

镁合金激光粉末床熔融技术研究进展

李子澈^{1, 2}, 吉辰^{1, 2}, 黄焕杰^{1, 2}, 廖若冰^{1, 2}, 李坤^{1, 2, 3}

1. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044

2. 高性能结构增材制造重庆市重点试验室 重庆 400044

3. 高端装备机械传动全国重点试验室 重庆 400044

摘要: 镁合金是最轻的金属材料, 因其优异的力学性能和良好的生物相容性, 从而在汽车、航空航天、生物医疗等领域具有极大应用潜力。激光粉末床熔融 (LPBF) 作为一种快速成形技术, 已被广泛用于制造复杂结构金属构件, 为镁合金的开发和应用提供了广阔的平台。首先, 探讨了LPBF过程中镁合金的缺陷形成机制, 并总结了其性能特征; 其次, 研究了LPBF工艺参数与镁合金成形性和材料性能之间的关系, 并对试验设计、仿真模型和机器学习等先进智能优化方法进行了评估; 再次, 介绍了合金元素和后处理方法对LPBF制备的镁合金显微组织和力学性能的影响; 最后, 展望了LPBF镁合金的未来潜在应用。

关键词: 增材制造; 激光粉末床熔融; 镁合金; 工艺优化; 性能优化

Research progress on laser powder bed fusion of magnesium alloys

LI Ziche^{1, 2}, JI Chen^{1, 2}, HUANG Huanjie^{1, 2}, LIAO Ruobing^{1, 2}, LI Kun^{1, 2, 3}

1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Chongqing Key Laboratory of High Performance Structural Additive Manufacturing, Chongqing 400044, China

3. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing 400044, China

Abstract: Magnesium alloys are the lightest metal materials, with great potential for application in fields such as automotive, aerospace, and biomedical due to their excellent mechanical properties and good biocompatibility. Laser powder bed fusion (LPBF), as a rapid prototyping technology, has been widely used to manufacture complex structural metal components, providing a broad platform for the development and application of magnesium alloys. Firstly, the defect formation mechanisms of magnesium alloy in LPBF process were discussed and its properties were summarized. Secondly, the relationship between LPBF process parameters and magnesium alloy formability and material properties is studied, and advanced intelligent optimization methods such as experimental design, simulation model and machine learning are evaluated. Then, the effects of alloying elements and post-treatment methods on the microstructure and mechanical properties of magnesium alloys fabricated by LPBF were introduced. Finally, the potential applications of magnesium alloys fabricated by LPBF were discussed.

Keywords: additive manufacturing; laser powder bed fusion; magnesium alloys; process optimization; performance optimization

基金项目: 国家自然科学基金 (52201105)。

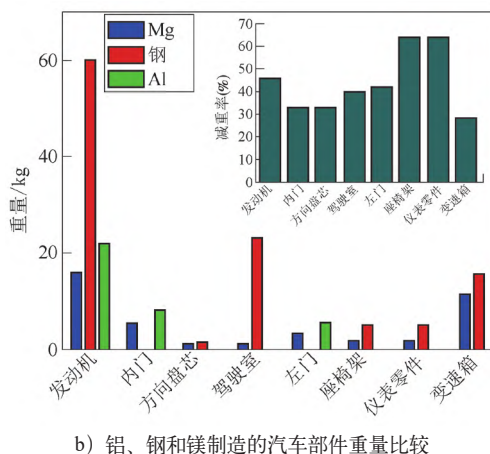
通信作者: 李坤, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料增材制造及智能制造, E-mail: kun.li@cqu.edu.cn。

1 序言

随着人类社会的快速发展和能源消耗的持续增长,地球资源与生态环境正遭遇前所未有的严峻挑战。国家“十四五”规划强调了加速推进新材料、新技术与新工艺的研发与应用的重要性,研发先进可靠的轻质材料和产品被提上日程^[1],其中镁合金凭借其出众的性能指标显现出广阔的应用前景。镁及其合金是最轻的工程材料(密度 $1.4\sim 2.0\text{g/cm}^3$),具有可回收性、可焊接性和高比强度等特性,具有卓越的可铸性与切削性,高效的振动阻尼能力,天然的资源丰度以及再利用等优点^[2, 3],这些特性确立了镁合金在现代工业发展中的重要地位,在汽车、生物医药、航空航天等领域均有重要的应用潜力(见图1)。



a) 镁合金电池箱体



b) 铝、钢和镁制造的汽车部件重量比较

图1 电动汽车轻量镁合金电池箱体及铝、钢和镁制造的汽车部件重量比较^[4, 5]

镁合金的主要生产方法为铸造、挤压与锻造。普通铸造方法往往存在晶粒粗大、铸造缺陷过多等缺点,力学性能较差^[6];挤压能够通过动态再结晶行为细化组织结构来提升力学性能,但镁合金具有致密六方晶体结构,不易进行塑性冷成形^[7],往往需要在更高的温度下激活更多的滑移系以实现更好

的塑性成形性;锻造可以得到性能优异的零件,但难以制造具有形状与内部结构复杂的近净结构。除此之外,铸造与挤压技术在生产复杂构件时往往需要繁琐的减材加工和后处理工艺,导致严重的材料浪费及较低的生产效率^[8]。与传统减材加工方法相比,增材制造被认为是一种“自下而上”的制造方法^[9],组件不受形状限制,可以制造复杂结构零件。由于冷却速度快,镁合金的晶粒细化、固溶强化与析出强化机制大大增强,相比于铸造、挤压等传统加工方式,增材制造零件的力学性能更有可能增强^[10, 11]。应用增材制造技术可以通过减少材料浪费和加工步骤来降低能源消耗,具有巨大的潜力^[12]。尽管增材制造为镁合金的成形制造提供了更多可能性,但必须解决镁合金增材制造过程中存在的问题。

本文总结了镁合金的特点和发展,讨论了激光粉末床熔融技术在镁合金成形制造中的特点与必要性。根据镁合金的独特特性,总结了激光粉末床熔融镁合金的成形缺陷机制(球化、气孔和裂纹)和性能特征(力学性能、抗氧化性和耐蚀性),并介绍了如何提高激光粉末床熔融镁合金成形性和性能,最后展望了激光粉末床熔融镁合金的潜在应用。

2 激光粉末床熔融技术的特点与必要性

根据能量输入,增材制造可分为激光增材制造和非激光增材制造。非激光增材制造包括基于烧结的增材制造(Sintering-based Additive Manufacturing)、电弧增材制造(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)和搅拌摩擦增材制造(Friction Stir Additive Manufacturing)。其中,基于烧结的增材制造是一种通过激光或其他热源将粉末材料烧结成固体结构的技术,在粉末床上通过黏合剂喷射、材料挤出和喷射形成零件,脱脂后通过烧结将粉末结合在一起^[13, 14]。该方法可以减少Mg元素的烧损,但严重的气孔和粗大晶粒会显著降低力学性能。WAAM以丝材为原料,通过电弧将丝材逐层熔化堆积形成金属构件,属于直接能量沉积技术,具有较高的金属沉积速率,能够制造复杂几何形状构件,但其制造速度与成形质量成反比,且具有较差的表面粗糙度,需二次加工^[15, 16]。搅拌

摩擦增材制造是一种固相非熔化增材制造方法,通过搅拌头的摩擦生热和塑性变形做功,使材料与基材熔合,将三维复杂形状构件制造转为简单的二维平面形状的逐层往复叠加,最终实现增材制造^[17]。该技术由于工艺温度相当低、晶粒粗化程度低、性能损害小,可以生产出具有优异力学性能的构件,然而对于复杂、不规则形状的镁合金构件制备仍存在挑战^[18, 19]。激光增材制造分为激光定向能量沉积(Laser Directed Energy Deposition, LDED)和激光粉末床熔融(Laser Power Bed Fusion, LPBF)。由于LDED能量较高,容易产生不稳定熔池^[20],因此LPBF应用最为广泛。LPBF利用高能激光束沿着指定路径逐层扫描,金属粉末通过吸收、反射、辐射和传热而熔化和凝固,因此可以生产高精度复杂形状零件。由于激光束快速移动,熔池冷却速率高达 $10^4 \sim 10^6 \text{K/s}$ ^[21],快速凝固导致的非平衡冶金现象(组织细化、固溶强化、亚稳相等)会显著影响材料的综合性能。优化热力学可有效调控微观结构,实现构件几何形状、化学成分及微观结构的精确控制。LPBF工艺原理如图2所示,首先在基板上铺设一层薄金属粉末,使用高能量密度激光对选定的区域进行熔合,扫描完成后,平台降低,下一层粉末沉积在顶部,激光扫描新的一层,重复该过程直到部件完成^[22]。

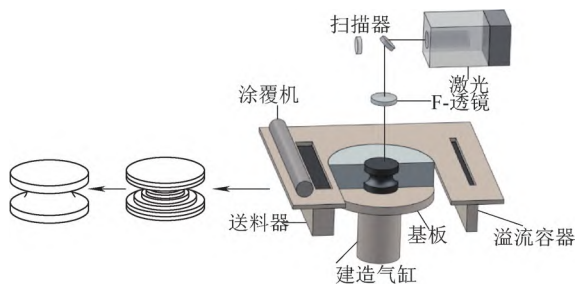


图2 激光粉末床熔融工艺原理^[23]

