

# 压铸镁合金激光焊气孔形成规律及原因

张婧<sup>1</sup> 单际国<sup>1,2</sup> 温鹏<sup>1,2</sup> 任家烈<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 清华大学机械工程系, 北京 100084  
<sup>2</sup> 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084

**摘要** 由于母材含有大量气源,气孔是压铸镁合金激光焊最主要的问题。在不同的激光功率密度下,采用不同的热输入对压铸镁合金激光焊气孔形成规律进行了研究。在低激光功率密度( $1.6 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup> 以下)焊接时,随着热输入的升高气孔率持续升高;在高激光功率密度( $3.2 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup> 以上)焊接时,在一定热输入下气孔率出现极小值,由此增加或减少热输入都会造成气孔率的升高,但当热输入非常低时气孔率又出现降低的趋势,即不同激光功率密度下气孔率随焊接热输入的变化存在两种不同的规律。结合压铸镁合金母材中气源行为以及焊接热过程,对两种规律的形成原因进行了讨论和实验验证,研究发现获得低气孔率焊缝的关键是抑制压铸镁合金中原子氢的析出,使其以固溶形式继续存在于焊缝中。

**关键词** 激光技术;焊接;压铸镁合金;气孔;激光功率密度;热输入

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603006

## Formation Regularity of Pores During Laser Welding of Die-Cast Magnesium Alloys and Its Mechanism

Zhang Jing<sup>1</sup> Shan Jiguo<sup>1,2</sup> Wen Peng<sup>1,2</sup> Ren Jialie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup> Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China

**Abstract** Welding pore is the main problem during laser welding of die-cast magnesium alloys. The influences of laser power density and heat input on pore formation regularity during laser welding of die-cast magnesium alloys are studied. The formation regularities of pore are different under low and high laser power densities. Under low laser power densities (less than  $1.6 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>), porosity increases with the increase of weld heat input; under high power densities (more than  $3.2 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>), the minimum value of porosity can be obtained at certain weld heat input, and changing weld heat input a bit higher or lower than this certain value both increase porosity, but when the weld heat input is low enough, low porosity can be obtained. The different regularities can be attributed to the influences of laser power density and weld heat input on welding thermal process and the behaviors of gas sources in weld pool. It is found that suppressing the atomic hydrogen precipitation is the key of obtaining low porosity welds.

**Key words** laser technique; welding; die-cast magnesium alloy; pore; laser power density; heat input

**OCIS codes** 140.3470; 140.3510; 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

镁合金作为一种发展迅猛的轻质结构材料,在汽车、电子和仪表等工业产品中得到广泛使用,且未来应用前景良好。目前镁合金构件主要以压铸成型为主,受压铸工艺的影响,压铸镁合金内部通常含有较多的气体,气孔成为压铸镁合金焊接过程中的主

要问题。与其他种类镁合金相比,压铸镁合金的焊接问题更加突出,通常被认为是不可焊接的,这制约了压铸镁合金构件的进一步应用。激光焊接具有能量密度集中、效率高和柔性好<sup>[1~3]</sup>等突出优势、在变形镁合金焊接中得到较多的研究和应用<sup>[4~9]</sup>,但激光焊接压铸镁合金的气孔问题仍然严重<sup>[5~10]</sup>。

**收稿日期**: 2011-03-23; **收到修改稿日期**: 2011-04-11

**基金项目**: 国家自然科学基金(50775124)资助课题。

**作者简介**: 张婧(1982—),女,博士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。

E-mail: zhang-jing06@mails.tsinghua.edu.cn

**导师简介**: 单际国(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光焊、堆焊和钎焊等方面的研究。

E-mail: shanjg@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

由于对压铸镁合金母材内部高含量气源<sup>[11]</sup>如何影响焊接气孔尚不明晰,即便严格控制焊接工艺,并结合焊后重熔以促进气泡逸出,效果也非常有限,气孔率仍维持在较高水平<sup>[9]</sup>。总之,目前针对压铸镁合金焊接气孔形成规律的研究尚少,且不同的研究结果存在较大差异<sup>[5,6,9,10]</sup>,尚未找到一条解决压铸镁合金激光焊接气孔的可行之道。

