

AlSi10Mg 活塞结构优化与 SLM 3D 打印工艺研究



张哲轩¹, 周洋^{1,*}, 门路辉², 宁金宝³, 关杰仁⁴

¹北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

²中国兵器工业集团第五二研究所, 浙江宁波 315100

³中国第一汽车集团有限公司技术中心, 吉林长春 130062

⁴江苏科技大学海洋装备研究院, 江苏镇江 212100

摘要: 基于拓扑优化与选择性激光熔化 (SLM) 3D 打印, 设计制造轻量化 AlSi10Mg 活塞, 提高引擎动力输出。建立传热/结构力学模型, 优化活塞裙部、环形内冷油道、支撑结构, 评估打印过程。分析打印精度、微观组织、力学性能, 装机后评估动力输出。结果表明, 截面为梯形, 环形内冷油道耐热/力载荷性最强, 顶点坐标分别为 (26.3,3)、(28.3,3)、(28.3,9)、(27.3,9), 体积由 55359 mm³ 降至 46715 mm³。销孔与头部下端面设支撑, 最大位移在裙部内表面与头部上端面间拐角位置, 为 0.57 mm, 裙部外表面位置次之, 为 0.29 mm, 裙部上端面位置最小, 为 0.15 mm。室温组织主要为共晶 (α -Al+Si) 与少量 Al₂Cu。300 °C × 2 h 退火, 杨氏模量为 68.8 GPa, 屈服强度为 244.5 MPa, 抗拉强度为 366.6 GPa, 断裂应变为 3%, 泊松比为 0.31, 维氏硬度为 1230.9 MPa。装机后, 三缸引擎最大转速由 3710 RPM 增至 3920 RPM, 最大轴上马力由 100 BHP 增至 112 BHP。

关键词: 活塞; AlSi10Mg; 结构优化; SLM; 力学性能; 动力输出

DOI: [10.57237/j.mater.2024.04.001](https://doi.org/10.57237/j.mater.2024.04.001)

Study on Structural Optimization and SLM 3D Printing Process of AlSi10Mg Piston

Zhang Zhexuan¹, Zhou Yang^{1,*}, Men Luhui², Ning Jinbao³, Guan Jieren⁴

¹School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²52 Institute of China North Industries Group, Ningbo 315100, China

³China FAW Group Technology Center, Changchun 130062, China

⁴Marine Equipment and Technology Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

Abstract: Using topology optimization and selective laser melting (SLM) 3D printing, lightweight AlSi10Mg pistons are designed and manufactured to enhance engine power output. A heat transfer/structural mechanical model is established, optimizing piston skirt, annular internal cooling oil passage, support structure, and evaluation of the printing process. Printing accuracy, microstructure, mechanical properties, and post-installation power output are analyzed. Results

基金项目: 国家自然科学基金 (基金号: 52371129).

*通信作者: 周洋, 15757861741@163.com

收稿日期: 2024-06-22; 接受日期: 2024-07-10; 在线出版日期: 2024-07-18

<http://www.materialsrd.com>

indicate a trapezoidal cross section, with the annular cold oil passage exhibiting superior heat resistance/load capacity. Vertex coordinates are (26.3,3), (28.3,3), (28.3,9), and (27.3,9). Volume reduced from 55359 mm³ to 46715 mm³. Pin hole and head lower end are supported, with maximum displacement at the upper end face corner of the skirt inner surface-head, 0.57 mm. Outer skirt surface displacement is 0.29 mm, while skirt upper end face displacement is minimal, 0.15 mm. Room temperature structure is primarily eutectic (α -Al+Si) with minor Al₂Cu. Annealed at 300 °C for 2 h, Young's modulus is 68.8 GPa, yield strength is 244.5 MPa, tensile strength is 366.6 GPa, fracture strain is 3%, Poisson's ratio is 0.31, and Vickers hardness is 1230.9 MPa. After installation, the maximum speed of the three-cylinder engine increases from 3710 RPM to 3920 RPM, and the maximum shaft horsepower increases from 100 BHP to 112 BHP.

Keywords: Piston; AlSi10Mg; Structural Optimization; SLM; Mechanical Properties; Power Output

1 引言

汽车轻量化对节能减排至关重要, 每减重 10%, 燃油效率提高 6~8%, 每减重 100 kg, 百公里油耗降低 0.3~0.6 L。引擎活塞重量的减小, 既优化载荷, 降低能耗, 提高燃油效率, 又降低摩擦与噪音, 提高零部件服役寿命[1]。目前, 以结构优化与 3D 打印为代表的结构材料一体化设计制造技术完全符合轻量化需求。主要体现如下方面: 一是结构设计上, 空间、材料利用率高, 结合拓扑优化实现最佳材料结构配比, 在整体性能上达到最大强度重量比; 二是产品制造上, 一次性快速制造复杂结构零部件, 避免多个部分拼装组合过程, 组织性能稳定均匀; 三是材料选择上, 采用铝合金、镁合金、钛合金等轻质材料。相较传统制造方式, 3D 打印零部件整体性能表现更优[2, 3]。

国内外学者对 3D 打印的研究与应用十分关注, 集中在优化设计与打印工艺领域。保时捷公司采用拓扑优化与 SLM, 打印引擎活塞, 活塞头部内集成封闭式环形内冷油道降低热载荷, 重量较量产锻造活塞降低 10%, 引擎转速提升, 马力由 700 匹增至 730 匹[4]; Ping Xu 采用 SLM, 打印多孔 AlSi10Mg 吸能结构, 加热至 300 °C 退火后, 最大吸能、位移、载荷为 758 J、30 mm、30 kN [5]; Bheemavarapu Subba Rao 采用 SLM, 退火与固溶后, 相较传统制造方法, 打印 Al-Si 合金耐磨性更高[6, 7]。

本文以轻量化为目标, 建立传热/结构力学模型, 优化活塞裙部、环形内冷油道、支撑结构, 评估打印过程; 建立多体动力学模型, 对比优化前后动力输出; 分析物相组成、应力位移; 测量打印精度, 分析物相组成与微观结构; 测量打印样品杨氏模量、屈服强度、抗拉强度、断裂应变、泊松比、维氏硬度, 最终达到活塞结构材料一体化设计制造目的。

2 仿真模拟与分析测试

2.1 建模

如图 1 所示, 活塞主要由头部、裙部组成[8]。头部内含环形内冷油道, 降低热载荷, 裙部内含销座销孔。活塞高度为 30 mm, 头部直径为 60 mm, 高度为 12 mm, 裙部高度为 18 mm, 外宽为 30 mm, 内宽为 20 mm, 销座高度为 18 mm, 宽度为 13.5 mm, 销孔直径为 10 mm, 与头部下端面间距离为 20 mm。采用自由四面体网格, 最大单元大小为 0.5 mm, 最小单元大小为 0.1 mm, 最大单元增长率为 1.5, 曲率因子为 0.6, 狭窄区域分辨率为 0.5, 单元质量直方图呈正态分布特征。

