

# ZM5 镁合金薄壁铸件光纤激光补焊工艺与组织性能研究

陈 宏 李铸国 姚成武 吴毅雄

上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200030

**摘要** 采用光纤激光对 ZM5 镁合金薄壁铸件进行补焊研究, 以焊道稀释率和表面交角进行工艺评价, 通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)表征了样品的显微组织、相组成, 并作了拉伸试验分析。结果表明, 补焊焊缝稀释率和焊道表面交角成线性相关变化, 补焊层由细小的等轴树枝晶组成, 平均晶粒直径为 15~20  $\mu\text{m}$ , 约为 ZM5 母材的 1/4; 补焊层基体组织为  $\alpha$ -Mg 相, 晶界析出 Mg-Al 共晶相, 其中  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 以连续网状或不规则的点状析出; 补焊层抗拉强度和延伸率优于母材, 补焊层拉伸断口为准解理断裂, 断口有少量韧窝, 而经均匀化热处理的母材断口为脆性断裂的解理断口。组织表征和性能试验表明, 光纤激光可实现 ZM5 镁合金铸件的缺陷补焊, 且在工艺上具有很好的适应性。

**关键词** 激光技术; ZM5 镁合金; 光纤激光; 激光补焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203002

## Research on Microstructure and Properties of Fiber Laser Repairing ZM5 Magnesium Alloy Thin-Walled Casting

Chen Hong Li Zhuguo Yao Chengwu Wu Yixiong

Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao  
Tong University, Shanghai 200030, China

**Abstract** In order to repair thin-walled castings of ZM5 magnesium alloy, the parameters for fiber laser welding are determined by dilution rate and weld-surface angle. Scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) are adopted for microstructure observation and analysis of chemical composition while tensile tests are carried out for evaluation of mechanical properties. It's demonstrated that the relationship between dilution rate and weld-surface angle is linear dependence. The fiber laser welding layer consists of tiny equiaxed dendrites with the average grain diameter of 15 to 20  $\mu\text{m}$  which is 1/4 of ZM5 base. The base structure of welding layer is  $\alpha$ -Mg phase, and the eutectic Mg-Al phase,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> mainly, is even dispersed along the grain boundary of welding layer. Shown in tensile tests, quasi-cleavage fracture occurred in fiber laser welding layer, which achieves higher strength and toughness than those of the brittle-fractured base metal. Thus thin-walled castings of ZM5 magnesium alloy are so well repaired by fiber laser that production quality and efficiency are greatly improved.

**Key words** laser technique; ZM5 magnesium alloy; fiber laser; laser welding; microstructure; properties

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900; 350.3850

### 1 引 言

作为极其轻质的工程结构金属材料, 镁合金具有比强度高、比刚度大、可浇性好和可回收利用等优点, 被誉为“21世纪绿色结构材料”而被广泛应用于航空航天、国防工业、交通运输等领域<sup>[1]</sup>。其中 ZM5 是最常见的一种铸造镁合金, 主要用于飞机、航天器、汽车发动机上的高负荷零件, 如飞机轮毂、航天器壳体和轿车齿

收稿日期: 2014-08-15; 收到修改稿日期: 2014-09-10

作者简介: 陈 宏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接与熔覆方面的研究。E-mail: david723ch@sina.com

导师简介: 李铸国(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光焊接与表面工程方面的研究。E-mail: lizg@sjtu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

轮传动变速箱体<sup>[2-4]</sup>等。但镁合金在铸造过程中极易出现疏松、气孔、夹渣、裂纹等铸造缺陷<sup>[5]</sup>,导致铸件不合格率较高。为了减少材料浪费和提高生产效率,常会采用电弧焊补镁合金铸件缺陷<sup>[6]</sup>。然而,由于镁合金熔点低、线膨胀系数大、导热性强而易引起较大的热应力,即使采用小电流的低热输入量补焊,在镁合金焊缝及近缝区金属仍然容易产生过热和晶粒长大,焊接过程中易产生裂纹缺陷,甚至产生焊接咬边、薄壁件焊穿等缺陷,导致镁合金补焊质量没有达到理想效果<sup>[7]</sup>。

和电弧焊相比,激光焊<sup>[8-9]</sup>具有功率密度高、加热时间短、焊接热影响区窄以及产生的热应力低等突出优点,在铸造镁合金缺陷焊补上具有更好的适应性。采用光纤激光对 ZM5 镁合金薄壁铸件的缺陷进行补焊工艺试验,并对补焊接头作组织观察和拉伸测试,探讨光纤激光补焊镁合金铸件缺陷的可行性。

