

# 稀土镁合金铸件表面微观缺陷形成机理及修复技术

陈 舸<sup>1,2</sup> 江善尧<sup>1</sup> 肖 旅<sup>1</sup> 王征远<sup>1</sup> 李宝辉<sup>1</sup> 董喜旺<sup>1</sup>

(1 上海航天精密机械研究所, 上海市 201600)

(2 上海交通大学, 上海市 200240)

**文 摘** VW63Z 稀土镁合金铸件表面微观缺陷经过荧光检测的结果表现为“条状荧光”现象, 当该缺陷出现在铸件非加工面时, 由于无法经过机械加工去除将直接导致铸件报废。本文探究了铸件表面缺陷的微观组织及其形成机理, 结果表明微观缺陷主要成分为稀土氧化物的双层氧化膜, 其中部分存在夹杂物; 金属液汇流导致表面微观缺陷更易形成。应用激光熔凝技术对铸件表面微观缺陷进行处理, 当平顶激光束输出功率为 800 W 时, 重熔层组织呈树枝晶形貌特征, 晶粒细小并与基体结合良好, 重熔层深度约为 915  $\mu\text{m}$ , 控制铸件热影响范围的同时基本可以修复铸件表面缺陷, 原缺陷位置荧光检测未见条纹状缺陷。

**关键词** 稀土镁合金, 微观缺陷, 激光熔凝

中图分类号: TG14

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.021

## Formation Mechanism and Repair Technology of Surface Micro-defects of Rare Earth Magnesium Alloy Castings

CHEN Ge<sup>1,2</sup> JIANG Shanyao<sup>1</sup> XIAO Lyu<sup>1</sup> WANG Zhengyuan<sup>1</sup> LI Baohui<sup>1</sup>  
DONG Xiwang<sup>1</sup>

(1 Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

(2 Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract** The micro-defects on the surface of VW63Z rare earth magnesium alloy castings were shown as "stripe fluorescence" as a result of fluorescence detection. The micro-defects which cannot be removed by mechanical processing would directly scrap the castings if it appeared on the non-machined surface of the casting. The microstructure of the surface defects of castings and their formation mechanism were investigated in this paper. Results showed that the main component of the micro defects was the double-layer oxide film of rare earth oxide, some of which contained inclusions; the confluence of the molten metal made the surface micro defects to form more easily. The laser melting technology was used to treat the surface micro-defects of the casting. When the output power of the flat-top laser beam was 800 W, the microstructure of the melted layer presented the dendrite characteristic, had finer grains and good combination with the matrix. The depth of the remelted layer was about 915  $\mu\text{m}$ , which could basically repair the surface defects of the casting while controlling the heat-affected range of the casting. The fluorescence detection of the original defect position showed no streak defects.

**Key words** Rare earth magnesium alloy, Micro-defects, Laser melting

### 0 引言

镁合金作为最轻的金属结构材料, 兼备高比强

度、比模量, 优异的导热、电磁屏蔽性能, 因此其研究和应用受到广泛关注<sup>[1]</sup>。Mg-Gd-Y 系高强耐热铸造

收稿日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(U2037601); 上海市科学技术委员会项目(18511109300)

第一作者简介: 陈舸, 1988 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事铸造镁合金材料开发及晶粒细化工作。E-mail: 18916090036@163.com

通信作者: 肖旅, 1983 年出生, 博士, 研究员, 上海航天精密机械研究所, 主要从事轻合金材料开发工作。E-mail: 9075986@qq.com

镁合金如VW63Z、VW83Z、VW103Z等具有优异的室、高温综合力学性能,在航空、航天领域广泛应用<sup>[2]</sup>。

砂型铸造是目前航天铸造产品中应用最为广泛的造型方法。稀土镁合金常采用砂型铸造的方式进行制备<sup>[3]</sup>。金属液在浇注凝固时,砂型直接与高温金属液接触,并提供铸件凝固、冷却所需的型腔,铸件会出现一定程度的卷气、夹杂等缺陷。工业生产中常用荧光检测的方法来观察铸件表面质量情况,铸件在浇注过程中产生的部分缺陷会直接暴露在表面,经过荧光检测的结果表现为“条状荧光”现象(简称荧光条纹),如图1所示。分析发现荧光条纹缺陷不同于裂纹和冷隔系表面缺陷,一般深度不超过1 mm,当缺陷出现铸件机加工面时可轻易通过机加工方法去除;然而随着铸件近净成形的要求越来越高,当该缺陷出现在铸件非加工面时,将难以通过机械加工方式去除,并称为潜在的裂纹萌生点,从而影响铸件合格率。



