

# 纳秒激光工艺参数对铝/镁异种焊缝成形的影响

高琼, 王克鸿, 郭顺, 周琦, 彭勇

南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 利用纳秒激光对铝合金和镁合金薄板进行了中心搭接焊试验, 分析了纳秒激光工艺参数对铝/镁焊缝成形及力学性能的影响。研究表明, 在纳秒激光焊接能量输入低、激光功率密度大、焊接速度快的条件下, 可形成有效的铝/镁焊接接头, 剪切强度达到 86 MPa。在 5~10 kW 激光功率范围内, 焊缝熔深与纳秒激光功率密度呈线性关系, 而与激光持续作用时间和激光点能量呈对数关系。

**关键词** 激光技术; 焊缝成形; 纳秒激光; 异种金属; 熔深

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0102004

## Effects of Nanosecond Laser Process Parameters on Al/Mg Dissimilar Metal Weld Formation

Gao Qiong, Wang Kehong, Guo Shun, Zhou Qi, Peng Yong

*School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** The center overlap welding experiments of aluminum alloy and magnesium alloy sheets are carried out by the nanosecond laser technology, and the effects of nanosecond laser process parameters on the formation and mechanical property of Al/Mg welds are analyzed. The results show that the Al/Mg joints are successfully welded by the nanosecond laser and their shear tensile strength can reach to 86 MPa under the conditions of low energy input, high power density and high welding speed. In the laser power range of 5-10 kW, the penetration depth of welds possesses a linear relationship with the nanosecond laser power density, however a logarithmic relationship with the laser duration and the laser point energy.

**Key words** laser technique; weld morphology; nanosecond laser; dissimilar metal; penetration

**OCIS codes** 140.3390; 140.7090; 140.3538; 160.3900

## 1 引言

铝合金和镁合金的优异性能使其在工业上具有广泛的应用, 同时, 两者的应用具有交叉性, 在某些特殊场合, 铝/镁合金结构件显得尤为重要<sup>[1]</sup>。然而, 铝和镁的物理性能相差较大, 相互溶解度低, 极易形成大量的铝/镁金属间化合物, 从而导致铝/镁接头质量不高。因此, 如何得到优质的铝/镁异种金

属焊接接头一直是国内外的研究热点之一<sup>[2-5]</sup>, 其中控制铝/镁接头界面金属间化合物的生成是提高接头质量的重点及难点<sup>[6-7]</sup>。

纳秒激光具有平均功率低、光斑小、脉冲重复频率高、脉冲宽度纳秒范围内可调、精度高等优点。利用纳秒激光焊接铝/镁异种材料, 可严格控制热输入量, 焊接速度极快, 熔池凝固时间短, 有利于减少铝/镁混合生成的金属间化合物<sup>[8]</sup>。Borrisutthekul

收稿日期: 2017-06-19; 收到修改稿日期: 2017-07-06

基金项目: 国防科工委基金(JSCG2017606B005)

作者简介: 高琼(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事异种金属焊接方面的研究。E-mail: gqiong88@163.com

导师简介: 王克鸿(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事新材料焊接机理、机器人系统集成、焊接过程智能化等方面的研究。

E-mail: wkh1602@126.com(通信联系人)

等<sup>[9]</sup>采用连续激光焊接镁合金和铝合金发现,在相同的熔宽条件下,减小下板的焊接熔深,可以减小界面的金属间化合物层厚度,焊缝剪切强度得到提高。因此,控制铝/镁异种金属搭接接头的焊缝尺寸对控制界面的金属间化合物厚度有重要作用。关于利用纳秒激光焊接铝/镁异种金属的研究鲜有报道。本文通过 0.5 mm 厚纯铝和 1 mm 厚镁合金薄板的纳秒激光焊接试验,研究了纳秒激光工艺参数对铝/镁异种金属焊缝成形的影响,为铝/镁异种金属纳秒激光焊接的后续研究提供了一定的试验依据。

