

基于 SLM 工艺的航空支架优化设计

王旭葆, 曲 波

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

[摘要] 激光选区熔化(SLM)是一种通过使用激光熔化金属粉末层成形的增材制造工艺,没有传统工艺的设计约束。但基于 SLM 的结构设计也需遵循一定的设计规则,从而兼顾效率、成本和成形稳定性。本文对轻量化航空铝合金支架的 SLM 工艺性进行分析,包括成形时间、消耗、后处理难度和稳定性。后结合 SLM 成形特点对原始结构进行重新设计,研究更复杂结构的机械性能和 SLM 工艺性,得到一个优化结构。优化结构重量减轻 24.5%,工况加权刚性提升 38.3%,位移量最大减少 32.7%,在缩放系数为 0.5 的条件下,成形时间减少 38.6%,材料用量大幅减少 65.6%,优化结构没有内部支撑,后处理难度得以降低,整体成形稳定性提升明显。

关键词: 激光选区熔化;轻量化;优化结构;成形稳定性;支撑

Optimal Design of Aero Support Based on Selective Laser Melting

WANG Xubao, QU Bo

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

[ABSTRACT] Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing technology that is based on melting layers of metal powder using powerful laser without traditional limits. Considering efficiency, cost and stability, some specific rules should be complied with in process of the structure design. In this article, SLM specialty of the aero aluminum alloy support was analyzed including total time, expenditure, difficulty in post-process and stability. Then the original structure was redesigned combined with SLM specialty. Complex of the structure was studied involving performance and SLM manufacturing. An optimal structure was obtained that the weight reduced by 24.5%, weighting stiffness increased by 38.3%, displacement reduced by 32.7% at most. Total time evaluated reduced by 38.6%, material consumption reduced by 65.6% dramatically at scale coefficient of 0.5. There were no supports inside the optimal structure, the post-process was easier, and fabricating stability was significantly improved.

Keywords: Selective laser melting; Lightweight; Optimal structure; Fabricating stability; Support

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.20.068

SLM (激光选区熔化)是一种使用激光熔化金属粉末,逐层成形的增材制造工艺,相比传统工艺,其主要优势为:可以成形内部复杂结构;一体成形,保证整体强度;不需要任何工具辅助成形;可以成形变截面结构以优化结构强度。

SLM 由于不使用任何切削工具进行成形,因此针对 SLM 的结构设计不受传统工艺的约束,但为了追求效率,降低成本和成形风险等目的,需要遵循一定的设计规则。

成形方位(包括零件距基板高度、特征面与成形方向角度等)决定了支撑区域、支撑用量、成形风险及精度和结构性能等。Strano 等^[1]通过算法确定零件成形所需的最少支撑量,从而来增加后处理效率。Snyder

等^[2]则对成形方向对微流道的成形误差和精度进行了研究。

支撑在 SLM 工艺中与零件同时成形,其主要作用是将零件固定在基板上,同时由于工艺过程中存在热应力产生的变形^[3-4],可起到防止几何形变^[5]的作用,此外还能够防止熔池塌陷^[6],保证成形过程的稳定性。在零件打印前对其位置摆放进行优化^[7],有可能减少支撑的使用,从而减少材料的使用和制造时间及后续去支撑时间。在使用支撑时,其支撑面会因支撑的存在而表面质量变差^[8],因此应尽量减少支撑的使用。

现阶段,由 SLM 成形的大多数结构是由传统工艺条件下的参数化建模方法构造的,由于不以 SLM 工艺性为前提进行设计,常会出现成形稳定性差,支撑密度

大且难去除,最佳成形方位无法匹配零件质量等问题。本文通过对已有轻量化结构进行结构和工艺性分析,利用拓扑优化^[9]和形状优化等手段,结合 SLM 工艺特征在保证原始性能的条件下进行重新设计,研究原始模型的轻量化设计潜力和优化结构 SLM 工艺性,并通过结果对比验证优化结构的可行性。

