

选区激光熔化制备镁稀土合金材料及组织性能研究

宋子扬¹ 陈利文¹ 景舰辉¹ 赵源¹ 王先庭¹ 侯华^{1,2} 赵宇宏^{1,3,4}

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 教育部共建高性能铝/镁合金材料开发应用协同创新中心, 新材料智能铸造先进成型山西省重点实验室, 太原 030051; 2. 北京科技大学北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083; 3. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 4. 辽宁材料实验室材料智能技术研究所, 沈阳 110167)

摘要 采用选区激光熔化(SLM)技术制备了WE43镁合金, 研究了不同激光功率对材料微观组织和力学性能的影响, 并对优化参数(200 W)试样进行了T4和T6热处理优化。结果表明, 激光功率显著影响材料致密度和显微组织, 60 W下因能量输入不足导致未熔合缺陷和氧化物聚集; 340 W下产生蒸气孔洞缺陷, 而200 W下实现了最佳工艺平衡, 获得致密度达98.8%的成形件, 其抗拉强度为312 MPa, 伸长率为8.3%, 展现出优异的强塑性匹配。热处理研究表明, T6时效处理(536 °C×8 h固溶+250 °C×16 h时效)促使 β' 强化相(20~50 nm)均匀析出, 使合金抗拉强度显著提升至356 MPa, 同时保持3.5%的伸长率。T6态合金的强化机制主要来源于高密度 β' 相产生的沉淀强化、细晶强化和独特的异构组织产生的异质变形诱导强化。

关键词 选区激光熔化; WE43镁合金; 时效处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250304

Preparation and Microstructure Behavior of Magnesium Rare-earth Alloy Materials by Selective Laser Melting

SONG Ziyang¹, CHEN Liwen¹, JING Jianhui¹, ZHAO Yuan¹, WANG Xianting¹, HOU Hua^{1,2}, ZHAO Yuhong^{1,3,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, MOE Jointly Collaborative Innovation Center for High-performance Al/Mg Based Materials, Shanxi Key Laboratory of Intelligent Casting and Advanced Forming for New Materials, North University of China, Taiyuan 030051; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 3. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024; 4. Institute of Materials Intelligent Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110167)

Abstract: Effects of laser powers on microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy prepared by selective laser melting (SLM) were systematically investigated, and specimens with optimal parameter (200 W) were subjected to T4 and T6 heat treatment. The results reveal that the laser power significantly affects the relative densities and microstructure, where insufficient energy input at 60 W leads to unfused defects and oxide aggregation, and vapor pore defects are generated at 340 W. Desirable process balance is achieved at 200 W, and formed parts with 98.8% relative densities are obtained, where the tensile strength and elongation are 312 MPa and 8.3%, respectively, presenting excellent strong plasticity matching. Heat treatment analysis indicates that T6 aging treatment (536 °C×8 h solid solution+250 °C×16 h aging) induces the uniform precipitation of β' -strengthened phases (20~50 nm), which significantly enhances the tensile strength to 356 MPa while maintaining elongation of 3.5%. The strengthening mechanism of T6-treated alloy is mainly attributed to precipitation strengthening generated by high-density β' -phase, fine grain strengthening, and heterogeneous deformation-induced strengthening produced by unique heterogeneous structure.

Key Words: Selective Laser Melting, WE43 Mg Alloy, Aging Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

随着能源的逐渐消耗和社会对高质量绿色材料的重视, 工业生产中镁合金结构复杂化、整体轻量化

收稿日期: 2025-08-02; 修订日期: 2026-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U25A20286, 52375394, 52275390, U23A20628); 国家外国专家资助项目(S20250277); 山西省外国专家资助项目(202504051012025); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目(202301050201004)

第一作者: 宋子扬, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: 1317743924@qq.com

通信作者: 赵宇宏, 女, 1974年出生, 教授, E-mail: zhaoyuhong@nuc.edu.cn

陈利文, 男, 1986年出生, 副教授, E-mail: chenliwen@nuc.edu.cn

引用格式: 宋子扬, 陈利文, 景舰辉, 等. 选区激光熔化制备镁稀土合金材料及组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 532-540.

SONG Z Y, CHEN L W, JING J H, et al. Preparation of magnesium rare-earth alloy materials and microstructure behavior by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 532-540.

和成形一体化的需求日益增加。镁合金(Mg-Al、Mg-Zn等)具有质量轻、比强度高、力学性能优异和生物相容性好等特点,在工程应用中具有巨大潜力。近年来,许多稀土元素(Y、Gd、Nd、Ce等)被用于设计镁合金,以进一步细化晶粒,获得更优异的高温强度和耐腐蚀性能。这些元素和镁原子的尺寸变化率在 $\pm 15\%$ 以内,能发挥优异的固溶强化和沉淀强化效果。目前,镁合金主要通过压力铸造和锻造进行加工,然后采用后处理技术提高其力学性能^[1-3]。激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)作为金属增材制造(Additive manufacturing, AM)技术,在高效率成形高精度轻量化/一体化复杂结构零件方面具有得天独厚的优势^[4-6]。镁稀土合金除镁基体元素外,通常包含Y、Gd、Nd、Sm等元素。稀土元素通过细化晶粒、析出强化相等方式克服传统镁合金固有的易氧化、腐蚀性能差、蠕变性能低等缺点,从而极大地改善镁合金的力学性能和耐腐蚀性^[3]。镁稀土合金目前常用于汽车工业、电子器械、军事国防和航空航天零部件的减重和减振以及生物医疗领域的骨植入物等领域^[7-10]。彭立明等^[11]系统研究了镁合金SLM成形技术,在粉末制备、缺陷控制及WE43合金快速凝固组织调控等方面取得很多有益的结果,通过优化工艺和后处理显著提升了材料性能。当前研究者通过调控Y含量或添加Zn、Ag等元素对WE43镁合金进行改性,提高了WE43镁合金的成形质量^[12-15]。增材制造技术是成形具有复杂结构的WE43镁合金的重要手段,日益受到研究者的关注^[16-18]。