## 2 工艺参数及试验

### 2.1 工艺参数

纳秒激光焊接可以通过调节不同的激光系统工艺参数得到相同的焊缝熔深。为了研究纳秒激光系统工艺参数之间的关系以及影响焊缝成形的关键工艺因素,定义了纳秒激光理论工艺参数如激光平均功率密度、激光作用时间、激光点能量,研究了纳秒激光理论工艺参数与铝/镁异种接头焊缝熔深之间的关系。

激光平均功率密度  $P_d$  是指单位面积内的激光功率,它与激光功率成正比,与光斑面积成反比,即

$$P_d = \frac{P}{A_s}, \quad (1)$$

$$A_s = \frac{1}{4}\pi D^2, \quad (2)$$

式中  $P$  为激光功率,  $A_s$  为光斑面积,  $D$  为光斑直径。

对于一个圆形的激光光斑而言,激光光斑边缘的点可看作激光作用点,如图 1 所示。当脉冲激光在工件上移动时,将两个激光点重叠部分与激光光斑直径的比值定义为重叠因子。脉冲激光焊接速度与脉冲频率、重叠因子的关系为

$$V = D \times f, \quad \delta = 0, \quad (3)$$

$$V = D \times (1 - \delta) \times f, \quad \delta > 0, \quad (4)$$

式中  $V$  为脉冲激光焊接速度;  $f$  为脉冲频率;  $\delta$  为重叠因子,  $\delta = 0$  表示两个相邻峰值脉冲激光作用在工件上不重叠,  $\delta > 0$  表示两个相邻峰值脉冲激光作用在工件上发生重叠。

激光的作用持续时间是指单个脉冲激光作用在工件某个点的时间。对于脉冲激光而言,激光作用持续时间与激光脉宽、重叠因子的关系为

$$T_d = W_p / (1 - \delta), \quad (5)$$

式中  $T_d$  为激光作用持续时间,  $W_p$  为激光脉宽。

即使是相同的激光能量密度,不同的激光直径也

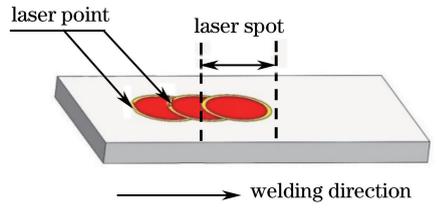


图 1 激光作用在工件上的示意图

Fig. 1 Schematic of laser beam acting on workpiece  
将导致传递到工件的能量不同。为了综合评价激光功率、焊接速度、激光辐照面积等工艺参数对焊缝成形的影响,引入了激光点能量  $E_{sp}$ <sup>[10]</sup>,并将其定义为

$$E_{sp} = \iint I(x, y) \times T_d dx dy, \quad (6)$$

式中  $I$  为光斑内某一点的瞬时能量密度,  $x, y$  为对应点的坐标。由(6)式可以看出,在单个脉冲激光作用在工件上的时间内,一个激光辐照面积上的激光输出能量即为激光点能量。激光点能量为

$$E_{sp} = \frac{P}{A_s} \times T_d \times A_s = P \times T_d, \quad (7)$$

联立(4)、(5)和(7)式可得

$$E_{sp} = \frac{W_p \times D \times f}{V} \times P, \quad (8)$$

由(8)式可以看出,纳秒激光焊接点能量与焊接速度成反比,与激光功率、脉冲频率、脉冲宽度成正比。

### 2.2 试 验

试验材料为 1050 铝合金薄板和 AZ31B H24 镁合金薄板,尺寸分别为 0.5 mm×30 mm×105 mm 和 1 mm×30 mm×105 mm。采用英国 SPI Laser 公司生产的 SP-0100p-A-EP-Z-B-Y 型脉冲光纤激光器进行激光焊接试验,激光器最大平均功率为 100 W,脉冲峰值功率达 10 kW,输出波长为 1060 nm,激光束焦点直径为 35 μm,脉宽为 280~500 ns,最大脉冲频率为 500 kHz。通过测试不同离焦量下的激光辐射光束直径计算出激光辐照面积。同时,采用流量为 15 L·min<sup>-1</sup>的纯氩气作为保护气体,防止焊接过程中试样被氧化。激光试验装置示意图如图 2 所示,采用铝/镁搭接的方式,其中铝板在上,镁板在下。