图1 试板铸件表面微观缺陷荧光检测结果

Fig. 1 Fluorescence detection results of micro-defects on the surface of castings

工业生产中应对该种缺陷的普遍处理方式为其与其他表面缺陷归为一类,采用机械加工打磨去除缺陷区域后氩弧焊补焊的方式修补该种缺陷,其主要缺点包括:(1)微观缺陷在铸件表面分布广,挖除时需要考虑铸件表面特征,挖除难度大、工时长;(2)采用氩弧焊补焊修复微观缺陷时,造成的热影响区大,镁合金铸件容易产生裂纹,造成铸件报废。

激光表面处理通常用于强化镁合金的表面性能,主要方法包括激光表面熔凝、合金化、熔覆和复合强化等<sup>[4]</sup>。其中激光熔凝处理<sup>[5]</sup>是用较高能量密度的激光束照射金属表面,形成的熔池急冷后使表面强化。其主要优点是能够在材料表面制造高质量的熔凝层,对基体材料热影响小。高亚丽<sup>[6]</sup>等使用10 kW横流CO<sub>2</sub>激光器在真空条件下重熔处理AZ91HP镁合金表面,改性层产生细晶强化,硬度提高,耐磨性和减摩性均增加。MAJUMDAR J D<sup>[7]</sup>在氩气保护下用CO<sub>2</sub>激光器分别对MEZ(Zn0.5%, Mn0.1%, Zr0.1%, Re2%)和AZ31, AZ61

及WE43镁合金进行了表面熔凝处理。发现激光功率为1.5~3 kW、扫描速度为100~300 mm/min条件下可得到与基体结合良好的表面改性层,其抗点蚀性显著提高。WANG A等<sup>[8]</sup>采用Nd:YAG激光器在Mg-Zn镁合金表面制备同质涂层,涂层由细小的等轴晶组成,无裂纹等缺陷。

激光熔凝处理通常作为镁合金表面强化的技术,而将激光熔凝作为表面缺陷修复技术则鲜有报道。本文将对镁合金铸件表面微观缺陷的形成机理进行探究,尝试采用激光熔凝处理修复稀土镁合金铸件表面微观缺陷,讨论激光束光型和输出功率对修复效果的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料及制造工艺

采用砂型铸造的方法制备VW63Z稀土镁合金。原材料为纯Mg、Mg-20Gd中间合金、Mg-30Y中间合金,晶粒细化剂原材料为Mg-30Zr中间合金。合金熔炼选用坩埚式电阻炉(GR-150-9)。将预热后的原材料按顺序分别放置于坩埚炉中熔炼,熔炼过程中施以一定量的JDMF覆盖剂阻燃,在Mg-30Zr中间合金熔化后加入一定量的JDMJ精炼剂进行精炼除渣、除杂,金属熔液静置25~40 min后捞除坩埚底部废渣,采用差压铸造的方式制备某镁合金铸件。

### 1.2 测试分析

选用等离子体发射光谱仪(ICP, PerkinElmer Plasma 400)对合金成分进行测定,结果如表1所示。选用GX60-DS金相分析系统对合金显微组织进行观察,选用CMT5305电子万能材料试验机进行拉伸试验,拉伸速率为2 mm/min,单次拉伸样品选取规格为M8 mm×Φ5 mm的铸件本体试样3根,测试结果取3根试样的平均值。使用FEI QUANTA 450扫描电镜(SEM)及其配备的X射线能谱仪(EDS)对铸件显微组织和形貌进行观察。采用南京东方激光有限公司生产的RS 2000 SM快轴流高功率CO<sub>2</sub>激光器对试板进行激光熔凝实验,扫描速度为300 mm/min,激光束每次扫描的进给量为1.5 mm。

表1 VW63Z合金实测成分

Tab1 Composition of VW63Z alloy			%(w)
Gd	Y	Zr	Mg
5.63	2.73	0.37	bal.

