



# 激光选区熔化铝合金及其复合材料的研究进展

蔡志勇<sup>1,2</sup>, 刘海江<sup>1</sup>, 王日初<sup>1,2,3</sup>, 彭超群<sup>1,2</sup>

1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410000;
2. 中南大学 电子封装与先进功能材料湖南省重点实验室, 长沙 410083;
3. 中南大学 轻质高强结构材料重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 铝合金及其复合材料具有比强度高、高比刚度和耐腐蚀性能优异等特点, 是一类重要的轻质材料。采用激光选区熔化技术制备结构-功能一体化铝合金及其复合材料的精密复杂构件, 在航空航天、交通运输、电子器件等领域具有广阔的应用前景。本文首先阐述激光选区熔化技术的基本原理、主要工艺参数及其影响规律; 分析激光选区熔化铝合金及其复合材料的微观组织、宏观性能和后处理方法等, 并概述其主要应用情况; 最后, 阐述激光选区熔化铝合金及其复合材料面临的主要问题并对其发展方向进行简单展望。

**关键词:** 激光选区熔化; 铝合金; 铝基复合材料; 致密度; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2022)-01-0050-16

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

**引文格式:** 蔡志勇, 刘海江, 王日初, 等. 激光选区熔化铝合金及其复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 50-65. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37854

CAI Zhi-yong, LIU Hai-jiang, WANG Ri-chu, et al. Progress in aluminum alloys and composites fabricated by selective laser melting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 50-65. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37854

铝合金是使用量仅次于钢材的一种重要金属材料, 具有密度小、比强度高、比刚度高和耐腐蚀性能优异等特点, 通过引入增强体形成的铝基复合材料可以进一步提高其强度、耐热性和耐磨性<sup>[1]</sup>。近年来, 随着航空航天、交通运输等领域的快速发展, 对轻质高性能金属材料的需求量不断增加, 铝合金及其复合材料的制备方法在传统熔铸、锻造和粉末冶金的基础上, 新型制备方法不断被开发和应用, 并在国内外学术界和产业界引起广泛关注。

增材制造(Additive manufacturing, AM), 也称为 3D 打印或快速成形, 具有直接从 3D 计算机辅助设计数据中逐层生产近终形尺寸 3D 零件的特点, 甚至有些增材制造技术生产的零件不需要后期处理

就可以直接应用, 从而有效缩短供应链和交货时间<sup>[2]</sup>。增材制造技术的主要优势在于节省原材料、提高定制产品的成本效益及实现混合材料的直接成型, 并且能够获得传统制备工艺难以实现的高性能复杂构件。SAMES 等<sup>[3]</sup>列出金属增材制造从 1984 年到 2012 年的重大事件时间表, 能够从文中详细了解增材制造的发展历史。

目前, 增材制造技术可以分为以下 3 类: ① 粉末床熔融(Powder-bed fusion, PBF); ② 直接能量沉积(Direct energy deposition, DED); ③ 液滴按需系统(Droplet-on-demand systems, DDS)<sup>[4]</sup>。其中, 激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)和电子束熔化(Electron beam melting, EBM)是两种重要的粉

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51804349); 中国博士后科学基金资助项目(2018M632986); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50766); 轻质高强结构材料重点实验室项目(JCKY201851)

**收稿日期:** 2020-11-13; **修订日期:** 2021-05-07

**通信作者:** 王日初, 教授, 博士; 电话: 0731-88836638; E-mail: wrccsu@163.com

末床熔融技术。

## 1 激光选区熔化技术概述

激光选区熔化技术于 1995 年由德国 Fraunhofer 激光技术研究所率先研发, 其基本原理是将零件的三维模型通过计算机辅助设计 (Computer-aided design, CAD) 软件分解, 然后逐层地添加材料直至成形出整个零件<sup>[5]</sup>。激光选区熔化技术采用的激光光斑直径小、制品尺寸精度高, 是制备精细、复杂结构金属零件领域最具发展前景的金属增材制造技术之一。

激光选区熔化设备的基本结构如图 1 所示<sup>[6]</sup>。典型构件的激光选区熔化工序包括以下几个主要步骤<sup>[4]</sup>。

1) 借助 CAD 将模型转换成一个 STL (Stereo Lithography, 立体光刻) 文件。

2) 选择最佳的建造方向(取决于 Z 轴的高度、表面光洁度和支撑结构的最小化), 生成支撑结构。

3) 对盖板进行预热(避免不均匀的热膨胀引起卷曲), 然后在盖板上涂上一层预先规定厚度的粉末。

4) 高能量密度的激光束发射到 X-Y 平面上, 通过移动激光束选择性地扫描和熔化所需要的区域。

5) 熔化完成后将盖板降低到与上一层粉末厚度相等的高度, 然后重新铺粉继续沉积下一层。

6) 重复步骤 3)~步骤 5), 得到激光选区熔化零件。

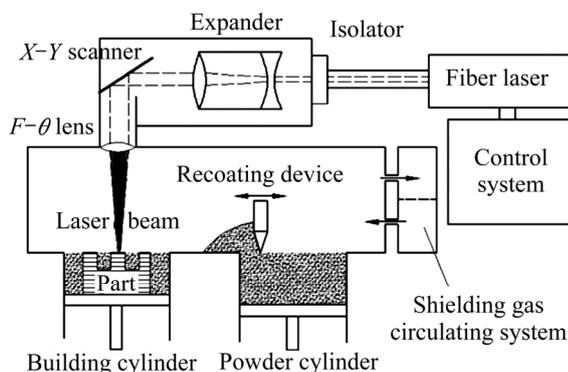


图 1 激光选区熔化设备的基本结构<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Structure of selective laser melting equipment<sup>[6]</sup>

激光选区熔化技术具有成形性能好、成形工件致密度高、材料性能良好等特点, 在航空航天、生物医疗和汽车等领域获得广泛应用, 逐渐成为增材制造技术的研究热点<sup>[7]</sup>。激光选区熔化过程具有复杂的非平衡物理和化学性质, 可以使增强体在基体中分散均匀, 并在增强体与基体之间的界面处诱发复杂的相互作用, 并且可以通过调整合金成形件的微观结构获得所需性能。XI 等<sup>[8]</sup>对比激光选区熔化 Al-12Si/TiB<sub>2</sub> 复合材料与 Al-12Si 合金的微观组织和性能发现, Al-12Si/TiB<sub>2</sub> 复合材料的微观组织由均匀的细等轴晶粒组成, 无各向异性现象, 从而具有更高的屈服强度和显微硬度。ZHAO 等<sup>[9]</sup>采用激光选区熔化技术制备 AlSi10Mg/8.5%(体积分数)SiC 复合材料, 分析三个特征区域的微观组织演变机理发现, 熔池中心和边界处具有较高的硬度(2.3 GPa 和 2.2 GPa)和弹性模量(78.9 GPa 和 75.5 GPa), 远高于传统方法制备的材料。

## 2 铝合金及其复合材料激光选区熔化技术

铝合金具有激光吸收率低、热导率高等特点, 激光选区熔化过程中大约 90% 的激光能量被反射, 导致其成形难度大于其他金属材料。因此, 铝合金及其复合材料的激光选区熔化对设备提出更苛刻的要求, 对工艺参数和环境的要求高于铁基、钛基等合金<sup>[10-11]</sup>。

国内外对激光选区熔化铝合金的研究主要集中在 Al-Si、Al-Si-Mg、Al-Li 系等合金材料, 其中 Al-Si 系合金的成形技术较为成熟, 学者们对 AlSi10Mg 和 Al-12Si 两种合金的激光选区熔化成形研究较多, 并且部分已经成功应用于工程型号。

2006 年, 张冬云<sup>[12]</sup>在德国 Fraunhofer 激光技术研究所的支持下, 采用激光选区熔化技术制备出 AlSi25、AlSi10Mg、AlMg3 和 AlMgSi0.5 四种合金。研究表明, 每种合金都存在一个加工阈值, 当以高于加工阈值的激光功率对合金粉末进行加热时, 四种铝合金的致密度都随着扫描速度的提高而降低, 并且激光选区熔化 AlSi10Mg 拉伸试样的力学性能显著优于铸造件。耿遥详等<sup>[13]</sup>应用“团簇+连接原子”模型, 通过增加合金液-固局域结构相容性,

获得一种激光选区熔化专用新成分  $Al_{91.0}Si_{7.5}Mg_{1.5}$ ，通过调整工艺参数获得近乎全致密的铝合金，其综合力学性能明显优于  $AlSi10Mg$  合金，该工作为设计激光选区熔化铝合金的成分提供了新思路。