焊后利用线切割方式制备金相试样,经过粗磨、精磨、抛光以及腐蚀后在光学显微镜下观察,利用金相分析软件测量三组相同激光焊接参数下的焊缝熔深和熔宽并取平均值。剪切拉伸试样如图 3 所示,由于单条焊缝宽度小于 100 μm,单条焊缝无法进行剪切,因此在同一剪切拉伸试样上激光连续扫 13 次,焊缝宽度约 2 mm,剪切结果取三组试验的平均值。

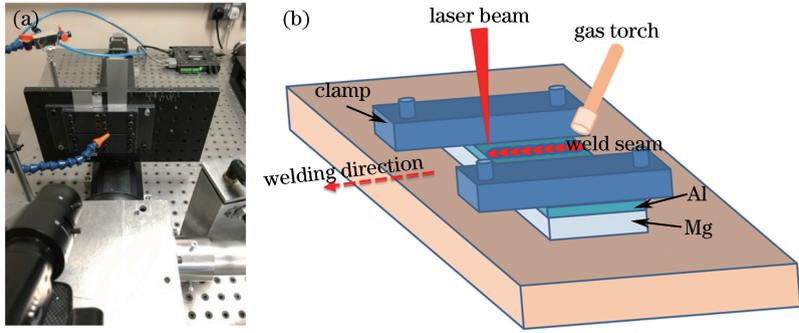


图 2 试验装置示意图。(a)实物图;(b)搭接方式

Fig. 2 Schematic of experimental setup. (a) Physical map; (b) lap way

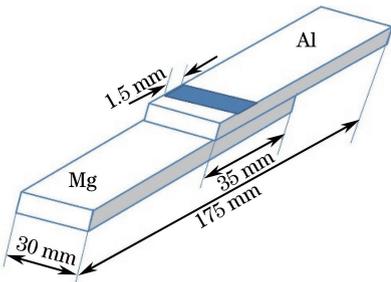


图 3 剪切拉伸试样示意图

Fig. 3 Schematic of shear tensile sample

### 3 分析与讨论

#### 3.1 焊接结果

纳秒激光焊接铝/镁异种金属焊缝表面成形及焊缝横截面如图 4(a)、(b)所示。当激光功率密度为  $0.90 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 、激光持续作用时间为  $65 \mu\text{s}$ 、激光点能量为  $0.59 \text{ J}$  时,单层焊缝宽度小,纳秒激光连续扫 13 次后的焊缝宽度仅为  $1.5 \text{ mm}$ ,说明焊缝表面成形良好。从图 4(b)中可以看出,此工艺参数下焊接模式为小孔深熔焊,能形成有效的铝/镁异种金属焊缝,接头界面处无明显裂纹,但焊缝底部有明显的孔洞,试样的剪切拉伸强度为  $86 \text{ MPa}$ 。焊缝底部产生蚀洞的原因是镁合金的蒸发点低,在小孔深熔焊模式下,镁母材蒸发形成镁蒸气并向上喷射,冷

却凝固时底部焊缝没有液体金属及时补充,故在焊缝底部留下了孔洞,称为蚀孔<sup>[11]</sup>。通常焊缝中存在的蚀坑会成为裂纹扩展源头并影响接头性能,但在拉伸试验中,断裂并未发生在焊缝蚀坑处,说明焊缝底部的蚀洞不是影响铝/镁异种金属焊缝接头的主要因素。