本文采用不同类型的激光热源对压铸镁合金进行了焊接,针对激光功率密度及热输入对压铸镁合金激光焊接气孔率的影响规律进行了研究,并结合压铸镁合金气源的特点和激光焊接热过程的特点,对气孔规律的形成原因进行了分析讨论,为控制与防止激光焊接压铸镁合金中的气孔问题提供了实验依据和理论参考。

## 2 实验方法

激光焊接所用母材为 2.54 mm 厚的 AM50 压铸镁合金板材,其名义化学成分如表 1 所示。焊接热源采用 PRC 生产的 3 kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器及 IPG 生产的 6 kW 光纤激光器,两种激光器的波长分别为 10.6 μm 和 1.07 μm,聚焦光斑直径分别为 0.6 mm 及 0.2 mm。焊接过程中对熔池采取正、背面氩气保护。焊前采用化学和机械方法将试样表面的氧化膜去除,焊接完成后,对同一条焊缝焊接稳定段的 3 个横断面进行取样,并制作金相试样,化学浸蚀后在金相显微镜下观察和拍照。基于 Matlab 软件编程对焊缝横截面的金相照片进行图像处理计算气孔率,气孔率用气孔总面积与焊缝总面积的比

值表示,最终气孔率取 3 个截面的平均值。

表 1 AM50 压铸镁合金的名义化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Nominal chemical composition of AM50 magnesium alloy (mass fraction, %)

Mg	Al	Zn	Mn	Zr
Bal.	4.9	—	0.26	—

## 3 实验结果

采用不同激光功率和焊接速度对 AM50 压铸镁合金板材进行了焊接。图 1 为 CO<sub>2</sub> 激光焊缝横截面形貌,所采用功率为 800,1000 和 1200 W。随着功率的升高,气孔倾向有所升高;同一功率下,随着焊接速度的升高,焊缝由熔透变为不熔透,在熔透状态下气孔倾向都比较高,在不熔透状态时气孔倾向有所降低。图 2 为光纤激光焊缝横截面形貌,用功率为 500,1000 和 1500 W,在 1000 W-2 m/min 和 1500 W-5 m/min 时获得了低气孔率和成形良好的焊缝。根据所得的焊缝横截面对气孔率进行计算,图 3,4 分别是采用两种不同激光器焊接时气孔率的变化规律。对于 CO<sub>2</sub> 激光焊接,气孔率随着激光功率的减小以及焊接速度的升高而降低。对于光纤激光焊接,采用较低功率 500 W 焊接时,气孔率随着焊接速度的升高而降低;采用较高功率 1000 W 及 1500 W 时,焊接速度适中时存在气孔率的极小值,焊接速度低于或高于此值均会造成气孔率的升高,而当焊接速度非常高时气孔率又呈下降趋势。