1 优化设计的 SLM 工艺性原则

在保证成形质量上,为防止表面球状效应和抑制翘曲变形,悬垂面需要支撑结构进行辅助。图 1 展示了对悬垂面添加支撑的成形结果。可以看到,支撑使表面成形质量恶化,且与厚度较小的薄壁结构融合,增加了后处理难度。因此,自支撑结构设计是 SLM 设计追求的目标。

在本文中,最大角度为 45°。图 2 展示了如何通过优化设计,去除支撑实现结构的自支撑。除了通过改变形状减少支撑的使用量外,还可以通过采用镂空结构减少支撑使用量甚至是实现自支撑。

在成形稳定性方面,SLM 相关设计指导手册中对提高可制造性的结构与工艺设计提出了指导性建议。图 3 中为理想状态下刮刀与零件作用方式示意图。由于刮刀在运动过程中与已成形层接触,在刮刀运动方向上会产生牵引力,对成形过程造成影响。理想状态下的成

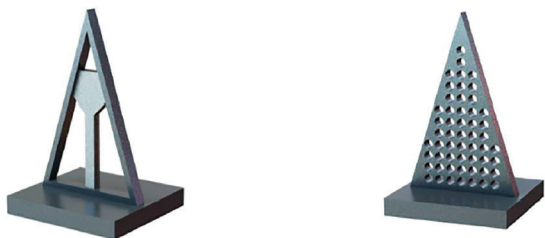


图1 不同厚度成形

Fig.1 Molding of different thickness



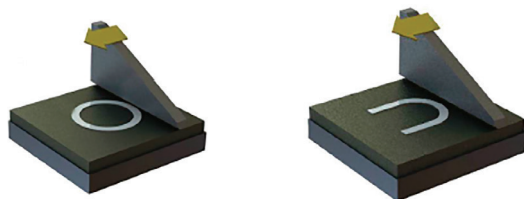
(a) 圆拱优化设计



(b) 内构优化设计

图2 优化设计

Fig.2 Optimized design



(a) 圆形轮廓

(b) U形轮廓

图3 刮刀与零件作用示意图

Fig.3 Illustrations of interactions between blade and part

形截面为圆形轮廓,见图 3 (a)。圆形轮廓在与刮刀接触时为点接触,可以使刮刀平滑掠过已成形层,同时圆形轮廓具有几何稳定性,可以抵抗刮刀在成形层上运动时产生的牵引力。图 3 (b) 的 U 型轮廓也具有圆形轮廓的特点,但要注意其摆放方向的要求以抵抗刮刀牵引力。

此外,其他对成形稳定性有影响,且应尽力避免的状况为:块状的几何结构不能与基板大面积接触,也不能产生大面积的分层截面,引起表面变形,甚至使成形结构与基板分离;尖锐边、角在成形过程中会造成结构翘曲,与刮刀碰撞,终止成形过程;在分层面积突变处,会积累大量应力,导致结构断裂。

2 优化设计原理

优化设计的通用数学模型为:

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

约束条件为:

$$g_i(X) \ll 0, i = 1, 2, \dots, m, x_n^l \ll x_n \ll x_n^u$$

式中, $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ 为设计变量; $f(X)$ 是目标函数; $g_i(X)$ 是不等式约束函数。本文的材料模型使用 SIMP 方法,即变密度法。单元密度被归一化与单元刚性矩阵直接关联,即 $\underline{K}(\rho) = \rho^p \mathbf{K}$, ρ 为惩罚系数, \mathbf{K} 为惩罚后单元刚性矩阵, \mathbf{K} 为实际材料刚性矩阵。在 OptiStruct 中,设计变量即为归一化密度 ρ , 其上限和下限分别为 0 和 1。

本文采用最小化数学模型,即优化目标为体积最小化,约束为加权柔度,数学模型为:

$$\text{Find } X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$$\text{Min } V = \sum_{n=1}^N x_n v_n$$

$$\text{constrains: } aC_X(X) + bC_Y(X) + cC_Z(X) \ll C_U$$

$$C(X) = \sum_{n=1}^N (x_n)^p \mathbf{u}_n^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_n$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{U}$$