3 激光粉末床熔融镁合金的成形缺陷

激光粉末床熔融镁合金过程中存在复杂的热物理现象,如激光的吸收和散射、快速热传导、粉末的快速熔化和凝固成形以及剧烈蒸发等^[10],导致成品缺陷的形成,主要包括球化、裂纹和孔隙,这些缺陷会严重降低镁合金的综合性能。因此,基于成形缺陷和微观组织的演变机制,优化镁合金激光粉末床熔融的工艺和性能对拓宽其潜在应用范围具有

重要意义。

3.1 球化

当高能激光束扫描金属粉末时,粉末吸收能量并迅速熔化,在表面张力、浮力、重力的共同作用下收缩成一系列不连续的球形颗粒^[24, 25],这种现象称为球化,是LPBF工艺的固有缺陷,在逐层扫描过程中容易导致孔隙的出现,使成形构件致密度下降、力学性能降低以及表面粗糙度值增加^[26]。GU等^[27]将球化现象分为两类,如图3所示。第一类是在低激光功率下,有限熔融液体的流动性差,颗粒无法均匀分布在基体上,粉末和熔融液体很难完全接触,熔融液体容易形成粗糙球体;第二类是在高激光功率下,熔池吸收过多能量,导致熔池剧烈波动,许多细小熔滴从焊道表面飞溅出来形成熔融飞溅物,凝固后形成球体。LIU等^[24]研究了LPBF工艺参数对AZ61镁合金球化现象的影响(见图3c)。随着扫描速度的增加,能量密度降低,熔池温度下降,液态表面张力和黏度增加,使液体无法顺畅流动和迁移至周围,导致样品表面的球化现象和孔隙率恶化。确定了最佳LPBF激光能量密度范围为 $133.9 \sim 187.5 \text{J/mm}^3$,当激光能量密度为 156.2J/mm^3 (扫描速度为 300mm/s)时,样品致密度高达99.4%。LPBF工艺参数与镁合金的成形质量密切相关,其中,激光能量密度对球化现象起着决定性作用^[28]。提高激光能量密度有利于粉末快速熔化变成液体,改善球化现象,但过高的能量密度可能会导致晶粒粗化、固溶元素减少,以及构件密度、显微硬度和力学性能的降低。因此,为了获得高质量成形构件,通过调整激光粉末床熔融工艺参数来控制球化行为就显得非常重要。

3.2 裂纹

LPBF过程中金属粉末的快速熔化和冷却所导致的过热和过冷会在构件内部产生巨大残余应力并促使裂纹形成,极大降低构件性能。镁合金的共晶温度非常低,例如镁铝合金为 437°C ,镁锌合金为 340°C ,会增加其凝固开裂的敏感性^[29]。裂纹可分为高能量密度的凝固裂纹和中低能量的液化裂纹^[30],如图4所示。凝固裂纹是由于凝固速度不同产生不均匀收缩,产生的局部应力导致试样被撕裂;液化裂纹则是由于熔池中缺乏熔融液体,导致流动性较差而无法有效搭接而形成的^[31]。

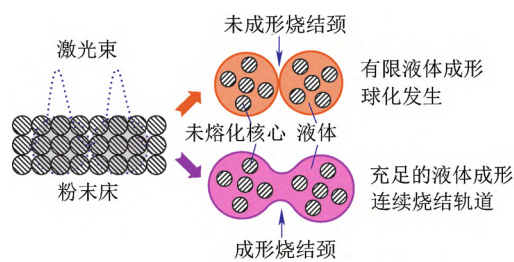
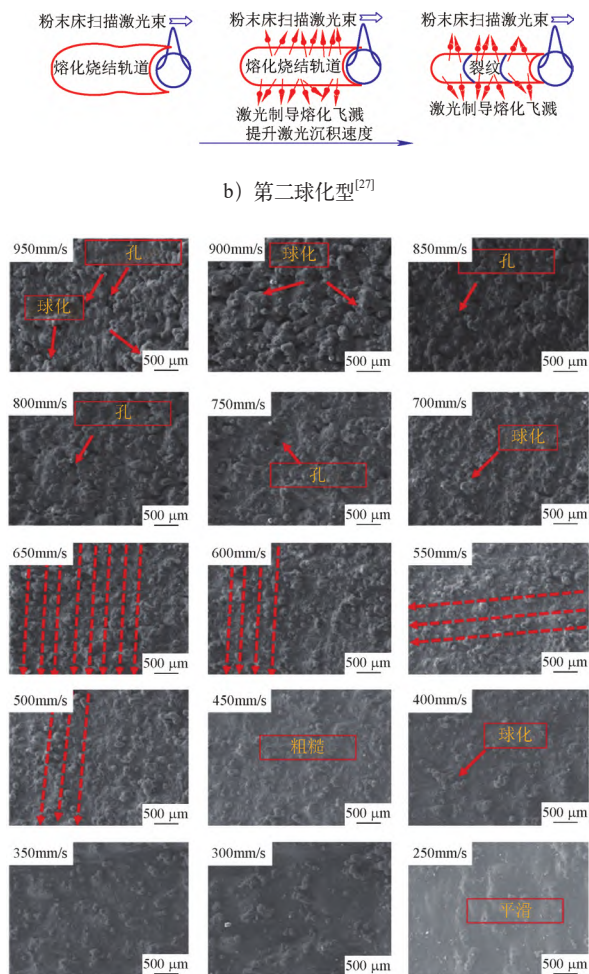


图3 球化类型及工艺参数对AZ61镁合金球化现象的影响

LIU等^[32]研究了LPBF工艺参数对ZK60镁合金热裂纹的影响，由于ZK60合金的凝固温度范围较宽，共晶温度较低，热应力较大，因此容易产生热裂纹，仅靠调节激光能量输入很难在抑制裂纹的同时避免未熔合、孔隙以及严重变形的产生。但热裂纹可以通过预热基板或添加改性元素来缓解^[33]，LIANG等^[34]发现在ZK60镁合金中添加稀土元素Y，可以消除激光粉末床熔融过程中产生的热裂纹，并

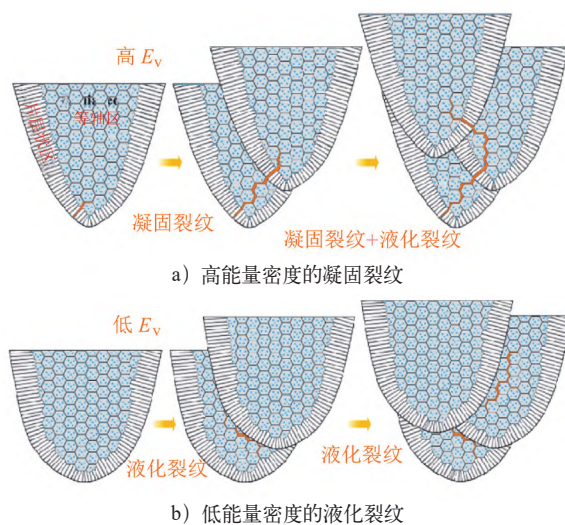


图4 裂纹的分类^[30]

且LIANG等^[35]也研究了激光粉末床熔融过程中基板预热温度对ZK60镁合金的影响，发现通过预热基板可以显著减少ZK60镁合金的热裂纹，并且力学性能随着预热温度的升高而增加，如图5所示。因此，通

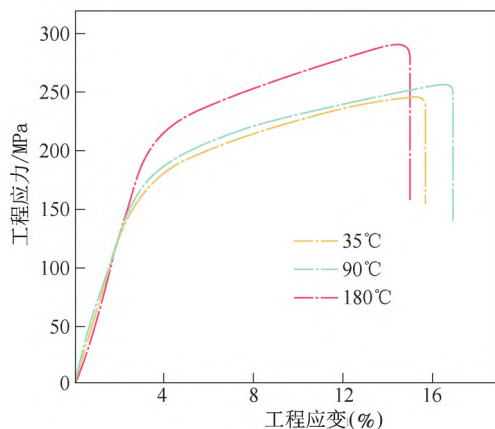
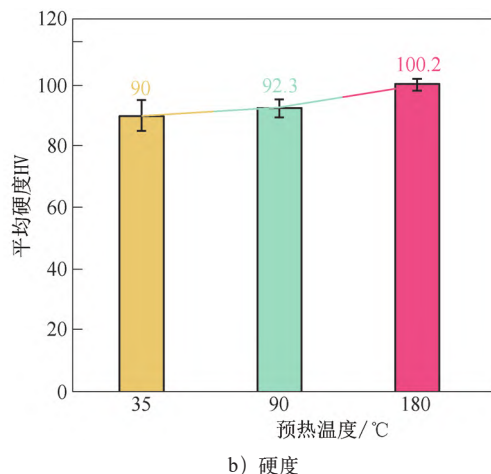
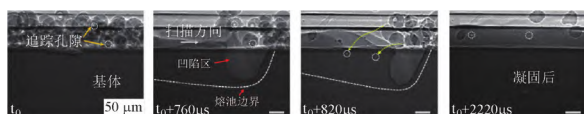