与传统铸造镁合金相比,SLM工艺的快速凝固特性使WE43镁合金力学性能差异显著。一方面,熔池中高温梯度引发强烈的Marangoni对流,促使合金元素在熔池内均匀分布,减少成分偏析;另一方面,快速凝固产生的“溶质捕获”效应,显著提高了基体中的固溶度。根据固溶强化理论,溶质原子与位错的交互作用阻碍了位错运动,使材料强度提升。上述两种机制协同作用,共同推动了SLM制备WE43镁合金力学性能的优化,为其高性能结构应用提供了微观组织层面的理论支撑^[19]。本研究以WE43镁稀土合金为材料,研究SLM成形工艺参数对试样成形缺陷、显微组织和力学性能的影响,探究固溶处理和时效处理对组织和性能调控规律,旨在为相关研究提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

采用旋转等离子体雾化工艺制备的球形WE43镁

合金粉末(粒径为 $15\sim 53\mu\text{m}$),其化学成分见表1。

表1 WE43镁合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of WE43 alloy powders %							
w_B							
Y	Re	Zr	Fe	Ni	Cu	Si	Mg
4.01	3.04	0.51	≤ 0.008	≤ 0.005	≤ 0.004	≤ 0.004	余量

采用鉴恒科技生产的3D打印金属增材制造设备。工作前通入高纯Ar,将 O_2 含量降至 $1\times 10^{-3}\%$ 以下,采用JSM-IT800扫描电镜观察粉末颗粒的形态,发现大多数颗粒呈现出完整的球形,符合SLM铺粉工艺的流动性要求。进行SLM试验前,必须将粉末在真空烘箱中放置3h,以去除水分并改善铺展粉末的流动性。其中,由于Y的高亲氧性,粉末表面明显出现了 Y_2O_3 氧化层,提高了储存和使用的安全性^[20]。工作时通过气体循环维持氧气含量低于 $1\times 10^{-3}\%$ 。打印件进行T4、T6热处理工艺选择热处理炉,切割选择BS-3030-ZD锯床、DK7735电火花线切割机。

1.2 试验过程

1.2.1 不同激光功率制备WE43镁合金打印件

采用选区激光熔化制备不同参数下WE43镁合金,打印参数见表2。在材料制备过程中,需对镁合金基板进行关键预处理,将其精准预热至 200°C ,旨在通过提升基板初始温度,大幅缩小后续打印过程中熔融材料与基板间的温度梯度,从而有效抑制因热胀冷缩不均产生的热应力,避免试样出现开裂、变形等缺陷。同时,预热能改善熔融材料在基板表面的流动性,促使层间实现更充分的冶金结合,显著增强粘合强度,为后续成形质量奠定基础。成形室内需持续通入纯度高达99.99%以上的氩气进行保护这一措施可有效防止高温下镁合金剧烈氧化生成 MgO 薄膜,避免由此导致材料性能劣化、表面粗糙等问题,确保试样在纯净环境中完成逐层堆积。

表2 WE43合金激光打印参数

Tab.2 Laser printing parameters for WE43 alloy					
试样	激光功率/ W	扫描速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	舱口间距/ μm	层厚/ μm	舱口角/ $^\circ$
1	60	300	100	20	67
2	200	300	100	20	67
3	340	300	100	20	67

1.2.2 热处理

通过选区激光融化工艺制备的WE43镁合金打印件见图1。选区激光熔化(SLM)技术固有的快速凝固特性,在细化WE43镁合金组织的同时,也导致了非平衡过饱和固溶及较高残余应力的形成。这种非平衡态

组织制约了材料塑性与综合性能的进一步提升。因此,后续热处理是调控其最终性能的关键。采用固溶+时效热处理,旨在通过固溶处理均匀化组织、消除应力,并通过时效处理析出纳米强化相以实现强化。具体工艺参数($536\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 固溶; $250\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 时效)基于JAHEDIM等^[21]采用的经典T6工艺优化调整:缩短固溶时间以控制晶粒过度长大,提高时效温度以促进 β' 相等强化相弥散析出,从而在提升强度的同时兼顾塑性。固溶后采用温水($60\text{ }^{\circ}\text{C}$)淬火以抑制非平衡析出,时效后空冷。

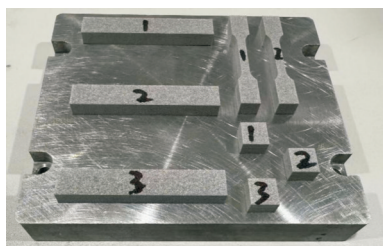


图1 SLM-WE43试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of SLM-WE43 specimens

1.3 表征检测

试样(60、200和340 W)均取自成形试样的中部区域,并沿垂直于激光扫描堆积的方向进行打磨、抛光、

腐蚀等步骤,使用特制腐蚀液(成分为4.2 g 苦味酸+10 mL的乙酸+80 mL的乙醇+10 mL的去离子水),用Leica DMI8型金相显微镜进行金相组织观察,采用SU-1500型扫描电镜对微观组织进行分析,并采用扫描电镜配置的能谱仪分析试样的元素分布和相组成。同时对拉伸试样进行打磨,使其表面光亮无明显缺陷,试样在拉伸过程中会更容易从缺陷处断裂,导致试样力学性能偏低,打磨后采用AG-X PLUS型电子万能试验机,对试样进行室温拉伸测试,加载速率为0.2 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织观察

图2为不同激光功率(60、200和340 W)下的SLM-WE43镁合金的OM图像。可以发现,当激光功率由60 W逐步提升至340 W时,块体试样都没有产生裂纹,但存在孔洞缺陷,致密度在95.43%~99.69%之间。这主要是由于镁合金的熔点和沸点较低,蒸气压较高,此外,孔洞缺陷数量会随着激光功率的增加而减少,但是超过一定激光功率后反而开始增多。可见必须选择合适的激光功率,才能制备出具有高致密度的试样。