激光选区熔化技术制备高导电金属以及熔点高和脆性大的难熔金属，成形难度相对较大。为减少成形材料的孔隙率，选择合适的工艺参数是必不可少的，但是目前的开发策略仍然存在局限性。BAJAJ 等<sup>[14]</sup>提出一种使用标准化流程图进行快速流程开发的简单方法，利用归一化能量密度与归一化舱口间距的关系图，首先确定一个宽的加工窗口，然后利用这种方法调整工艺参数用于钨和铝合金的激光选区熔化成形，采用 200 W 脉冲激光和 400 W 连续激光分别获得致密度为 97.4% 和 99.7% 的成形件。

近年来，为提高激光选区熔化铝合金的力学性能，研究人员采用外加或原位方法将增强颗粒引入合金中<sup>[15]</sup>。颗粒增强铝基复合材料 (Particle reinforced aluminum matrix composites, PRAMCs) 的增强体一般都是硬质颗粒，如  $SiC$ 、 $TiC$ 、 $TiB_2$ 、 $ZrB_2$  和  $Al_2O_3$  等陶瓷颗粒，这些增强颗粒往往具有高熔点、高硬度和优良的力学性能，他们除了可以提高复合材料的强度、硬度和耐磨性外，还可以作为晶粒细化的形核位点。PRAMOD 等<sup>[16]</sup>详细介绍了各种通过原位反应制备增强体颗粒的方法。XIAO 等<sup>[17]</sup>发现，将纳米  $TiB_2$  颗粒添加到  $AlSi10Mg$  合金后，

基体组织为细小的等轴晶，没有择优的晶粒结构，复合材料的各向异性显著降低。LI 等<sup>[18]</sup>采用激光选区熔化技术制备出完全致密、无裂纹的原位纳米  $TiB_2$  增强  $AlSi10Mg$  合金，力学性能测试表明该复合材料具有很高的抗拉强度(530 MPa)、优良的延展性(15.5%)和较高的显微硬度(191 HV<sub>0.3</sub>)，结合微观组织表征结果作者进一步讨论了该复合材料的强韧化机理，为利用原位颗粒增强金属基复合材料提供了一种重要途径。

### 3 激光选区熔化的主要工艺参数

激光选区熔化技术的工艺参数，例如扫描速度、舱口间距、激光能量、层厚等，是影响铝合金及其复合材料组织缺陷和宏观性能的关键。已有文献报道了这些工艺参数对成形件致密度和力学性能的影响。ZHANG 等<sup>[19]</sup>综述了激光选区熔化成形的缺陷形成机制，如图 2 所示，他们将主要工艺参数分为 4 类：激光输入(Laser-related)、扫描相关(Scan-related)、粉末特性(Powder-related)和温度状况(Temperature-related)。

#### 3.1 粉末特性

激光选区熔化的原材料是专用的金属粉末，粉末特性直接影响工艺参数制定及成形零件的组织性能。激光选区熔化金属粉末要求粒度小、粒度

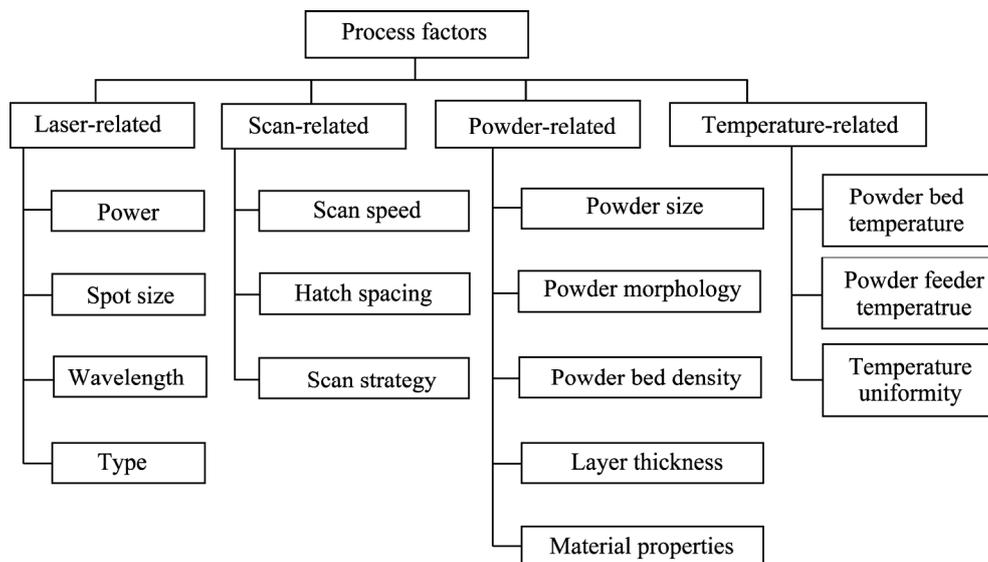


图 2 激光选区熔化的工艺参数分类<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Classification of processing factors of selective laser melting<sup>[19]</sup>

分布均匀、球形度高和氧含量低。对于金属粉末成分的定量和定性分析,一般使用化学分析法和光谱分析法;而氧含量作为一项航天航空等领域要求十分严格的指标,通常需要控制在0.15%以下<sup>[20]</sup>。金属粉末粒度是影响激光选区熔化成形性的一项关键指标,粒度一般要求不能过大,但是粒度过小也会影响粉末流动性,阻碍粉末的熔融,通常采用的粒度范围是15~63 μm(细粉)和63~105 μm(粗粉)。

唐鹏钧等<sup>[21]</sup>采用超音速气体雾化设备制备AlSi10Mg合金粉末,通过气流分级去除细小和粗大的粉末颗粒,获得的粉末大多数为球形颗粒,少数为不规则形状,能够满足激光选区熔化成形的要求;但是,雾化过程中残留气体导致出现一些空心粉末,成形零件的致密度存在一定不足。BAITIMEROV等<sup>[22]</sup>发现,具有良好流动性的粉末表现出较好的激光选区熔化成形性,但是由于粉末颗粒的集聚,大量细颗粒粉末表现出非常差的流动性,从而不利于激光选区熔化成形。

### 3.2 激光能量输入

激光能量输入直接决定金属粉末的熔融环境,在激光选区熔化成形过程中影响成形件的组织缺陷和力学性能,对于铝合金及其复合材料尤其重要。与激光能量输入有关的主要工艺参数有激光功率、扫描速度、舱口间距和层厚等<sup>[19]</sup>。

当其他工艺参数一定时,激光功率过低形成的熔池尺寸小、温度低,粉末未完全熔化,熔液黏度和表面张力都较大,从而降低熔液的流动性,熔液容易分裂成金属球体产生球形化,最终出现孔隙<sup>[23-24]</sup>。即使激光选区熔化过程在惰性气氛中进行,铝合金熔池自由表面也会形成薄的氧化层,需要使用较高的激光功率来破碎氧化膜。此外,由于铝的能量吸收率低,激光束的大部分辐照被反射,适当提高激光功率有利于铝合金的激光成形。TONELLI等<sup>[25]</sup>研究粉末及工艺参数对A357铝合金致密度和硬度的影响时发现,合金的致密度受激光功率的影响显著。随着激光功率增加,样品的致密度逐渐升高,而且不同粉末存在不同的功率阈值,只有在超过阈值的情况下,成形件致密度才会随着激光功率的增加而线性升高。

虽然高激光功率是降低孔隙率的必要条件,但是当激光功率过高时,熔池宽度也随之增大,容易出现过烧现象,同时伴有球形化现象<sup>[23]</sup>。张红昌等<sup>[26]</sup>采用“分组变向”的扫描方式研究工艺参数对2024铝合金微观组织和力学性能的影响;在扫描速度一定时,合金致密度随着激光功率的增加呈先升高后降低的趋势,当激光功率为260 W时致密度最高。

扫描速度越大,输入的激光能量密度越低,导致熔池宽度变窄、深度变浅,前一层未熔化部位的粉末难以被后一层熔池覆盖,从而出现层间部分粉末没有熔化的现象,并留下工艺孔隙;当扫描速度较小时,即使是较大的扫描间距也仍然有较高的搭接率,获得的成形件质量更好<sup>[27]</sup>。HANEMANN等<sup>[28]</sup>对AlSi10Mg合金的研究表明,随着激光功率增加和扫描速度降低,成形件中裂纹减少;当激光功率≤225 W时,合金致密度随着扫描速度的提高而降低;而当激光功率≥275 W时,合金致密度随着扫描速度的降低而减小。

以上结果表明,激光功率和扫描速度等工艺参数并不是作为单一变量各自影响成形件的组织性能,而是存在相互耦合的作用。当扫描速度相对较低、激光功率较高时,熔池在高能量输入下不稳定,残余应力也较高,成形件中容易出现微裂纹;当扫描速度相对较高、激光功率较低时,能量输入较低不足以熔化粉末,导致成形件中出现未熔合缺陷<sup>[19]</sup>。激光能量密度可以表示为<sup>[29-30]</sup>

$$E = \frac{P}{v \times h \times t} \quad (1)$$

式中:  $E$  表示激光能量密度(J/mm<sup>3</sup>);  $P$  表示激光功率(W);  $v$  表示扫描速度(mm/s);  $h$  表示舱口间距(mm);  $t$  表示层厚(mm)。