图5 基板预热温度对ZK60镁合金力学性能的影响^[35]

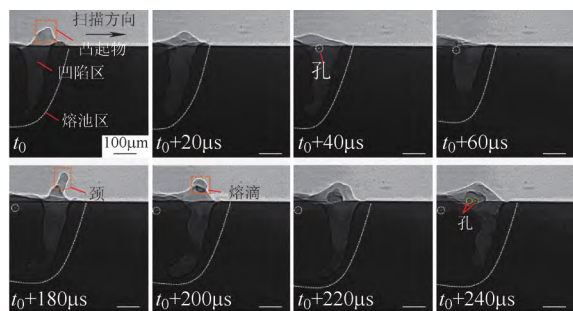
过优化激光粉末床熔融工艺参数和调整合金成分，可以有效减少镁合金在成形制造过程中的裂纹缺陷，提高其力学性能和可靠性。

3.3 孔隙

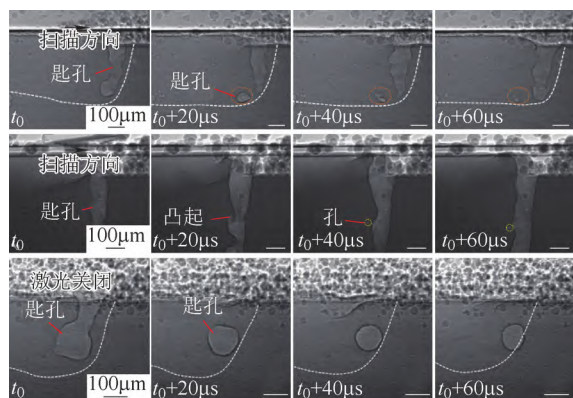
孔隙是金属增材制造中最常见的缺陷，会直接降低成形构件的密度、拉伸性能和疲劳性能。由于镁的熔沸点较低、饱和蒸气压较高，在成形过程中极易蒸发产生气体，而熔池较高的凝固速率会导致蒸发合金元素没有足够时间逃逸，因此镁合金相比于其他合金更容易产生孔隙缺陷^[36]。HOJJATZADEH等^[37]研究了LPBF过程中的孔隙形成机制，主要分为3种来源，如图6所示。第一种孔隙的形成是由于在气体雾化金属粉末中含有许多气孔，打印过程中粉末中的气体会转移到构件上从而形成孔隙；第二种是由于表面波动而在熔池中捕获的孔隙。在铺粉过程中粒径不一、流动性差的粉末易被保护气体湍流吸附并滞留在凝固构件中，导致气体难以逸出，形成孔隙；第三种是在锁匙孔中形



a) 第一种孔隙^[37]



b) 第二种孔隙^[37]

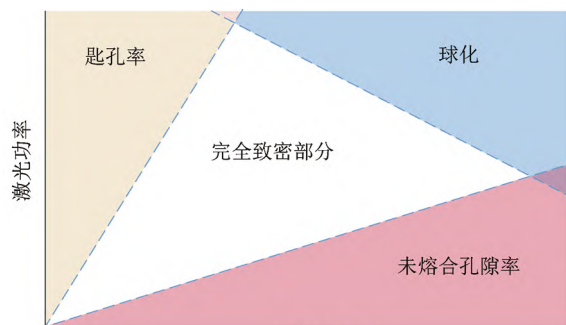


c) 第三种孔隙^[37]

图6 激光粉末床熔融主要孔隙来源

成的孔隙，当激光器开启时，巨大的热量导致粉末表面温度接近沸点，垂直于表面的反冲压力几何式上升，导致熔融液滴远离激光中心，而当激光器关闭后，蒸气压迅速降低，锁匙孔坍塌，其底部在熔池中保留为一个充满气体的大孔。

XIE等^[38]利用高速摄像机研究了LPBF激光功率对ZK60镁合金孔隙率的影响，通过SEM、OM发现，激光功率的增加（40~60W）会导致孔隙率和孔隙尺寸减小，致密度增加；通过X射线扫描（XCT）发现，较低的激光功率有利于互连孔的形成，而较高的功率容易导致互连孔的减少和孤立孔的增加，并提出了一种新型的基于OM图像的孔隙率测量方法，在不影响孔隙率分析质量的前提下可作为XCT的替代方法。LI等^[39]研究了LPBF激光能量密度对AZ91D镁合金孔隙率的影响，发现当激光能量密度在70~120J/mm³时，可以获得几乎完全致密的构件，而随着激光能量密度的进一步减小或增大，孔隙率均呈现增大趋势。OLIVEIRA等^[40]总结了LPBF工艺参数对孔隙率的影响，并提出了相应的解决方案，如图7所示。当激光能量不足时，会导致熔化不完全，熔池较小，未熔合缺陷产生；当激光



遇到的问题	主要方法	次要方法
孔隙率	降低激光功率	提升激光速度 重熔或再热
未熔合孔隙	缩小扫描间距和层厚	降低激光速度 增加激光功率 重熔或再热
成分变化	降低激光功率 提升激光速度	增加扫描矢量长度 增加层厚
减少残余应力和变形	减小扫描矢量长度 加热基体或沉积室	降低激光速度
遇到的问题	主要方法	次要方法
微观分离	提升激光速度	再降低激光速度
不理想的组织	降低激光速度	降低激光功率
粗晶粒或柱状晶	降低激光速度	降低激光功率
亚稳态阶段	重熔或再热	降低激光速度

图7 LPBF工艺参数对孔隙率的影响及解决方案^[40]

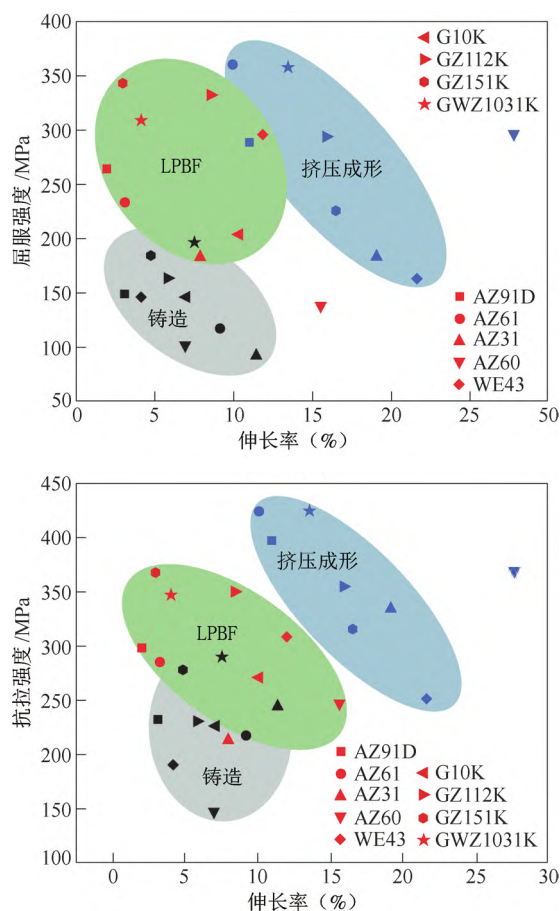
能量输入较高时,金属很容易蒸发并产生气体,形成锁匙孔,通过激光功率和扫描速度的合理耦合可以实现完全致密的零件成形。

4 激光粉末床熔融镁合金的性能研究

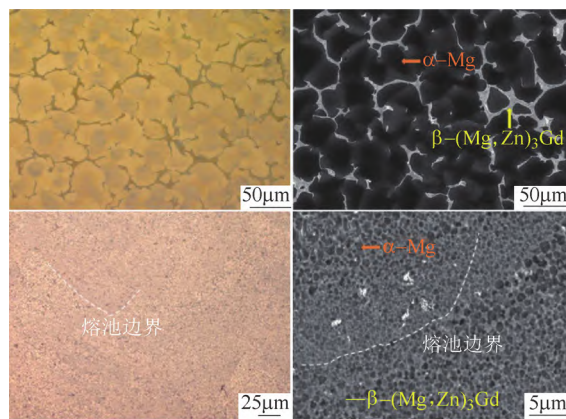
4.1 激光粉末床熔融镁合金的力学性能

镁合金因其高比强度而被越来越多地用于不同行业的轻质结构。根据最近对LPBF制备的镁合金与铸造和挤压镁合金的力学性能的研究(见图8a),可以发现LPBF制备的镁合金的屈服强度和抗拉强度高于大多数铸态合金,接近甚至超越部分挤压态合金,这是由于激光粉末床熔融极快冷却速度引起的细晶强化和固溶强化导致的。WU等^[28]对比了LPBF与铸造ZK60镁合金的晶粒尺寸,分别为 $7.3\mu\text{m}$ 和 $56.4\mu\text{m}$,认为前者晶粒尺寸的减小可归因于其高冷却速率特性;DENG等^[41]对比了LPBF和半连续铸造工艺对GZ112K镁合金的影响(见图8b),发现在LPBF工艺下镁合金由均匀而细小的等轴晶粒组成,平均晶粒尺寸仅为 $(1.53\pm 0.72)\mu\text{m}$,远小于铸态样品,根据Hall-Petch公式^[42]可知,合金强度随晶粒尺寸的减小而增大。除了细晶强化外,固溶强化也是提高LPBF构件力学性能的主要原因,半连续铸造GZ112K镁合金的 α -Mg基体中Gd和Zn含量仅为 $(5.15\pm 0.48)\%$ 和 $(0.79\pm 0.10)\%$,而LPBF制备的GZ112K合金在 α -Mg基体中具有更多的Gd和Zn含量(几乎是两倍),显著增强了固溶强化效果。此外,随着扫描速度的增加, α -Mg基体中的Gd含量有所下降,而Zn含量略有增加。尽管Zn含量有所增加,但Gd的固溶强化效应仍然是主要的。整体上,在溶质俘获和元素气化的相互作用下,随着扫描速度的增加,激光粉末床熔融GZ112K合金的固溶强化效应减弱。