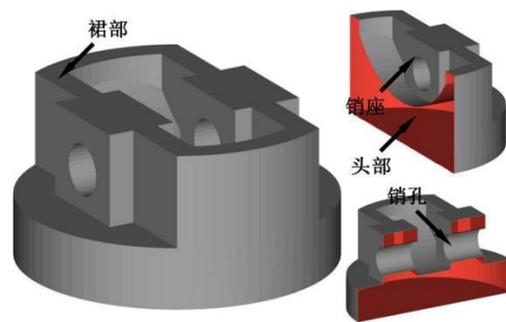


图 1 优化前活塞结构

2.2 计算与表征

采用 COMSOL Multiphysics, 建立活塞裙部与环形内冷油道传热/结构力学模型, 以拓扑或参数优化。建立三缸引擎多体动力学模型, 对比优化前后动力输出; 采用 ANSYS Additive Suite, 建立活塞传热/结构力学模型, 评估活塞打印过程, 优化支撑设计; 采用 JMatPro, 根据平衡相图与 CCT 曲线, 预测打印后物相组成; 采

用 SLM 3D 打印机, 打印优化后活塞, 采用三维扫描仪评估打印误差; 采用 XRD 与 SEM, 表征打印样品物相组成与微观结构; 采用拉伸试验机与维氏硬度计, 测量打印样品力学性能。

3 结构优化

3.1 裙部

采用变密度法与 SIMP 插值模型, 以拓扑优化裙部 [9, 10]。根据工况条件, 以销孔外裙部为设计域, 域材料密度设为可变, 相对密度为 0~1; 如表 1 所示, 建立相对密度与杨氏模量间函数关系, 如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_i = \begin{cases} 0, \in \Omega_v \\ 1, \in \Omega_r \end{cases} \\ E_i = x_i^p \cdot E_0 (i = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (1)$$

其中, Ω_v 为设计域内无材料区域; Ω_r 为设计域内有材料区域; i 为设计域中第 i 个微元; p 为 SIMP 插值模型的惩罚因子; x_i 为第 i 个微元的相对密度; E_0 为材料的杨氏模量; E_i 为第 i 个微元的弹性模量。

表 1 力学性能参数及其边界条件设置

材料	密度	屈服强度
AlSi10Mg	2700 kg/m ³	290 MPa
杨氏模量	泊松比	边界载荷
70 GPa	0.33	5 MPa、2 MPa

以最小化总弹性应变能为目标函数, 最终保留体积分数为束条件, 拓扑优化关系如式(2)所示:

$$\begin{cases} find \\ X = (x_1, \dots, x_n), U = (u_1, \dots, u_n) \\ min \\ C = F^T \cdot U = U^T \cdot K \cdot U = \sum_{i=1}^n x_i^p \cdot u_i^T \cdot k_0 \cdot u_i \\ s \cdot t \\ K \cdot U = F \end{cases} \quad (2)$$

其中, $X=(x_1, \dots, x_n)$ 为相对密度矢量; C 为总弹性应变能; F 为载荷矢量; $U=(u_1, \dots, u_n)$ 为位移矢量; K 为结构刚度矩阵; k_0 为初始微元刚度矩阵。

头部下端面、裙部与气缸间接触面为边界载荷面, 施加载荷分别为 5 MPa、2 MPa; 活塞销与 2 个销孔间接触面为接触对; 活塞水平方向位移为 0, 竖直方向位移为非 0。采用亥姆霍兹方程, 过滤半径为 1 mm; 采用双曲正切投影, 投影点为 0.5, 参数化扫描 SIMP 指数与投影斜率的指定组合, 为 1/2、2/4、3/6、4/8、5/10; 采用线性单元阶次[11], 最小罚体积分数为 40%, 最终保留体积分数为 55% [12]。采用 MMA 方法, 优化容差为 0.001, 模型最大计算次数为 1000。计算结果表明, SIMP 指数与投影斜率为 4/8 时模型收敛性最大, 最大应力为 41.6 MPa, 最大位移为 0.02 mm, 在销座下端面与头部上端面间接触面位置, 如图 2 所示。

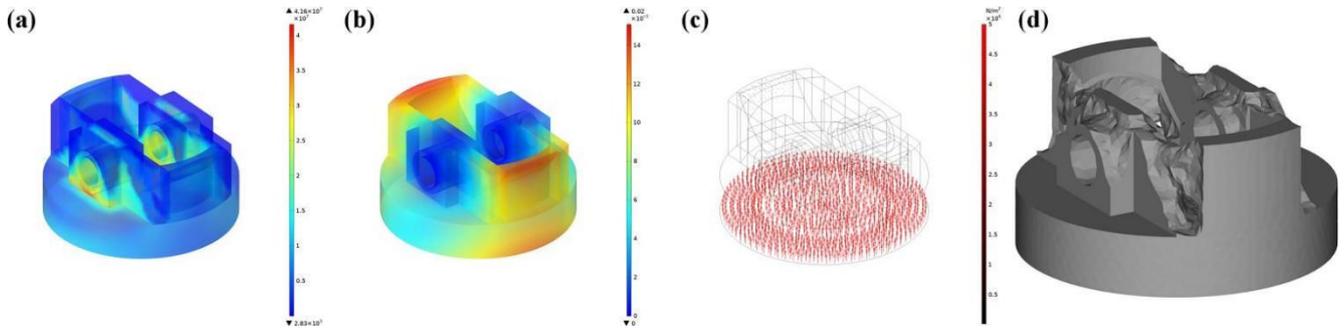


图 2 裙部拓扑优化: (a). 应力; (b). 位移; (c). 载荷; (4). 拓扑结构

3.2 环形内冷油道

环形内冷油道截面为四边形[13, 14], 优化前环形内冷油道截面顶点坐标分别为(25,3)、(28,3)、(28,9)、(26,9); 以最小化加权平均温度为目标函数[15, 16], 头部下端面为最小热载荷面, 温度为 200 ℃, 裙部上端面为最大热载荷面, 温度为 400 ℃, 如表 2 所示; 活塞中