粉末层的厚度影响原位反应和凝固时的热量,进而影响激光选区熔化零件的微观组织和宏观性能。从式(1)可以看出,当舱口间距增大时,合金致密度降低,但是间距过小导致激光能量过度集中,成形件容易翘曲变形。DADBAKSHSH等<sup>[31]</sup>探讨粉末层厚度对激光选区熔化Al/5%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(质量分数)复合材料微观结构的影响,通过对比50 μm、75 μm和较厚粉末层获得的微观组织发现,粉末层厚度越大,成形件中氧含量越低,因为较厚的粉末层降低

冷却速度, 激活更多的放热反应, 最终减少基体中的氧含量。MAAMOUN 等<sup>[32]</sup>研究工艺参数对激光选区熔化铝合金零件质量的影响, 在层厚恒定为 30  $\mu\text{m}$  的条件下, 采用控制变量的方法调整 AlSi10Mg 合金的制备工艺参数(激光功率、扫描速度、舱口间距), 获得的样品相对密度达到 99.7%。

### 3.3 扫描策略

激光选区熔化的常用扫描策略有“单向”、“锯齿形”、“交叉阴影形”和“岛屿式扫描策略”, 如图 3 所示<sup>[33]</sup>。“单向”和“锯齿形”扫描策略, 在扫描轨道的初期和末期, 激光能量经常不稳定而需要降低扫描速度, 导致激光能量输入相对较大。“交叉阴影形”扫描策略可以使能量输入在层与层之间更加平衡, 有效防止缺陷的萌生和传播。“岛屿式扫描策略”先将填充层分为几个“岛”, 每个“岛”随机且连续地构建, 然后将连续的层移动一定的距离, 可以避免缺陷的积累。此外, 这种方式可以平衡激光选区熔化零件的残余热应力, 减少裂纹的产生。由于扫描顺序的变化, 缺陷往往会在小岛边界形成, 因此这还需要进一步改善。

VALENTE 等<sup>[34]</sup>优化岛屿式扫描策略, 制备的合金表面粗糙度更高, 但是表面纹理更均匀, 合金抗拉强度(494 MPa)高于线扫描策略(474 MPa)。MUGWAGWA 等<sup>[35]</sup>对比岛屿式、连续式、连续棋盘式和最小热影响(LHI)四种扫描策略对成形件残余应力和变形的影响, 连续棋盘式扫描策略获得的样品平均残余应力最小, 与残余应力研究结果相似, 连续棋盘式的结果与岛屿式策略相比, 形状偏差较小, 而且连续棋盘式策略的扫描时间略低于岛屿式和 LHI 棋盘策略。

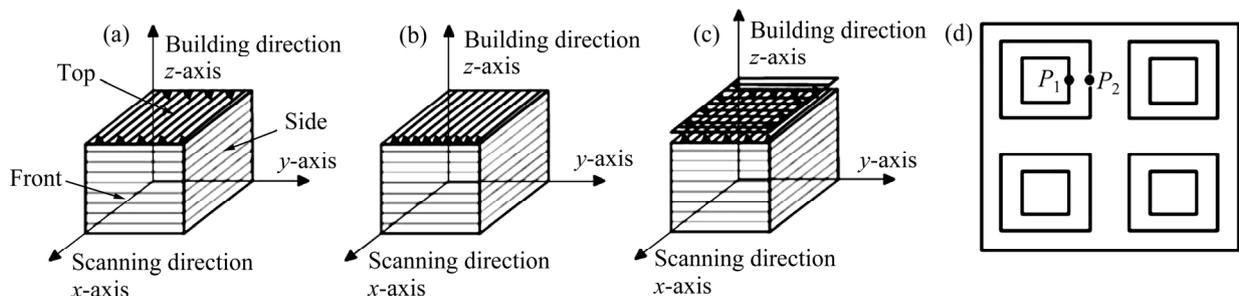


图 3 激光选区熔化的常用扫描策略<sup>[33]</sup>

Fig. 3 Scanning strategy diagram of selective laser melting: (a) Zigzag scanning strategy; (b) One-way scanning strategy; (c) Cross-hatching scanning strategy; (d) Island scanning strategy<sup>[33]</sup>

## 4 激光选区熔化铝合金及其复合材料的微观组织与性能

### 4.1 致密度

影响激光选区熔化铝合金及其复合材料致密度的主要因素是孔隙的形成, 而孔隙对零件的性能具有严重影响。激光选区熔化零件的孔隙可以分为 3 类: 熔合误差、气孔和缩孔<sup>[36]</sup>。熔合误差主要是激光能量密度不足, 导致最后一个凝固层重熔不完全, 冶金结合不良; 粉末颗粒间夹带气体时也容易产生熔合误差, 这些孔隙一般呈不规则形状。气孔是在激光扫描时气体逸出后形成的空腔, 熔池中的流体力与空腔中的蒸汽压力趋于平衡, 导致液态金属坍塌形成周期性孔隙。缩孔的形成主要归因于凝固过程中液态金属供应不足。目前, 研究人员主要通过优化激光选区熔化工艺参数、粉末干燥、表面重熔等方法来抑制孔隙的产生, 从而提高成形铝合金及其复合材料的致密度。

邹亚桐等<sup>[24]</sup>利用田口方法研究激光功率、扫描速度、扫描间距等工艺参数对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金致密度的影响, 当激光功率较低时, 粉末容易产生球化效应, 导致铺粉不均匀。张骁丽等<sup>[23]</sup>提出球化严重将造成下一层表面更加粗糙, 产生“连锁效应”, 甚至终止成形; 通过适当提高激光功率可以减少孔隙, 最终确定的激光功率为 160~180 W。扫描速度不宜过低或者过高, 过低会引起部分蒸发气体残留在内部形成气孔, 过高则导致粉末熔化不完全, 极易产生大量孔隙, 优化后的扫描速度为 800~1100 mm/s, 扫描间距为 0.05 mm。当然, 获得高致密度零件的充分条件还包括足够的

能量密度输入, 但是能量密度过高会引起过烧, 铝合金及其复合材料的一般选择  $4.0\sim 6.0\text{ J/mm}^2$ 。柯宇等<sup>[37]</sup>采用激光选区熔化制备 AlSi10Mg 合金, 平均致密度达到 99.6%, 影响合金致密度的主要因素包括粉末碰撞飞溅、冷却速度快和氧化杂质; 另外, 作者还给出工艺参数与致密度的优化云图, 如图 4 所示, 该结果为提高激光选区熔化铝合金及其复合材料的致密度提供了重要参考。

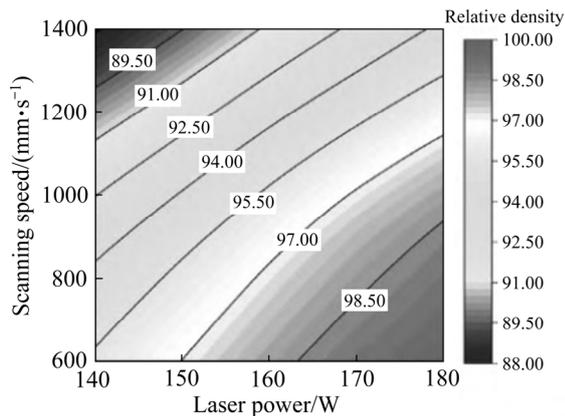


图 4 激光选区熔化工艺参数与合金致密度的关系<sup>[37]</sup>

Fig. 4 Relationship between selective laser melting parameters and relative density of alloys<sup>[37]</sup>

重熔对合金表面粗糙度和孔隙率都有一定的影响, 并且有利于表面光洁度的提高。YU 等<sup>[38]</sup>分析两种重熔策略对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金孔隙率的影响, 重熔方向相同的样品中心和边缘区域的孔隙率显著降低, 而重熔方向相反的样品总孔隙率较高, 孔隙主要分布在边缘处。此外, 重熔还可以促进残余颗粒的熔解, 通过多次重熔循环, 随着凝固层温度升高和再熔区温度梯度降低, 残余应力得到降低。对于致密度不高的激光选区熔化零件, 裂纹一般在孔隙集中区域萌生并迅速扩展, 最终导致断裂; 而合金的抗疲劳性能也受到残余气孔的显著影响<sup>[39]</sup>。

## 4.2 微观组织

微观组织直接决定激光选区熔化零件的性能, 但是激光选区熔化铝合金及其复合材料的微观组织形态复杂、形式多样。目前, 为改善微观组织的一致性, 主要采用工艺优化、颗粒掺杂和热处理等方式<sup>[5]</sup>。