激光粉末床熔融不合理工艺参数或镁合金粉末成分所引起的残余应力、缺陷和硬脆相会限制其伸长率^[44]。为了实现激光粉末床熔融制备的镁合金力学性能优化,基于激光工艺参数的调控显得尤为重要。LIU等^[45]研究了激光能量密度对AZ61镁合金拉伸性能的影响,发现随着激光能量密度的增大($138.89\sim 208.33\text{J/mm}^3$),平均晶粒尺寸逐渐增大($1.61\sim 2.46\mu\text{m}$),UTS和YS均先增大后降低,UTS和YS分别比铸态提高93%和136%,如图9所示,但



a) LPBF、铸造和挤压镁合金的室温拉伸性能^[43]



b) LPBF和半连续铸造GZ112K镁合金的显微组织^[41]

图8 不同工艺下的镁合金力学性能与微观结构对比

沿晶界 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相是伸长率较低的原因。与铸态相比,晶粒细化和固溶强化是力学性能增强的主要因素:激光粉末床熔融的快速凝固特性对晶粒细化效果显著;小尺寸下的熔化和凝固能够减少元素偏析并导致更均匀的化学成分以及固溶元素浓度的增加。仅依靠调整激光粉末床熔融工艺参数并不能实现镁合金性能的显著增强,通常需要搭配一定的后

处理手段来进一步优化,比如热处理、添加合金元素等,综合这些策略,激光粉末床熔融可以充分发挥镁合金的性能潜力,发挥其在轻量化和力学性能方面的优势,满足严格的工程需求。

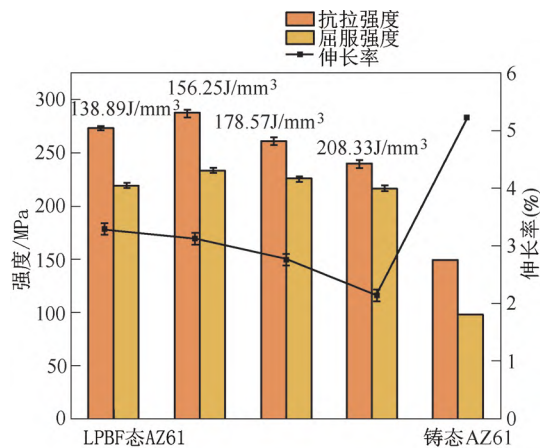


图9 LPBF/铸态AZ61镁合金力学性能比较^[45]

4.2 激光粉末床熔融镁合金的抗氧化性

提高镁合金的抗氧化性对其在航空航天和交通运输中的安全和实际应用具有重要意义。镁对氧有很高的亲和力,在低温下很容易形成MgO,尽管在激光粉末床熔融过程中有保护气体,但由于粉末颗粒中存在的少量氧气及空气中的氧气,因此镁仍然容易被氧化。氧化膜的致密性可以用PBR (Pilling-Bedworth Ratio) 来表征^[46],当 $PBR < 1$ 时,形成的氧化膜松散,无法完全覆盖表面;当 $PBR \geq 1$ 时,可以形成完整致密的保护性氧化膜;当 $PBR \gg 1$ 时,氧化膜内部应力过大,容易形成裂纹断裂脱落,导致保护性能退化^[47]。MgO/Mg的PBR值为0.81^[48],因此氧化镁无法提供有效的保护。添加合金元素是提高镁合金抗氧化性的有效手段,KIM等^[48]研究发现在镁中添加合金元素(如Ca、Gd、Y等)能够在高温下形成新型氧化膜,而不是不稳定的MgO,可以提高镁合金的高温抗氧化性。JIANG等^[49]研究了不同含量的Y元素对镁合金抗氧化能力的影响,发现Mg-Y合金在高温环境下,样品表面会形成致密的MgO/Y₂O₃复合氧化膜,阻碍氧化反应,减缓了镁合金的氧化,此外,Y含量越高,复合氧化膜对Mg基体的保护作用越强,如图10所示。YU等^[50]研究发现在Mg基体中固溶Y元素能够形成致密均匀的氧化膜,有利于提高其高温抗氧化性。非平衡凝固能够促进固溶体元素的形成,从而提高镁合金的抗氧化

性,特别是对于具有高固溶度稀土元素。因此,设计适用于激光粉末床熔融的新型镁合金粉末成分及调整工艺参数是改善镁合金抗氧化性的关键。通过这些方法可以显著提升镁合金的抗氧化能力,确保其在航空航天和交通运输领域的安全应用,同时也为LPBF制备的镁合金在其他领域的应用提供了更广阔的前景。

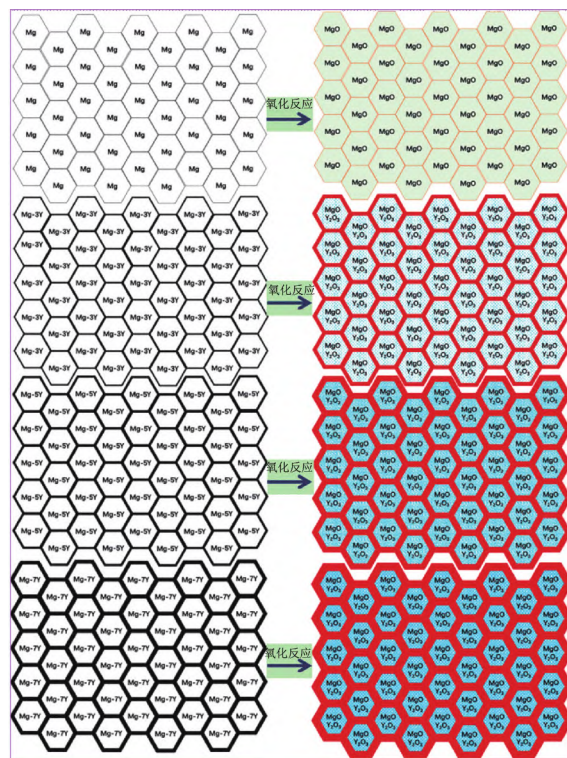


图10 不同Y含量下镁合金的氧化机理^[49]

4.3 激光粉末床熔融镁合金的耐腐蚀性

与其他可生物降解合金、永久性植入物、陶瓷及聚合物相比,镁基合金具有与天然骨骼相似的力学性能(密度、屈服强度、抗拉强度、伸长率和弹性模量),尽管如此,镁基合金作为生物医学材料的主要局限性是其高腐蚀速率^[51]。LPBF的快速凝固特性能够产生细小、高度均匀的微观结构,能够引起腐蚀机制的转变,从点蚀到整体腐蚀^[52]。WU等^[28]研究发现受析氢反应控制的激光粉末床熔融ZK60的阴极电流密度低于铸态ZK60,在阳极分支上与相同电位下的铸造ZK60相比,激光粉末床熔融ZK60的电流密度也较低,因此表现出更高的耐蚀性。LIANG等^[53]研究了LPBF制备的Y改性ZK60镁合金的显微组织和腐蚀行为(见图11),添加Y元素后,表面膜的钝化性和稳定性得到改善,且在晶界

处形成了连续的含稀土沉淀物网络，形成了防腐屏障，抑制了裂纹形成并诱导了晶粒细化，具有优异的耐蚀性。

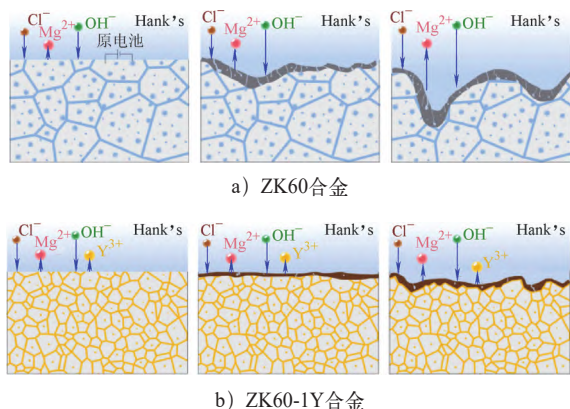


图11 LPBF制备的Y改性ZK60合金腐蚀机理^[53]