## 2 试验方案

试验母材为 ZM5 镁合金薄壁铸件,激光补焊焊丝成分与母材相同,ZM5 镁合金化学成分见表 1。ZM5 镁合金薄壁铸件微观组织如图 1 所示,经均匀化热处理,基体为  $\alpha$ -Mg 相,晶界析出的为  $\alpha$ -Mg 和  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 的共晶组织。

表 1 ZM5 镁合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of ZM5 magnesium alloy (massfraction, %)

Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Impurity
Balance	7.5~9.0	0.2~0.8	0.15~1.5	≤0.25	≤0.2	≤0.05	≤0.01	≤0.1

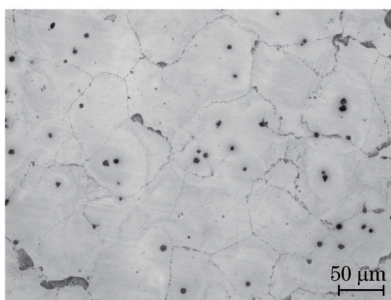


图 1 ZM5 镁合金铸件微观组织

Fig.1 Microstructure of ZM5 magnesium alloy

激光补焊设备为德国 IPG 公司 10 kW 光纤激光,ZM5 镁合金薄壁铸件补焊为表面堆焊,保护气体为工业纯氩,试验参数如表 2 所示。室温拉伸试验参照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002)<sup>[10]</sup>,使用电火花线切割分别切取母材与补焊层拉伸试样(取样示意图如图 2 所示),拉伸试验在 Zwick Z100/SN5A 电子万能试验机上进行。微观组织和拉伸断口观察使用扫描电子显微镜(SEM),并结合 X 射线衍射(XRD)进行相分析。

表 2 ZM5 镁合金光纤激光补焊试验工艺参数

Table 2 Parameters for fiber laser welding ZM5 alloy

Ar gas flow /(L/min)	Defocus /mm	Welding speed /(m/min)	Laser power /W	Wire speed /(m/min)
15	+20	0.5	1000 ~ 2400	1 ~ 3.6

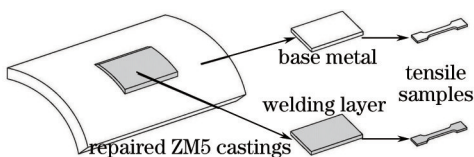


图 2 拉伸试样取样示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile sampling

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 补焊工艺对焊道稀释率与表面交角的影响

铸件缺陷需进行多层多道焊,焊道成形对补焊质量有着重要影响。堆焊焊道成形指标中,焊道稀释率

( $R_d$ )和焊道表面交角  $\alpha$  直接影响着铸件缺陷的补焊质量。如图3所示,焊道稀释率为焊道截面中熔化母材和补焊焊道全面积[熔化焊丝面积( $S_1$ )和熔化母材面积( $S_2$ )之和,即  $S_1+S_2$ ]的比值;焊道表面交角为焊道余高两侧与母材表面切角(即  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ )的平均值。铸件缺陷补焊过程中,焊道稀释率过大会造成余高相对熔深较小,激光能量过多地消耗在熔化母材上,容易导致薄壁铸件被焊穿<sup>[1]</sup>,且有损补焊效率;稀释率过小会造成余高过高,使得表面交角减小而产生焊道间死角、熔合不良等缺陷。通过测量各补焊工艺参数条件下焊道截面(图4),并按(1)式和(2)式计算焊道稀释率和表面交角。

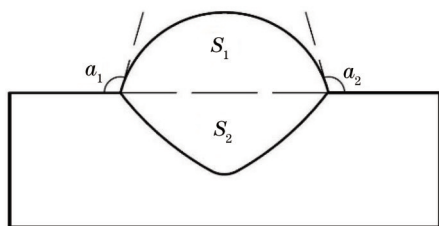


图3 稀释率和表面交角示意图

Fig.3 Schematic diagram of dilution rate and weld-surface angle

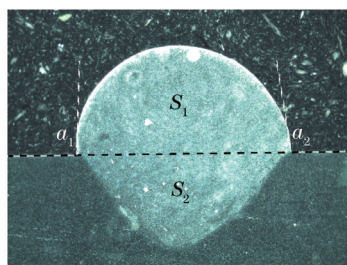


图4 ZM5镁合金铸件激光补焊焊道稀释率和表面交角测量示意图

Fig.4 Schematic diagram of measuring dilution rate and weld-surface angle of ZM5 laser beams