激光焊接的热效应取决于焊件吸收光束能量的多少,常用激光吸收率表征。在不同连续激光功率下,1050 铝合金对激光的吸收率随着焊接时间的变化如图 5 所示。可以看出,室温下 1050 铝合金的激光吸收率仅为 30%;随着焊接时间的增加,1050 铝合金的激光吸收率逐渐增大。1050 铝合金的小激光吸收率使得激光焊接初始阶段铝合金吸收的热量不足以焊透板材,随着焊接时间的增加,1050 铝合金对激光的吸收率增大,母材被焊透甚至焊穿。因此,采用连续激光工艺焊接铝合金具有局限性。而纳秒激光的瞬时功率大,功率密度达  $10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,脉冲时间超短,当超短脉冲与金属相互作用时,金属中存在的大量自由电子可通过逆韧吸收过程吸收激光能量。趋肤层厚度内的自由电子吸收激光能量后,电子温度迅速升高,然后通过自由电子热扩散将热流传入到金属靶材内部以及通过电子与晶格耦合过程传递给周

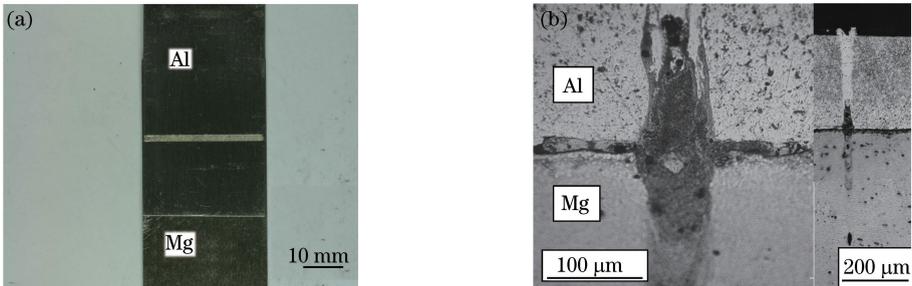


图 4 铝/镁焊缝形貌。(a)表面形貌;(b)横截面形貌

Fig. 4 Morphology of Al/Mg weld. (a) Surface morphology; (b) cross-sectional morphology

围晶格。由图 4(a)可知,纳秒激光焊接铝合金时焊缝均匀,不存在前期焊不透的情况。

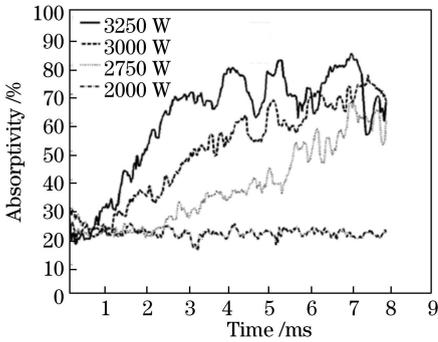


图 5 1050 铝合金的激光吸收率随焊接时间的变化<sup>[12]</sup>

Fig. 5 Laser absorptivity of 1050 aluminum alloy versus welding time<sup>[12]</sup>

### 3.2 纳秒激光功率密度对焊缝熔深的影响

由(1)、(4)、(5)式可知,激光功率密度与激光功率和激光光斑面积有关,分别讨论激光功率和激光光斑面积对不同激光功率密度下铝/镁焊缝熔深的影响。当激光光斑面积恒定时,在 6~10 kW 激光功率范围内,铝/镁焊缝熔深与激光功率密度的关系如图 6 所示。可以看出,在相同的激光持续作用时间下,随着激光功率密度的增大,焊缝熔深逐渐增大,焊缝熔深与激光功率密度呈线性关系。图 7 所示为激光持续作用时间为 32 μs 时,不同激光功率密度下的铝/镁焊缝截面图,可以发现,当激光功率密度过小时,未能形成有效的铝/镁接头。

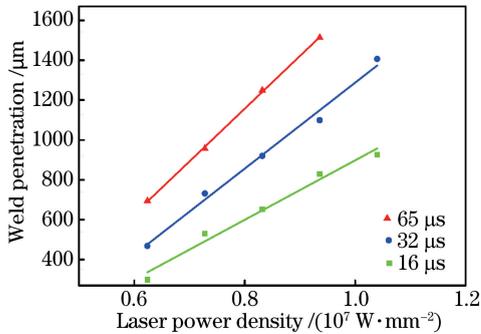


图 6 当激光光斑面积恒定时,焊缝熔深随激光功率密度的变化

Fig. 6 Penetrations depth of welds versus laser power density when laser spot area is constant

