

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2022.07.020

基于增材制造的空间反射镜拓扑优化设计*

刘 多¹, 江昱含¹, 董得义², 孙宝玉¹, 关英俊^{1*}

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院
长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 传统的空间反射镜存在研制周期长、成本高的问题, 为了缩短反射镜的研制周期并节约成本, 将拓扑优化与增材制造技术相结合, 以满足反射镜面形精度要求为前提, 对高轻量化率的反射镜结构进行了拓扑优化设计与增材制造。首先, 在确定反射镜材料和初始参数后, 建立了反射镜的拓扑优化数学模型, 并在拓扑优化中引入了可制造性约束, 获得了满足面形精度要求的反射镜背部创新加强筋结构; 然后, 对反射镜模型进行了有限元分析, 分析了缩比模型与原尺寸模型的等效性; 最后, 采用选区激光熔化技术, 以 AlSi10Mg 铝合金粉末为材料, 进行了反射镜缩比模型增材制造试验。研究结果表明: 在自重载荷下, 光轴垂直方向裸镜面形精度达到峰谷值 164.3 nm, 均方根值 27.6 nm, 优化后的反射镜质量为 4.75 kg, 轻量化率达到了 85%, 实现了反射镜高轻量化率设计; 采用增材制造技术后, 获得了高度还原拓扑优化反射镜结构的效果, 可为空间反射镜的高效研制提供参考。

关键词: 大口径空间反射镜; 面形精度; 拓扑优化; 数学模型; 选区激光熔化技术; 可制造约束

中图分类号: TH74; TP391.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)07-1010-07

Topological optimization design of space mirror based on additive manufacturing

LIU Duo¹, JIANG Yu-han¹, DONG De-yi², SUN Bao-yu¹, GUAN Ying-jun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The traditional space mirror has the problems of long development cycle and high cost. In order to shorten the development cycle of the mirror and save the cost, the topology optimization and additive manufacturing technology were combined. On the premise of meeting the requirements of the shape accuracy of the mirror, the topology optimization design and additive manufacturing of the mirror structure with high lightweight rate were carried out. Firstly, the mathematical model of the topology optimization was established after determining the material and initial parameters of the mirror, and the manufacturability constraint was introduced into the optimization, the innovative stiffener structure at the back of the mirror meeting the requirements of surface accuracy was obtained. Then, the finite element analysis was carried out. The equivalence between the reduced scale model and the original size model was studied. Finally, the fabrication experiment of mirror scale model additive was carried out with AlSi10Mg aluminum alloy powder by selective laser melting (SLM) technology. The results indicate that the shape accuracy of the bare mirror in the vertical direction of the optical axis reaches peak value (PV) = 164.3 nm, root mean square (RMS) = 27.6 nm under the self weight load, the optimized mirror mass is 4.75 kg, and the lightweight rate reaches 85%, the high lightweight design of the mirror is realized according to the finite element analysis. After adopting additive manufacturing technology, the effect of highly restoring topology optimization mirror structure is achieved, which provides a new way for the efficient and rapid development of space mirror.

Key words: large aperture space mirror; shape accuracy; topological optimization; mathematical model; selective laser melting (SLM) technology; manufacturability constraint

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11873007, 12073028); 中央引导地方科技发展基金资助项目(202002035JC)

作者简介: 刘多(1996-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事空间光学遥感器结构优化设计方面的研究。E-mail: 2817594474@qq.com

通信联系人: 关英俊, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: guanyingjun@ccut.edu.cn

0 引言

空间光学反射镜属于航空航天领域的精密光学元件,有着批量小、性能高的特点。

空间光学技术的发展,对空间光学反射镜提出了高效、快速研制的新要求。传统的反射镜研制方式存在技术流程复杂、周期长以及成本高等问题,且加工复杂的光机结构相对比较困难^[1]。