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n, 0 \ll x_n \ll 1$$

式中, V 为结构体积; x_n 为单元设计变量; v_n 为单元体积;

u_n 为单元 n 的位移向量; k_0 为单元初始刚度矩阵; F 为结构整体载荷矩阵; K 为结构整体刚度矩阵; U 为结构整体位移矩阵; $C_x(X)$ 、 $C_y(X)$ 、 $C_z(X)$ 分别为各工况下柔度函数; a 、 b 、 c 分别为加权系数。

3 原始设计结构分析与 SLM 工艺性分析

图 4 (a) 为原始支架设计, 原始结构符合传统切削工艺的设计原则, 通过加强板对结构进行横向位移约束, 并在侧壁及加强板上均有大小不同的开孔, 以最大程度去除材料, 达到轻量化的目的。原始结构最薄处为 5mm, 最厚处为 8mm, 材料采用铝合金, 体积系数为 1.64, 整体最大长度为 470mm。

通过有限元分析进行工况模拟, 得到原始设计的工况下最大位移为 0.339mm, 一阶和二阶特征频率为 342Hz 和 383Hz, 最大位移分别为 0.046mm 和 0.035mm。

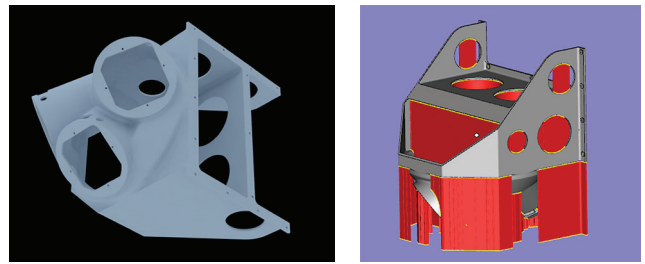
由于要保证安装面的表面质量, 因此安装面应尽量采用自支撑结构, 通过优化安装方位, 比例因子为 0.5 的零件摆放位置见图 4 (b), 红色为支撑结构, 可以看到安装面上有大量块状支撑与基板连接, 由于加强板的存在, 大量块状支撑与结构内部接触, 部分支撑通过安装面与基板连接, 而过高的支撑结构增加了材料用量的同时也增加了成形风险。原始模型大量的内部支撑会增加后处理难度, 因此在进行设计时应尽量避免形成内部支撑结构。

4 优化设计与工艺性分析

优化设计要求为在保证刚度的条件下最大程度减轻重量, 缓解应力集中, 抑制结构变形, 同时提高特征频率。重新设计根据 SLM 设计原则进行, 使用复杂曲面建模, 以获得圆滑分层截面, 同时采用分立结构以防止出现材料块状积累, 原截面突变处采用圆角以使截面平滑过渡。结构优化的目标函数为体积最小, 约束条件为柔度最小。整个过程使用 OptiStruct^[10-11] 软件的变密度优化法进行原型设计, 材料类型为铝合金, 之后对原型设计使用自由型优化进行迭代设计。

有限元模型及工况如图 5 所示。红色三角表示模拟螺栓固定, 箭头表示安装面所受各向质量块在加速度条件下的载荷, 同时整个结构受 Y 向 10 倍重力加速度。红色箭头表示在 X 方向安装面施加载荷等效静力 1000N, 绿色和蓝色箭头分别表示 Y 向和 Z 向被施加载荷等效静力 1000N。网格绿色部分为非设计域, 蓝色部分为设计域。

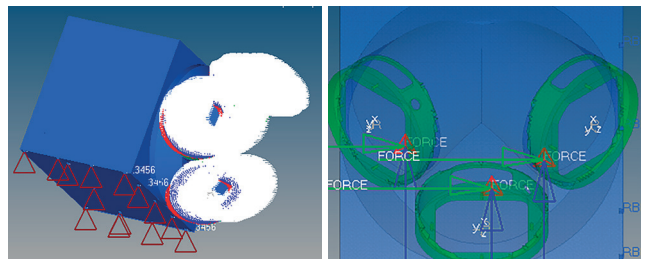
拓扑优化结果如图 6 (a) 所示, 最终设计如图 6 (b) 所示。优化设计以拓扑优化结果作为参考, 并以 SLM