选用荧光检测方法对VW63Z镁合金铸件进行渗透检测,首先将荧光渗透剂涂在清洁、干燥的铸件表面,待荧光剂渗入表面开口缺陷中后,去除表面多余的荧光剂,施加显像剂,之前渗入铸件表面开口缺陷中的渗透剂被吸出,在黑光灯下铸件表面显示出缺陷的位置,荧光检测方案如表2所示。

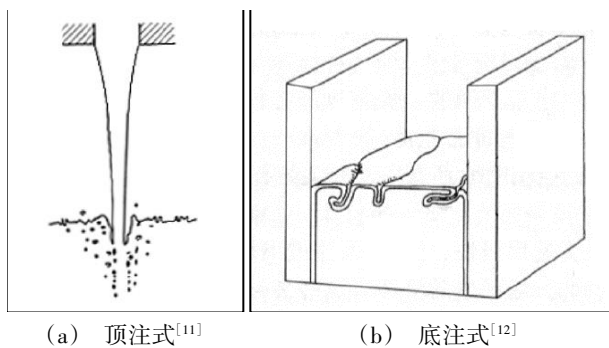
表2 荧光检测方案表

Tab. 2 Test parameters of fluorescence detection			
材质	表面状态	检测部位	检测设备
VW63Z	打磨	全部表面	黑光灯FC-100/F
显象时间/min	显像剂	试片	去除剂
20	自显	PSM-5	水
检测时机	渗透时间/min	渗透剂	检测方法
激光熔凝后	15	HM-406	I A-f
环境温度/°C	灵敏度等级		
20	2级		

## 2 结果及分析

### 2.1 微观缺陷组织表征与形成机理分析

稀土镁合金在浇注过程中会与空气中的氧气反应形成氧化薄膜<sup>[9-10]</sup>。在铸造过程中金属液的不稳定流动会将表面氧化膜卷入到金属液内部,卷入过程中表面膜上会发生相互折叠,形成卷入性缺陷,如图2所示。



(a) 顶注式<sup>[11]</sup> (b) 底注式<sup>[12]</sup>

图2 表面膜卷入金属液过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the process of surface film being drawn into molten metal

在顶注式重力浇注系统中,金属液依靠重力填满型腔。当金属液下降速度增大到一定值时,液面上的表面膜会被卷入金属液内部,如图2(a)所示;而底注式浇注系统中,表面膜会脱离铸型外壁形成堆积,或者被压缩而发生折叠和卷入<sup>[4]</sup>,如图2(b)所示。

VW63Z 镁合金铸件荧光检测结果如图3所示,可见在荧光下,铸件表面微观缺陷如竖状条纹,沿着舱体内部轴向排列。

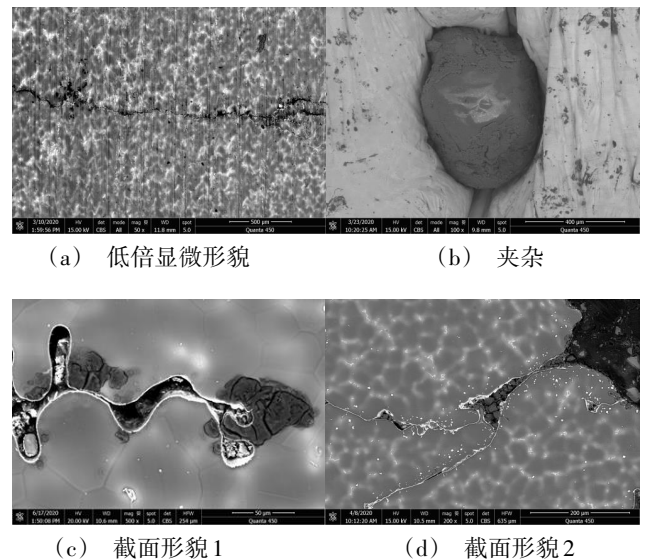


图3 铸件荧光检测结果

Fig. 3 Fluorescence detection results of castings

VW63Z 稀土镁合金铸件表面的微观缺陷处SEM结果如图4所示,其中选区EDS测试结果如图5和表3所示。铸件表面各类缺陷以未弥合的细小裂纹为主,周围分布着一些细小的白色颗粒状相,部分裂纹存在夹杂;在镁合金断口试样浇注过程中,合金液浇入模具后,表面很快出现一层表面膜,随后在凝固过程中该表面膜层会出现一定程度的收缩,EDS分析结果表明白色颗粒相和表面膜的成分基本为氧化钆、氧化钇和氧化镁。