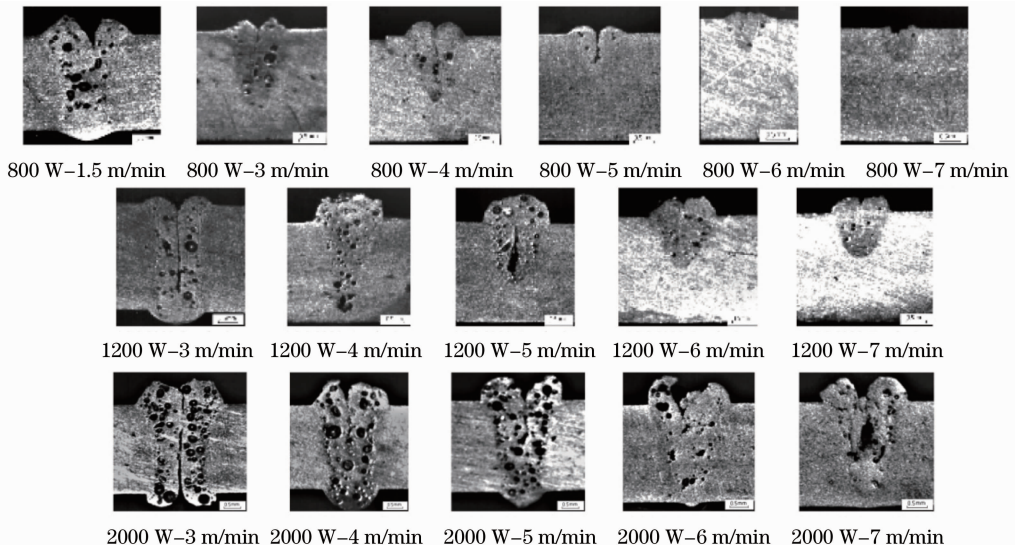


图 1 不同焊接条件下 CO<sub>2</sub> 激光焊缝横截面典型形貌

Fig. 1 Typical cross sections of CO<sub>2</sub> laser weld seam under different welding conditions

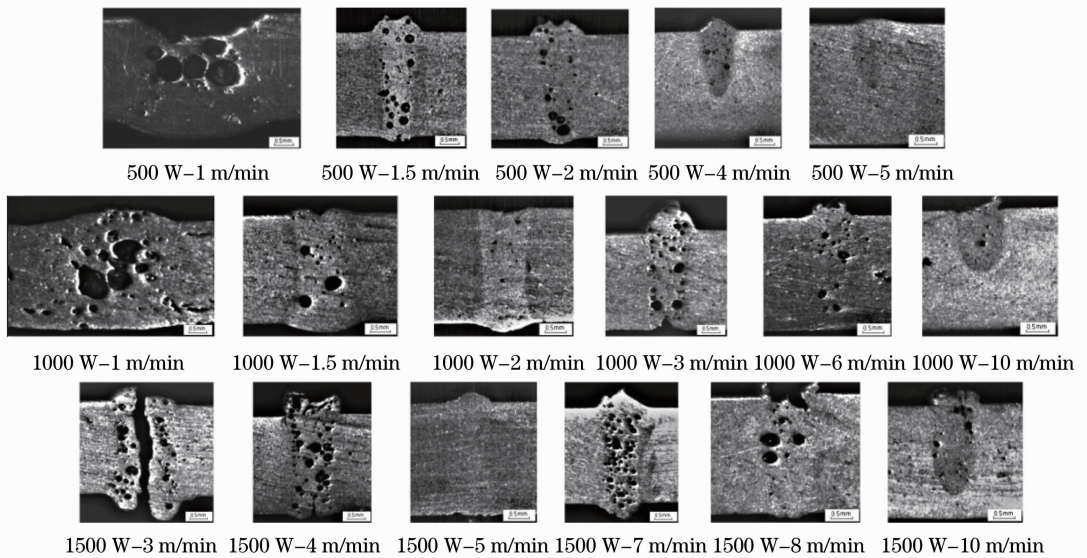


图 2 不同焊接条件下光纤激光焊缝横截面典型形貌

Fig. 2 Typical cross sections of fiber laser weld seam under different welding conditions

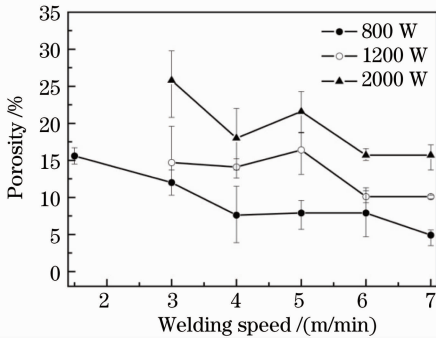


图 3 激光功率和焊接速度对 CO<sub>2</sub> 激光焊缝气孔率的影响

Fig. 3 Effect of laser power and welding speed on porosity of CO<sub>2</sub> laser weld seam

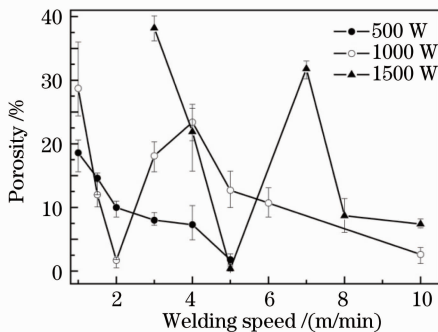


图 4 激光功率和焊接速度对光纤激光焊缝气孔率的影响

Fig. 4 Effect of laser power and welding speed on porosity of fiber laser weld seam