SUWAS 等<sup>[40]</sup>研究激光选区熔化 Al-12Si 和

AlSi10Mg 合金的微观组织、织构和力学性能的演变规律, 其微观组织由 Al-Si 共晶和初生  $\alpha(\text{Al})$  基体组成, 晶粒尺寸相对传统铸造合金明显减小, 并且 Si 相富集于晶粒边界; AlSi10Mg 合金的微观组织与 Al-12Si 合金相似, 晶粒边界以  $\alpha(\text{Al})$  为核心并且富集 Si 相, 晶粒细化和固溶体的硬化有助于提升合金力学性能。朱小刚等<sup>[41]</sup>研究平行和垂直于激光选区熔化方向 AlSi10Mg 合金的微观组织, 发现在平行方向有排列整齐的白色柱状晶穿插熔池区, 而垂直方向的熔池则呈现椭圆形, 在边缘区域分布着较为明显的沉淀相。

LI 等<sup>[42]</sup>研究添加微量  $\text{TiB}_2$  陶瓷颗粒(质量分数为 1%)对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金微观组织和性能的影响。与 AlSi10Mg 合金相比,  $\text{TiB}_2$  颗粒提高复合材料的组织均匀,  $\text{TiB}_2$  颗粒分布均匀, 在增强颗粒与基体的界面处有少量 Si 颗粒析出, 显微硬度分布更为稳定, 拉伸强度、屈服强度和伸长率等性能都有所提升。胡亮等<sup>[43]</sup>研究  $\text{TiB}_2$  含量对 2024 铝合金微观组织及力学性能的影响, 质量分数为 1% 的纳米  $\text{TiB}_2$  颗粒可以将晶粒尺寸由  $19.9\ \mu\text{m}$  细化至  $4.25\ \mu\text{m}$ , 晶粒形貌由柱状转化为短棒状和等轴状, 复合材料力学性能得到提升; 但是, 当  $\text{TiB}_2$  质量分数增加至 3% 时, 晶粒细化效果减弱,  $\text{TiB}_2$  颗粒出现团聚现象, 综合力学性能急剧下降。

相比于工艺参数优化和引入纳米颗粒, 热处理对改善激光选区熔化铝合金及其复合材料微观组织的研究较少。马如龙等<sup>[44]</sup>对激光选区熔化 Al-4.0Mg-0.7Sc-0.4Zr-0.5Mn 进行不同温度热处理 ( $300$ 、 $350$  和  $400\ ^\circ\text{C}$ ), 微观组织由柱状晶区和细等轴晶区组成, 随着温度升高, 组织没有发生明显变化, 但是温度过高 ( $>350\ ^\circ\text{C}$ ) 会导致  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  和  $\text{Al}_6\text{Mn}$  强化相长大, 从而导致合金强度降低。

## 4.3 力学性能

力学性能是评价激光选区熔化工艺可行性的基础指标, 目前关于激光选区熔化铝合金及其复合材料力学性能的研究主要集中在拉伸性能和疲劳性能。

SUBBIAH 等<sup>[45]</sup>研究支撑结构、建造方向和后处理工艺对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金力学性能的影响, 与常规铸造试件相比, 激光选区熔化成形件的抗拉强度为  $431.1\ \text{MPa}$ , 相对提高 20%; 该强

度提高是由于快速凝固过程导致晶粒细化,更多的晶界可以阻止位错移动;但是激光选区熔化样品的伸长率相对较低,这可能是由于样品中存在孔隙和未熔粉末;合金经过(550 °C, 2 h)热处理后,伸长率提高至未热处理样品的两倍。

不同预热温度和扫描策略也影响着铝合金及其复合材料的力学性能。郭妙贤等<sup>[46]</sup>发现,在棋盘式扫描路径下预热到120 °C后获得AlSi10Mg零件,其抗拉强度和硬度均得到显著提高。CHEN 等<sup>[47]</sup>对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金的研究发现,网状Al-Si共晶组织的生长方向不同,但是横向强度和纵向强度没有明显区别,而横向硬度(100 HV)略高于纵向硬度(90 HV)。表1所列激光选区熔化和铸造(Ingot Metallurgy, IM)铝合金及其复合材料的部分力学性能<sup>[1, 48-53]</sup>。

在疲劳性能方面,邹田春等<sup>[48]</sup>研究激光选区熔化 AlSi7Mg 合金的高周疲劳性能,获得加载应力与疲劳寿命之间关系的曲线,加载应力与疲劳寿命大致呈线性关系,随着加载应力增大,疲劳寿命逐渐变短。AWD 等<sup>[56]</sup>研究 Al-Si 和 Ti-6Al4V 两种轻量

化合金的疲劳性能,通过微计算机断层扫描和负荷增加试验,验证重熔策略的有效性,并与热等静压试样进行对比,激光选区熔合金的微观组织更加均匀,热导率更高,疲劳强度也更优异。

#### 4.4 尺寸精度

尺寸精度是衡量成形件性能的重要指标之一。为使零件具有可替换性,必须保证零件尺寸的一致性,即要求尺寸在某一合理的范围内。在复杂的精密金属零件制造领域,零件尺寸精度越高,零件的后处理时间越短,可以降低制造成本<sup>[57]</sup>。目前,国内外针对激光选区成形件几何尺寸精度的研究还比较少,并且暂时没有激光选区成型尺寸设计规则供设计工程师参考。

付立定等<sup>[58]</sup>初步研究了扫描速度、激光功率、扫描间距对激光选区成型件尺寸精度的影响。杨永强等<sup>[59]</sup>为了实现薄壁零件的快速制造,利用DiMetal-280快速成型设备进行激光选区成型工艺试验,在优化工艺参数后得到变截面的薄壁零件,零件底部壁宽为142.0 μm,顶部壁宽为101.3 μm,

表1 激光选区熔化铝合金及铝基复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of aluminum alloys and composites prepared by selective laser melting

Material	Forming method and state	Yield strength/MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%	Ref.
AlSi10Mg	SLM	319.0	477.5	4.0	[48]
	IM	165.0	315.0	5.0	[48]
	SLM		456.7	8.7	[49]
	IM		314.0	13.4	[49]
	SLM	275	406	3.8	[50]
	SLM/T5	326	431	3.1	[50]
	SLM/T6	236	288	9.3	[50]
AlSi7Mg	SLM	299.2	368.8	9.2	[51]
	IM	185.0	275.0	5.0	[48]
Al-Zn-Cu-Mg	SLM/2%SiC		503	10.6	[1]
	SLM+Si+TiB <sub>2</sub>	455±4.3	556±12		[52]
Al-12Si	SLM	260	380	2.5	[53]
	SLM+(400 °C, 6 h)	100	130	14.1	[53]
Al-15Si	SLM		398	2.6	[54]
	SLM/1%TiC	340	578	7.9	[54]
Al-20SiAl6061	SLM	150	500	1.8	[53]
	SLM+(400 °C, 6 h)		240	5.0	[53]
	SLM	172	184		[55]

与设计值相差分别为  $22.0\ \mu\text{m}$  和  $21.3\ \mu\text{m}$ , 与极限值相吻合, 分析表明成型设备成型零件壁厚的绝对误差极限值在  $20\ \mu\text{m}$  左右。TANG 等<sup>[60]</sup>通过选区激光熔化对铜基合金进行原型件制造, 发现增加扫描间距有利于提高精度, 而扫描层厚对成型件精度几乎没有影响。

## 5 激光选区熔化铝合金及其复合材料的后处理

为了提高零部件的服役性能和可靠性, 激光选区熔化铝合金及其复合材料通常需要经过后处理以提高综合性能, 例如采用热处理和表面重熔等方式优化合金的微观组织, 从而提高材料的强度与韧性配合。

### 5.1 热处理

国内外针对激光选区熔化铝合金及其复合材料的后处理以固溶和时效(T6)热处理为主。CLEMENT 等<sup>[61]</sup>对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金拉伸试样进行 T6 热处理, 包括在( $540\ \text{°C}$ , 6 h)固溶以及  $140\ \text{°C}$  和  $160\ \text{°C}$  人工时效 1~16 h, 时效后样品的微观组织沿晶界均匀分布。图 5 所示为两个试样在  $140\ \text{°C}$  和  $160\ \text{°C}$  下的时效硬度曲线。ZAKAY 等<sup>[62]</sup>评估热处理温度对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金腐蚀性能的影响, 在  $300\ \text{°C}$  下进行热处理后, 合金获