当激光功率和激光移动速度一定时,不同激光光斑直径下激光功率密度与焊缝熔深的关系如图 8 所示。可以看出,焊缝熔深与激光功率密度呈线性关系,随着激光功率密度的增大,焊缝熔深逐渐增大。当激光光斑直径不变时,在不同激光功率下,激光功率密度与焊缝熔深的关系如图 8 中红色的方点

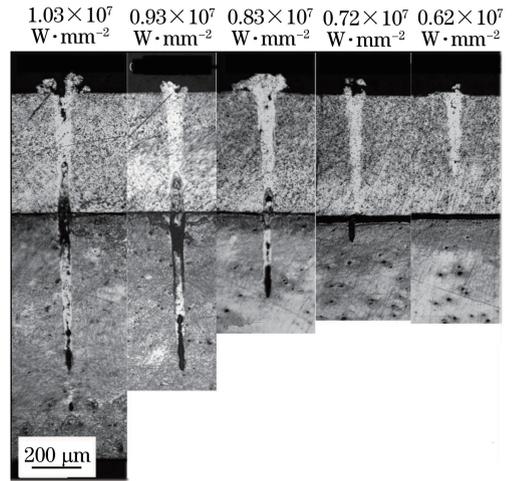


图 7 当激光光斑面积恒定时,不同激光功率密度下的焊缝形貌

Fig. 7 Weld morphologies under different laser power densities when laser spot area is constant

所示,可以看出,两者也呈线性关系。比较图 8 中两条曲线可以看出,当激光功率密度的增加量一样时,改变激光功率获得的焊缝熔深增加量较大,而改变激光光斑直径获得的焊缝熔深增加量较小。

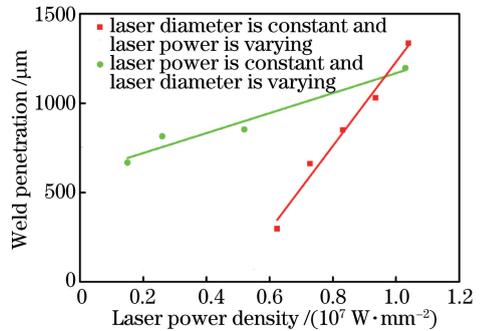


图 8 当激光移动速度恒定时,焊缝熔深随激光功率密度的变化

Fig. 8 Penetration depth of welds versus laser power density when laser moving speed is constant

由(1)、(5)、(8)式可知,随着激光光斑直径的改变,激光功率密度、激光持续作用时间以及激光点能量均发生改变。如图 9 所示,当激光光斑直径增大时,激光功率密度减小,但激光点能量增大。这是由于激光光斑直径增大后,单个激光光斑在工件上输出的激光能量增大,即激光点能量增大。激光点能量的增大弥补了一部分激光光斑直径增大导致的激光能量损耗,这解释说明了图 8 中改变激光光斑直径时,焊缝熔深随激光功率密度变化较小的原因;同时,也反应了焊缝熔深不仅仅与激光功率密度有关,还与激光功率密度和激光点能量有关。