结合EDS分析结果与试样浇注过程中观察到的现象,可以判断在扫描电子显微镜下观察到的表面富Gd现象即为铸造过程中合金表面产生的膜层导致的,而荧光条纹处的表面膜呈褶皱状,存在大量没有熔合的缝隙。而部分微观缺陷存在的夹杂情况如图4(b)所示,根据EDS选区39分析结果可知,该夹杂物为SiO<sub>2</sub>,应是浇注过程中砂粒脱落导致。

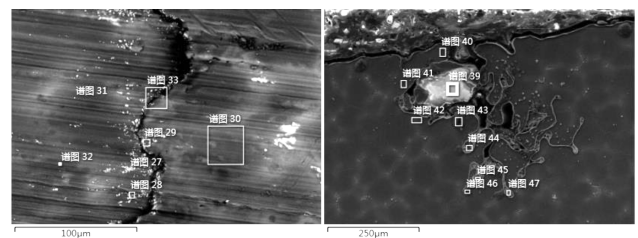


(a) 低倍显微形貌 (b) 夹杂

(c) 截面形貌1 (d) 截面形貌2

图4 各类表面微观缺陷SEM结果

Fig. 4 SEM results of various surface micro-defects



(a) 选区1 (b) 选区2

图5 表面微观缺陷EDS结果

Fig. 5 EDS results of surface micro-defects

观察微观缺陷出现的位置,大致位于浇注系统的两个分布式内浇道当中,由此推测在浇注时内浇道中金属液发生汇流,有可能会造成铸件表面微观缺陷的生成。对浇注系统三维模型及充型过程进行数值模拟,

表3 选区元素占比

Tab. 3 Proportion of elements in selected area % (w)

试样	Mg	Gd	Y	C	O
27#	40.9	22.0	7.0	13.7	10.0
	O	Si	K	Al	C
39#	60.9	32.7	1.6	1.8	3.0

结果如图5所示。金属液通过升液管后由多个内浇道进入铸型,内浇道中的金属液刚进入到铸型中时会与铸型中的空气反应生成氧化膜,表面膜主要成分是氧化镁和氧化钇。CAMPBELL<sup>[13]</sup>指出氧化膜在充型过程中极容易形成,同时对铸件的机械性能和可靠性有重要影响,并提出双层氧化膜的概念,且前文的SEM和EDS结果也证实了双层氧化膜的存在。

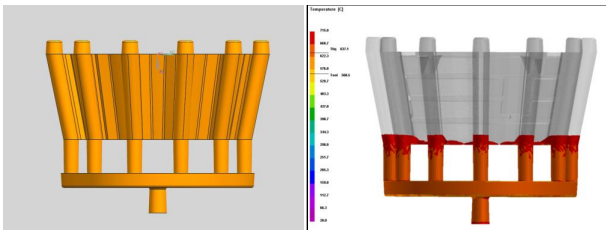


图6 浇注系统三维模型及充型过程数值模拟

Fig. 6 3D model of gating system and numerical simulation of mold filling process