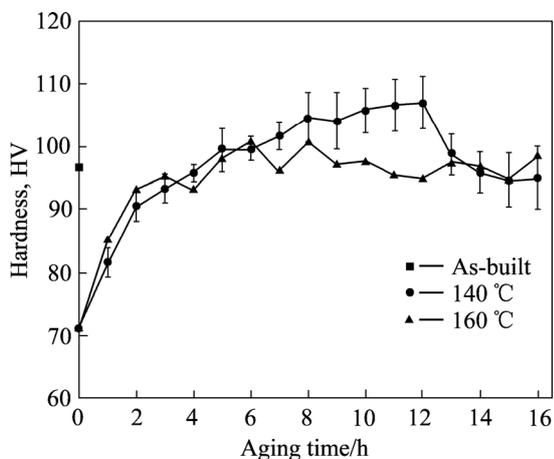


图5 激光选区熔化 AlSi10Mg 合金  $140\ \text{°C}$  和  $160\ \text{°C}$  时效处理的硬度曲线<sup>[61]</sup>

Fig. 5 Hardness curves of selective laser melted AlSi10Mg alloy aged at  $140\ \text{°C}$  and  $160\ \text{°C}$ <sup>[61]</sup>

得较好的抗应力腐蚀能力, 这主要归因于激光选区熔化过程的快速凝固特点达到了应力释放的条件以及  $\alpha(\text{Al})$  基质和细 Si 网的稳定结合, 但是较高的热处理温度( $400\ \text{°C}$ )会形成粗大的 Si 相和  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相颗粒, 从而对合金腐蚀性能产生不利影响。

闫成鑫等<sup>[63]</sup>研究 T6 热处理对 AlSi10Mg 合金微观组织和性能的影响发现, 热处理后均匀网状 Si 相发生断裂、溶解, 重新聚集成不规则形状或者成为细小弥散的 Si 相; 随着热处理时间增加, Si 颗粒逐渐增大, 颗粒数量逐渐减少; 合金抗拉强度和屈服强度均有所降低, 但是伸长率从  $6.4\%$  增加至  $10.7\%$ <sup>[64]</sup>。

### 5.2 表面重熔

激光表面重熔(Laser surface remelting, LSR)工艺对激光选区熔化铝合金及其复合材料的微观组织和力学性能具有一定影响<sup>[65]</sup>。激光表面重熔工艺可以降低合金抗拉强度, 提高合金显微硬度, 同时通过晶粒长大和残余应力释放提高塑性, 并且激光表面重熔有助于改善成形件的表面光洁度。

IRURRIOUZ 等<sup>[66]</sup>通过测试对比不同热处理工艺下激光选区熔化 AlSi10Mg 合金的力学性能, 进而确定最佳性能组合的热处理工艺。此外, MATJEKE 等<sup>[67]</sup>研究热处理时间对 AlSi10Mg 合金微观组织和力学性能的影响, 随着应力消除时间增加, 变形性能得到改善, 样品表现出更高的韧性。

### 5.3 变形加工

变形加工也是提高激光选区熔化材料综合性能的常用方法之一。热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)可以有效降低零件的残余孔隙, 并以牺牲合金强度的方式提高其抗疲劳性能, 是提高激光选区熔化试样综合性能的有效途径之一。

SCHNELLER 等<sup>[68]</sup>探讨热等静压处理对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金微观组织和疲劳性能的影响, 在经过高于固溶温度的热等静压处理和低温退火后, 合金孔隙率显著降低, 由于硅沉淀物在晶粒边界生长, 晶粒边界变得模糊, 硅沉淀物团聚体延缓裂纹缺陷的扩展, 从而有效提高合金抗疲劳裂纹

扩展的能力；作者基于实验结果进一步阐述合金的断裂机理。根据 FINFROCK 等<sup>[69]</sup>的研究结果，激光选区熔化并经过热等静压的复合材料具有较弱的(001)织构，热等静压处理还可以有效消除激光选区熔化合金的内部和表面孔隙。

马如龙等<sup>[70]</sup>采用选区激光熔化制备 Al-4.0Mg-0.7Sc-0.4-Zr-0.5Mn 合金，通过冷轧和 300 °C退火 1 h 进一步细化选区激光熔化合金的晶粒，获得的平均晶粒尺寸为 $(2.4\pm 1.3)$  μm，轧制合金的强度由于晶粒细化和高密度 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)相形成而得到显著提高。此外，Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)颗粒还可以增强微观结构的稳定性。

## 6 激光选区熔化铝合金及其复合材料的应用

随着激光选区熔化技术的飞速发展以及基础理论的不断深入，激光选区熔化铝合金及其复合材料已经应用于航空航天、医疗生物和汽车制造等领域，并取得了良好的经济和社会效益。

### 6.1 航空航天领域

激光选区熔化技术具有表面质量好、制造精度高特点，能够实现悬空、型面和复杂内腔的整体制造，是满足航天航空制造领域中复杂薄壁精密构件高性能的理想制造方法。美国通用电气公司率先成立激光选区熔化金属材料研发团队，并在 2012 年收购 Morris 和 RQM 公司。图 6 所示为 GE/Morris 公司利用激光选区熔化技术制造的复杂结构金属零件<sup>[71]</sup>。

2013 年，美国国家航空航天局马歇尔航天飞行中心(National Aeronautics and Space Administration's Marshall Space Flight Center)利用激光选区熔化技术制备的喷注器成功应用于 J-2X 发动机，如图 7 所示<sup>[71]</sup>。

2015 年，英国采用激光选区熔化技术制造的铝合金结构支架成功应用于 Eurostar E3000 卫星<sup>[72]</sup>，如图 8(a)所示。图 8(b)所示为美国加州大学将纳米细化剂添加至铝合金粉末，采用激光选区熔化技术制备的高热裂敏感性 6061 铝合金<sup>[72]</sup>。

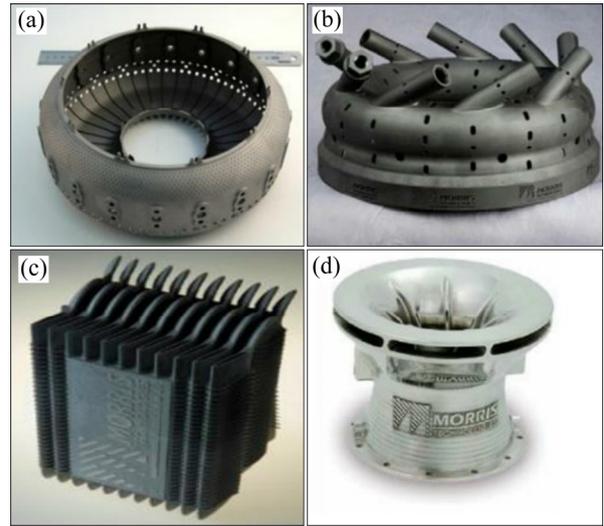


图 6 典型激光选区熔化金属零件<sup>[71]</sup>

Fig. 6 Typical metal components prepared by selective laser melting: (a) Aero engine combustion chamber; (b) Aero engine nozzle; (c) Thin wall radiator; (d) Thin-walled sandwich nozzle<sup>[71]</sup>

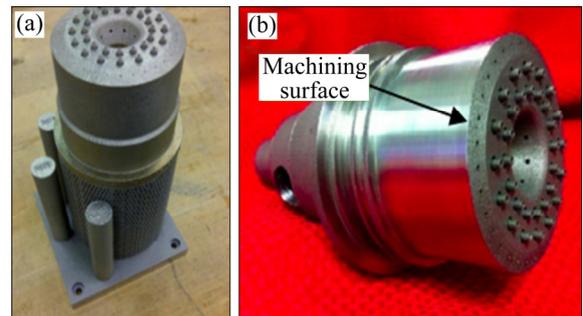


图 7 激光选区熔化喷注器和加工后样品<sup>[71]</sup>

Fig. 7 Selective laser melted injector(a) and parts after processing(b)<sup>[71]</sup>

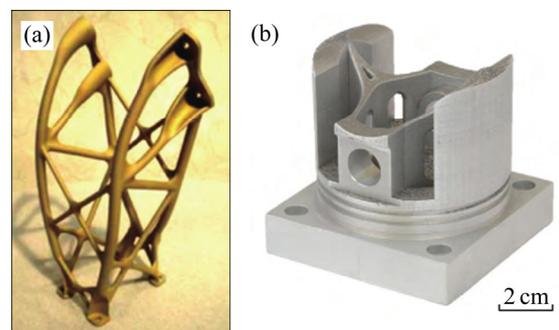


图 8 激光选区熔化航空航天铝合金结构支架零件和拓扑优化的 6061 合金活塞<sup>[72]</sup>

Fig. 8 Selective laser melted aerospace aluminum alloy structural support parts(a) and topology optimized 6061 alloy piston(b)<sup>[72]</sup>