$$R_d = S_2 / (S_1 + S_2), \tag{1}$$

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2. \tag{2}$$

表3为不同工艺参数下的焊道稀释率与表面交角的试验结果。从表3可以看出,不同的激光功率和送丝速度工艺参数条件下,补焊焊道稀释率和焊道表面交角之间可以大致看作线性相关变化,即稀释率越大则焊道表面交角越大,稀释率越小则焊道表面交角越小,如图5所示。

表3 不同工艺参数下的焊道稀释率与表面交角

Table 3 Dilution rates and weld-surface angles

No.	Laser power /W	Wire speed /(m/min)	Dilution rate	Weld-surface angle /(°)
1	1000	1	0.87	144.35
2	1200	1.2	0.66	117.25
3	1200	1.5	0.40	90.92
4	1500	1.8	0.45	77.68
5	1500	2.2	0.63	108.30
6	1800	2.2	0.40	89.44
7	1800	2.8	0.59	105.9
8	2100	3.2	0.65	107.80
9	2100	3.4	0.52	100.14
10	2100	3.6	0.65	117.60
11	2300	3.4	0.62	116.74
12	2400	3.4	0.65	144.05
13	2400	3.6	0.54	114.25

当焊道稀释率为0.55~0.65、表面交角为100°~120°时,补焊焊道没有出现咬边、焊道死角或熔合不良等缺陷。采用表3中第8组工艺参数进行ZM5铸件缺陷补焊试验,图6为多层多道补焊实物图以及焊道横截面宏观照片,可以看出该工艺条件下多层多道ZM5镁合金补焊层中无气孔、咬边、裂纹等焊接缺陷。

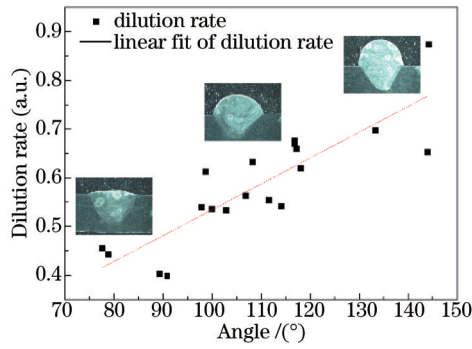


图5 焊道稀释率与表面交角的关系

Fig.5 Relationship between dilution rate and weld-surface angle

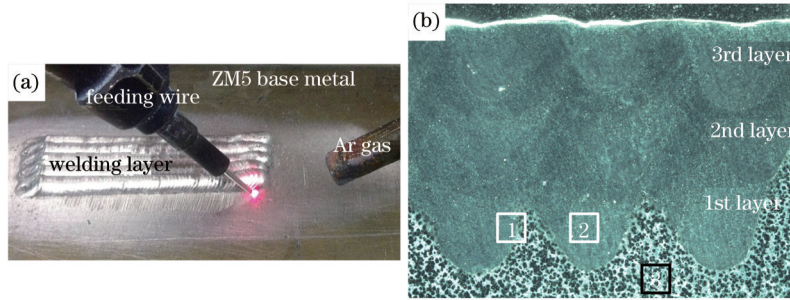


图6 ZM5铸件补焊试样。(a)实物图;(b)焊道横截面

Fig.6 Repairing ZM5 alloy castings by laser welding. (a) Repaired sample; (b) cross section metallography

### 3.2 补焊层组织显微组织

图7为ZM5镁合金补焊层相组成的XRD分析图谱,补焊层主要由 $\alpha$ -Mg相和少量的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相组成。图8为ZM5镁合金激光补焊层(第一层)的SEM显微组织照片。图8(a)为补焊层熔合区(图6中区域1)显微组织,在熔合区附近的较窄区域(200~250  $\mu$ m)内,补焊层为平面晶、胞状晶和柱状树枝晶;图8(b)为补焊焊道中心区域(图6中区域2)显微组织照片,为等轴树枝晶形态;图8(c)为图8(b)焊道中心区域等轴树枝晶的放大像,可见在等轴枝晶间有不连续的第二相析出,结合图7的XRD相组成分析结果,补焊层的相构成为:基体为 $\alpha$ -Mg相,枝晶间析出 $Mg_{17}Al_{12}$ 相,以及沿晶间分布的富Al的 $\alpha$ -Mg相[图8(c)箭头所示]。图8(d)为ZM5镁合金母材(图6中区域3)显微组织照片,晶界处存在不连续 $\alpha$ -Mg与 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶组织。