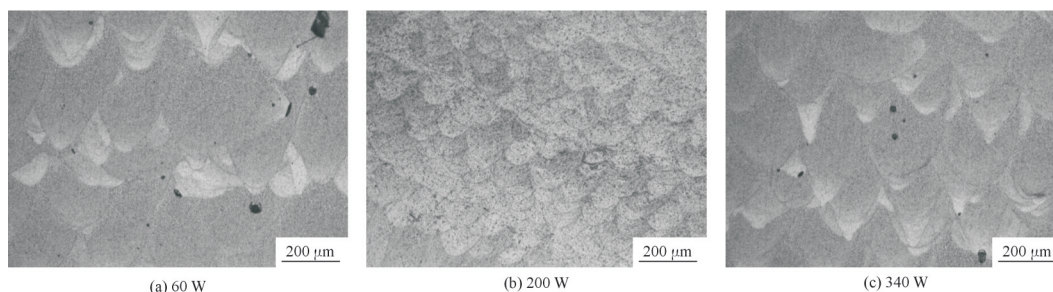


图2 不同激光功率下SLM-WE43镁合金的OM组织

Fig.2 OM images of of SLM-WE43 magnesium alloy under different laser powers

因激光功率改变导致出现孔洞缺陷的原因如下:一是当激光功率不足时(如60 W),能量输入难以完全熔化粉末颗粒,导致层间或道次间结合不充分,形成不规则未熔合孔洞;二是在200 W下,熔池内部可能产生蒸气反冲压力,形成深熔焊匙孔;三是功率过高(340 W)时,镁合金(沸点 $1\,090\text{ }^{\circ}\text{C}$)易发生剧烈气化;在易因氩气夹带而产生孔洞缺陷。

图3为不同激光功率下的SLM-WE43镁合金的SEM图像和元素分布,浅色部分为镁基体,亮色部分为稀土氧化物 $\text{Y}(\text{Nd})_2\text{O}_3$ 。当激光功率逐渐增大时,能明显观察到稀土氧化物 $\text{Y}(\text{Nd})_2\text{O}_3$ 在基体中逐渐减少。这是因为高功率(340 W)下熔池温度超过 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (镁

沸点的1.8倍),稀土元素(Y、Gd)的氧化物发生分解,而且功率提升使Marangoni对流速度从0.1 m/s(60 W)增至1.2 m/s(340 W),导致氧化物碎片被卷入熔池内部溶解,表面氧化层破裂后被推向熔池边缘,最后高功率导致稀土元素(易在晶界形成氧化物)固溶度提高,其中 $\alpha\text{-Mg}$ 中Y固溶度从0.8%(质量分数,下同)(60 W)增至2.3%(340 W)形成亚稳相:部分Y与Nd结合生成 $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5\text{Y}_2$ 而非氧化物。

图4是激光功率为60 W条件下SLM成形WE43镁合金的SEM显微组织及元素分布特征。EDS分析结果表明,Y和O元素在 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中呈现弥散分布状态,其中稀土氧化物(主要为 Y_2O_3)以纳米颗粒形式

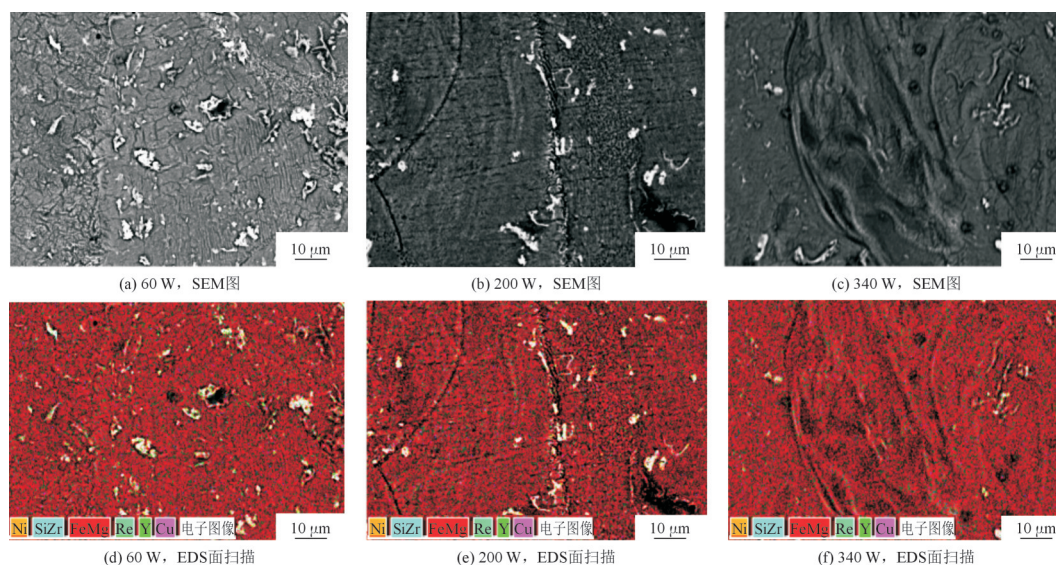


图3 不同激光功率下 SLM-WE43 镁合金的 SEM 和元素面扫分布

Fig.3 SEM images and EDS mapping of SLM-WE43 magnesium alloy under different laser powers

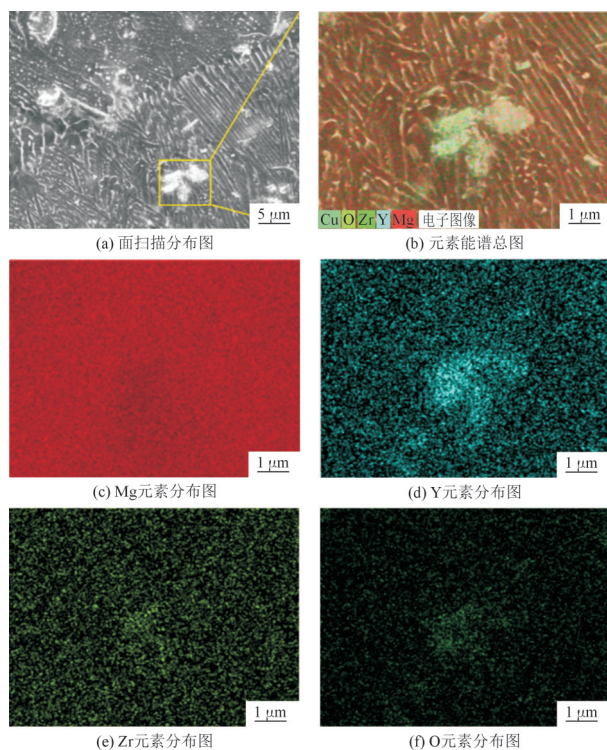


图4 SLM-WE43(60 W)面扫图像

Fig.4 Face scanning images of SLM-WE43 alloys at 60 W

(50~100 nm)沿晶界均匀析出。值得注意的是,通过高倍 SEM-EDS 面扫描可观察到,Zr 元素在稀土氧化物/基体界面处出现局部富集现象(浓度较基体提高 3~5 倍),这种独特的元素分布特征揭示了 Mg-Zr-Y-O 多元体系的相互作用机制,表明在低功率 SLM 成形过程中形成了以富 Zr 相为核心,外围包裹稀土氧化物的特殊界面结构。

