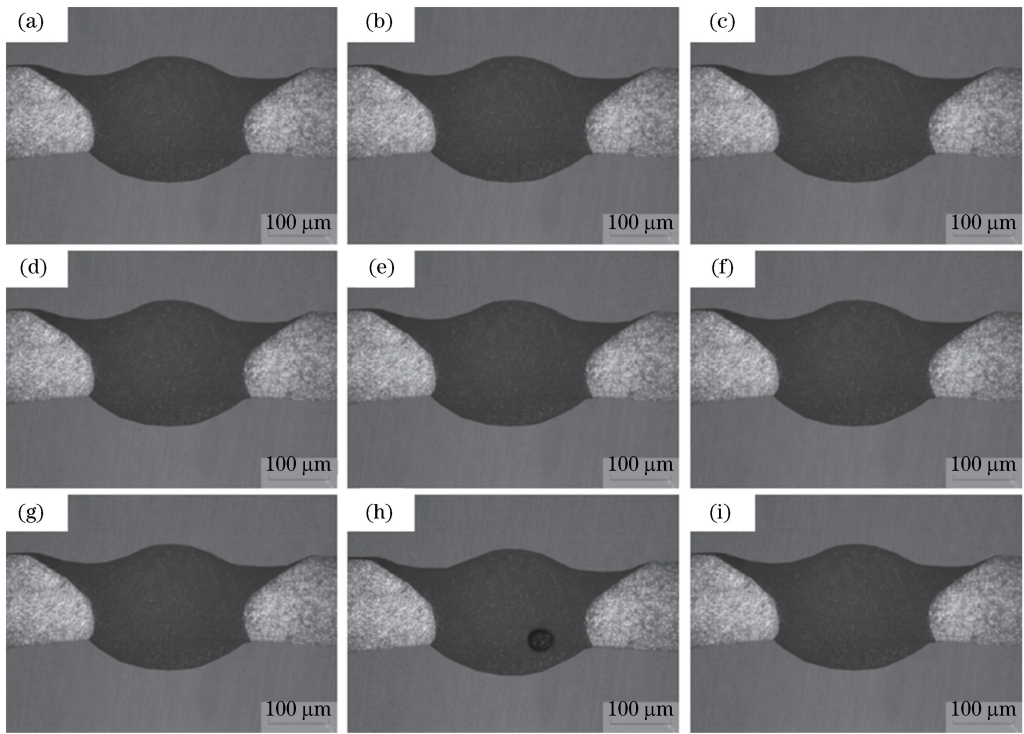


图 5 电弧电流 200 A 下的 9 个焊缝横截面气孔形貌

Fig. 5 Morphologies of pores in 9 cross sections of welds at arc current of 200 A

## 4 结 论

6061-T6 铝合金激光-TIG 复合高速焊的“匙孔”稳定性对焊缝中的气孔有重要影响,通过调整激光脉冲参数与电弧电流可以改变“匙孔”的深度、直径、存在时间及“匙孔”周围环境温度,减少焊缝中的气孔。在激光-TIG 复合焊接过程中,焊接速度的提高使得焊接接头内部产生焊接气孔。通过增大激光脉宽,延长激光“匙孔”对电弧的作用时间,可降低气孔的形成趋势。在增大激光频率的过程中,激光频率必须和焊接速度相匹配,并需要合适的脉冲重叠度;当电弧电流从 180 A 增大到 200 A 时,熔池表面温度升高,“匙孔”内等离子体更容易向外扩散,气孔形成趋势降低。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu Z T, Wang X F, Yang X Y, *et al.* Droplet transfer in aluminum alloy laser-MIG hybrid welding coupled by high frequency pulses and its cladding characteristics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 39-44.  
朱宗涛, 王雪飞, 杨晓益, 等. 高频脉冲耦合铝合金激光-MIG 复合焊接熔滴过渡及其熔覆特性[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 39-44.
- [2] Qiao J N, Wang Q M, Zou J L, *et al.*

Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminium alloy joints by fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902001.

乔俊楠, 王启明, 邹江林, 等. 光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金接头的组织与力学性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902001.