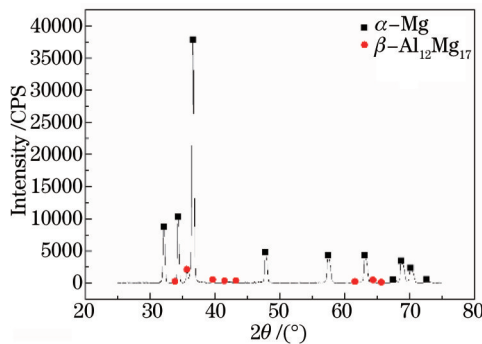


图7 补焊层XRD分析

Fig.7 XRD analysis of ZM5 magnesium welding layer

### 3.3 补焊层拉伸性能与断口形貌

图9为ZM5镁合金光纤激光补焊层(LBW)与母材(BM)拉伸试验的应力应变曲线。激光补焊层的抗拉强度和延伸率分别为245 MPa和9.0%,母材为218 MPa和6.6%。可见补焊层力学性能优于母材。图10为ZM5镁合金激光补焊层和母材的拉伸断口SEM形貌,图10(a)是ZM5镁合金母材拉伸断口,可以看出ZM5母材拉伸断裂是解理断裂机制,有较多脆性断裂的解理面,这些解理面呈河流花样状,由一些大小不等的解理阶梯

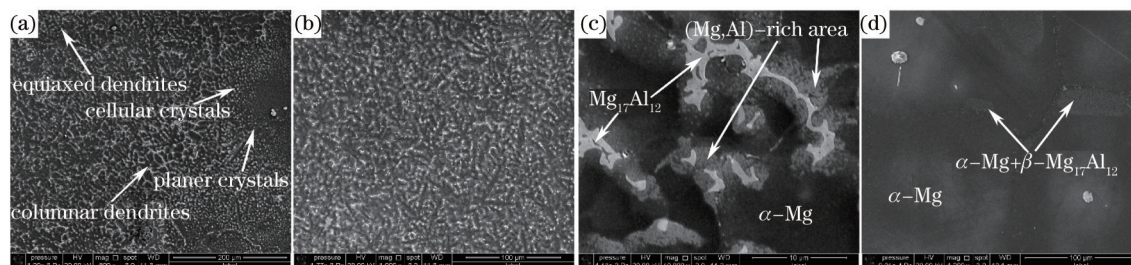


图8 ZM5镁合金补焊层及母材组织SEM照片。(a)熔合区;(b)焊缝中心;(c)焊缝中心放大像;(d)母材

Fig.8 SEM photographs of ZM5 base metal and welding layer. (a) Fusion zone; (b) weld center; (c) magnified view of weld center; (d) base metal

所构成;图10(b)为激光补焊层的拉伸断口,呈准解理断裂,断口有大量细小的准解理面和韧窝微孔,准解理面之间存在撕裂棱,而微孔则是由激光补焊晶界析出的 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 相颗粒在拉伸过程中脱落引起。相比之下,母材断口中的微孔较少,是因为母材经过固溶处理,原铸造组织内 $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 相溶解消失。因此,综合拉伸行为和断裂机制分析表面,ZM5镁合金激光补焊层的塑韧性优于母材。