(a) 原始结构 (b) 支撑结构

图4 原始支架设计

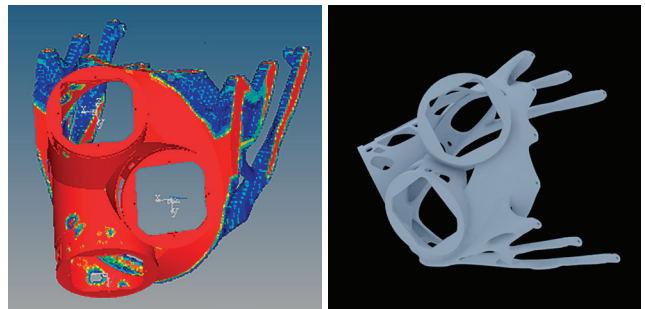
Fig.4 Original support design



(a) 设计域 (b) 工况

图5 设计域与工况

Fig.5 Design domain and working conditions



(a) 优化结果 (b) 最终设计结果

图6 优化结果与最终设计结果

Fig.6 Optimization result and final design result

工艺性为指导, 对整个零件进行分体设计, 安装头使用镂空设计, 螺栓连接支架使用复杂曲面设计以尽量优化支撑使用。图 6 (b) 为轻量化结构, 其由大量不规则复杂曲面构成, 并且存在非对称镂空结构和开孔, 整体结构尽可能满足自支撑形成条件。结构质心由原先的 (1.807, 2.211, -0.326) 移动到 (-3.506, 2.876, -3.006), 移动距离为 6mm, 与原设计相差不大。

图 7 为比例因子 0.5 优化结构的 SLM 成形工艺图, 由于优化设计考虑减少支撑使用量的要求, 取消了加强板, 降低了支撑使用量和成形风险。整体刚性由变截面结构与三角形构造进行补偿, 同时由于变截面设计的存在, 进一步降低支撑使用量。安装面上部由爪状结构组成, 为避免形成过高的支撑, 同一侧的爪状分支基本处

于同一平面,支撑结构上下两端与爪状分支相连接。
安装面部分使用镂空设计以减少重量,同时减少安

装面在基板上的投影面积,以进一步减少支撑使用量。

5 结果与讨论

通过对比图 8 和图 9 各等效工况位移图,优化后 X 轴工况分析结果显示,其安装头变形方向与原设计基本一致,位移量也相同, Y 轴位移小于原设计。优化后 Z 轴工况结果显示,在工件位移红色部分采用了三角形构造,并增强了三角形构造与主构造的连接强度,成功抑制了 Z 轴位移,位移量减少了 32.7%。

通过对比图 10 和图 11 各等效工况应力图,优化后 X 轴工况应力分析结果显示,应力更多集中于螺栓固定处的爪状结构上,以此限制了爪状结构的位移。优化后 Y 轴工况分析结果显示,镂空区域将原本集中的应力分布转为分散在整个结构中,同时螺栓连接承受更大应力

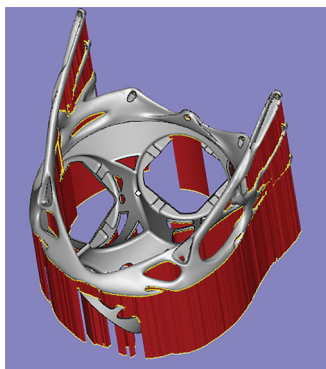


图7 优化设计工艺图
Fig.7 Optimized design process diagram

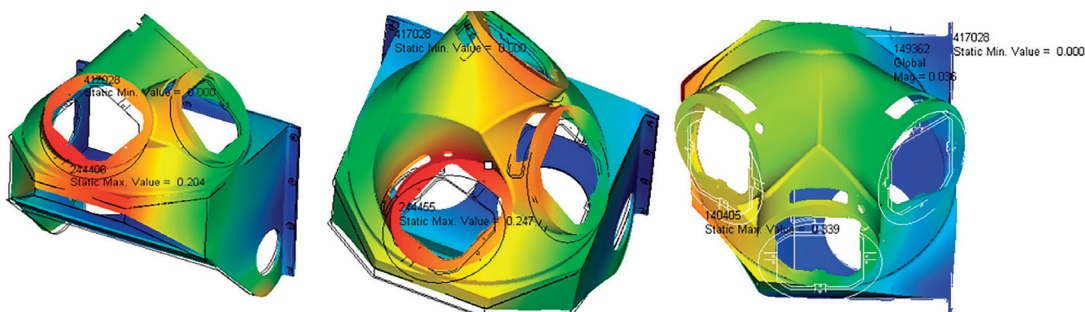


图8 原设计位移云图 (受力方向从左至右为: X、Y、Z)
Fig.8 Original design displacement cloud (load direction from left to right: X、Y、Z)