5 激光粉末床熔融镁合金的成形优化

5.1 参数控制与试验设计

良好的成形性是激光粉末床熔融镁合金获得良好力学性能的前提，通过调控激光参数可以实现对镁合金微观结构与性能的控制和优化。尽管LPBF拥有超过100个可调整的工艺参数，但激光能量密度已被确定为最有影响力的参数，可用式（1）表示为

$$Ev=P/VHT \quad (1)$$

式中 Ev ——激光能量密度 (J/cm^2)；

P ——激光功率 (W)；

V ——扫描速度 (mm/min)；

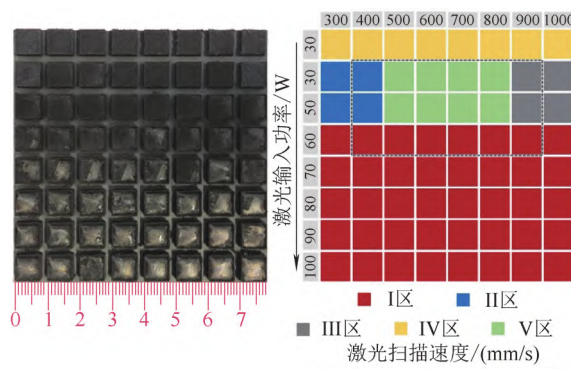
H ——扫描间距 (mm)；

T ——层厚 (mm)。

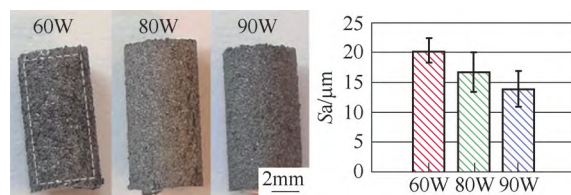
优化工艺参数可以最大限度减少缺陷，降低表面粗糙度值，提高构建速度并制造致密构件^[54]。

在大多数工作中，根据成形质量和尺寸精度的评价，对单个或两个工艺参数进行组合、调整和优化，以获得最佳的工艺窗口，如图12a所示。ÅHMAN等^[55]研究了LPBF激光功率对WE43镁合金表面粗糙度的影响，当激光功率为60W时，样品表面粗糙，颜色略深，而80W和90W样品的表面没有明显的差异，且90W样品边缘比其他样品更加圆润光泽，如图12b所示。60W样品的表面粗糙度最高，主要归因于激光能量输入较低所导致的未熔合，以及较多的部分熔融粉末颗粒粘附于表面上。YIN等^[56]研究了层厚对激光粉末床熔融WE43镁合金的

影响。结果表明，发现较大层厚可以提高加工效率，减少粉末消耗，但较大层厚需要对激光能量输入进行精细控制，否则可能损害成形精度。对于新材料而言，激光粉末床熔融工艺参数的优化研究主要依赖于试错法，既耗时又费力。因此科学的试验设计和智能优化方法成为必然，以加速研究成果向实际应用的转化。试验设计 (DOE) 能够通过工艺参数与构件性能的定量分析来发现和控制关键因，在减少试验次数的同时提供可靠的统计性结果。PAWLAK等^[57, 58]采用DOE方法，通过五水平旋转中心复合设计、三因素全因子设计以及两元素旋转设计，利用激光粉末床熔融技术制备了孔隙率<0.5%的AZ31B合金，且力学性能接近热轧状态下的锻造合金，耐蚀性超越了锻造合金。



a) LPBF-ZK60镁合金的宏观形貌及相应的工艺参数^[28]



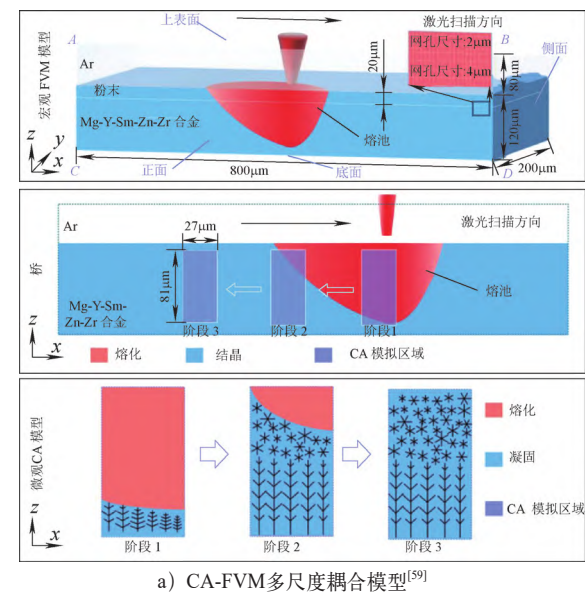
b) LPBF激光功率对WE43镁合金表面粗糙度的影响^[55]

图12 激光粉末床熔融工艺参数对镁合金的影响

5.2 仿真模拟与机器学习

虽然DOE能够辅助工艺参数的选择，但输入变量的范围有限，完整工艺窗口的开发仍需耗费大量时间与成本。LPBF是一个从微观到宏观尺度的多物理场、多尺度过程，包括激光与粉末相互作用、晶粒生长和微观结构演化等，因此通过开发物理模型来更准确地表现这些关系很重要。微观上，WANG等^[59]开发了基于宏观有限体积法 (FVM) 和元胞自动机 (CA) 的耦合模型，考虑了反冲压力和Marangoni对流的影响，探索了激光粉末床熔

融过程中Mg-3.4Y合金的柱状晶到等轴晶的转变（CET），如图13a所示。结果表明，熔池的温度梯度从底部到顶部逐渐减小，凝固速率提高。熔池凝固受溶质扩散控制，成分过冷能够促进形核，并发现Zr的溶解限制了 α -Mg柱状晶体的生长，对CET有显著的抑制作用；宏观上，SHEN等^[60]通过建立三维有限元模型（FEM）来模拟激光粉末床熔融AZ91D镁合金粉末熔池的温度分布及流动变形，如图13b所示。XU等^[61]建立了三维非线性瞬态热耦合有限元模型，研究了LPBF扫描策略（连续扫描、岛状扫描和正交扫描）对Mg-3.4Y-3.6Sm-2.6Zn-0.8Zr合金的热应力演化及残余应力分布的影响。研究发现，不同扫描策略下熔池的峰值温度不同，正交扫描策略下残余应力在各个方向上的分布更均匀，且在减少残余应力方面最为有效。基于仿真模型的研究，可以减少激光粉末床熔融试验成本，为提高成形构件性能提供科学指导。



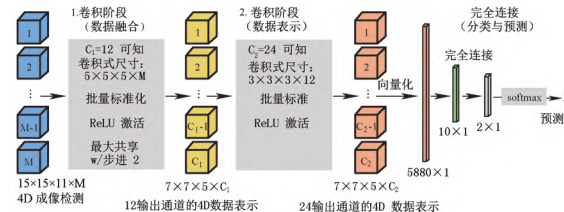
a) CA-FVM多尺度耦合模型^[59]

b) 熔池温度随时间的变化^[60]

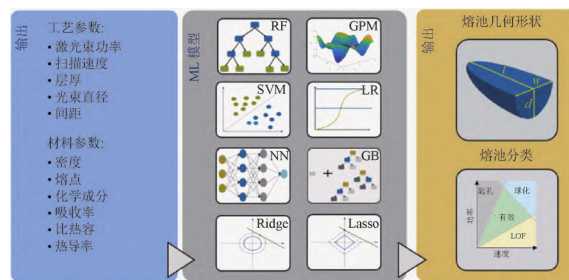
图13 激光粉末床熔融微观与宏观模拟仿真

仿真模拟可以减少重复试验，但并未解决多工艺参数的全局优化问题，物理驱动的方法无法快速准确预测整个过程。因此，基于数据的分析和挖掘工具显得尤为重要。机器学习作为一种有效的复杂模式识别和分析工具，其优势在于无需构建繁琐

复杂的物理方程，而是能从历史数据中学习输入与输出之间的关系。近年来，机器学习因其在质量控制、工艺优化、设计优化及微观结构分析等不同应用中的优越性能，在增材制造领域受到越来越多的关注^[62]。SNOW等^[63]收集了激光粉末床熔融的过程监测数据，并将其与构件疲劳性能关联。通过XCT扫描及自动缺陷识别软件识别的内部缺陷数据，使用原位数据训练的卷积神经网络（CNN）成功识别出关键缺陷，并在独立数据集上验证了该模型的预测性能，如图14a所示；AKBARI等^[64]开发了一个名为MelpoolNet的机器学习模型来表征激光粉末床熔融的熔池行为，能够预测其几何形状和缺陷类型，进而优化工艺参数并预测孔隙率，如图14b所示。基于数据驱动的方法高度依赖于数据质量，数据中的不合理或不一致会严重影响机器学习模型的性能。因此，必须实施严格的数据质量控制措施，如数据清洗和预处理等，以确保模型的有效性和可靠性，从而提高其预测性能。



a) LPBF构件缺陷检测的卷积神经网络架构^[63]



b) MelpoolNet模型架构^[64]

图14 激光粉末床熔融的机器学习模型

6 激光粉末床熔融镁合金的性能优化

采用优化的工艺参数，激光粉末床熔融能够制造出成形质量、力学性能良好的构件。同时，对粉末成分及显微组织的精细化控制是进一步提升LPBF制备镁合金构件性能的关键策略。