各面为表面对环境辐射面, 环形内冷油道中各面与裙部内壁为热通量面。采用 BOBYQA 方法[17], 容差为 0.01, 最大计算次数为 1000。计算结果表明, 头部下端面温度最大, 为 375 ℃, 裙部上端面温度最小, 为 175 ℃; 环形内冷油道内表面热通量最大, 为 3.33×10^7 W/m², 头部与裙部外表面热通量最小, 为 1.75×10^6

W/m², 优化后环形内冷油道截面顶点坐标分别为 (26.3,3)、(28.3,3)、(28.3,9)、(27.3,9), 如图 3 所示, 活塞体积由 55359 mm³ 降至 46715 mm³, 优化结果如图 4 所示。

表 2 热学性能参数及其边界条件设置

材料	导热系数
AlSi10Mg	240 W/(m K)
热膨胀系数	热载荷
23×10 ⁻⁶ K ⁻¹	200 ℃、400 ℃

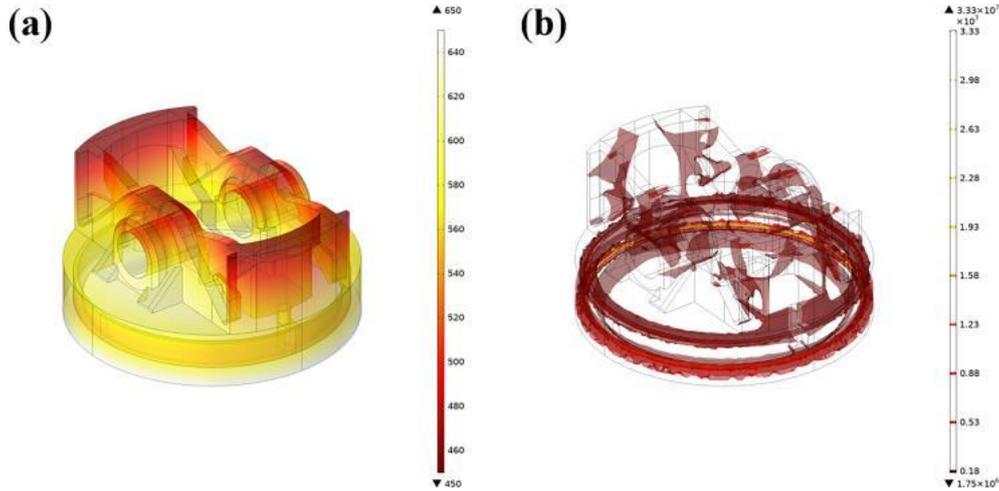


图 3 环形内冷油道参数优化: (a). 温度; (b). 热通量

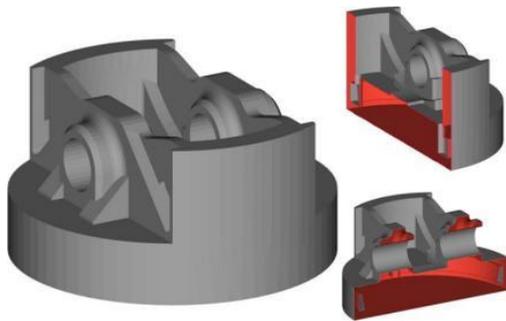


图 4 优化后活塞结构

扫描速度	激光功率	光斑直径
1000 mm/s	200 W	80 μm
熔化温度	凝固潜热	基板温度
680 ℃	400 kJ/kg	150 ℃

$$\begin{cases} r_f = \sqrt{(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2 + (z-z_f)^2} \\ q_l = \frac{2 \cdot P_l}{\pi \cdot r_s^2} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot r_f^2}{r_s^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, x_f, y_f, z_f 为激光焦点位置 x, y, z 坐标; r_f 为熔池内任意位置 (x, y, z) 与激光焦点间距; r_s 为激光光斑半径; P_l 为激光功率; q_l 为激光热通量。

熔池处温度与热通量最大, 达到材料熔点后形成液相, 热影响区其次, 如图 5(a)、图 5(b)所示。随光斑移动, 熔池快速冷却为固相, 如图 5(c)所示, 光斑前进方向热影响区变为熔池, 最终导致特定位置处温度、热通量、液相比先增大后减小。打印第一层后, 铺粉形成第二层粉床, 粉床厚度远低于熔池或热影响区厚度, 导致光斑移动至第二层粉床特定位置时, 下方第一层对应位置处材料重新快速熔化凝固, 如图 6(a)、图 6(b)所示。随铺粉层数增加, 热量无法及时散出, 积聚在材料内部, 最终导致在急冷急热下, 热应力增大, 材料翘曲, 如图 6(c)所示。

打印材料为 AlSi10Mg, 如表 4 所示。计算结果表

4 打印工艺

4.1 过程仿真模拟

打印过程近似熔池处材料快速熔化凝固, 如表 3 所示。打印自下而上逐层进行, 相邻层保持特定打印夹角[18]。打印第一层粉床时, 熔池与热影响区激光光斑处热通量呈高斯分布[19], 如式(3)所示:

表 3 打印工艺参数设置

材料	层厚	层数	初始层角度
AlSi10Mg	50 μm	600	57 °
层间旋转角	扫描间距	走线间距	
67 °	100 μm	10 mm	

明, 缓慢加热冷却条件下, 室温下物相组成为共晶 (α -Al+Si)、少量 α/β -AlFeSi 与 Mg_2Si , 如图 7(a)所示; 考虑实际过程中材料加热冷却速度极快, 根据 CCT 曲

线, 快速冷却曲线在 Al_2Cu 及其时效过渡相 (θ') 曲线左侧, θ' 为亚稳态, 打印后物相组成为共晶 (α -Al+Si)、少量 ($Al_2Cu+\theta'$), 如图 7(b)所示。