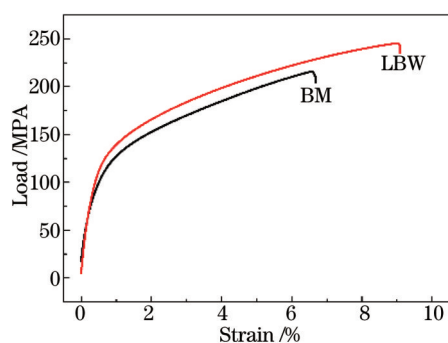


图9 母材和光纤激光补焊层的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of BM and LBW

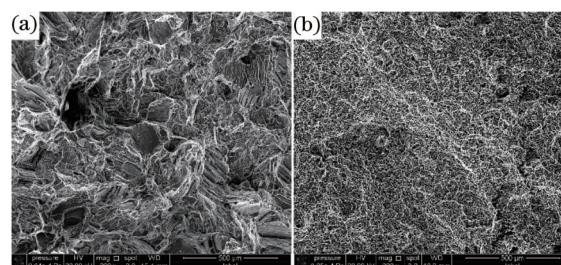


图10 拉伸断口SEM照片。(a)母材;(b)激光补焊层

Fig.10 SEM photographs of tensile fractures. (a) BM; (b) LBW

## 4 结 论

采用光纤激光对ZM5镁合金进行补焊,以焊道稀释率与焊道表面交角评价补焊焊道成形,并进行显微组织和力学性能分析,获得以下结果:

1) 激光补焊焊道稀释率和焊道表面交角之间可以大致看成线性相关变化,即稀释率越大,焊道表面交角越大;稀释率越小,焊道表面交角越小。多层多道ZM5镁合金激光补焊试验表明,补焊层中无气孔、咬边、裂纹等焊接缺陷;

2) 激光补焊层主要为等轴树枝晶,基体为 $\alpha$ -Mg相,枝晶间析出以 $Mg_{17}Al_{12}$ 为主的Mg-Al共晶相,补焊层平均晶粒直径约15~20  $\mu m$ ,与母材晶粒直径60~80  $\mu m$ 相比,补焊层的晶粒显著细化,为母材晶粒尺寸的1/4;

3) ZM5镁合金激光补焊层晶界析出相形态与母材不同。在母材晶界处,Mg-Al共晶析出相为较大的椭圆块状,共晶相内部的 $Mg_{17}Al_{12}$ 为细条状;在补焊层晶界处, $Mg_{17}Al_{12}$ 以连续网状或不连续的点状析出;

4) 激光补焊层的抗拉强度和延伸率均高于母材。ZM5母材拉伸断裂是解理断裂机制,有较多脆性断裂呈河流花样状的解理面;激光补焊层的拉伸断口呈准解理断裂,断口有少量韧窝,塑韧性优于母材。

## 参 考 文 献

- 1 K U Kainer. Magnesium Alloys and Technology[M]. Germany: WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA Press, 2003.
- 2 I Ostrovsky, Y Henn. Present state and future of magnesium application in aerospace industry[C]. International Conference "New challenges in aeronautics" ASTEC, 2007, 7: 19-22.
- 3 Wei Chengcheng, Huang Jian, Dai Jun, et al.. Analysis of laser-welded joint of dissimilar magnesium alloys AZ31 and NZ30K[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(12): 1203002.

- 隗成澄, 黄 坚, 戴 军, 等. 异种镁合金 AZ31 与 NZ30K 激光焊接接头分析[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1203002.
- 4 Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603015.
- 檀财旺, 李俐群, 陈彦宾, 等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603015.
- 5 H E Friedrich, B L Mordike. Magnesium Technology[M]. Berlin: Springer Press, 2006.
- 6 Wang Xin, Yang Chuang, Feng Jicai. Research on TIG repairing technology for ZM6 magnesium alloy casting[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 33-36.
- 王 欣, 杨 闯, 冯吉才. ZM6 镁合金铸件 TIG 焊补工艺[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 33-36.
- 7 Yang Hongwei, Wang Yasheng. Repairing technology of magnesium casting defect[J]. Welding Technology, 2004, 33(4): 32-33.
- 杨宏伟, 王雅生. 镁合金铸件缺陷补焊技术[J]. 焊接技术, 2004, 33(4): 32-33.
- 8 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.
- 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.
- 9 Quan Yajie. Research status and development trends of laser welding of magnesium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050001.
- 全亚杰. 镁合金激光焊的研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050001.
- 10 National Standardization Technical Committee. GB/T 228-2002, Metallic Materials Tensile Testing at Ambient Temperature[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- 全国标准化技术委员会. GB/T 228-2002, 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- 11 Ma Long, Ni Jiaqiang. Research on repairing cast magnesium alloys[C]. Tenth Shenyang Science Conference (Information Science and Engineering branch), 2013.
- 马 龙, 倪家强. 铸造镁合金补焊工艺研究[C]. 第十届沈阳科学学术年会论文集(信息科学与工程技术分册), 2013.

栏目编辑: 张浩佳