### 6.2 医疗生物领域

激光选区熔化技术在生物医疗领域的应用主要集中在人体骨骼假体、牙科、外科手术辅助工具等<sup>[73]</sup>, 采用的材料主要是 316L 不锈钢、CoCrMo 合金和 Ti6Al4V 合金等。考虑到金属材料与人体内部的排斥关系, 激光选区熔化铝合金应用于医疗领域还鲜有报道。激光选区熔化技术可以基于患者的需求为目的, 设计出与宿主骨最相近的几何形貌。杨永强等<sup>[74]</sup>阐述了牙冠牙桥、舌侧正畸托槽、手术导板、全膝置换股骨假体以及多孔植入体的激光选区熔化制造。图 9 所示为个性化牙冠牙桥激光选区熔化制造和颅骨多孔修复体设计与激光选区熔化制造<sup>[74]</sup>。

### 6.3 汽车制造领域

传统的开模铸造周期一般较长, 影响研发效率, 而且存在缩孔和内部微裂纹的问题, 而激光选区熔化工艺可以快速制造出复杂的汽车构件, 力学

性能接近锻件水平。高志鹏等<sup>[75]</sup>针对研发效率问题提出一种发动机缸盖的激光选区熔化成形方案, 并打印出发动机缸盖结构样件, 如图 10 所示。

## 7 存在的问题及展望

激光选区熔化技术与传统材料成形技术相比具有成形速率快、成形件性能优良等优势, 但是目前铝合金及其复合材料的激光选区熔化技术与成形件的组织性能仍然存在理论和技術上的问题, 主要包括:

- 1) 适用于激光选区熔化的铝合金种类少。铝合金的激光吸收率小、热导率大, 激光成形难度较大, 目前适用于激光选区熔化成形的铝合金仍集中于 Al-Si、Al-Cu、Al-Mg-Si 和 Al-Zn 系等传统铸造或可焊铝合金。
- 2) 激光选区熔化铝合金及其复合材料的工艺条件还不成熟。激光选区熔化技术仍然面临着设备

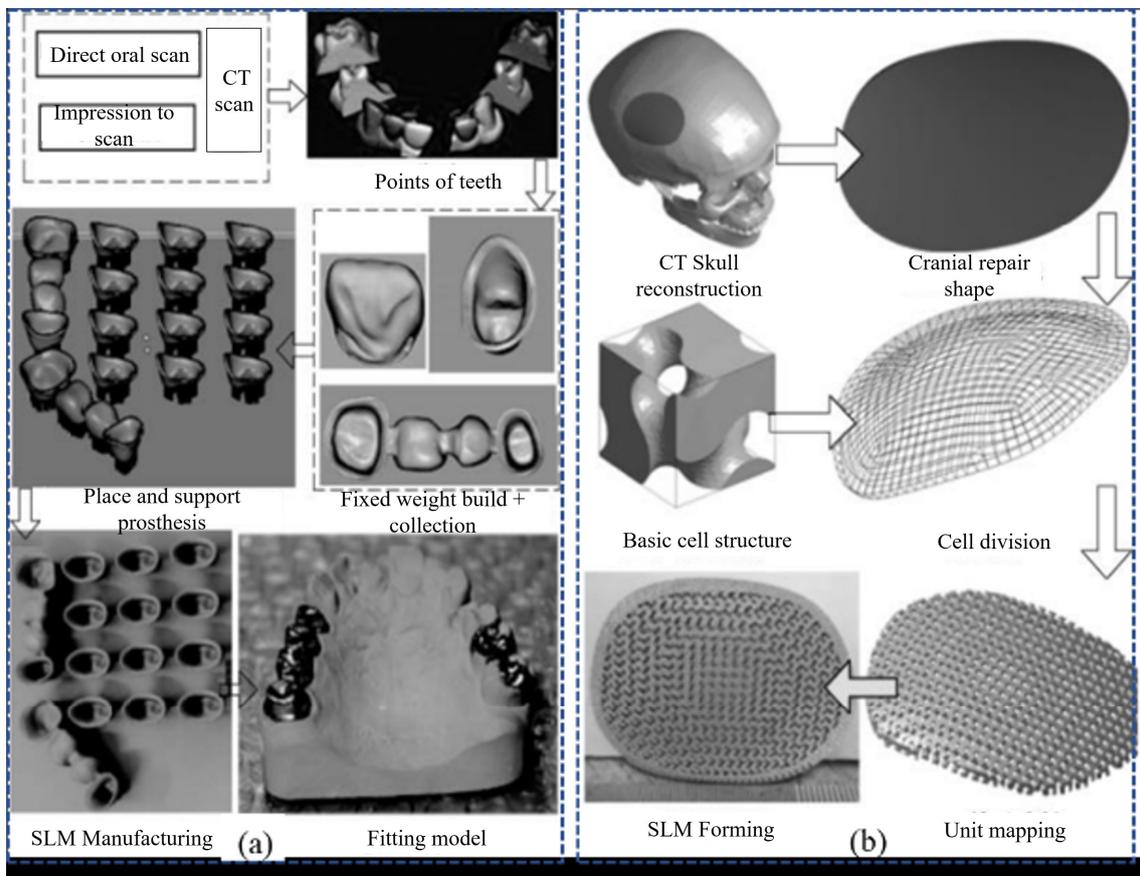


图 9 个性化牙冠牙桥激光选区熔化制造和激光选区熔化制造颅骨多孔修复设计<sup>[74]</sup>

Fig. 9 Individualized crown and bridge prepared by selective laser melting(a) and skull porous restoration design based on selective laser melting technology(b)<sup>[74]</sup>

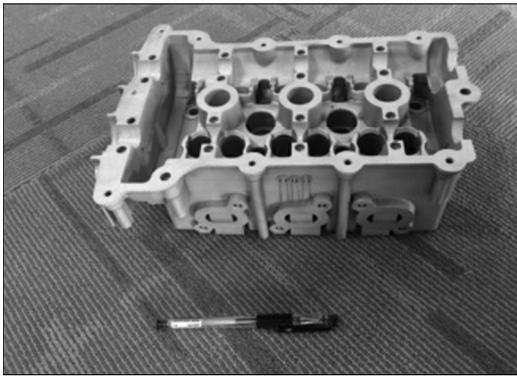


图 10 激光选区熔化铝合金发动机缸盖外观<sup>[75]</sup>

Fig. 10 Appearance of selective laser melted aluminum alloy engine cylinder head<sup>[75]</sup>

水平低、环境要求高、研发成本高和成形效率低等问题；而材料力学性能还极大地受到成形工艺参数和后热处理制度的影响，例如激光功率、扫描速度等工艺参数；成形工艺参数还影响熔池温度和表面张力，从而导致成形件的性能存在一致性差的问题，这也是激光选区熔化材料存在的共性问题。

3) 激光选区熔化铝合金及其复合材料的冶金缺陷难以控制，主要包括：① 球化现象。根据表面能最小原理，液态金属在与基板接触不良时会收缩成表面张力驱动的球形。球化现象导致凝固层表面粗糙，并伴有大量的孔洞，最终降低零件的致密度和性能。② 孔隙。孔隙一般分为熔合误差、气孔和缩孔，孔隙的产生主要受到生产过程工艺参数的影响，孔隙的存在导致材料强度和疲劳性能显著降低。③ 残余应力和裂纹缺陷。激光选区熔化过程中的快速熔化和凝固获得高冷却速率和温度梯度，不均匀的热分布导致凝固结构的热膨胀和收缩，从而不可避免地产生高残余应力。④ 氧化。尽管零件可以在氩气保护下成形，但是实际生产过程中仍然存在 0.1%左右的氧气，主要来源于粉末原料的部分氧化和熔池表面残留的氧气，形成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  阻碍粉末颗粒的熔化和结合，而氧化物夹杂往往是裂纹萌生之处。

由此可见，对激光选区熔化铝合金及其复合材料的综合性能研究将是重中之重。为了实现激光选区熔化工艺的制造灵活性，可以通过结合晶格和多孔结构以及其他复杂的零件几何形状。由于激光选

区熔化技术本质上是跨学科的，成形零件应用领域较为广泛，因此将激光选区熔化的优势与机械和结构设计相结合，可以实现从设计到制造完整结构或功能组件的完整过程，这也是激光选区熔化成形获得广泛应用的重要突破方向之一。

## REFERENCES

- [1] WANG Ming, SONG Bo, WEI Qing-song, et al. Improved mechanical properties of  $\text{AlSi}_7\text{Mg}/\text{nano-SiC}_p$  composites fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810: 151926.
- [2] 马如龙, 彭超群, 王日初, 等. 选区激光熔化铝合金的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(12): 2773–2788.  
MA Ru-long, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Research progress of selective laser melting of aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(12): 2773–2788.
- [3] SAMES W J, LIST F A, PANNALA S, DEHOFF R R, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing[J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(5): 315–360.
- [4] ABOLKHAIR N T, SIMONELLI M, PARRY L, et al. 3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 106: 100578.
- [5] 苗秋玉, 刘妙然, 赵凯, 等. 铝合金增材制造技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 58–66.  
MIAO Qiu-yu, LIU Miao-ran, ZHAO Kai, et al. Research progress on technologies of additive manufacturing of aluminum alloys[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 58–66.
- [6] LIU Yang, YANG Yong-qiang, WANG Di. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1/2/3/4): 647–656.
- [7] UZAN N E, RATZKER B, LANDAU P, et al. Compressive creep of  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  parts produced by selective laser melting additive manufacturing technology[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100788.
- [8] XI L, WANG P, PRASHANTH K G, et al. Effect of  $\text{TiB}_2$