6.1 添加合金元素

由于合金元素的添加，因此激光粉末床熔融具有极快的冷却速度、固溶强化和第二相强化的作

用,可有效提高镁合金的力学性能和稳定性。Al在镁中的溶解度可达12.7%,可作为 α -Mg基体中的替代溶质。LIU等^[45]研究发现,晶粒细化和固溶强化是激光粉末床熔融AZ61的主要强化机理,而沿着晶界分布的网状硬脆 β -Mg₁₇Al₁₂相是造成其伸长率较低的原因。Zn是另一种有效的合金元素,在镁合金中的最大固溶度为6.2%。WEI等^[65]研究了Zn含量对激光粉末床熔融Mg-Zn二元合金的影响,在较低含量下($w_{Zn}=1\%$)合金获得了极高的致密度,Mg₇Zn₃共晶相分布均匀,力学性能与铸态相当($UTS=148\text{MPa}$ 、 $EL=11.0\%$),随着Zn含量的增加($w_{Zn}=2\%\sim 12\%$),致密度显著下降,且Mg₇Zn₃共晶相数量不断增加,其形貌逐渐由颗粒状转变为近网状结构,力学性能显著下降,主要是由于凝固裂纹和微孔所导致。在镁合金中添加稀土元素已被证明是提高其力学性能最有效的方法之一,稀土元素的固溶和析出强化可显著增强其力学强度^[66]。稀土元素很容易与镁粉末表面残留的氧和氢反应,形成的稳定稀土氧化物和氢化物可阻止进一步氧化。Gd元素具有很强的析出硬化作用,因此Mg-Gd基合金表现出超高的强度^[67]。DENG等^[41]研究发现,当扫描速度为300mm/s、扫描间距为100 μm 时,在固溶强化、细晶强化以及(Mg, Zn)₃Gd共晶相的共同影响下,激光粉末床熔融Mg-11.00Gd-1.77Zn-0.43Zr合金在室温下拥有优异的力学性能($YS=325\text{MPa}$ 、 $UTS=332\text{MPa}$ 、 $EL=4.0\%$)。掺杂Y元素也能够调节镁合金力学性能,WANG等^[68]研究了LPBF多元稀土镁合金(Mg-3.4Y-3.6Sm-2.6Zn-0.8Zr)的显微组织和硬度,Y元素在晶界处偏析,呈絮状不规则分布,主要为热稳定性较高的Y₂O₃。沿晶界网状分布的(Mg, Zn)₃(Y, Sm)共晶相显著提高了合金显微硬度(105HV),晶界硬化和固溶硬化是显微硬度显著提高的原因。Mg-RE合金中LPSO相因其耐蚀性、高强度和热稳定性而受到广泛关注。LI等^[69]研究了WGZ1051K和WGZ1251K合金中LPSO相的作用,认为LPSO相与 α -Mg基体之间的界面可以容纳基底位错滑移,并在塑性变形过程中阻止变形孪晶的形成,可以提高Mg-RE-X合金室温塑性,且在高温下能够抑制 β' 强化相的粗化,提高抗蠕变性。但是LPSO相的形成会强烈消耗合金元素,固溶强化急剧下降^[70]。

6.2 后处理

LPBF成形构件可能存在许多缺陷,包括裂纹、孔隙、未熔合、残余应力、变形、不均匀组织、各向异性、夹杂物及非平衡相等^[71],需要进一步的后处理工艺来改善合金性能。DENG等^[72]为LPBF开发了一种新型高强度GWZ1221M合金(Mg-12Gd-2Y-1Zn-0.5Mn),沉积态下力学性能 $YS=(315\pm 8)\text{MPa}$ 、 $UTS=(340\pm 7)\text{MPa}$ 、 $EL=(2.7\pm 0.5)\%$,抗拉强度明显高于铸态合金,T4处理后硬脆 β -(Mg, Zn)₃(Gd, Y)相转化为基底X相和LPSO相,具有更好的塑性变形性,EL提高。T6处理后在晶粒内部引入了许多纳米级的棱柱形 β' 沉淀物,力学性能得到显著增强($YS=320\text{MPa}\pm 3\text{MPa}$ 、 $UTS=395\text{MPa}\pm 4\text{MPa}$ 、 $EL=2.1\%\pm 0.4\%$)。LIU等^[73]研究了热等静压HIP(450 $^{\circ}\text{C}$ 、103MPa、3h)对激光粉末床熔融AZ61合金的力学性能的影响,发现HIP后样品密度接近100%,且大部分硬脆 β -Mg₁₇Al₁₂相溶解到基体中,减少了裂纹形成和晶界处 β 相的钉扎效应,在未降低UTS的前提下,EL提高160%,但由于晶粒粗化[(2.2 ± 0.3) $\mu\text{m}\sim (23.9\pm 6)\mu\text{m}$],YS从233MPa降低至126MPa。同时,LIU等^[74]也发现,LPBF-AZ61镁合金的最佳T4工艺为410 $^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$, β -Mg₁₇Al₁₂相几乎完全溶解,显著提高了构件的延展性。HU等^[75]研究了T4热处理对激光粉末床熔融AZ91D的影响,发现T4处理(420 $^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$)后 β -Mg₁₇Al₁₂相完全消失,整体力学性能下降,但耐蚀性显著增强。LI等^[76]研究了深冷处理(DCT)对激光粉末床熔融WE43镁合金的影响,发现DCT能够引发晶格收缩和微应力储存应变能,导致析出驱动力减小,且在不破坏亚稳强化相[β' -Mg₁₂Nd和 β'' -Mg₃(Y, Nd)]的情况下进一步析出高硬度强化相,同时DCT过程中能够产生巨大压应力,诱导了位错形成,位错的纠缠与湮灭促使亚晶粒和纳米亚晶粒的形成,力学性能得到显著提高($UTS=337\text{MPa}$ 、 $YS=275\text{MPa}$ 、 $EL=10.5\%$),如图15a所示。DENG等^[77]研究了T4和T6工艺对LPBF-GZ112K合金的影响,如图15b所示。T4处理后,硬脆 β -(Mg, Zn)₃Gd共晶相转变为较软的层状LPSO相,EL提高至14.4%。T6处理后,基面上存在 γ' 析出相、层状14H-LPSO相和致密的棱柱椭圆 β' 相,14H-LPSO相能够阻碍

β' 相生长, 导致析出相更细小, YS 和 UTS 提高到343MPa、371MPa, 而 EL 降低至4.0%。DENG等^[78]也研究了T4、T5和T6处理工艺对激光粉末床熔融GWZ1031K合金的影响。研究表明, T4处理后(450℃×12h)硬脆 $\beta - (Mg, Zn)_3(Gd, Y)$ 共晶相转化为晶粒内部相对柔软、可变形的层状LPSO结构, 合金表现出最好的 EL (10.3%±0.5%), T5处理后(175℃×64h)合金具有超高屈服强度(365MPa)和极低伸长率(0.8%), 而T6处理后合金表现出最好的 YS (316MPa±5MPa)和 UTS (400MPa±7MPa)。后处理被认为是减少缺陷、提高构件力学性能的有效方法, 然而, 目前关于激光粉末床熔融制备镁合金对后处理的研究不足, 因此亟需深化研究, 以探索各种后处理工艺对合金缺陷、微观结构及力学性能的影响, 优化镁合金的综合性能, 确保其在高端领域的广泛应用。