随着增材制造技术的快速发展,国内外相关研究者将反射镜拓扑优化与增材制造技术相结合,对其制造方法开展了大量的研究工作,为复杂光机结构的快速设计、快速制造创造了条件。

PARK K S 等人^[2]较早地运用变密度法,对反射镜进行了轻量化设计;但由于受到传统加工方式的限制,采用该方法进行反射镜轻量化设计时,需要利用优化结果进行重新建模。胡瑞^[3]对 $\phi 2\ 000\ \text{mm}$ 口径的拓扑优化反射镜进行了研究,但其存在二次建模过程,延长了前期模型优化设计的时间。屈艳军^[4]以 $\phi 1\ 420\ \text{mm}$ 口径的反射镜为对象,对其进行了轻量化设计;相较于传统筋板式反射镜,虽然通过拓扑优化得到的反射镜质量更轻,但其面形精度 RMS 值仍有较大的提升空间。HILPERT E 等人^[5]通过激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术,打印了背部封闭式六边形蜂窝结构金属反射镜,其轻量化率达到63.5%;但研究发现,其轻量化率仍有进一步提高的可能。HILPERT E 等人^[6]以沃罗诺伊细胞(Voronoi cells)轻量化结构为基础,采用增材制造技术对反射镜进行加工,虽然使反射镜的刚度得到了保证,但其轻量化率却有所降低。HERZOG H 等人^[7]对通过增材制造获得的铝合金反射镜进行了抛光,抛光后获得了理想的表面粗糙度;但由于没有对其进行表面镀膜改性,使得该镜面无法满足可见光波段的指标要求。HOULLIER T 等人^[8]研究了 TMA 望远镜系统,并利用 3D 打印工艺技术制造出了该系统的一面反射镜;虽然该工艺技术的成形效果良好,但反射镜的杂散光量比较大。王冲等人^[9]通过增材制造技术制备了反射镜,增材制造技术的成形效果良好,但其二次建模过程又延长了反射镜的设计周期。

由此可见,采用增材制造技术制造反射镜现阶段仍处于研究试验阶段,且现阶段增材制造过程的反射镜结构轻量化程度较低。梁雄等人^[10]分析对比了主流软件的拓扑优化功能,并指明了面向增材制造的拓扑优化设计的发展方向。目前,国外相关的主流软件也处于发展阶段,其功能也有待于完善。

综上所述,将拓扑优化与增材制造技术相结合,并将其应用于空间光学反射镜的研制,是一个崭新的课题,符合航空航天领域的发展趋势。目前,在该相关研究方面已有一些学者进行了研究,可以为增材制造金属反射镜^[11]和 SiC 陶瓷复合材料反射镜提供借鉴^[12]。同时,上述相关学者还就增材制造技术在提升相机轻量化率和减少相机组件数量方面的优越性和可行性^[13]进行过研究。

笔者将拓扑优化与增材制造技术相结合,以口径 $\phi 500\ \text{mm}$ 的反射镜为对象,以满足面形精度要求为前提,对高轻量化率的反射镜结构进行优化设计与增材制造。

1 反射镜结构优化数学模型

1.1 拓扑优化理论

在实际工程问题中,拓扑优化方法与传统的设计有所不同,它从设计域、非设计域、约束函数以及目标函数等方面切入,根据优化算法获得最优结构。

由于优化后的结构相对复杂,且机械加工难度较高,因此研究人员引入了增材制造技术,以发挥其可制造复杂结构的特点,使高度还原反射镜的拓扑优化结果成为可能。

笔者采用在实际工程问题中较为成熟的变密度法。变密度法的原理是,基于有限元模型,以单元密度为研究对象,使设计域的单元密度连续分布在 0~1 之间,用 0 和 1 来代表单元的无或有,越接近 0 说明对整体结构贡献越小,则应去除该部分;越接近 1 说明对整体结构贡献越大,要将该部分保留。