- particles on microstructure and crystallographic texture of Al-12Si fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 786: 551–556.
- [9] ZHAO Xuan, GU Dong-dong, MA Cheng-long, et al. Microstructure characteristics and its formation mechanism of selective laser melting SiC reinforced Al-based composites[J]. *Vacuum*, 2019, 160: 189–196.
- [10] 高文英, 王凯, 张伟强, 等. 选区熔化成形铝合金技术研究进展[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(18): 17–20.
- GAO Wen-ying, WANG Kai, ZHANG Wei-qiang, et al. Research progress of aluminum alloys fabricated by selective laser melting[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(18): 17–20.
- [11] 姜海燕, 林卫凯, 吴世彪, 等. 激光选区熔化技术的应用现状及发展趋势[J]. *机械工程与自动化*, 2019(5): 223–226.
- JIANG Hai-yan, LIN Wei-kai, WU Shi-biao, et al. Application status and development trend of laser selective melting technology[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2019(5): 223–226.
- [12] 张冬云. 采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1700–1704.
- ZHANG Dong-yun. Model manufacturing process from aluminum alloys using selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(12): 1700–1704.
- [13] 耿遥祥, 樊世敏, 简江林, 等. 选区激光熔化专用 AlSiMg 合金成分设计及力学性能[J]. *金属学报*, 2020, 56(6): 821–830.
- GENG Yao-xiang, FAN Shi-min, JIAN Jiang-lin, et al. Mechanical properties of AlSiMg alloy specifically designed for selective laser melting[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(6): 821–830.
- [14] BAJAJ P, WRIGHT J, TODD I, et al. Predictive process parameter selection for Selective Laser Melting Manufacturing: applications to high thermal conductivity alloys[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 27: 246–258.
- [15] WANG P, ECKERT J, PRASHANTH K G, et al. A review of particulate-reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(8): 2001–2034.
- [16] PRAMOD S L, BAKSHI S R, MURTY B S. Aluminum-based cast in situ composites: A review[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(6): 2185–2207.
- [17] XIAO Y K, BIAN Z Y, WU Y, et al. Effect of nano-TiB<sub>2</sub> particles on the anisotropy in an AlSi<sub>10</sub>Mg alloy processed by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 798: 644–655.
- [18] LI X P, JI G, CHEN Z, et al. Selective laser melting of nano-TiB<sub>2</sub> decorated AlSi<sub>10</sub>Mg alloy with high fracture strength and ductility[J]. *Acta Materialia*, 2017, 129: 183–193.
- [19] ZHANG Bi, LI Yong-tao, BAI Qian. Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(3): 515–527.
- [20] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 245–257.
- XU De, GAO Hua-bing, DONG Tao, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 245–257.
- [21] 唐鹏钧, 何晓磊, 杨斌, 等. 激光选区熔化用 AlSi<sub>10</sub>Mg 粉末显微组织与性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(1): 47–53.
- TANG Peng-jun, HE Xiao-lei, YANG Bin, et al. Microstructure and properties of AlSi<sub>10</sub>Mg powder for selective laser melting[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(1): 47–53.
- [22] BAITIMEROV R, LYKOV P, ZHEREBTSOV D, et al. Influence of powder characteristics on processability of AlSi<sub>12</sub> alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2018, 11(5): 742.
- [23] 张骁丽, 齐欢, 魏青松. 铝合金粉末选择性激光熔化成形工艺优化试验研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 391–397.
- ZHANG Xiao-li, QI Huan, WEI Qing-song. Experimental study of selective laser melted AlSi<sub>12</sub>[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 391–397.
- [24] 邹亚桐, 魏正英, 杜军, 等. AlSi<sub>10</sub>Mg 激光选区熔化成形工艺参数对致密度的影响与优化[J]. *应用激光*, 2016, 36(6): 656–662.
- ZOU Ya-tong, WEI Zheng-ying, DU Jun, et al. Effect and optimization of processing parameters on relative density of AlSi<sub>10</sub>Mg alloy parts by selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(6): 656–662.
- [25] TONELLI L, LIVERANI E, VALLI G, et al. Effects of

- powders and process parameters on density and hardness of A357 aluminum alloy fabricated by selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(1/2): 371–383.
- [26] 张红昌, 宋彬, 邢明. 2024 铝合金粉末选区激光熔化成形工艺研究[J]. *铸造技术*, 2020, 41(1): 22–24.  
ZHANG Hong-chang, SONG Bin, XING Ming. Study on selective laser melting forming process of 2024 Al alloy powder[J]. *Foundry Technology*, 2020, 41(1): 22–24.
- [27] 张文奇, 朱海红, 胡志恒, 等. AlSi<sub>10</sub>Mg 的激光选区熔化成形研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(8): 918–926.  
ZHANG Wen-qi, ZHU Hai-hong, HU Zhi-heng, et al. Study on the selective laser melting forming of AlSi<sub>10</sub>Mg[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(8): 918–926.
- [28] HANEMANN T, CARTER L N, HABSCHIED M, et al. In-situ alloying of AlSi<sub>10</sub>Mg+Si using Selective Laser Melting to control the coefficient of thermal expansion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 795: 8–18.
- [29] MAJEED A, MUZAMIL M, LV J X, et al. Heat treatment influences densification and porosity of AlSi<sub>10</sub>Mg alloy thin-walled parts manufactured by selective laser melting technique[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(6): 1–13.
- [30] ZHU Yi, ZOU Jun, YANG Hua-yong. Wear performance of metal parts fabricated by selective laser melting: A literature review[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2018, 19(2): 95–110.
- [31] DADBAKHS S, HAO L. Effect of layer thickness in selective laser melting on microstructure of Al/5wt.%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder consolidated parts[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 106129.
- [32] MAAMOUN A H, XUE Y F, ELBESTAWI M A, et al. Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts: powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2018, 11(12): 2343.
- [33] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(9): 3303–3312.
- [34] VALENTE E H, GUNDLACH C, CHRISTIANSEN T L, et al. Effect of scanning strategy during selective laser melting on surface topography, porosity, and microstructure of additively manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24): 5554.
- [35] MUGWAGWA L, DIMITROV D, MATOPE S, et al. Evaluation of the impact of scanning strategies on residual stresses in selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(5/6/7/8): 2441–2450.
- [36] ZHANG Jin-liang, SONG Bo, WEI Qing-song, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 270–284.
- [37] 柯宇, 马盼, 马永超, 等. 激光选区熔化 AlSi<sub>10</sub>Mg 合金微观组织及力学性能研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(2): 198–203.  
KE Yu, MA Pan, MA Yong-chao, et al. Microstructure and mechanical properties of AlSi<sub>10</sub>Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(2): 198–203.
- [38] YU Wen-hui, SING S L, CHUA C K, et al. Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi<sub>10</sub>Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 574–581.
- [39] TANG Ming, PISTORIUS P C. Fatigue life prediction for AlSi<sub>10</sub>Mg components produced by selective laser melting[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125: 479–490.
- [40] SUWAS S, KUMAR D. Microstructure–texture–mechanical property relationship in alloys produced by additive manufacturing following selective laser melting (SLM) technique[J]. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 2020, 5(1): 1–10.
- [41] 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(2): 77–80.  
ZHU Xiao-gang, SUN Jing, WANG Lian-feng, et al. Microstructure, properties and inclined plane forming quality of aluminum alloy formed by selective laser melting[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(2): 77–80.
- [42] LI Yu-xin, GU Dong-dong, ZHANG Han, et al. Effect of trace addition of ceramic on microstructure development and mechanical properties of selective laser melted AlSi<sub>10</sub>Mg alloy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020,