激光功率  $P$  和光斑直径  $d$  决定着激光功率密度  $E$ ,  $E = 4P/(\pi d^2)$ , 表示单位面积上的热能。激光功率  $P$  和焊接速度  $V$  决定着焊接线能量  $q$ ,  $q = P/V$ ,

表示焊接过程的热输入。图 5 为不同激光功率密度下气孔率随线能量变化的曲线, 由图 3, 4 转换而来。由图 5 可知, 不管是何种激光光源, 在激光功率密度较低(低于  $1.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ )时, 气孔率随热输入的增加都呈升高趋势, 在激光功率密度较高(高于  $3.2 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ )时气孔率在热输入一定时存在气孔率的极小值, 在此基础上热输入的减少或增加均会造成气孔率的升高, 而当热输入非常小时气孔率又降低。

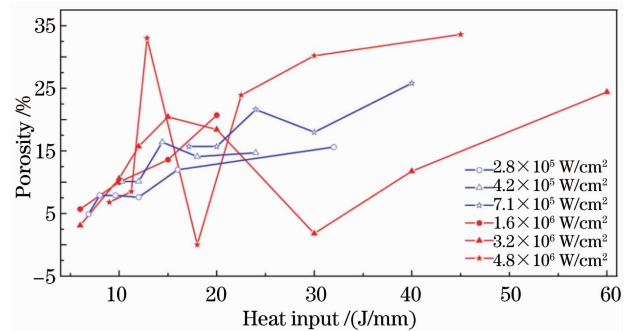


图 5 激光功率密度和焊接热输入对焊缝气孔率的影响

Fig. 5 Effect of laser power density and welding heat input on porosity of laser weld seam

采用 CO<sub>2</sub> 激光及光纤激光焊接时, 激光功率密度范围分别为  $2.8 \times 10^5 \sim 7.2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  及  $1.6 \times 10^6 \sim 4.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。由于各功率密度下都形成以小孔为特征的激光深熔焊, 材料对激光的吸收率几乎为 100%, 因此这里可以忽略材料对不同波长激光的吸收率差别。由图 5 可知, 不同的激光功率密度是导致两种类型激光器出现不同气孔率

变化规律的根本原因,与激光器类型无关。因此,激光焊接中影响气孔率的主要参数可归结为激光功率密度和热输入。采用高的激光功率密度焊接时,热输入取合适值时可以得到低气孔率和成形良好的焊缝。

## 4 分析与讨论

压铸镁合金激光焊接的气孔是焊缝金属凝固期间未能从熔池中及时浮出而残留于金属中的气泡<sup>[1,6]</sup>,气孔形成主要取决于两个环节:气泡的形核及长大环节和气泡的逸出环节。对于压铸镁合金来说,母材中含有两种形式的气源——高压分子态气体及大量固溶的原子氢<sup>[7,8]</sup>。从原理上推测压铸镁合金激光焊气孔形成过程如下:焊接时金属熔化,熔池中高压分子态气体形成的气泡膨胀及合并,部分逸出熔池,部分留在焊缝中形成气孔;原子氢析出,或形核为气泡,或扩散进入现有的气泡使其长大,部分气泡逸出熔池,部分气泡留在焊缝中形成气孔。金属熔化和凝固的时间主要由焊接热过程决定。因此,压铸镁合金激光焊气孔的产生与母材内部的气源和焊接热过程直接相关。

低激光功率密度与高激光功率密度时气孔率变化规律呈现不同,主要是因为原子氢析出与气泡逸出竞争关系所引起的变化。低激光功率密度焊接时对应的熔池体积大,熔池冷却相比高激光功率密度时慢,因此原子氢的析出速度维持在较高水平,此时气泡逸出速度在工艺窗口范围内始终无法超过原子氢的析出速度,热输入的升高反而促进了原子氢的析出而使气孔率升高。高激光功率密度时熔池体积小,冷却快,原子氢的析出速度相比低激光功率密度焊接时要慢,此时在一定热输入时可得到气泡逸出速度大于原子氢析出速度的情况,从而得到低气孔率的焊缝。