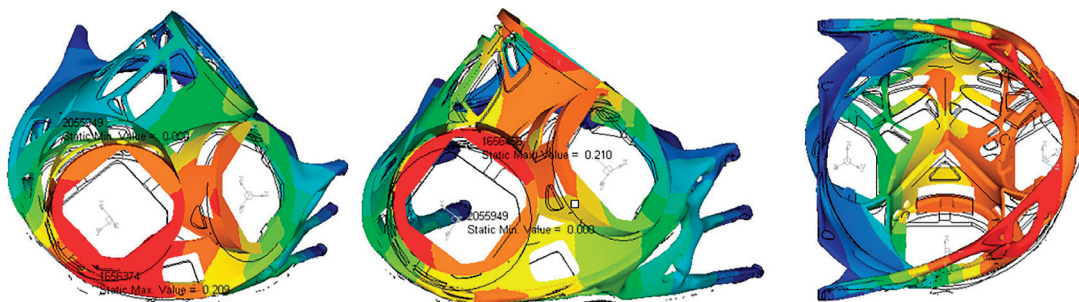


图9 优化设计位移云图 (受力方向从左至右: X、Y、Z)
Fig.9 Optimal design displacement cloud (load direction from left to right: X、Y、Z)

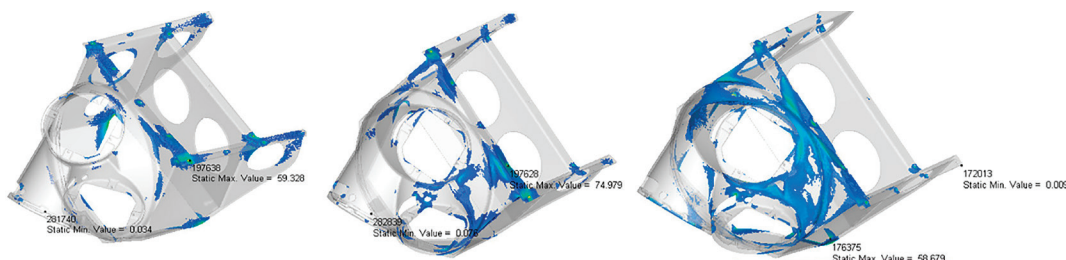


图10 原设计应力云图 (受力方向从左至右为: X、Y、Z)
Fig.10 Original design stress cloud (load direction from left to right: X、Y、Z)

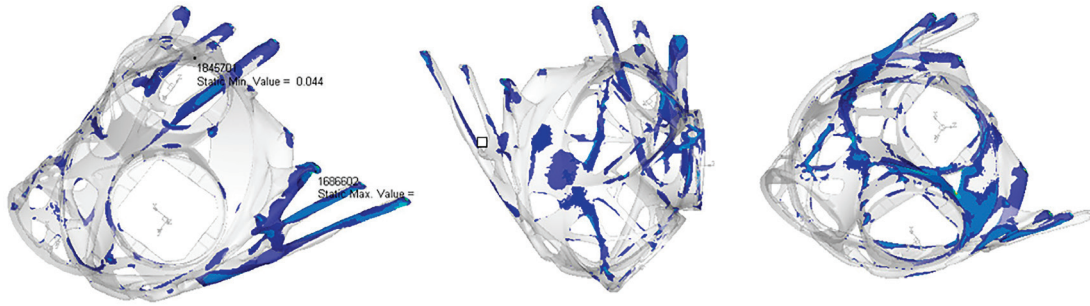


图11 优化设计应力云图 (受力方向从左至右: X、Y、Z)
Fig.11 Optimal design stress cloud (load direction from left to right: X、Y、Z)