图 5 是激光功率为 200 W 时 SLM-WE43 的 SEM 图像和元素面扫描成像。根据先前的研究,球形颗粒

可能是 $Mg_3(Gd, Nd)$, 而白色片状沉淀相可能是 Y_2O_3 相。基体中分布着尺寸为 $0.5\sim 2\ \mu m$ 的球形颗粒,经 EDS 分析确认为 $Mg_3(Gd, Nd)$ 金属间化合物,存在条状白色析出相(长约为 $6\ \mu m$, 宽约为 $5\ \mu m$),其中 $x(Y)/x(O)$ 比接近 2:3,表明该相可能为 Y_2O_3 或富 Y-O 的氧化物相,在此功率下 Y 与 O 元素的信号分布相对分散,并未形成如低功率(60 W)条件下的连续、显著的富集区域。相比于低功率(60 W)条件,200 W 通过以下机制显著改善组织,熔池温度提升至约 $1\ 600\ ^\circ C$,促进 Y_2O_3 相的溶解再分布,使氧化相面积分数降低约 40%,Marangoni 对流增强(流速达 $0.8\ m/s$),破碎并分散大尺寸氧化物,较高的冷却速率($10^4\ K/s$)抑制氧化物粗化,平均尺寸减小至低功率条件的 60%。

图 6 是激光功率为 340 W 时 SLM-WE43 的 SEM 图像和元素面扫描成像。在高功率激光作用下,材料显微组织发生显著变化,与 200 W 相比,Y 元素在微观区域内的信号强度更高,呈现出更为明显的富集状态,形成了尺度更小、分布更密集的富 Y 团簇或区域。同时,大尺寸、孤立的富 Y、O 析出相基本消失。这可能是因为极高的熔池温度(超过 $2\ 200\ ^\circ C$)与剧烈的熔体动力学,导致局部 Y 元素发生气化-再凝结过程,或诱导产生纳米尺度的浓缩效应,即极高的冷却速率(约 $10^6\ K/s$)快速“冻结”了这种微观聚集状态,抑制了元素的长程扩散与重新均匀化。这表明当激光功率升高至 340 W 时,虽能进一步细化氧化物相,但过高的能量输入可能引发 Y 元素的局部聚集,形成了不同于中低功率下的元素分布形态。

综上,随着激光功率从 60 W 增至 340 W,SLM 成形 WE43 镁合金的组织发生显著演变,低水平激光功率

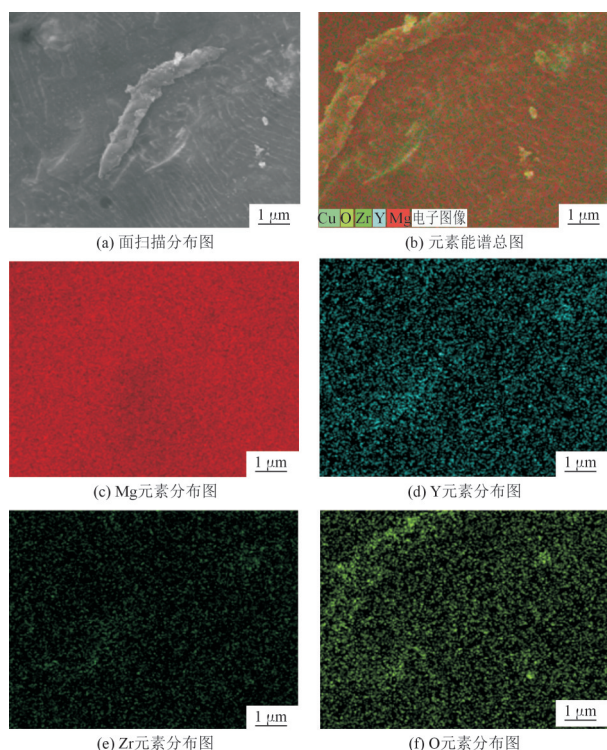


图 5 SLM-WE43(200 W)元素面扫图像

Fig.5 Face scanning images of SLM-WE43 alloys at 200 W

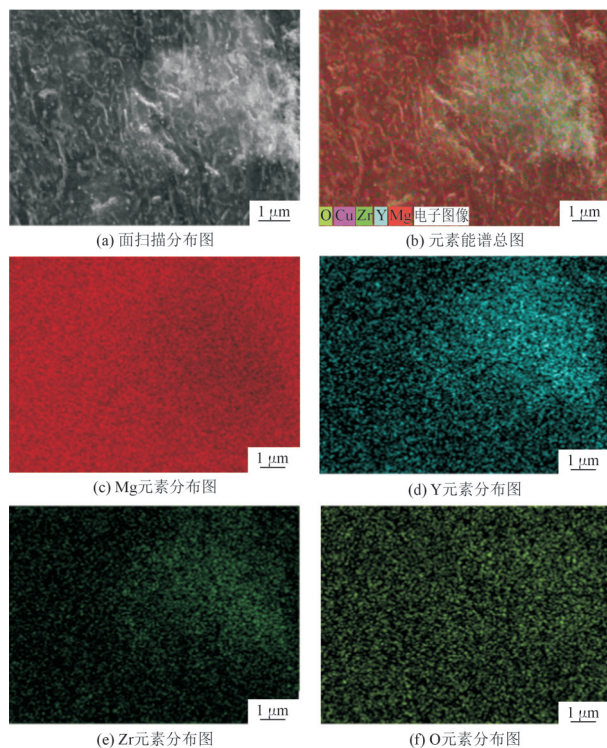


图 6 SLM-WE43(340 W)元素面扫图像

Fig.6 Face scanning images of SLM-WE43 alloys at 340 W

(60 W)晶界处分布 Y_2O_3 , Zr 元素界面富集,形成连续氧化物网络,伸长率受限,中水平激光功率(200 W)熔池对流增强使氧化物尺寸减小, $Mg_3(Gd, Nd)$ 球形相均匀分布,强塑性协同,而高水平激光功率(340 W)极高的热输入虽然进一步细化了显微组织,但 EDS 分析表明,