在低功率密度激光焊接时,随着热输入的增大,熔池冷却速度变慢,一方面促进了原子氢的析出,有利于气泡形核及长大,增加气孔倾向;另一方面促进了气泡的逸出,有利于减小气孔倾向。气孔率的持续升高表明此时气泡的形核及长大环节在气孔形成中起了主要作用。在高功率密度激光焊接时,这里以 1500 W 光纤激光焊接为例(见图 2,4),焊接速度 5 m/min 时对应气孔率的极小值,从气泡逸出条件分析,焊接速度 4 m/min 及 3 m/min 更加有利于气泡的逸出,而 5 m/min 时低的气孔率说明分子态气体形成的气泡在焊接过程中有充足的时间逸出熔池

而不形成气孔。5 m/min 相比 4 m/min 时气泡逸出速度不过分降低,而原子氢的析出速度明显降低,从而得到了低气孔率焊缝。当焊速为 6 m/min 时,虽然原子氢的析出速度相比 5 m/min 时有所降低,但此时气泡逸出速度显著降低,气泡来不及逸出,又使气孔率升高。当焊速很高(大于 8 m/min)时,热输入非常小,原子氢的析出受到明显抑制,气孔率又降低。

为了研究压铸镁合金中两类气源行为对气孔形成的影响,焊接前通过真空加热保温除去母材中的原子氢。图 6(a),(b)分别为焊前不除氢和焊前真空加热 350 °C 并且保温 1.5 h 除氢后激光焊接得到的焊缝,两个焊缝的激光焊接工艺参数完全相同(CO<sub>2</sub> 激光焊接,激光功率 800 W,焊接速度 1.5 m/min),施焊后两个焊缝气孔率分别为 23.4% 和 3.2%,通过焊前去除原子氢,焊缝气孔率大大降低,说明压铸镁合金母材中原子氢的析出对焊缝气孔的形成起着主要作用。同时,对高激光功率密度焊接时得到的低气孔率焊缝进行低激光功率密度激光重熔(三道光纤激光 1000 W,2 m/min 焊缝毗邻,在此焊道上采用 CO<sub>2</sub> 激光 700 W,1.5 m/min 重熔),如图 7(a),(b)所示,气孔率再次升高(6.8% 升高到 18.3%),说明高功率密度下得到的低气孔率焊缝中仍然固溶着大量的原子氢,在低功率密度激光重熔过程中这部分原子氢再次析出导致气孔率升高。两个实验都表明,压铸镁合金母材中大量固溶的原子氢对焊缝气孔起重要作用,激光焊接获得低气孔率焊缝的关键是抑制原子氢的析出,使其继续以原子形式固溶于焊缝金属中。

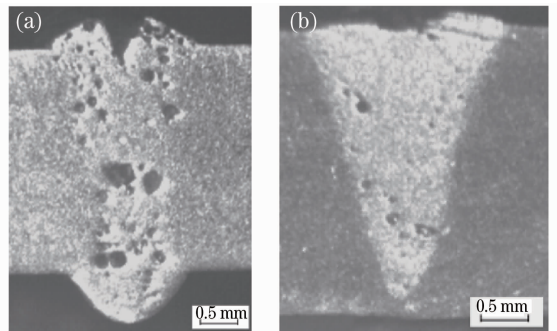


图 6 不同除氢条件下焊缝横截面形貌。(a)焊前未除氢,(b)焊前去除原子氢

Fig. 6 Cross sections of laser weld seam with different hydrogen removal conditions. (a) no hydrogen removal solution, (b) hydrogen removal solution before welding