## 2.2 激光熔凝工艺研究

### 2.2.1 激光束光型的影响

常用的激光束光型分为高斯激光和平顶激光,激光能量分布示意图如图7所示。

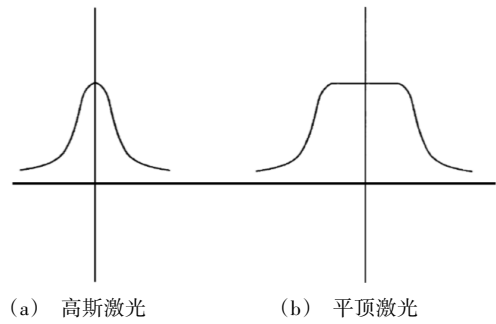
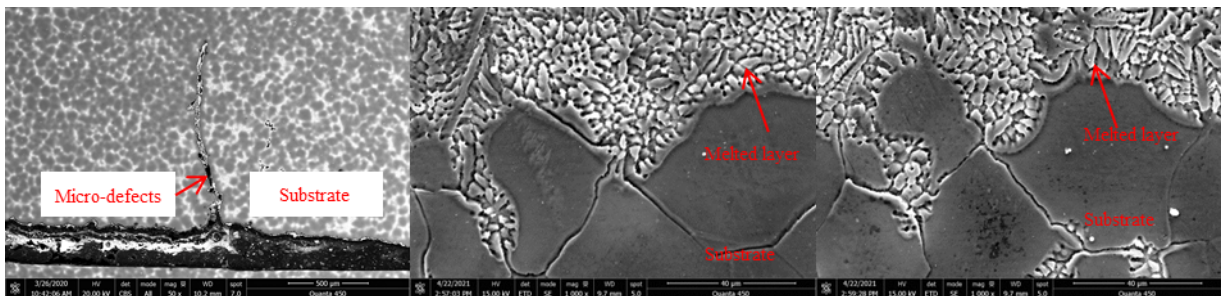


图7 激光束能量分布示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 7 The energy distribution diagram of laser beam<sup>[14]</sup>

实际的激光加热过程中,光源以光斑的形式照射到工件表面,高斯激光束能量分布近似符合高斯模型,光斑中心能量密度高;平顶激光需要一定的光束整形,能量分布则更为均匀。采用平顶激光和高斯激光两种光型对VW63Z镁合金铸件表面进行加工,将激光熔凝后的试板先用240#~1 200#砂纸进行粗磨,沿垂直于激光扫描的方向将试样切成两半,观察熔凝层截面的金相组织。激光功率设定为600 W时,使用两种光型加工VW63Z铸件表面缺陷后铸件截面SEM结果如图8所示。

由图8可知,使用平顶激光和高斯激光两种光型对铸件表面缺陷处进行熔凝处理后,铸件表面微观缺陷组织如双层氧化膜发生重熔,重新凝固后的组织呈树枝晶状,晶粒相比基体组织更小。观察可知,激光功率选择为600 W时,平顶激光和高斯激光两种光型加工所得的重熔组织与基体组织界面相互交叉、结合良好。



(a) 原始表面缺陷

(b) 平顶激光

(c) 高斯激光

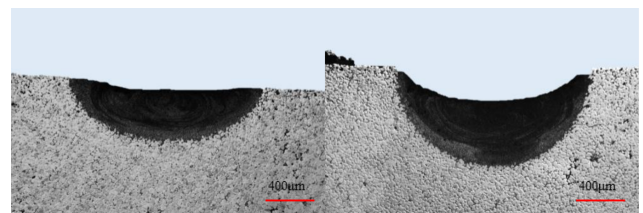
图8 重熔组织与基体组织结合部分SEM结果

Fig. 8 SEM results of the combined part of the remelted structure and the matrix structure

观察两种光型重熔组织上表面如图8所示,采用高斯激光重熔后的组织其上表面呈明显的圆弧状,这是因为高斯激光束的峰值部分能量较平顶激光更大,高斯激光光型加工后的上表面凹陷情况更为明显。

### 2.2.2 激光输出功率的影响

考虑到铸件激光熔凝后的表面质量要求,选取激光束光型为平顶激光,采用不同激光输出功率(600、800、1 000 W)对VW63Z铸件表面缺陷处进行熔凝处理,铸件截面金相照片如图9所示。可见随着



(a) 平顶激光

(b) 高斯激光

图9 激光熔凝后铸件截面金相照片

Fig. 9 OM images of the cross-section of the casting after laser melting

激光输出功率的提升,重熔组织的枝晶尺寸增大,这是由激光熔凝的快速加热和冷却特性<sup>[15]</sup>决定的:随着激光功率增大,形成的熔池较深,枝晶生长空间增大,冷却速度降低,枝晶的生长更易进行,枝晶尺寸