Y 元素在局部呈现出更为显著的聚集状态,这可能是极高温导致的元素气化-再凝结或纳米尺度浓缩效应所致,同时,剧烈的熔池动力学也引入了少量气孔。所以中水平激光功率(200 W)平衡了组织细化与缺陷控制,为工程应用优选参数。

2.2 后处理

当前关于选区激光熔化(SLM)技术制备的 WE43 镁合金热处理工艺的研究报道较少。KANG H 等^[22]针对铸态 WE43 镁合金开展不同时效处理温度对其组织与性能影响的研究。发现时效处理后合金中析出均匀弥散分布的细小 β'' 和 β' 强化相。与打印态试样相比,屈服强度和极限抗拉强度分别提高了约 30.9% 和 28.2%,但伸长率从 $(4.0 \pm 1.4)\%$ 降低到 $(0.7 \pm 0.3)\%$ 。HYER H 等^[23]对 SLM 制备的 WE43 合金进行了热处理研究,但采用的热处理工艺参数是针对铸造 WE43 合金设计的。研究表明,WE43 镁合金更适宜的热处理工艺为 T4(固溶处理)和 T6(时效处理)。具体工艺参数为:首先进行 $536^\circ C \times 8 h$ 的固溶处理,随后采用水淬冷却;实施 $250^\circ C \times 16 h$ 的时效处理,风冷。

图 7 是激光功率为 200 W 固溶态 WE43 镁合金的 SEM 图像和 X 射线面扫描成像。可以看出,在固溶过程中,合金中的第二相逐渐溶解到 α -Mg 基体中,使基体趋于均匀化。然而,由于 SLM 快速凝固形成的非平

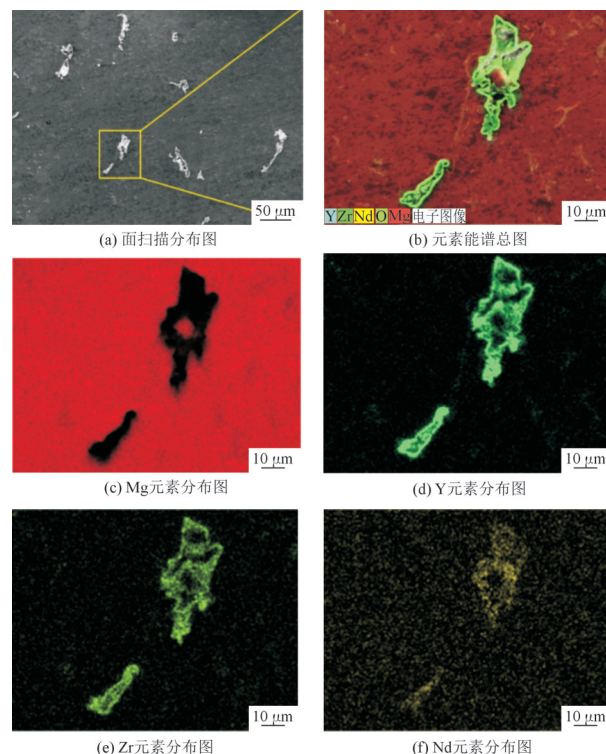


图 7 SLM-WE43(200 W-T4)元素面扫图像

Fig.7 Face scanning images of T4-treated SLM-WE43 alloys at 200 W

衡组织特点,部分富稀土相可能未完全固溶,少量方块状相仍残留在晶粒边界处。此外,高温固溶处理促使晶粒发生再结晶和长大,导致晶粒尺寸较SLM原始态有所增加,但整体组织仍保持较高的致密度。经过 $536\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 固溶处理后,合金进入时效阶段,在时效阶段,过饱和固溶体发生分解并析出多种强化相。

图8是激光功率为200 W时效态WE43镁合金的SEM图像和X射线面扫描成像。可以看出,时效态WE43镁合金的显微组织主要由 α -Mg基体、矩形 β 相、薄片状 β' 相及亚稳态针状 β_1 相构成。这些析出相以弥散分布的形式存在,通过沉淀强化机制显著提升了合金的力学性能。其中, β' 相和 β_1 相由于尺寸细小且与基体共格,能够有效阻碍位错运动,从而提升合金的强度和硬度。尽管时效处理导致晶粒进一步长大,但SLM特有的熔池边界和快速凝固特征使得合金仍保留粗细晶粒交替分布的异构双周期微观结构。这种结构由SLM逐层熔融沉积形成,其中细晶区(熔池中心)与粗晶区(熔池边界)相互交织,有助于协调合金的强度与塑性。此外,晶界处的残余第二相和析出相可抑制晶粒过度长大,维持组织的稳定性。

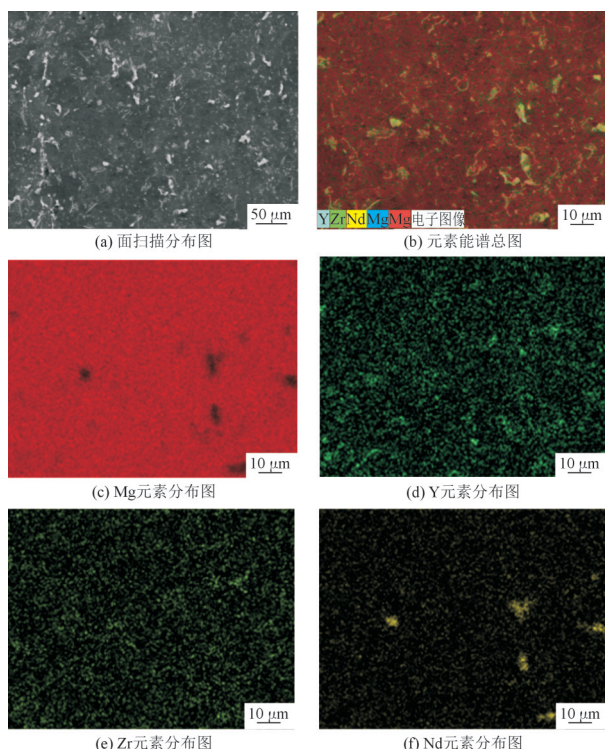


图8 SLM-WE43(200W-T6)元素面扫图像

Fig.8 Face scanning images of T6-treated SLM-WE43 alloys at 200 W

2.3 力学性能

ESMAILY M等^[24]研究表明,在激光功率为300 W、扫描速度为1 200 mm/s的条件下,SLM制备的WE43

试样致密度达到最高。ATTARZADEH F等^[25]发现,随着激光体积能量密度的增加,匙孔诱导孔洞数量相对于WE43合金整体缺陷数量的比例呈指数上升。然而,以往对SLM制备WE43合金的研究仅停留在显微组织表征和力学性能测试方面,并未深入探讨缺陷形成机制、熔化模式和力学性能强化机制,对WE43合金显微组织与力学性能之间的内在关系也未有研究^[26]。