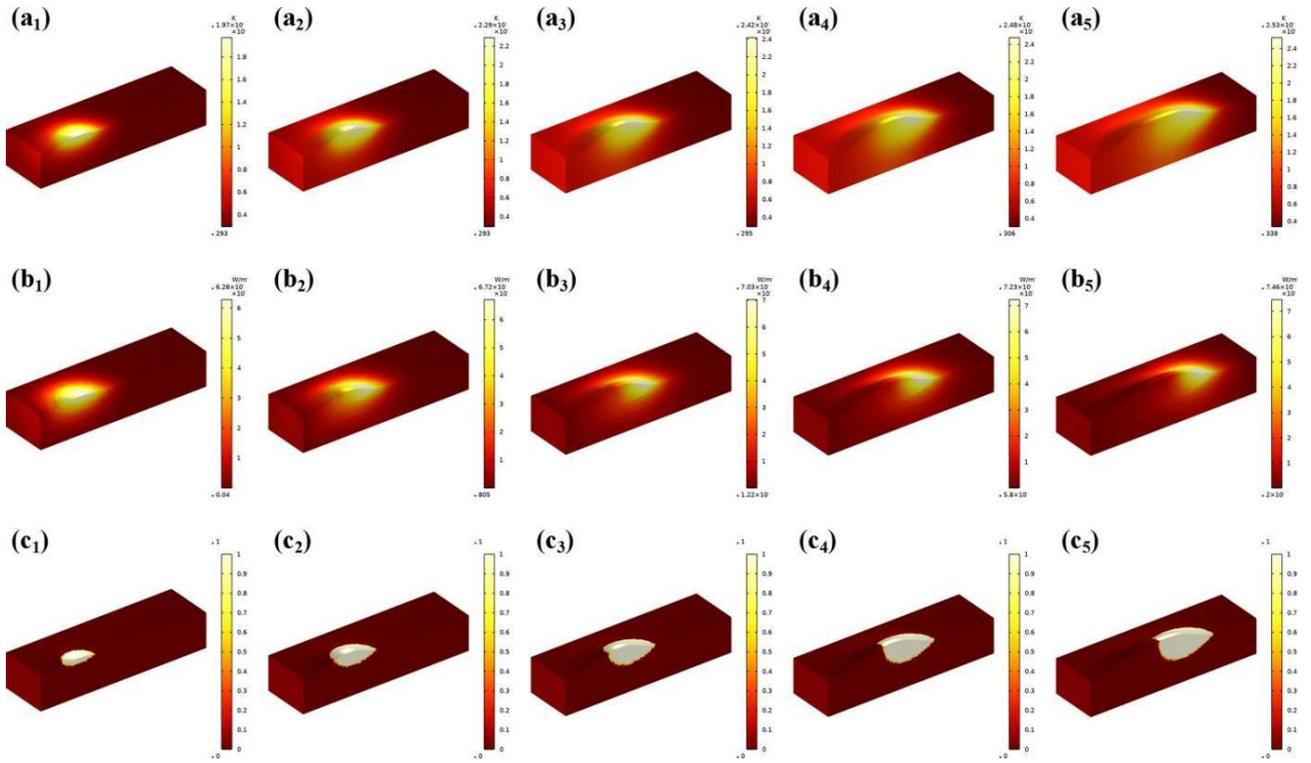


图 5 单层打印过程模拟: (a). 温度; (b). 热通量; (c). 液相比

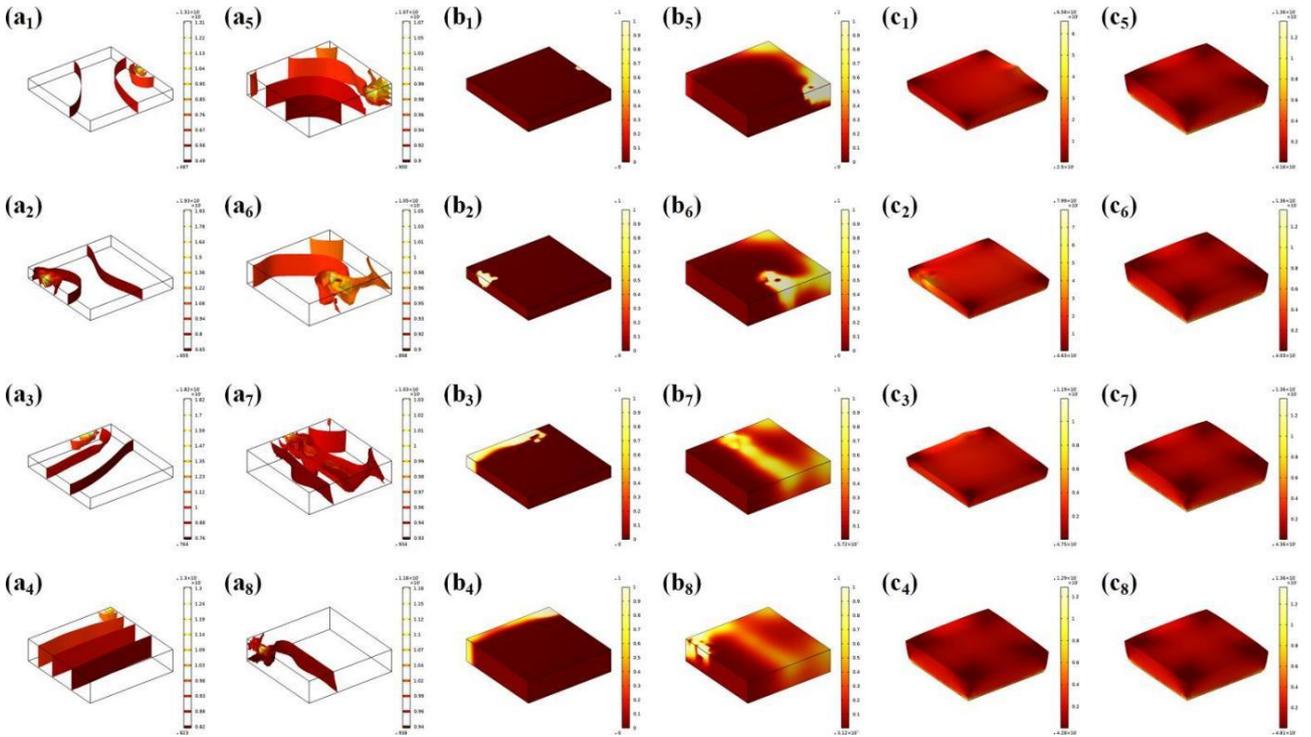


图 6 多层打印过程模拟: (a). 温度; (b). 液相比; (c). 热应力

表 4 打印材料主要化学成分/wt.%

Si	Mg	Fe	Zn
10.0~13.0	<0.05	<1.2	<0.3
Ni	Mn	Cu	Al
<0.2	<0.6	<0.6	Bal.