- 33(2): 64–76.
- [43] 胡亮, 刘允中, 涂诚, 等. 纳米  $\text{TiB}_2$  对激光选区熔化 2024 铝合金显微组织与力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 365–373.
- HU Liang, LIU Yun-zhong, TU Cheng, et al. Effects of nano- $\text{TiB}_2$  particles on microstructure and mechanical properties of AA2024 deposited by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2019, 24(4): 365–373.
- [44] MA Ru-long, PENG Chao-qun, CAI ZHI-yong, et al. Manipulating the microstructure and tensile properties of selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr alloy through heat treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 831: 154773.
- [45] SUBBIAH R, BENSINGH J, KADER A, et al. Influence of printing parameters on structures, mechanical properties and surface characterization of aluminium alloy manufactured using selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11/12): 5137–5147.
- [46] GUO Miao-xian, YE Yi, JIANG Xiao-hui, et al. Microstructure, mechanical properties and residual stress of selective laser melted  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(11): 6753–6760.
- [47] CHEN Jing, HOU Wei, WANG Xiu-zhuan, et al. Microstructure, porosity and mechanical properties of selective laser melted  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(7): 2043–2054.
- [48] 邹田春, 陈敏英, 祝贺, 等. 激光选区熔化  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  合金高周疲劳性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 234–241.
- ZOU Tian-chun, CHEN Min-ying, ZHU He, et al. Research on high cycle fatigue performance of  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 234–241.
- [49] YAN Qian, SONG Bo, SHI Yu-sheng. Comparative study of performance comparison of  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  alloy prepared by selective laser melting and casting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 41: 199–208.
- [50] PELLIZZARI M, MALFATTI M, LORA C, et al. Properties of laser metal fused  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  alloy processed using different heat treatments[J]. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 2020, 165(3): 164–168.
- [51] WANG Min, SONG Bo, WEI Qing-song, et al. Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 739: 463–472.
- [52] ZHOU S Y, SU Y, WANG H, et al. Selective laser melting additive manufacturing of 7xxx series Al-Zn-Mg-Cu alloy: cracking elimination by co-incorporation of Si and  $\text{TiB}_2$ [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101458.
- [53] ZHANG Shi-kai, MA Pan, JIA Yan-dong, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-(12-20)Si Bi-material fabricated by selective laser melting[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(13): 2126.
- [54] ZHOU Yan, WEN Shi-feng, WANG Chong, et al. Effect of TiC content on the Al-15Si alloy processed by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105719.
- [55] MAAMOUN A H, XUE Y F, ELBESTAWI M A, et al. The effect of selective laser melting process parameters on the microstructure and mechanical properties of Al6061 and  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  alloys[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2018, 12(1): 12.
- [56] AWD M, JOHANNSEN J, CHAN T, et al. Improvement of fatigue strength in lightweight selective laser melted alloys by in-situ and ex-situ composition and heat treatment[C]// TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, 2020: 115–126.
- [57] 杨永强, 卢建斌, 王迪, 等. 316L 不锈钢选区激光熔化成型非水平悬垂面研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 94–99.
- YANG Yong-qiang, LU Jian-bin, WANG Di, et al. A study of 316L stainless steel non-horizontal overhanging surface in selective laser melting[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 19(6): 94–99.
- [58] 付立定. 不锈钢粉末选择性激光熔化直接制造金属零件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- FU Li-ding. Investigation into manufacturing metal parts direct from stainless steel powders via selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [59] 杨永强, 罗子艺, 苏旭彬, 等. 不锈钢薄壁零件选区激光熔化制造及影响因素研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1):

- 60–67.
- YANG Yong-qiang, LUO Zi-yi, SU Xu-bin, et al. Study on process and effective factors of stainless steel thin-wall parts manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 60–67.
- [60] TANG Y, LOH H T, WONG Y S, et al. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 368–372.
- [61] CLEMENT C D, MASSON J, KABIR A S. On the heat treatment of AlSi<sub>10</sub>Mg fabricated by selective laser melting process[C]//TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, 2020: 425–434.
- [62] ZAKAY A, AGHION E. Effect of post-heat treatment on the corrosion behavior of AlSi<sub>10</sub>Mg alloy produced by additive manufacturing[J]. JOM, 2019, 71(3): 1150–1157.
- [63] 闫成鑫, 张惠帝, 于宝义, 等. SLM 成形和热处理对 AlSi<sub>10</sub>Mg 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 160–164.
- YAN Cheng-xin, ZHANG Hui-di, YU Bao-yi, et al. Effects of selective laser melting and heat treatment on microstructures and properties of AlSi<sub>10</sub>Mg alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys. 2020, 40(2): 160–164.
- [64] 袁广辰, 卢云, 郑学儒. T6 热处理对选择性激光熔化 AlSi<sub>10</sub>Mg 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(10): 151–156.
- YUAN Guang-chen, LU Yun, ZHENG Xue-ru. Effects of T6 heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melting AlSi<sub>10</sub>Mg alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(10): 151–156.
- [65] HAN Quan-quan, JIAO Yang. Effect of heat treatment and laser surface remelting on AlSi<sub>10</sub>Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9/10/11/12): 3315–3324.
- [66] ITURRIOZ A, GIL E, PETITE M M, GARCIA D I A, et al. Selective laser melting of AlSi<sub>10</sub>Mg alloy: Influence of heat treatment condition on mechanical properties and microstructure[J]. Welding in the World, 2018, 62(4): 885–892.
- [67] MATJEKE V J, MOOPANAR C, BOLOKANG A S, et al. Effect of heat treatment time on the microstructure and mechanical deformation behavior of additive-manufactured AlSi<sub>10</sub>Mg components[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2020, 5(4): 379–385.
- [68] SCHNELLER W, LEITNER M, SPRINGER S, et al. Effect of HIP treatment on microstructure and fatigue strength of selectively laser melted AlSi<sub>10</sub>Mg[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(1): 16.
- [69] FINFROCK C B, EXIL A, CARROLL J D, et al. Effect of hot isostatic pressing and powder feedstock on porosity, microstructure, and mechanical properties of selective laser melted AlSi<sub>10</sub>Mg[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2018, 7(4): 443–456.
- [70] MA Ru-long, PENG Chao-qun, CAI Zhi-yong, et al. Enhanced strength of the selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr alloy by cold rolling[J]. Materials Science and Engineering A: 2020, 775: 138975.
- [71] 董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(1): 1–5.
- DONG Peng, CHEN Ji-lun. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(1): 1–5.
- [72] 甘武奎, 彭金贵, 李仕豪, 等. 铝合金选区激光熔化精密成形及其在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 53–63.
- GAN Wu-kui, PENG Jin-gui, LI Shi-hao, et al. Aluminum alloy selective laser melting precision forming technology and application in aviation field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(16): 53–63.
- [73] 杨永强. 激光选区熔化在医学领域应用前景广阔[J]. 信息技术时代, 2013(6): 40–42.
- YANG Yong-qiang. The application prospects of selective laser melting in the medical field are broad[J]. Neo Industry Times, 2013(6): 40–42.
- [74] 杨永强, 宋长辉, 王迪. 激光选区熔化技术及其在个性化医学中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 140–151.
- YANG Yong-qiang, SONG Chang-hui, WANG Di. Selective laser melting technology and its applications on personalized medical parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 140–151.
- [75] 高志鹏, 明平才, 卿辉斌, 等. 铝合金汽车发动机缸盖复杂结构的 SLM 制造工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2019(9): 24–30.

GAO Zhi-peng, MING Ping-cai, QING Hui-bin, et al.  
Research on SLM manufacturing process for aluminium  
alloy automobile engine cylinder head with complicated

structure[J]. *New Technology & New Process*, 2019(9):  
24–30.

## Progress in aluminum alloys and composites fabricated by selective laser melting

CAI Zhi-yong<sup>1,2</sup>, LIU Hai-jiang<sup>1</sup>, WANG Ri-chu<sup>1,2,3</sup>, PENG Chao-qun<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410000, China;

2. Key Laboratory of Electronic Packaging and Advanced Functional Materials, Hunan Province,  
Central South University, Changsha 410083, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on High-strength Structural Materials,  
Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Aluminum alloys and composites have the characteristics of low density, high specific strength and excellent corrosion resistance. The selective laser melting technology was applied to the structure-function integrated aluminum alloys and composites with precise and complex structure, which have broad application prospects in aerospace, transportation, electronic devices and so on. This article mainly introduced the research, development and application of selective laser melting of aluminum alloys and composites at home and abroad. Firstly, it explained the basic principles of selective laser melting technology. Secondly, it introduced the main process parameters of selective laser melting, the microstructure of aluminum alloys and composites, performances and post-processing technology, and the key applications of selective laser melting of aluminum alloys and composites. Finally, it described and prospected the main problems faced by selective laser melting of aluminum alloys and composites.

**Key words:** selective laser melting; aluminum alloy; aluminum matrix composite; relative density; mechanical property

---

**Foundation item:** Project(51804349) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2018M632986) supported by the China Postdoctoral Science Foundation; Project(2019JJ50766) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China; Project(JCKY201851) supported by the National Key Laboratory of Science and Technology on High-strength Structural Materials

**Received date:** 2020-11-13; **Accepted date:** 2021-05-07

**Corresponding author:** WANG Ri-chu; Tel: +86-731-88836638; E-mail: wrccsu@163.com

(编辑 龙怀中)