图9为不同激光功率下SLM-WE43的力学性能。可以看到,随着激光功率增加,材料的力学性能呈现出先高后低的趋势。当激光功率达到200 W时,材料的抗拉强度和伸长率均达到了峰值,这标志着此时材料的力学性能达到了最优状态。进一步分析发现,在激光功率从60 W增加至200 W的过程中,材料的抗拉强度和伸长率均有所增强,其中抗拉强度提升了100%,而伸长率也增加了155%,这一最优性能与微观组织的显著改善直接相关(见图4和图5)。在60 W下(图4),大量纳米级 Y_2O_3 氧化物沿晶界连续分布,虽能提供一定的弥散强化,但更易成为裂纹源,限制了塑性。当功率提升至200 W(图5),更高的熔池温度(约1 600 $^{\circ}\text{C}$)和增强的Marangoni对流促进了 Y_2O_3 相的溶解与再分布,使其面积分数降低了约40%,平均尺寸减小至60 W条件下的60%。同时,基体中形成了弥散分布的、尺寸为0.5~2 μm 的球形 $\text{Mg}_3(\text{Gd}, \text{Nd})$ 金属间化合物强化相。因此,200 W功率通过细化与均匀化有害氧化物、引入有益金属间化合物,实现了细晶强化与弥散强化的协同,在显著提升强度的同时大幅释放了塑性潜力。然而,当激光功率进一步增加至340 W时,材料的抗拉强度和伸长率均出现了下滑,这表明过高的激光功率会导致力学性能下降。分析发现,这是由于蒸气诱导孔洞缺陷,镁蒸气剧烈喷发形成的球形孔洞,组织粗化效应,熔池高温($> 2\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}$)导致晶粒异常长大,强化相 Mg_3RE 粗化。因此选择合适的激光功率对力学性能的影响至关重要。

图10为不同激光功率下的试样拉伸断口电镜图。

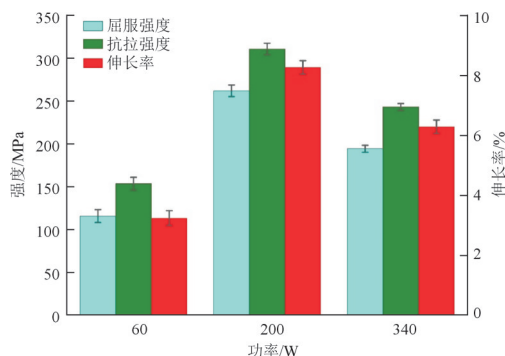


图9 激光功率对合金强度和伸长率的影响规律

Fig.9 Influence law of laser power on strength and elongation of SLM-WE43 alloy

可以看出,随着激光功率增加,断口形貌呈现出显著的演化特征。在 60 W 下,断口表面呈现明显的沿晶断裂特征,伴随粗大撕裂棱与局部解理面,且可见晶界处微裂纹的萌生痕迹,这类形貌直接反映了低功率下连续分布的 Y_2O_3 氧化物对裂纹扩展的诱导作用,晶界处连续析出的氧化物不仅阻碍位错运动,更易成为裂纹形核核心,促使裂纹沿晶界快速扩展,最终导致材料塑性变形能力受限。当激光功率提升至 200 W 时,断口呈现均匀致密的细小韧窝形貌,韧窝尺寸集中在 $1\sim3\ \mu\text{m}$,无明显宏观缺陷。韧窝的形成源于微孔的形核、长大与聚合,其细小且均匀的分布特征,反映出该工艺下微观组织的优

化效果, Y_2O_3 相的弥散细化与 $Mg_3(Gd,Nd)$ 金属间化合物的均匀析出,不仅通过细晶强化与弥散强化协同提升了强度,更通过阻碍裂纹的集中萌生与扩展,赋予材料优异的塑性变形能力。当激光功率进一步增至 340 W 时,断口形貌出现明显劣化,表面可见大量尺寸 $>5\ \mu\text{m}$ 的球形孔洞,韧窝粗大且分布不均,局部区域伴随沿晶断裂特征。球形孔洞的形成源于镁蒸气的剧烈喷发,而粗大韧窝与沿晶断裂则与熔池高温引发的晶粒异常长大、 $Mg_3(RE)$ 强化相粗化直接相关。这些缺陷会加速应力集中与裂纹扩展,使材料无法通过均匀塑性变形吸收能量,最终引发力学性能的下滑。

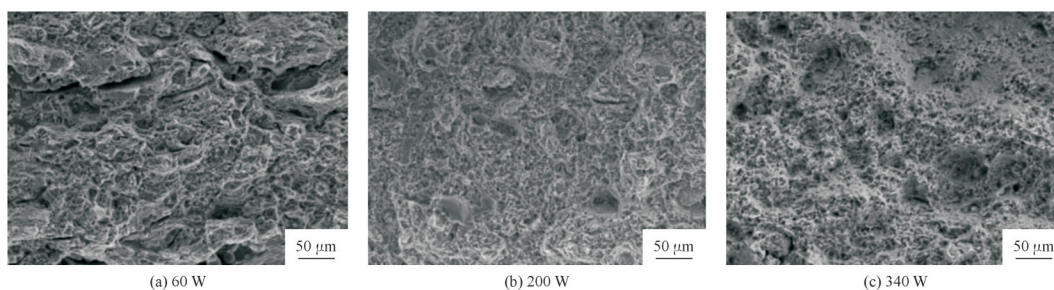


图 10 不同激光功率下的试样拉伸断口形貌

Fig.10 Tensile fracture morphologies of specimen under different laser powers

断口形貌的演化规律从微观尺度揭示了激光功率对 SLM-WE43 合金力学性能的调控机制,低功率下晶界氧化物的裂纹诱导作用、最优功率下组织均匀化的韧化效应、高功率下缺陷与组织粗化的劣化作用,共同构成了力学性能先升后降的内在根源,也进一步佐证了 200 W 激光功率的工艺合理性。