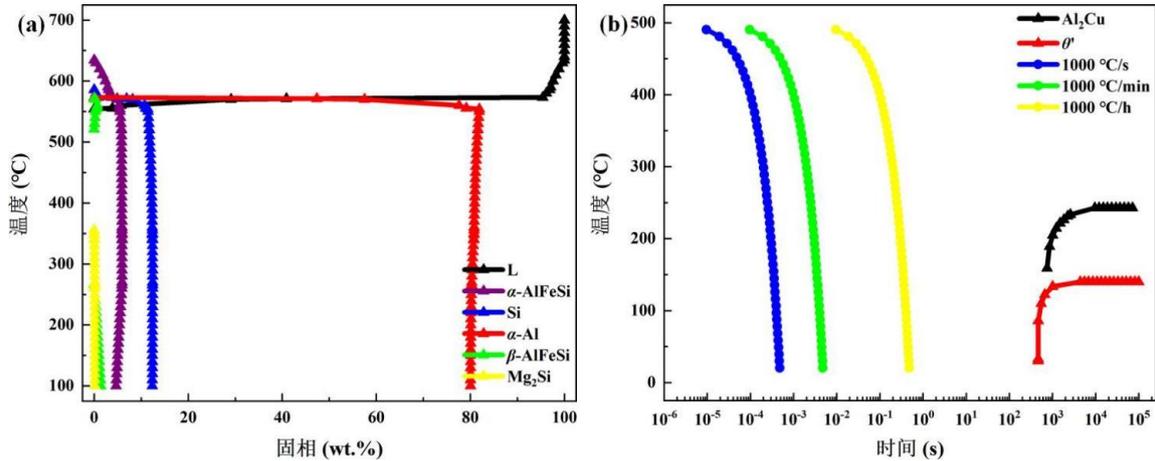


图 7 打印材料特性模拟: (a). 平衡相图; (b). CCT 曲线

随打印进行, 铺粉层数增加, 热量与热应力积聚增多, 最终导致活塞位移与应力显著增大。计算结果表明, 去除支撑前, 活塞最大位移与最大应力均在头部下端面, 分别为 $1.20.55 \text{ MPa}$ 与 $1.83 \times 10^{-1} \text{ mm}$, 故头部底端为实体支撑, 如图 8(a)、图 8(b)所示。支撑最大位移与最大应力均在头部下端面, 分别为 140.86 MPa

与 $1.63 \times 10^{-1} \text{ mm}$, 如图 8(c)、图 8(d)所示。去除支撑后, 活塞内部积聚应力快速释放, 相较去除前, 活塞最大位移位置不变, 但最大位移由 $1.83 \times 10^{-1} \text{ mm}$ 增至 $2.95 \times 10^{-1} \text{ mm}$, 销孔处最大位移由 $5.51 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 增至 $1.44 \times 10^{-1} \text{ mm}$, 如图 8(e)所示, 故为防止应力释放过快引起开裂, 静置至室温后去除支撑[20, 21]。

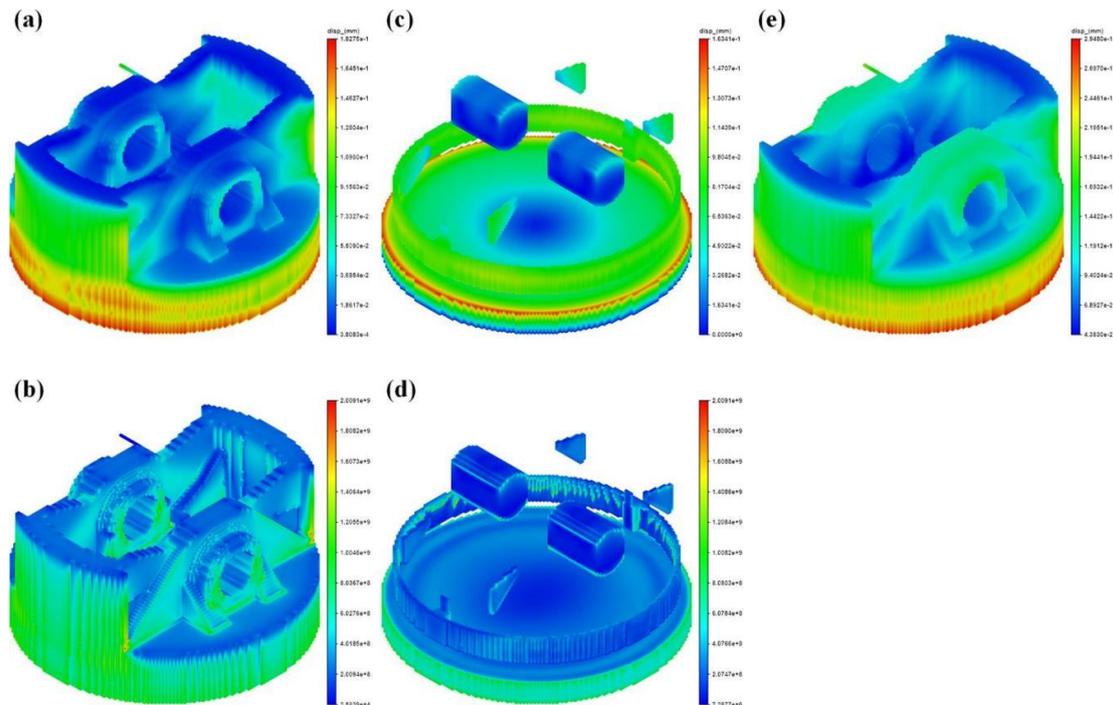


图 8 活塞打印过程模拟仿真: (a). 去除支撑前活塞位移; (b). 去除支撑前活塞应力; (c). 支撑位移; (d). 支撑应力; (e). 去除支撑后活塞位移

4.2 样品分析测试

如图 9 所示, 打印粉体物相组成主要为 α -Al、Si、少量 Mg_2Si 。球形度为 0.9, $D_{av}=37 \mu m$ 、 $D_{10}=19 \mu m$ 、 $D_{50}=35 \mu m$ 、 $D_{90}=59 \mu m$, 平均粒径为 15~53 μm 。

如图 8(b)、图 8(d)所示, 裙部支撑最大位移与最大应力分别为 $6.54 \times 10^{-2} mm$ 与 40.77 MPa, 与活塞接触位置最大应力为 40.19 MPa。考虑去除支撑前后接触位置最大位移分别为 $5.51 \times 10^{-2} mm$ 与 $9.40 \times 10^{-2} mm$, 仅增大 $3.89 \times 10^{-2} mm$, 故仅销孔与头部下端面设支撑, 如图 10(a)所示。按优化后活塞结构打印样品, 待静置至室温应力完全释放后去除支撑, 如图 10(b)所示。喷砂清洁样品表面, 如图 10(c)所示, 测量样品尺寸, 以评估

打印误差。如图 10(d)所示, 最大位移在裙部内表面与头面上端面间拐角位置, 为 0.57 mm, 裙部外表面位置次之, 为 0.29 mm, 裙部上端面位置最小, 为 0.15 mm。打印样品物相组成主要为 α -Al、Si、少量 Al_2Cu , 如图 10(e)所示, 微观结构为稳定均匀共晶组织, 相邻光斑扫描痕迹呈特定夹角, 如图 10(f)所示。实验结果与计算结果基本吻合。