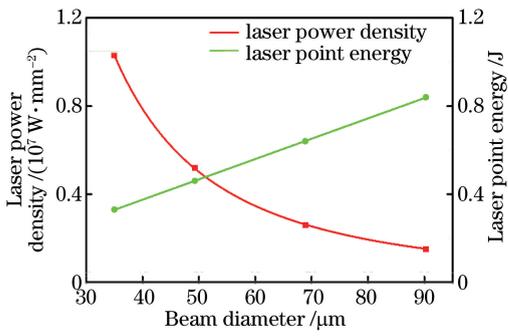


图 9 激光功率密度及激光点能量与激光光斑直径的关系

Fig. 9 Laser power density and laser spot energy versus laser spot diameter

### 3.3 纳秒激光持续作用时间对焊缝熔深的影响

对于纳秒激光焊接而言,激光持续作用时间与激光焊接速度、脉冲频率和脉宽有关。在  $30 \sim 120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  激光移动速度范围内,激光持续作用时间对焊缝熔深的影响如图 10 所示。可以看出,激光持续作用时间与焊缝熔深呈对数关系,说明激光持续作用时间对焊缝熔深的影响分为不同阶段。初期,随着激光持续作用时间的增加,焊缝熔深快速增大;当激光持续作用时间继续增加,焊缝熔深的增大趋于平缓。这说明了当激光持续作用时间较短时,激光持续作用时间对焊缝熔深的影响较大,随着时间的增加,激光持续作用时间不再是影响焊缝熔深的主要因素。这是因为激光焊接中存在激光能量密度阈值,当激光能量密度达到阈值时,金属表面温度升高,发生金属熔化、汽化,开始形成小孔,一部分的能量密度用于形成小孔,剩余部分的能量密度将用于增大小孔深度。当激光功率密度一定、激光持续作用时间较短时,激光能量密度在形成小孔所需的能量阈值范围内,激光持续作用时间对小孔深度

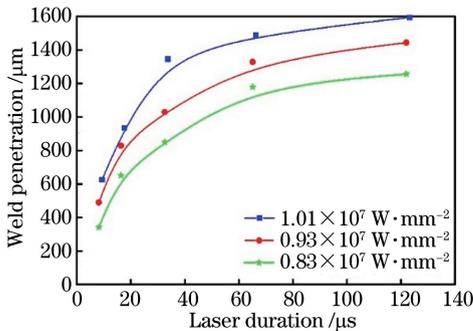


图 10 当激光光斑面积保持不变时,

焊缝熔深随激光持续作用时间和激光功率密度的变化

Fig. 10 Penetration depth of welds versus laser duration and laser power density when laser spot area is constant

和焊缝深度的影响显著;在较长的激光作用时间下,激光能量密度足够大,形成的小孔趋于稳定,即使激光作用时间继续增加,其对小孔深度影响不再显著。

不同激光持续作用时间下铝/镁焊缝截面形貌如图 11 所示。可以看出,焊缝底部出现蚀孔,随着激光持续作用时间的减少,焊缝熔深逐渐减小,当激光持续作用时间过短时,未能形成有效的铝/镁接头。

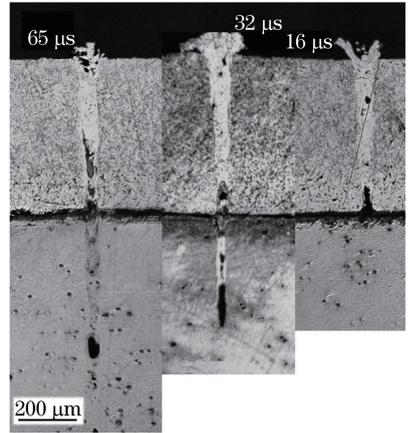


图 11 不同激光持续作用时间下的焊缝截面形貌

Fig. 11 Weld morphologies under different laser durations

### 3.4 纳秒激光点能量对焊缝熔深的影响

通过改变激光功率密度和激光持续时间,得到纳秒激光点能量与铝/镁异种接头焊缝熔深之间的关系,如图 12 所示。可以看出,在相同纳秒激光功率密度下,纳秒激光点能量与焊缝熔深呈对数关系。在一定纳秒激光点能量范围内,焊缝熔深随激光点能量的增大而快速增大,随后趋于平缓。如图 12 中点 1 到点 2 所示,当纳秒激光点能量相同时,随着激光持续作用时间的增加,当激光功率密度减小时,焊缝熔深随激光功率密度的减小而减小;如图 12 中点