对热处理(激光参数 200 W)的 WE43 试样进行力学性能分析。图 11 为不同热处理下 SLM-WE43 的力学性能。可以看出,T4 状态下材料的强度低于初始态,但是塑性极大提升,而在 T6 状态下材料的塑性很差,但是强度却显著增强,当经过固溶处理(T4)后,材料的伸长率均达到了峰值。进一步分析发现,在时效处理(T6)时,尽管伸长率降低幅度很大,但是材料的抗拉强度和屈服强度获得巨大增强,抗拉强度提升了 14%,这种性能转变直接归因于纳米级强化相的弥散析出(图 8)。在 $250\ ^\circ\text{C}\times 16\ \text{h}$ 的时效过程中,过饱和固溶体分解,在 $\alpha\text{-Mg}$ 基体内析出高密度的、与基体共格/半共格的片状 β' 相及针状 β_1 相。这些纳米析出相能非常有效地阻碍位错运动,产生强烈的析出强化效应,是强度显著提升的核心机制。然而,高密度的析出相也严重限制了位错在塑性变形过程中的运动能力,同时晶界处析出的连续相进一步阻碍了晶界滑移,共同导致了塑性的急剧下降。值得注意的是,SLM 特有的异构双周期显微结构(熔池边界粗晶区与中心细晶区交替)在热处理后得以保留(图 8),这种结构有助于协调变形,但

在 T6 状态下,其积极作用被析出相导致的脆化效应所掩盖。

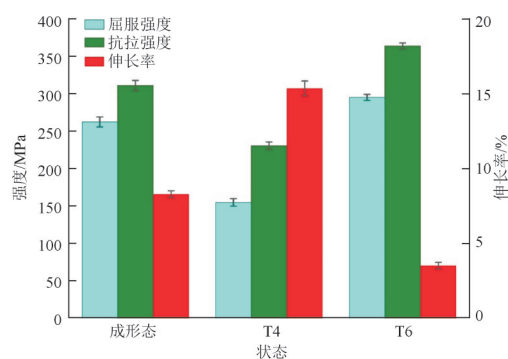


图 11 热处理对强度和伸长率的影响规律

Fig.11 Influence law of heat treatment on strength and elongation

图 12 为不同热处理下的试样拉伸断口 SEM 图。可以看出,不同热处理状态下的断口形貌呈现出鲜明差异,其微观特征与力学性能的转变机制高度关联。在 200 W 下制备的初始态试样中,断口表面呈现均匀细密的韧窝形貌,韧窝尺寸集中在 $1\sim2\ \mu\text{m}$,无明显宏观缺陷。这种形貌反映出初始态中弥散分布的 $Mg_3(Gd,Nd)$ 相与细化的 Y_2O_3 氧化物协同作用,既通过弥散强化提升了强度,又保留了一定的塑性变形能力,对应初始态强度与塑性的平衡状态。经过 T4 固溶处理后,断口表面出现大量相互交织的片状撕裂棱,伴随尺寸更大、分布更均匀的韧窝。撕裂棱的形成源于位错在基体中持续滑移并引发微孔聚合,而韧窝的扩大则体现出固溶

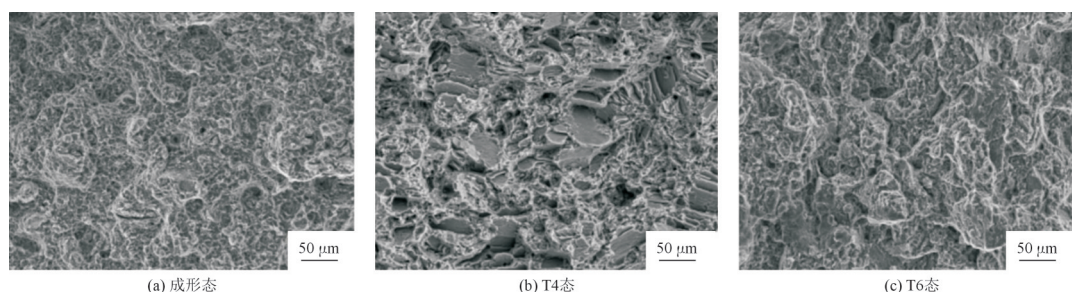


图12 不同状态下的试样拉伸断口SEM形貌

Fig.12 SEM morphologies of tensile fracture of specimens under different conditions

处理后过饱和基体中位错运动阻力的降低——晶界处连续氧化物的溶解与强化相的回溶,大幅减少了裂纹形核位点,使材料能通过更充分的塑性变形吸收能量,这与T4态下伸长率显著提升的力学行为直接呼应。经T6时效处理后,断口形貌发生显著劣化,表面出现大量沿晶断裂特征与局部解理面,韧窝数量锐减且尺寸细小。沿晶断裂的出现源于晶界处连续析出的 β 相阻碍了晶界滑移,而解理面则反映出高密度纳米析出相(β' 与 β_1 相)对位错运动的强烈钉扎作用。此时材料变形时裂纹易沿晶界或析出相界面快速扩展,无法通过均匀塑性变形吸收能量,最终导致塑性急剧下降;而析出相的强化效应则通过断口局部的细小韧窝与撕裂棱残留得以体现,与T6态下强度显著提升的规律完全契合。

断口形貌的演化,从微观尺度诠释了热处理对SLM-WE43合金力学性能的调控本质,T4处理通过回溶强化相释放塑性潜力,T6处理通过析出纳米相实现强度跃升,而初始态则维持了强度与塑性的协同,三者的形貌差异直接对应了微观组织演化与力学性能的内在关联。