加热打印样品至 300 $^{\circ}C$, 保温 2 h, 通过退火提高材料力学性能。如图 11 所示, 实验结果表明, 热处理后杨氏模量为 68.8 GPa, 屈服强度为 244.5 MPa, 抗拉强度为 366.6 GPa, 断裂应变为 3%, 泊松比为 0.31, 维氏硬度为 1230.9 MPa。

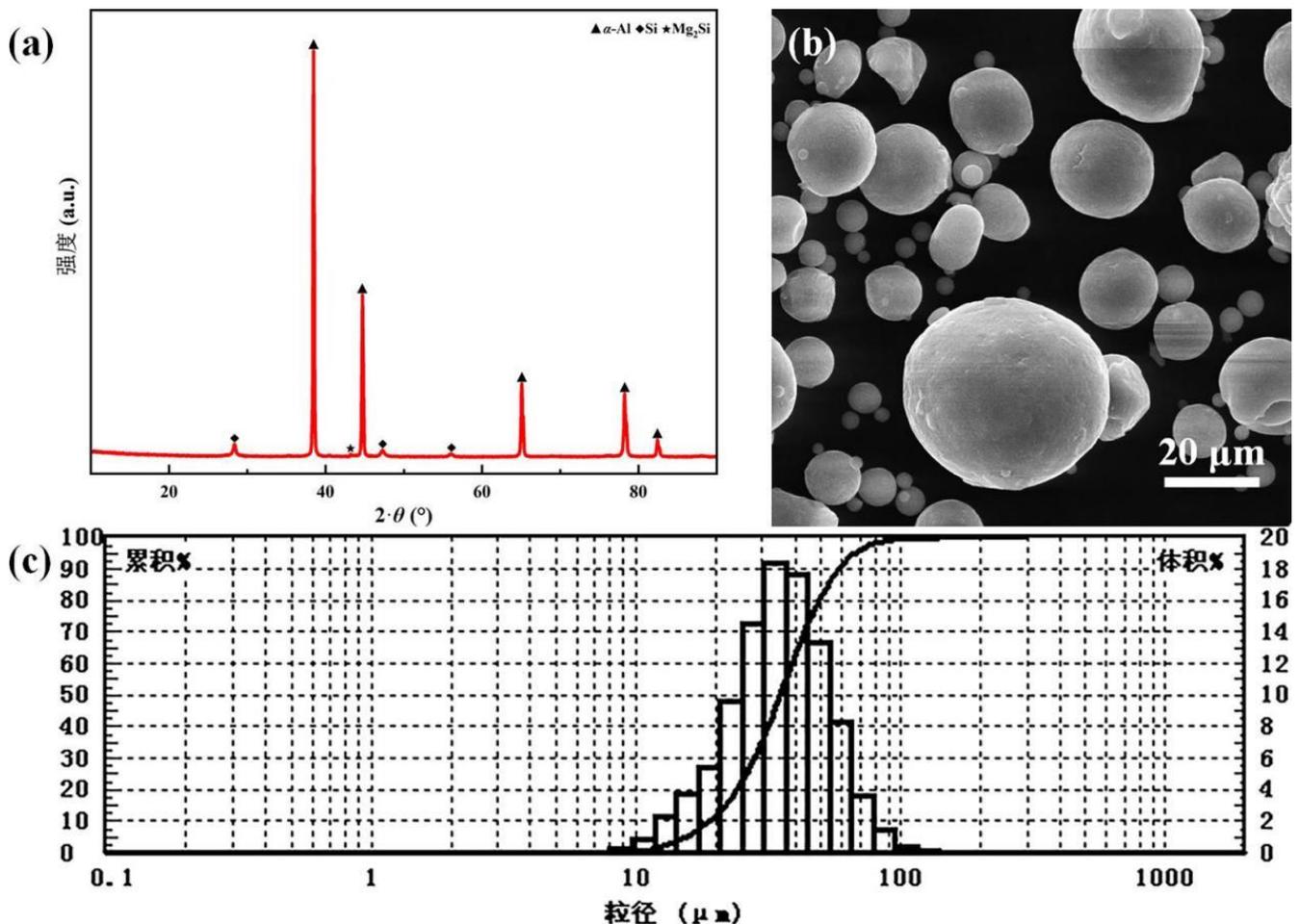


图 9 打印粉体: (a). 物相组成; (b). 微观结构; (c). 粒径分布

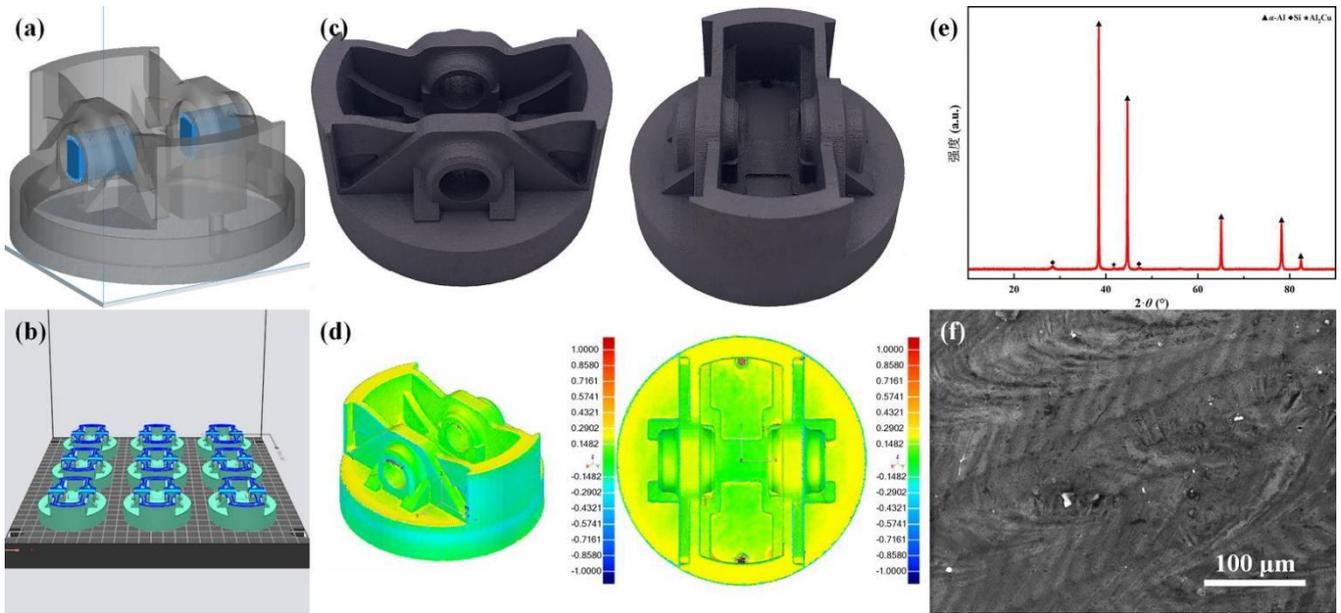


图 10 打印活塞: (a). 支撑结构; (b). 摆放结构; (c). 喷砂清洁后样品; (d). 三维扫描; (e). 物相组成; (f). 微观结构

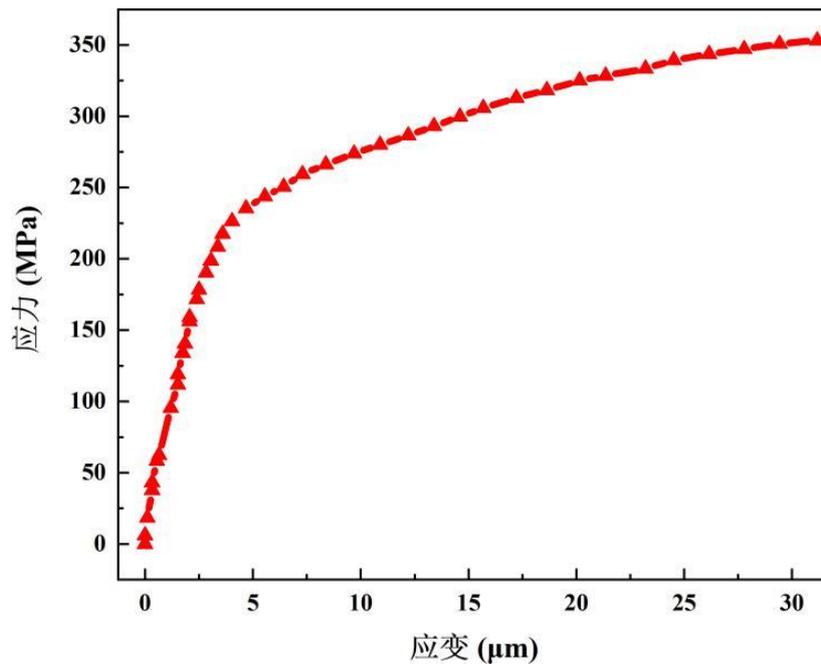


图 11 打印样品室温拉伸应力应变曲线