以固定零件,其他区域应力情况基本与 X 轴工况下相同。优化后 Z 轴工况结果显示,整个应力分布与原设计基本相同,但由于镂空结构,应力在螺栓连接处的应力分布比较集中,最大应力出现在螺栓连接处。从表 1 中可以看到,优化结构整体性能有较大提升,除 X 轴工况性能与原设计性能接近外,其他工况都有较大改善,基本实现了性能要求。表 1 为优化结构分析数值与对比(括号内数值)。

表1 轻量化设计分析结果

属性	X 轴	Y 轴	Z 轴	1 阶	2 阶
最大位移	0.208 (+2.4%)	0.21 (-14.9%)	0.22 (-32.7%)	0.036 (-21.7%)	0.034 (-2.8%)
最大应力	90 (+52.5%)	91 (+22.9%)	77 (+32.7%)	10 (+47%)	9.8 (+22.5%)
柔度系数	161 (+8.7%)	183 (-21.7%)	206 (-25.8%)	250 (+35.2%)	142 (-25.6%)

图 12 和图 13 分别为不同高度时优化结构与原结构的分层截面形状图,可以看到优化设计的分层截面形状相比原设计没有大面积的材料连接区,其截面基本由不规则圆弧构成,确保在任何成形方向,结构与刮刀都是点接触。说明设计结构较原设计更适合使用 SLM 成形。

表2 SLM工艺指标

设计	零件体积 / mm ³	支撑体积 / mm ³	总体积 / mm ³	零件扫描时间 / h	支撑扫描时间 / h	铺粉时间 / h	总时间 / h
原始设计	20.5	92.0	112.6	25	12	7	44
优化设计	15.5	23.1	38.7	19	3	5	27

表 2 为在同样的工艺参数下成形所需材料和时间的估计值。最终结果显示,优化设计较原设计材料用量减少 65.6%,成形时间缩短 38.6%,尤其是其支撑用量减少 74.8%,验证了优化设计的去支撑效果,降低了后处理难度。表 2 为比例系数 0.5 条件下的结果。

6 结论

(1) 优化结构使用变截面及镂空设计,各工况位移最大减少 32.7%,刚性提高 38.3%,减重 24.3%。结构长度减小 90mm,宽度增加 30mm,应力集中得到缓解,框架体积减少 12.2%,提高了空间利用率。

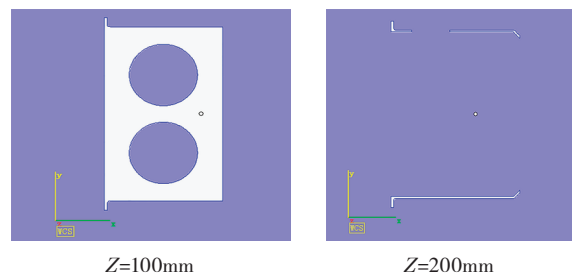


图12 原结构截面形状图
Fig.12 Cross-sections of the original design

(2) 由于优化结构根据 SLM 工艺设计原则进行设计,在比例因子为 0.5 的条件下,支撑体积大幅减少 74.8%,在同样摆放位置状态下,优化结构材料用量减少 65.6%,成形时间缩短 38.6%。由于在结构内部没有支撑存在,优化设计也降低了后处理难度。

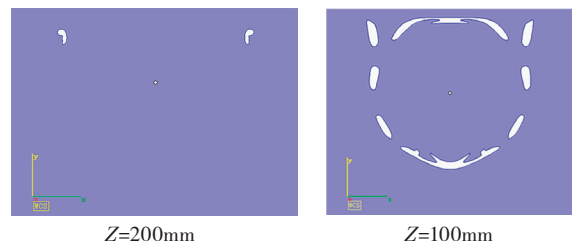


图13 优化结构截面形状图
Fig.13 Cross-sections of the optimal design

(3) 设计结果表明,对于薄壁支架零件,采用拓扑优化和 3D 打印相结合的方式制造能够得到更轻、性能更好的结构。

(下转第78页)