- [3] Zhai Y F, Huang J, Li M, *et al.* Research on high speed high power CO<sub>2</sub> laser welding of 6061-T6 aluminium with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0503001.  
翟玉峰, 黄坚, 李敏, 等. 6061-T6 铝合金高速大功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接性的研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0503001.
- [4] Zhang D, Chen W H, Sun Y H, *et al.* Analysis of mechanical properties about the welding joints of 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(1): 45-49.  
张聃, 陈文华, 孙耀华, 等. 焊接方法对 2219 铝合金焊接接头力学性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2013, 33(1): 45-49.
- [5] Peng X Y, Cao X W, Duan Y L, *et al.* Microstructures and properties of MIG welded joint of 7020 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 912-918.  
彭小燕, 曹晓武, 段雨露, 等. 7020 铝合金 MIG 焊接接头的组织与性能 [J]. 中国有色金属学报,

- 2014, 24(4): 912-918.
- [6] Zhu H, Chen Q, Chen J H. Influence rule of HAZ geometrical dimension to aluminum alloy joint deformation and strength [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 77-81.  
朱浩, 陈强, 陈剑虹. 热影响区几何尺寸对铝合金焊接接头变形及强度影响规律 [J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 77-81.
- [7] Xu L H, Tian Z L, Peng Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. Chinese Journal of 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接头组织及力学性能 [J]. 中国激光, 2008, 35(3): 456-461.
- [8] Cai X Y, Li H, Yang L J, *et al.* Improvement of weld appearance of laser-short circuiting transfer metal-inert gas (MIG) hybrid welded aluminium alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0503001.  
蔡笑宇, 李恒, 杨立军, 等. 铝合金激光短路过渡熔化极惰性气体保护焊复合焊缝成形改善 [J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503001.
- [9] Zhang D F, Yang Y, Wang T J, *et al.* Comparison of fiber laser-MIG arc hybrid and fiber laser welding of 6009 aluminium alloy [J]. Materials Review, 2015, 29(6): 121-124.  
张德芬, 杨阳, 王同举, 等. 6009 铝合金光纤激光-MIG 电弧复合焊和光纤激光焊工艺对比研究 [J]. 材料导报, 2015, 29(6): 121-124.
- [10] Zhang C, Gao M, Zeng X Y. Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 479-487.
- [11] Wang Q Y, Chen H, Zhu Z T, *et al.* A characterization of microstructure and mechanical properties of A6N01S-T5 aluminum alloy hybrid fiber laser-MIG welded joint [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5/6/7/8): 1375-1384.
- [12] Xu G X, Zhang W W, Liu P, *et al.* Numerical analysis of fluid flow in laser + GMAW hybrid welding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(6): 713-723.  
胥国祥, 张卫卫, 刘朋, 等. 激光 + GMAW 复合热源焊熔池流体流动的数值分析 [J]. 金属学报, 2015, 51(6): 713-723.
- [13] Ascari A, Fortunato A, Orazi L, *et al.* The influence of process parameters on porosity formation in hybrid laser-GMA welding of AA6082 aluminum alloy [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(5): 1485-1490.
- [14] Ola O T, Doern F E. Factors controlling keyhole-induced porosity in cold wire laser welded aluminum [J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012008.
- [15] Kroos J, Gratzke U, Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. Journal of Physics D, 1993, 26(3): 474-480.
- [16] Kim J S, Watanabe T, Yoshida Y. Effect of the beam-defocusing characteristics on porosity formation in laser welding [J]. Journal of Materials Science Letters, 1995, 14(22): 1624-1626.
- [17] Tucker J D, Nolan T K, Martin A J, *et al.* Effect of travel speed and beam focus on porosity in alloy 690 laser welds [J]. Journal of Metals, 2012, 64(12): 1409-1417.
- [18] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry [J]. Journal of Physics D, 2007, 40(19): 5854-5859.
- [19] Tao W, Yang Z B, Shi C Y, *et al.* Simulating effects of welding speed on melt flow and porosity formation during double-sided laser beam welding of AA6056-T4/AA6156-T6 aluminum alloy T-joint [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 638-647.
- [20] Semak V, Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing [J]. Journal of Physics D, 1997, 30(18): 2541-2552.