4.3 装机动力输出模拟仿真

基于三缸引擎, 活塞材料为 AlSi10Mg, 气缸、连杆、曲轴材料均为 40Cr; 活塞头部上端面为载荷面, 油气混合物点燃后, 施加载荷为 50 bar; 曲轴与连杆、连杆与活塞销孔、活塞裙部与气缸分别形成接触对, 活塞水平方向位移为 0, 竖直方向位移为非 0, 如图

12(a)、图 12(d)所示; 计算结果表明, 待动力输出稳定后, 活塞优化前后, 重量显著减小, 引擎最大扭矩由 193 N m 增至 204 N m, 最大转速由 3710 RPM 增至 3920 RPM, 最大轴上马力由 100 BHP 增至 112 BHP, 动力输出显著提升。

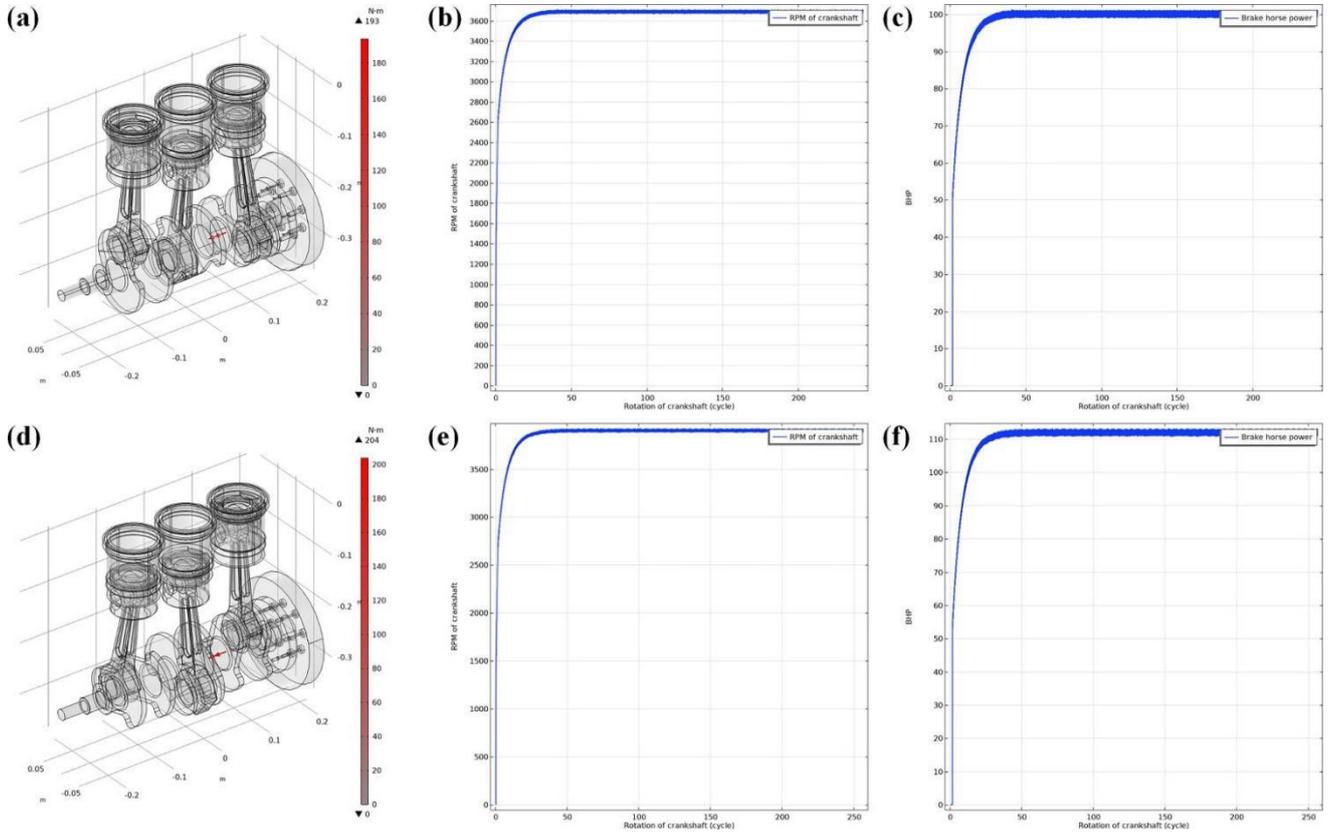


图 12 三缸引擎动力输出模拟仿真: (a). 优化前扭矩; (b). 优化前转速; (c). 优化前轴上马力; (d). 优化后扭矩; (e). 优化后转速; (f). 优化后轴上马力