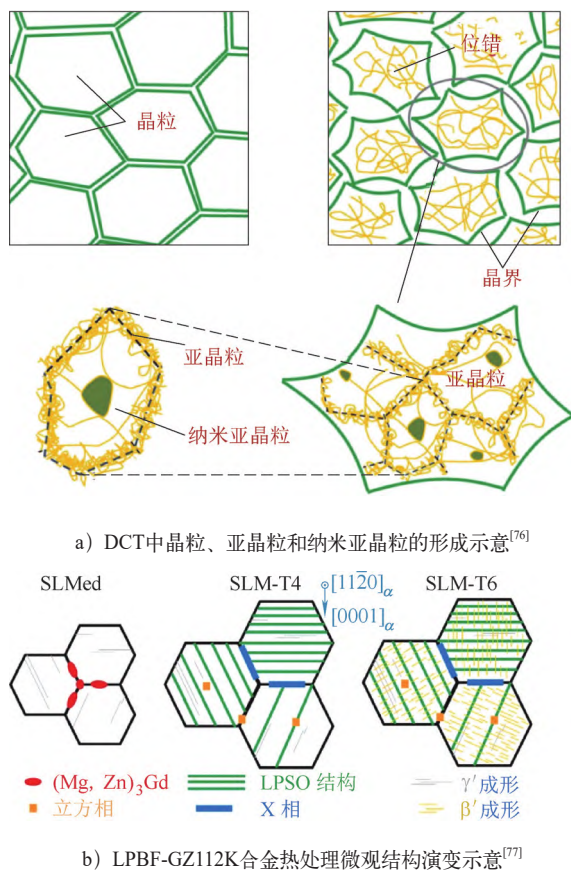


图15 不同后处理方式对LPBF镁合金的影响

7 激光粉末床熔融镁合金的潜在应用

激光粉末床熔融镁合金在生物医学、交通运输以及航空航天等领域具有广阔应用前景(见图

16)。与铝合金和钛合金相比, 镁合金的低强度(特别是在高温下)和低耐蚀性是限制其应用的主要因素^[79]。WU等^[28]、LIANG等^[53]、HU等^[75]、BäR等^[80]以及其他学者研究了LPBF制备的镁基合金在生物医学中的应用潜力, 比如骨钉、骨再生金属支架等。尽管近年来在理解和优化LPBF可生物降解镁合金方面取得了很大进展, 但仍处于起步阶段。在交通运输和航空航天领域使用镁合金的主要原因是减轻重量, 由于镁合金的高温性能、蠕变性能、耐蚀性能较差, 在交通运输中主要用于汽车横梁、中控支架、前车架、座车架、电池模块端及内车门等^[81]; 在航天航空中主要用于卫星支架、通信天线、电子封装结构及燃油喷嘴等^[82]。随着稀土镁合金的发展, 商用Mg-RE合金螺钉于2013年首次推出, 其他人体植入物包括血管支架、螺钉、销钉和关节融合术等也得到了广泛的临床应用^[83]; Mg-RE合金也已被用于制造某些类型的武器装备, 比如轻型导弹、雷达部件等^[84]。基于早期Mg-RE合金商业化的成功, 设计开发高性能稀土镁合金可以替代传统金属。合金化、固溶强化以及第二相强化是改善金属力学性能的最有效方法^[85], 只有深入准确地把握激光粉末床熔融工艺与材料显微组织和力学性能之间的相互关系, 才可能设计出高性能镁合金构件, 并且激光粉末床熔融技术可以解决复杂结构制造困难的问题, 因此优化激光粉末床熔融镁合金的材料设计与加工无疑是推动其在更广阔领域应用的关

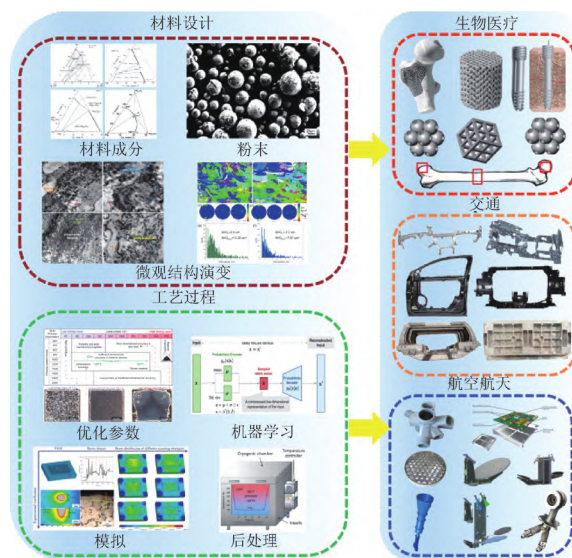


图16 激光粉末床熔融镁合金的潜在应用^[3, 61, 76, 81, 82, 85-89]

键。尽管镁合金在机械结构领域的应用仍处于初级阶段，但其蕴含的巨大潜力已得到了业界的一致认可。特别是在北美、德国和中国等国际与地区，对镁及其合金的研究和应用兴趣正日益浓厚，随着全球范围内科研人员和工业界的共同关注与努力，必将助推镁合金成为未来工业中最重要的材料之一。

8 结束语

本文总结了目前激光粉末床熔融镁合金的研究现状，介绍了镁合金激光粉末床熔融过程中缺陷的形成机制与构件力学性能，并对如何提高LPBF制备的镁合金成形性和力学性能的研究进行了回顾和讨论，结论如下。

1) 激光粉末床熔融是一种逐层熔化粉末以构建复杂零件的增材制造方法，该工艺提供了一种设计制备镁合金的有效方法，但镁合金较差的成形性限制了其广泛应用。

2) 激光粉末床熔融镁合金的大部分研究集中于工艺参数如何影响其微观结构、成形性和力学性能。DOE方法有助于减少不必要的试验成本。模拟仿真与机器学习可以辅助探索激光粉末床熔融镁合金的最佳流程窗口并预测性能。

3) 镁合金成分和显微组织决定了其力学性能，开发新型多元镁合金并研究成分、析出物和微观结构的演变机制，将进一步提高激光粉末床熔融镁合金的性能。

4) 热处理作为最常用的后处理方法，可以有效消除孔隙和残余应力，促进强化相析出。进一步开展高通量试验来探索不同后处理工艺与LPBF制备的镁合金结构和性能之间的关系是必要的。

5) LPBF镁合金在生物医疗方面的应用引起了研究人员的广泛关注，目前商业化稀土镁合金人体植入物已有报道，但需要更多的临床样本来证明其可靠性和安全性。而镁合金作为机械结构部件的应用受到的关注较少，针对LPBF稀土镁合金的耐高温、抗蠕变性能的提升亟待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 唐建伟. ZK60镁合金分流挤压型材固态焊合与晶粒异常长大行为研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [2] 刘宏杰, 刘文才, 孙家伟, 等. 镁合金电弧增材制造研究现状及展望[J]. 材料工程, 2024, 52 (2): 16-30.
- [3] ESMAILY 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: 101321.

- [4] MASOOD CHAUDRY U, TEKUMALLA S, GUPTA M, et al. Designing highly ductile magnesium alloys: current status and future challenges[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2022, 47 (2): 194-281.
- [5] LI T, SONG J, ZHANG A, et al. Progress and prospects in Mg-alloy super-sized high pressure die casting for automotive structural components[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11 (11): 4166-4180.
- [6] 覃哲. 离心铸造Mg-Gd-Y-Zn-Mn合金组织与性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [7] KURZYNOWSKI T, PAWLAK A, SMOLINA I. The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00033-1>.
- [8] 李坤, 吉辰, 白生文, 等. 高性能镁合金电弧增材制造技术研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2024, 60 (7): 289-311.
- [9] HOSEINI E, POPOVICH V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.
- [10] TRAN H-C, LO Y-L. Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 411-425.
- [11] 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.
- [12] SUN C, WANG Y, MCMURTREY M D, et al. Additive manufacturing for energy: A review[J]. Applied Energy, 2021, 282: 116041.
- [13] SALEHI M, MALEKSAEEDI S, SAPARI M a

- B, et al. Additive manufacturing of magnesium–zinc–zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing[J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107683.
- [14] SALEHI M, MALEKSAEEDI S, NAI M L S, et al. Towards additive manufacturing of magnesium alloys through integration of binderless 3D printing and rapid microwave sintering[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100790.
- [15] TREUTLER K, WESLING V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (18) : 8619.
- [16] KUMAR N, BHAVSAR H, MAHESH P V S, et al. Wire arc additive manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 285: 126144.
- [17] 李会朝, 王彩妹, 张华, 等. 搅拌摩擦增材制造技术研究进展[J]. *金属学报*, 2023, 59 (1) : 106-124.
- [18] WANG W, HAN P, PENG P, et al. Friction stir processing of magnesium alloys: A review[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33 (1) : 43-57.
- [19] CHEN H, MENG X, CHEN J, et al. Wire-based friction stir additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103557.
- [20] THOMPSON S M, BIAN L, SHAMSAEI N, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 8: 36-62.
- [21] TIAN Z, ZHANG C, WANG D, et al. A review on laser powder bed fusion of inconel 625 nickel-based alloy[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (1) : 81.
- [22] CALIGNANO F, MANFREDI D, AMBROSIO E P, et al. Overview on additive manufacturing technologies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(4): 593-612.
- [23] AFKHAMI S, DABIRI M, ALAVI S H, et al. Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 122: 72-83.
- [24] LIU S, GUO H. Balling behavior of selective laser melting (SLM) magnesium alloy[J]. *Materials*, 2020, 13 (16) : 3632.
- [25] YU G, GU D, DAI D, et al. On the role of processing parameters in thermal behavior, surface morphology and accuracy during laser 3D printing of aluminum alloy[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49 (13) : 135501.
- [26] LI R, LIU J, SHI Y, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59 (9) : 1025-1035.
- [27] GU D, SHEN Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods[J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (8) : 2903-2910.
- [28] WU C L, ZAI W, MAN H C. Additive manufacturing of ZK60 magnesium alloy by selective laser melting: Parameter optimization, microstructure and biodegradability[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26: 101922.
- [29] LIU K, KOU S. Susceptibility of magnesium alloys to solidification cracking[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, 25 (3) : 251-257.
- [30] LIANG J, LEI Z, CHEN Y, et al. Formability, microstructure, and thermal crack characteristics of selective laser melting of ZK60 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 839: 142858.
- [31] 李坤, 马锐津, 戴启雷, 等. 高性能镁合金激光制造技术研究现状及展望[J]. *航空制造技术*, 2022, 65 (23) : 30-47.
- [32] LIU J, YIN B, SUN Z, et al. Hot cracking in ZK60 magnesium alloy produced by laser powder bed fusion process[J]. *Materials Letters*, 2021, 301: 130283.
- [33] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112-224.
- [34] LIANG J, LEI Z, CHEN Y, et al. Elimination of extraordinarily high cracking susceptibility of ZK60

- Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. Materials Letters, 2022, 312: 131731.
- [35] LIANG J, WU S, LEI Z, et al. In-situ aging treatment by preheating to obtain high-strength ZK60 Mg alloy processed by laser powder bed fusion[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112361.
- [36] 张强, 汪认, 杨清云, 等. 镁合金激光增材制造技术的研究现状[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (7): 12-20.
- [37] HOJJATZADEH S M H, PARAB N D, GUO Q, et al. Direct observation of pore formation mechanisms during LPBF additive manufacturing process and high energy density laser welding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 153: 103555.
- [38] XIE W, MAN H-C, CHAN C-W. Interplay of laser power and pore characteristics in selective laser melting of ZK60 magnesium alloys: A study based on in-situ monitoring and image analysis[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12 (4): 1346-1366.
- [39] LI X, FANG X, WANG S, et al. Selective laser melted AZ91D magnesium alloy with superior balance of strength and ductility[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11 (12): 4644-4658.
- [40] OLIVEIRA J P, LALONDE A D, MA J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108762.
- [41] DENG Q, WU Y, LUO Y, et al. Fabrication of high-strength Mg-Gd-Zn-Zr alloy via selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2020, 165: 110377.
- [42] LIU L, ZHOU X, YU S, et al. Effects of heat treatment on mechanical properties of an extruded Mg-4.3Gd-3.2Y-1.2Zn-0.5Zr alloy and establishment of its Hall-Petch relation [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023 (2): 501-512.
- [43] 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.
- [44] ZENG Z, SALEHI M, KOPP A, et al. Recent progress and perspectives in additive manufacturing of magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10 (6): 1511-1541.
- [45] LIU S, YANG W, SHI X, et al. Influence of laser process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of a selective laser melted AZ61 magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808: 151160.
- [46] ZHANG Y L, LI J, ZHANG Y Y, et al. Evolution in microstructure and high-temperature oxidation behaviors of the laser-cladding coatings with the Si addition contents[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154131.
- [47] DU J-Y, LI Y-L, LI F-Y, et al. Research on the high temperature oxidation mechanism of Cr₃C₂-NiCrCoMo coating for surface remanufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 565-579.
- [48] KIM Y M, YIM C D, KIM H S, et al. Key factor influencing the ignition resistance of magnesium alloys at elevated temperatures[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(11): 958-961.
- [49] JIANG Q, LU D, LIU C, et al. The pilling-bedworth ratio of oxides formed from the precipitated phases in magnesium alloys[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.761052.
- [50] YU X, SHEN S, JIANG B, et al. The effect of the existing state of Y on high temperature oxidation properties of magnesium alloys[J]. Applied Surface Science, 2016, 370: 357-363.
- [51] AGARWAL S, CURTIN J, DUFFY B, et al. Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications[J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 68: 948-963.
- [52] DALOZ D, STEINMETZ P, MICHOT G. Corrosion behavior of rapidly solidified magnesium-aluminum-zinc alloys[J]. Corrosion, 1997, 53 (12): 944-954.
- [53] LIANG J, WU S, LI B, et al. Microstructure and

- corrosion behavior of Y-modified ZK60 Mg alloy prepared by laser powder bed fusion[J]. Corrosion Science, 2023, 211: 110895.
- [54] REDDY K P K, RAO B N, NAZEEMUDHEEN M N, et al. Selection of optimal process parameters to obtain defect-free builds in IN718 made by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08677-9>.
- [55] ÅHMAN H N, LARSSON L, WAHMAN C, et al. Higher laser power improves strength but reduces corrosion resistance of Mg WE43 processed by powder bed fusion[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108979.
- [56] YIN B, LIU J, PENG B, et al. Influence of layer thickness on formation quality, microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of WE43 magnesium alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12 (4) : 1367-1385.
- [57] PAWLAK A, SZYMCHYK P E, KURZYNOWSKI T, et al. Selective laser melting of magnesium AZ31B alloy powder[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26 (2) : 249-258.
- [58] PAWLAK A, ROSIENKIWEICZ M, CHLEBUS E. Design of experiments approach in AZ31 powder selective laser melting process optimization[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17 (1) : 9-18.
- [59] WANG W L, LIU W Q, YANG X, et al. Multi-scale simulation of columnar-to-equiaxed transition during laser selective melting of rare earth magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 119: 11-24.
- [60] SHEN H, YAN J, NIU X. Thermo-fluid-dynamic modeling of the melt pool during selective laser melting for AZ91D magnesium alloy[J]. Materials, 2020, 13 (18) : 4157.
- [61] XU R, WANG W, WANG K, et al. Finite element simulation of residual stress distribution during selective laser melting of Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105571.
- [62] NG W L, GOH G L, GOH G D, et al. Progress and opportunities for machine learning in materials and processes of additive manufacturing[J]. Advanced Materials, 2024, n/a(n/a): 2310006.
- [63] SNOW Z, REUTZEL E W, PETRICH J. Correlating in-situ sensor data to defect locations and part quality for additively manufactured parts using machine learning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 302: 117476.
- [64] AKBARI P, OGOKE F, KAO N Y, et al. MeltpoolNet: Melt pool characteristic prediction in metal additive manufacturing using machine learning[J]. Additive Manufacturing, 2022, 55: 102817.
- [65] WEI K, ZENG X, WANG Z, et al. Selective laser melting of Mg-Zn binary alloys: Effects of Zn content on densification behavior, microstructure, and mechanical property[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 756: 226-236.
- [66] WANG Z, SHEN Z, ZHAO Y, et al. Insights into the design of oxidation-resistant Mg alloy by alloying with rare-earth elements[J]. Materials Today Advances, 2023, 20: 100446.
- [67] ZHANG Y, WU Y, PENG L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 703-711.
- [68] WANG W, HE L, YANG X, et al. Microstructure and microhardness mechanism of selective laser melting Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 868: 159107.
- [69] LI Y, YANG C, ZENG X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of magnesium alloys containing long period stacking ordered phase[J]. Materials Characterization, 2018, 141: 286-295.
- [70] ZHENG D, ZHU Q, ZENG X, et al. Unveiling the strengthening effect of LPSO phase in a Mg-Y-Zn alloy[J]. Materials Letters, 2022, 311: 131524.
- [71] MOTALLEBI R, SAVAEDI Z, MIRZADEH H. Post-processing heat treatment of lightweight magnesium alloys fabricated by additive

- manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 1873-1892.
- [72] DENG Q, CHANG Z, SU N, et al. Developing a novel high-strength Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy for laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023. DOI: 10.1016/j.jma.2023.09.027.
- [73] LIU S, GUO H. Influence of hot isostatic pressing (HIP) on mechanical properties of magnesium alloy produced by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Letters, 2020, 265: 127463.
- [74] LIU S, GUO H. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy prepared by selective laser melting (SLM)[J]. Materials, 2022, 15(20): 7067.
- [75] HU Q, CHEN C, LIU M, et al. Improved corrosion resistance of magnesium alloy prepared by selective laser melting through T4 heat treatment for biomedical applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 813-825.
- [76] LI K, CHEN W, YIN B, et al. A comparative study on WE43 magnesium alloy fabricated by laser powder bed fusion coupled with deep cryogenic treatment: Evolution in microstructure and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103814.
- [77] DENG Q, WU Y, ZHU W, et al. Effect of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted Mg-11Gd-2Zn-0.4Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 829: 142139.
- [78] DENG Q, WU Y, WU Q, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of a high-strength Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 49: 102517.
- [79] KURZYŃSKI T, PAWLAK, SMOLINA I. The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20 (1) : 23.
- [80] BÄR F, BERGER L, JAUER L, et al. Laser additive manufacturing of biodegradable magnesium alloy WE43: A detailed microstructure analysis[J]. Acta Biomaterialia, 2019, 98: 36-49.
- [81] XIE H, ZHAO H, GUO X, et al. Recent progress on cast magnesium alloy and components[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59 (22) : 9969-10002.
- [82] BAI J, YANG Y, WEN C, et al. Applications of magnesium alloys for aerospace: A review[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11 (10) : 3609-3619.
- [83] YANG M, CHEN C, WANG D, et al. Biomedical rare-earth magnesium alloy: Current status and future prospects[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12 (4) : 1260-1282.
- [84] WU G, WANG C, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9 (1) : 1-20.
- [85] CHEN J, TAN L, YU X, et al. Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 87: 68-79.
- [86] QIN Y, WEN P, GUO H, et al. Additive manufacturing of biodegradable metals: Current research status and future perspectives[J]. Acta Biomaterialia, 2019, 98: 3-22.
- [87] LI Y, ZHOU J, PAVANRAM P, et al. Additively manufactured biodegradable porous magnesium[J]. Acta Biomaterialia, 2018, 67: 378-392.
- [88] GHAYOONI MOHAMMADI M, MAHMOUD D, ELBESTAWI M. On the application of machine learning for defect detection in L-PBF additive manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107338.
- [89] ROKHLIN L L. The Regularities in constitution of the ternary phase diagrams of magnesium alloys with two rare-earth metals belonging to different groups (yttrium group or cerium group)[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2020, 41 (4) : 532-537.