随之增大。根据对VW63Z镁合金铸件表面微观缺陷分析可知,铸件表面微观缺陷的深度大多不超过0.9 mm,激光输出功率为800 W时,重凝层深度约为0.915 mm,满足缺陷修复的深度要求。

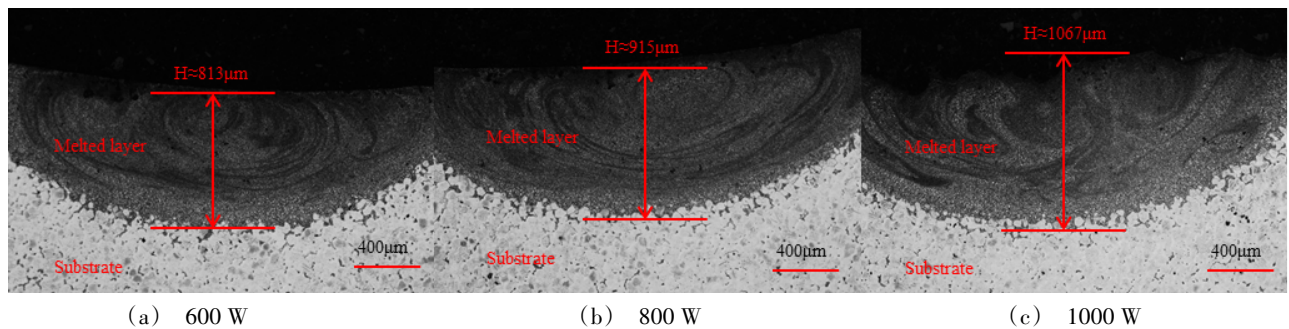


图10 不同功率的平顶激光熔凝后铸件截面金相照片

Fig. 10 OM images of the cross-section of the castings after flat-top laser fusion with different powers

综上所述,采用平顶激光和高斯激光两种光型的激光束对铸件表面缺陷进行加工,缺陷得到修复,重熔后的组织呈树枝晶状并与基体结合良好;选取不同功率的平顶激光束处理铸件表面缺陷,随着激光束功率增加,枝晶尺寸增大,熔深增加,同时热影响区增大。考虑到铸件表面质量要求和控制激光熔凝的热影响区范围,最终选取激光熔凝的光型为平顶激光,激光束的输出功率为800 W。

### 2.2.3 激光熔凝修复效果验证

采用光型为平顶激光、输出功率为800 W的CO<sub>2</sub>激光器对VW63Z镁合金铸件表面存在微观缺陷的部分进行激光熔凝处理,处理后的样品采用荧光检测的方法进行渗透检测,结果如图11所示。根据荧光检测验收标准HB7780—2005,样品未见超标缺陷,激光熔凝修复线性条纹缺陷效果良好。

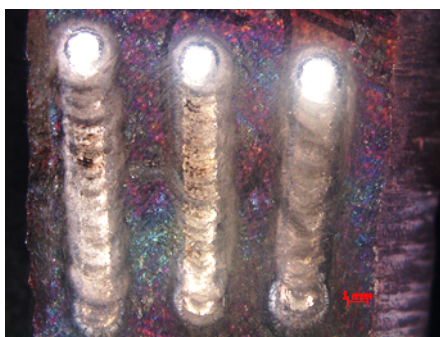


图11 荧光检测结果

Fig. 11 The results of fluorescence detection

激光熔凝后的样品表面经打磨后尺寸符合验收标准,对铸件本体以及激光熔凝区域分别取样加工,样品经T6热处理后进行力学性能检测,结果如表4所示。

T6状态下母材的性能平均值为 $R_m=320$  MPa,激光熔凝区样品 $R_m=241$  MPa,为母材的75.3%,激光熔凝区

凝区与母材结合良好,力学性能满足使用条件。

表4 不同区域样品T6态力学性能测试结果

Tab. 4 Test results of mechanical properties in T6 state of samples in different regions

区域	抗拉强度 $R_m$ /MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长 A /%
激光熔凝区	241	196	1.3
母材区	320	203	4.5