5 结论

基于拓扑优化与 SLM 3D 打印, 设计制造轻量化 AlSi10Mg 活塞, 提高动力输出。体积由 55359 mm^3 降至 46715 mm^3 , 装机后最大扭矩、转速、轴上马力分别由 193 N m 、 3710 RPM 、 100 BHP 增至 204 N m 、 3920 RPM 、 112 BHP 。销孔与头部下端面设支撑, 最大位移在裙部内表面与头部上端面间拐角位置, 为 0.57 mm , 裙部外表面位置次之, 为 0.29 mm , 裙部上端面位置最小, 为 0.15 mm 。物相组成主要为共晶 ($\alpha\text{-Al+Si}$) 与少量 Al_2Cu 。 $300 \text{ }^\circ\text{C} \times 2 \text{ h}$ 退火, 杨氏模量为 68.8 GPa , 屈服强度为 244.5 MPa , 抗拉强度为 366.6 GPa , 断裂应变为 3% , 泊松比为 0.31 , 维氏硬度为 1230.9 MPa 。

参考文献

[1] John H. Martin, Brennan D. Yahata, Jacob M. Hundley, Justin A. Mayer, Tobias A. Schaedler, Tresa M. Pollock, 3D printing of high-strength aluminium alloys [J], Nature, 2017, 549: 365-369.

[2] Qiyang Tan, Jingqi Zhang, Ning Mo, Zhiqi Fan, Yu Yin, Michael Bermingham, Yingang Liu, Han Huang, Ming-Xing Zhang, A novel method to 3D-print fine-grained AlSi10Mg alloy with isotropic properties via inoculation with LaB6 nanoparticles [J], Additive Manufacturing, 2020, 32: 101034.

[3] Marina Cabrini, Sergio Lorenzi, Tommaso Pastore, Simone Pellegrini, Diego Manfredi, Paolo Fino, Sara Biamino, Claudio Badini, Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by means of direct metal laser sintering [J], Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 326-335.

[4] Nesma T. Aboulkhair, Marco Simonelli, Luke Parry, Ian Ashcroft, Christopher Tuck, Richard Hague, 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting [J], Progress in Materials Science, 2019, 106: 100578.

[5] Ping Xu, Weinian Guo, Liting Yang, Chengxing Yang, Effect of heat treatment on AlSi10Mg composite 3D printed energy absorption structures [J], Alexandria Engineering Journal, 2024, 101: 267-281.

[6] Jairo Alberto Muñoz Bolaños, Denis Ten, Bazhenov Viacheslav, Alexander Komissarov, Alexander Gromov, Mechanical and microstructural evolution of a 3D printed AlSi11Cu alloy [J], Procedia CIRP, 2020, 95: 103-108.

- [7] Yubei Zhang, Shan Li, Yantong Zhao, Wenyan Duan, Bingshan Liu, Tongcai Wang, Gong Wang, Digital light processing 3D printing of AlSi10Mg powder modified by surface coating [J], *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101897.
- [8] 雷基林, 杨永忠, 邓晰文, 代国雄, 杨振东, 吴涛, 基于活塞传热与强度分析的内冷油腔的优化 [J]. *汽车工程*, 2020, 42(3): 323-329.
- [9] Sajjad Zargham, Thomas Arthur Ward, Rahizar Ramli, Irfan Anjum Badruddin, Topology optimization: a review for structural designs under vibration problems [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53: 1157-1177.
- [10] Yan Zhang, Mi Xiao, Hao Li, Liang Gao, Sheng Chu, Multiscale concurrent topology optimization for cellular structures with multiple microstructures based on ordered SIMP interpolation [J], *Computational Materials Science*, 2018, 155: 74-91.
- [11] Dustin Roman Jantos, Christopher Riedel, Klaus Hackl, Philipp Junker, Comparison of thermodynamic topology optimization with SIMP [J], *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2019, 31: 521-548.
- [12] Shouyu Cai, Hualin Zhang, Weihong Zhang, An integrated design approach for simultaneous shape and topology optimization of shell structures [J], *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2023, 415: 116218.
- [13] Jizu Lv, Peng Wang, Minli Bai, Gang Li, Ke Zeng, Experimental visualization of gas-liquid two-phase flow during reciprocating motion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 79: 63-73.
- [14] A. J. Torregrosa, A. Broatch, P. Olmeda, J. Martí n, A contribution to film coefficient estimation in piston cooling galleries [J], *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(2): 142-151.
- [15] T. Dbouk, A review about the engineering design of optimal heat transfer systems using topology optimization [J], *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 841-854.
- [16] V. Subramaniam, T. Dbouk, J.-L. Harion, Topology optimization of conjugate heat transfer systems: a competition between heat transfer enhancement and pressure drop reduction [J], *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 75: 165-184.
- [17] Akihiro Takezawa, Makoto Kobashi, Yuichiro Koizumi, Mitsuru Kitamura, Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the Hashin-Shtrikman bound [J], *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 564-572.
- [18] A. Serjouei, T. Libura, A. Brodecki, J. Radziejewska, P. Broniszewska, P. Pawłowski, T. Szymczak, M. Bodaghi, Z. L. Kowalewski, Strength-hardness relationship for AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion: an experimental study [J], *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 861: 144345.
- [19] Chengyi Dan, Yuchi Cui, Yi Wu, Zhe Chen, Hui Liu, Gang Ji, Yakai Xiao, Han Chen, Mingliang Wang, Jun Liu, Lei Wang, Yang Li, Ahmed Addad, Ying Zhou, Siming Ma, Qiwei Shi, Haowei Wang, Jian Lu, Achieving ultrahigh fatigue resistance in AlSi10Mg alloy by additive manufacturing [J], *Nature Materials*, 2023, 22: 1182-1188.
- [20] S. I. Shakil, A. Hadadzadeh, B. Shalchi Amirkhiz, H. Pirgazi, M. Mohammadi, M. Haghshenas, Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy: Microstructure and micromechanics [J], *Results in Materials*, 2021, 10: 100178.
- [21] Michael Schuch, Tom Hahn, Matthias Bleckmann, The mechanical behavior and microstructure of additively manufactured AlSi10Mg for different material states and loading conditions [J], *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813: 141134.