时效时间与温度对WE43镁合金的拉伸性能影响程度各异。研究表明,随着时效时间延长,WE43合金的屈服强度和抗拉强度变化幅度较小,而伸长率呈现先上升后下降的趋势,并在保温12 h时达到峰值。在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 的时效条件下,合金的拉伸屈服强度为296 MPa,抗拉强度为356 MPa,伸长率为3.5%。与打印态相比,其抗拉强度显著提升,强度超过350 MPa,但是塑性显著下降。强度的提高可能与 β' 相的析出有关,而随着时效时间延长,沉淀相数量增多反而阻碍了位错的运动,导致塑性下降。优异的合金强度主要来源于 β' 相的沉淀强化、晶界强化以及异构双周期显微组织提供的异质诱导强化。

3 结 论

(1)激光功率为200 W时SLM成形的WE43镁合

金综合性能最优,既避免了低功率下(60 W)的氧化物聚集和伸长率不足,又克服了高功率下(340 W)的孔洞缺陷,实现了组织细化与力学性能的最佳平衡。

(2)力学性能呈现先升后降趋势,200 W试样展现出最佳强塑性匹配,抗拉强度达312 MPa,伸长率为8.3%,分别比60 W和340 W试样提高了100%和27%以及155%和31%。

(3)热处理工艺优化效果显著,200 W试样经T6处理($536\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 固溶+ $250\text{ }^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 时效)后, β' 强化相均匀析出,抗拉强度进一步提升至356 MPa,同时保持3.5%的伸长率。

(4)时效处理(T6)优异的合金强度($>350\text{ MPa}$)主要来源于 β' 相的沉淀强化、晶界强化以及异构双周期显微组织提供的异质诱导强化。

参 考 文 献

- [1] MEIER J M, CARIS J, LUO A A. Towards high strength cast Mg-RE based alloys: Phase diagrams and strengthening mechanisms [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(6): 1 401-1 427.
- [2] CHEN L W, ZHAO Y H, LI M X, et al. Reinforced AZ91D magnesium alloy with thixomolding process facilitated dispersion of graphene nanoplatelets and enhanced interfacial interactions [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A804: 140 793.
- [3] CHEN L W, ZHAO Y H, JING J H, et al. Microstructural evolution in graphene nanoplatelets reinforced magnesium matrix composites fabricated through thixomolding process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 940: 168 824.
- [4] LI X Z, FANG X W, WANG S P, et al. Selective laser melted AZ91D magnesium alloy with superior balance of strength and ductility [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 11(12): 4 644-4 658.
- [5] CHEN L W, JING J H, ZHANG L L, et al. Corrosion behavior of graphene nanosheets reinforced magnesium matrix composites in simulated body fluids [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2024, 37: 525-536.
- [6] CHEN L W, LI J, CHEN W P, et al. Comprehensive assessment and multiple-response optimization of serpentine channel pouring process for achieving high-quality semisolid slurry [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3 839-3 852.
- [7] ZENG Z R, SALEHI M, KOPP A, et al. Recent progress and per-

- spectives in additive manufacturing of magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(6): 1 511-1 541.
- [8] JING J H, CHEN L W, WANG K L, et al. Indirect squeeze casting of ZM5 baffle with linear segregation and its formation mechanism [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 7 024-7 036.
- [9] CHEN L W, ZHAO Y H, HOU H, et al. Development of AZ91D magnesium alloy-graphene nanoplatelets composites using thixo-molding process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778: 359-374.
- [10] BAI J Y, YANG Y, WEN C, et al. Applications of magnesium alloys for aerospace: A review [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(10): 3 609-3 619.
- [11] 彭立明, 邓庆琛, 吴玉娟, 等. 镁合金选区激光熔化增材制造技术研究现状与展望[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 31-54.
- [12] 张好好. 铸造 WE43-Zn 镁合金微观组织与力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [13] JING J H, CHEN L W, LI Z Q, et al. Interfacial bonding mechanism of graphene nanoplatelets reinforced AZ91D magnesium alloy prepared by semi-solid injection molding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1 006, 176 171.
- [14] CUI S Y, CHEN L W, JING J H, et al. Role of Ca/Al ratio content on microstructural evolution and mechanical properties of Mg-Al-Ca alloy fabricated through squeeze casting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1036: 181 819.
- [15] SUN K X, CHEN W P, PEI J Q, et al. Phase-field simulation for anisotropic dendrite growth in Mg-3 Zn alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2 855-2 867.
- [16] ZUMDICK N A, JAUER L, KERSTING L C, et al. Additive manufactured WE43 magnesium: A comparative study of the microstructure and mechanical properties with those of powder extruded and as-cast WE43 [J]. Materials Characterization, 2019, 147: 384-397.
- [17] LEI P Y, YANG W K, WANG K L, et al. A modified phase-field model for grain boundary migration in sintering [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 300: 110 428.
- [18] DUAN Z Q, CHEN W P, PEI X L, et al. A multimodal data-driven design of low pressure die casting gating system for aluminum alloy cabin [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 2 723-2 736.
- [19] 石浩. 激光选区熔化 WE43 镁合金工艺及 TPMS 多孔结构性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [20] GANGIREDDY S, GWALANI B, LIU K, et al. Microstructure and mechanical behavior of an additive manufactured (AM) WE43-Mg alloy[J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 53-64.
- [21] JAHEDI M, MCWILLIAMS B A, KNEZEVIC M, et al. Deformation and fracture mechanisms in WE43 magnesium-rare earth alloy fabricated by direct-chill casting and rolling [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A726: 194-207.
- [22] KANG H, YAN H, CHEN R S. Effects of heat treatment on the precipitates and mechanical properties of sand-cast Mg-4Y-2.3Nd-1Gd-0.6Zr magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A645: 361-368.
- [23] HYER H, ZHOU L, BENSON G, et al. Additive manufacturing of dense WE43 Mg alloy by laser powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101 123.
- [24] ESMALY M, ZENG Z, MORTAZAVI A N, et al. A detailed microstructural and corrosion analysis of magnesium alloy WE43 manufactured by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101 321.
- [25] ATTARZADEH F, ASADI E. Analysis of element loss, densification, and defects in laser-based powder-bed fusion of magnesium alloy WE43[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(8): 2 118-2 136.
- [26] 许文贺. 激光选区熔化制备 WE43 镁合金及成形 TPMS 点阵的性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