### 3 结论

(1)稀土镁合金VW63Z铸件表面微观缺陷大多数为细小裂纹,裂纹的形成与稀土元素氧化、金属液汇流、砂型发气、砂粒脱落等因素有关;表面缺陷主要成分为稀土氧化物的双层氧化膜,包括氧化镁、氧化钇和氧化钆,其中部分存在夹杂物,包括氧化膜夹杂与砂粒夹杂;

(2)采用平顶激光和高斯激光两种CO<sub>2</sub>激光对VW63Z铸件表面缺陷进行熔凝处理,重熔层组织呈树枝晶状,晶粒细小并与基体结合良好。当激光束选取为平顶激光时,重熔组织上表面更为平整;

(3)随着激光输出功率增加,VW63Z铸件重熔层枝晶尺寸增大,熔池深度增加,同时铸件热影响区增大。当激光束输出功率为800 W时,熔深约为0.915 mm,控制铸件热影响范围的同时基本可以修复铸件表面缺陷,

(4)原缺陷位置经激光熔凝处理后荧光检测未见条纹状缺陷,T6状态下激光熔凝区样品 $R_m=241$  MPa,为母材的75.3%,激光熔凝区与母材结合良好,力学性能满足使用条件。

### 参考文献

[1] 丁文江,吴国华,李中权,等. 轻质高性能镁合金开发

及其在航天航空领域的应用[J]. 上海航天, 2019, 36(2):1-8.

DING W J, WU G H, LI Z Q, et al. Development of high-performance light-mass magnesium alloys and applications in aerospace and aviation fields[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(2):1-8.

[2] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3):281-292.

WU G H, CHEN Y S, DING W J. Current research, application and future prospect of magnesium alloys in aerospace industry[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(3):281-292.

[3] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1(1): 2-22.

[4] 姚军. AZ91D 镁合金激光熔覆与重熔层组织特征及其性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

YAO J. Study on microstructure characterizations and properties of laser cladding and remelting on surface of ZA91D magnesium alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[5] 马幼平, 杨蕾, 徐可为. 镁合金表面改性技术研究现状及进展[J]. 轻合金加工技术, 2007(9):6-12+19.

MA Y P, YANG L, XU K W. State and progress of magnesium alloy modification technologies [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2007(9):6-12+19.

[6] 高亚丽, 王存山, 刘红宾, 等. AZ91HP 镁合金真空激光熔凝的微观组织与性能[J]. 应用激光, 2005, 25(3): 148-150.

GAO Y L, WANG C S, LIU H B, et al. Microstructure and properties of AZ91 HP magnesium alloy treated by vacuum laser melting[J]. Applied Laser, 2005, 25(3):148-150.

[7] MAJUMDAR J D, GALUN R, MORDIKE B L, et al. Effect of laser surface melting on corrosion and wear resistance of

a commercial magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 361(1-2): 119-129.

[8] WANG A, XIA H, WANG W, et al. YAG laser cladding of homogenous coating onto magnesium alloy [J]. Materials Letters, 2006, 60(6): 850-853.

[9] SLEPPY W C. Oxidation of molten high-purity aluminum in dry oxygen [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1961, 108(12): 1097-1102.

[10] SILVA M P, TALBOT D E J. Oxidation of liquid aluminum-magnesium alloys[J]. Light Metals, 1989: 147-132.

[11] DIVANDARI M, CAMPBELL J. A new technique for the study of aluminum oxide films [J]. Aluminum Transaction, 2000, 2(2): 233-238.

[12] MI J, HARDING R A, CAMPBELL J. Effects of the entrained surface film on the reliability of castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(9): 2893-2902.

[13] CAMPBELL J. Castings [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003: 18.

[14] 仇卫华. 激光表面强化中温度场与应力场的数值模拟与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

CHOU W H. Numerical simulation and analysis of temperature and thermal stress field of laser surface hardening [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

[15] 高亚丽, 接劼, 王存山, 等. 镁合金激光熔凝层显微组织分析[J]. 应用激光, 2013, 33(1):34-39.

GAO Y L, JIE M, WANG C S, et al. Analysis of the Microstructure of laser melting layer on Mg alloy [J]. Applied Laser, 2013, 33(1):34-39.