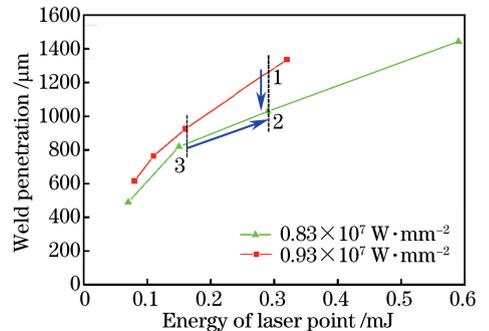


图 12 不同激光功率密度下焊缝熔深随纳秒激光点能量的变化

Fig. 12 Penetration depth of welds versus nanosecond laser energy under different power densities

3到点2所示,当激光功率密度相同时,焊缝熔深随纳秒激光点能量的增大而增大。因此,激光功率密度是影响铝/镁接头焊缝熔深的关键因素。

## 4 结 论

通过纳秒激光中心搭接焊接得到的铝/镁焊缝表面成形良好,焊缝界面处无明显裂纹,焊缝剪切强度达到86 MPa。当纳秒激光光斑直径一定时,纳秒激光功率密度与焊缝熔深呈线性关系;当纳秒激光光斑直径增大时,随着纳秒激光功率密度的减小,激光点能量增大。纳秒激光持续作用时间与焊缝熔深呈对数关系。纳秒激光功率密度和纳秒激光点能量是影响铝/镁接头焊缝熔深的关键因素。

**致谢** 感谢英国克兰菲尔德大学的激光焊接中心提供设备帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Q. Magnesium/aluminum dissimilar metal laser welding technology in the application and development of auto industry[J]. World Nonferrous Metals, 2016(16): 104-105.  
刘倩. 镁/铝异种金属激光焊接技术在汽车工业中的应用与发展[J]. 世界有色金属, 2016(16): 104-105.
- [2] Liu P, Li Y J, Wang J, *et al.* Microstructure in interface zone of diffusion-bonded joint of Mg/Al dissimilar materials [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 5-8.  
刘鹏, 李亚江, 王娟, 等. Mg/Al异种材料真空扩散焊界面区域的显微组织[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 5-8.
- [3] Chen Y, Fu N N, Shen C B, *et al.* Microstructure and properties of dissimilar materials Mg/Al laped joint by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 93-96.  
陈影, 付宁宁, 沈长斌, 等. 镁铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 93-96.
- [4] Sato Y S, Park S H C, Michiuchi M, *et al.* Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(9): 1233-1236.
- [5] Wang J, Feng J C, *et al.* Research status and development trend of welding magnesium and aluminum[J]. Welding & Joining, 2007(9): 15-19.  
王军, 冯吉才. 镁铝异种金属焊接研究现状与进展[J]. 焊接, 2007(9): 15-19.
- [6] Masoudian A, Tahaei A, Shakiba A, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir weld of dissimilar AZ31-O magnesium alloy to 6061-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1317-1322.
- [7] Shang J, Wang K H, Tian H J, *et al.* Study on cold metal transfer welded lap joints of Mg/Al dissimilar metals [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 41-45.  
尚晶, 王克鸿, 田宏军, 等. 冷金属过渡搭接焊镁铝异种金属接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 41-45.
- [8] Yu G, Zhao S S, Zhang Y J, *et al.* Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. Chinese Journal of 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] Borrisutthekul R, Miyashita Y, Mutoh Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(2): 199-204.
- [10] Suder W J, Williams S W. Investigation of the effects of basic laser material interaction parameters in laser welding [J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(3): 032009.
- [11] Zhang J, Shan J G, Wen P, *et al.* Formation regularity of pores during laser welding of die-cast magnesium alloys and its mechanism [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603006.  
张婧, 单际国, 温鹏, 等. 压铸镁合金激光焊气孔形成规律及原因 [J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603006.
- [12] Pierron N, Sallamand P, Mattei S. Study of magnesium and aluminum alloys absorption coefficient during Nd : YAG laser interaction [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(6): 3208-3214.