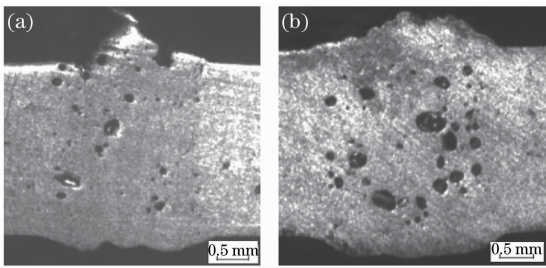


图 7 激光重熔焊缝横截面形貌

(a) 光纤激光三道熔焊, (b) CO<sub>2</sub> 激光重熔

Fig. 7 Cross sections of laser remelting experiment

(a) three scanning by fiber laser, (b) remelting by CO<sub>2</sub> laser after fiber laser scanning

## 5 结 论

1) 激光功率密度以及热输入是影响激光焊接气孔率的重要因素,不同激光功率密度下气孔率随热输入的变化规律存在差异。在低激光功率密度( $1.6 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup> 以下)焊接时,随着热输入的升高气孔率持续升高;在高激光功率密度( $3.2 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup> 以上)焊接时在一定热输入下存在气孔率的极小值,由此增加或减少热输入都会造成气孔率的升高,但当热输入非常低时也会使气孔率出现降低的趋势。

2) 低激光功率密度与高激光功率密度焊接时气孔率变化规律不同是由原子氢析出和气泡逸出的竞争关系所导致的。低激光功率密度焊接时对应熔池体积大,寿命长,因此原子氢的析出速度维持在较高水平,热输入的升高促进了原子氢的析出而使气孔率升高;高激光功率密度焊接时熔池体积小,寿命短,原子氢的析出量相对较少,在一定热输入时可得到气泡逸出速度大于原子氢析出速度的情况,从而获得低气孔率的焊缝。

3) 压铸镁合金激光焊时获得低气孔率的关键是抑制焊缝金属中原子氢的析出,使其继续以原子

形式固溶于焊缝中。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun *et al.*. Application and research of laser processing automobile body manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 17~23  
陈根余, 梅丽芳, 张明军等. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 17~23
- 2 Hu Lianhai, Huang Jian, Li Zhuguo *et al.*. Microstructure and properties of high power CO<sub>2</sub> laser welded pipeline steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3174~3178  
胡连海, 黄 坚, 李铸国等. 高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接管线钢接头的组织与性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3174~3178
- 3 Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong *et al.*. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2091~2097  
梅丽芳, 陈根余, 金湘中等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2091~2097
- 4 X. Cao, M. Jahazi, J. P. Immarrigeon *et al.*. A review of laser welding techniques for magnesium alloys [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, **171**(2): 188~204
- 5 M. Marya, G. R. Edwards. The laser welding of magnesium alloy AZ91 [J]. *Weld. World*, 2000, **44**(2): 31~37
- 6 X. Cao, M. Xiao, M. Jahazi *et al.*. Nd:YAG laser welding of magnesium alloy castings [C]. San Francisco: 2005 TMS Annual Meeting & Exhibition: Magnesium Technology, 2005, 441~443
- 7 A. Weisheit, R. Galun, B. L. Mordike. CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium based alloys [J]. *Weld. J.*, 1998, **77**(4): 148~154
- 8 M. Pastor, H. Zhao, T. DebRoy. Continuous wave Nd:YAG laser welding of AM60B magnesium alloys [J]. *J. Laser Appl.*, 2000, **12**(3): 91~100
- 9 H. Zhao, T. DebRoy. Pore formation during laser beam welding of die-cast magnesium alloy AM60B-mechanism and remedy [J]. *Weld. J.*, 2001, **80**(8): 204~210
- 10 Shan Jiguo, Zhang Jing, Zheng Shiqing *et al.*. Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(s3): 234~239  
单际国, 张 婧, 郑世卿等. 镁合金激光焊接气孔问题的实验研究 [J]. *稀有金属与工程*, 2009, **38**(s3): 234~239
- 11 Shan Jiguo, Zhang Jing, Zheng Shiqing *et al.*. Experimental study on the reason of pore formation in laser welding of die-cast magnesium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, **45**(8): 1006~1012  
单际国, 张 婧, 郑世卿等. 压铸镁合金激光焊气孔形成原因的实验研究 [J]. *金属学报*, 2009, **45**(8): 1006~1012