1.2 优化模型建立

在反射镜的结构拓扑优化过程中,通常以柔度最小作为目标函数,使结构的刚度最大化,以此来等效于反射镜面形精度 RMS 值最小。

柔度计算公式如下:

$$C(X) = U^T F = U^T K U \quad (1)$$

式中: U —位移响应向量; F —载荷向量; K —反射镜镜面单元的刚度矩阵。

首先,笔者引入了镜面节点最大位移约束。虽然镜面节点最大位移不完全等同于 PV 值,但仍然可以在一定程度上表达 PV 值的变化趋势。

用镜面节点最大位移来代替 PV 值,可以节约计算成本,其计算式如下:

$$D_A - D_Z \leq 0 \quad (2)$$

式中: D_A —拓扑优化后反射镜镜面节点最大位移;

D_z —实心镜坯的镜面节点最大位移。

此外,笔者引入体积分数约束,其表达式如下:

$$G(X) = \sum_{i=0}^N \rho_i V_i + V_{\text{non-design}} - \alpha V^0 \leq 0 \quad (3)$$

式中: V^0 —实心反射镜初始体积; α —体积分数。

由于反射镜是单一材料,不是由多种材料混合而成,笔者选用体积分数作为其约束。

反射镜结构优化的数学模型如下:

$$\begin{cases} \text{Find } X = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T \\ \text{Min } C(X) = U^T F \\ \text{s. t. } KU = F \\ G(X) \leq 0 \\ D_A - D_z \leq 0 \\ 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

在优化模型中,笔者进一步引入了可制造性约束,以保证增材制造的稳定性;其中,先利用拔模约束,使镜面背部形成合理的加强筋;再通过最小成员尺寸约束,避免因加强筋过细而出现无法打印的情况;最后利用最大成员尺寸约束,使之在增材制造过程中不会产生材料堆积的现象。

2 反射镜初始结构设计

2.1 增材制造材料选取

对比常用的空间反射镜材料的性能参数,不难发现,铝合金材料加工工艺性更好、加工周期更短、材料成本更低,可以满足红外波段的使用需求。因此,铝合金以其独有的优势,在航空航天领域得到了广泛的应用。

由于此处采用增材制造技术,为了满足红外波段使用要求,笔者选用铝合金材料,开展反射镜拓扑优化结构设计(此处的设计要求反射镜在自重载荷下的面形精度为: $PV \leq \lambda/2$, $RMS \leq \lambda/10$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)^[14]),并利用增材制造技术,对反射镜背部复杂加强筋结构的可制造性和还原度验证展开研究工作。

2.2 初始结构设计

根据反射镜轻量化构型,可将反射镜分为背部开放式、背部封闭式及背部半封闭式 3 种结构。由于背部开放式结构轻量化程度较高,所以笔者选择优化该结构。

通过经验和相关反射镜结构设计理论,笔者确定的初始模型如图 1 所示。

反射镜初始模型主要参数初定:

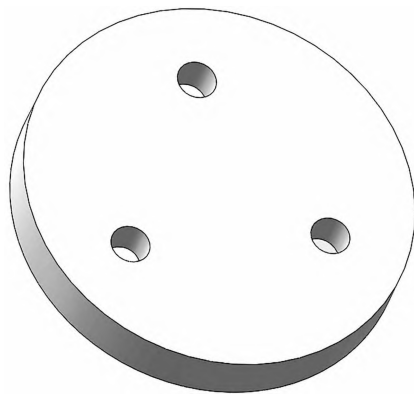


图 1 反射镜初始模型

反射镜的厚度为 68 mm, 镜面厚度为 3 mm, 支撑孔位半径为 150 mm, 支撑孔壁厚为 6 mm。

3 反射镜结构拓扑优化设计

3.1 镜体优化模型的建立

为了兼顾计算量和计算精度,根据结构对称性原则,笔者选取 1/6 反射镜结构建立反射镜优化模型,如图 2 所示。

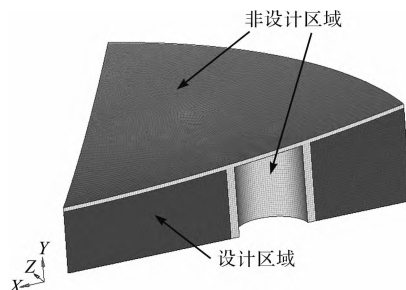
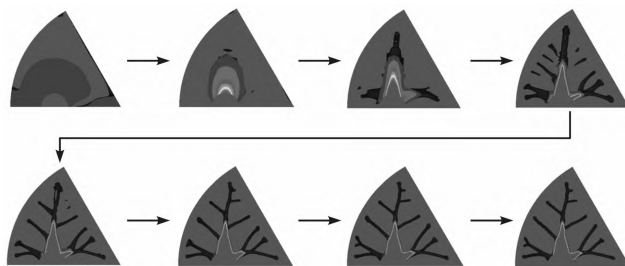


图 2 反射镜优化模型

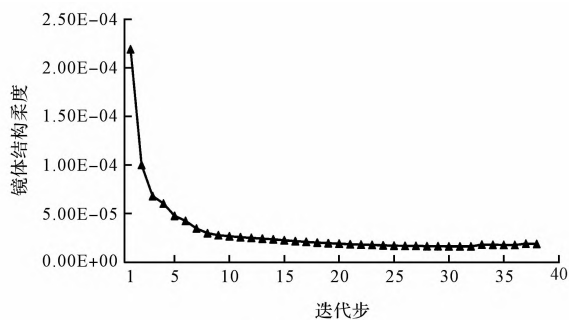
该模型共有 494 810 个单元, 509 548 个节点。其中, 镜面和支撑孔壁部分为非设计区域, 其他部分均为设计区域; 在反射镜优化模型的镜面中心, 笔者建立圆柱坐标系, 约束非设计区域对称边界的转动自由度, 以此来等效整个反射镜的优化结果。

3.2 优化结果分析

经过 38 步迭代, 目标函数曲线收敛, 其中间的迭代步与迭代曲线, 如图 3 所示。



(a) 中间迭代步



(b) 迭代曲线
图3 迭代过程

拓扑优化结果如图4所示。

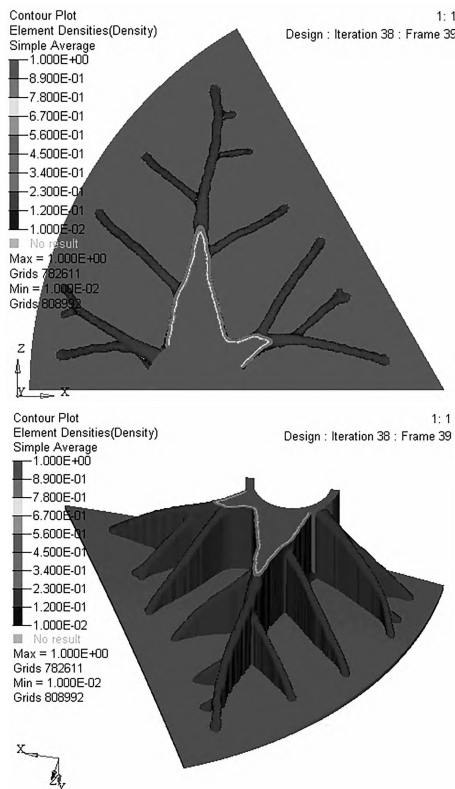


图4 拓扑优化结果

对图4中的拓扑优化结果进行分析可以发现,其拓扑结构呈发散的树枝状,沿着树枝发散方向材料呈变高度分布;与靠近支撑孔的筋相比,远离支撑孔的筋更细,高度更小。

通过 OS Smooth 提取密度阈值为 0.2 的 1/6,得到的反射镜实体模型如图5所示。

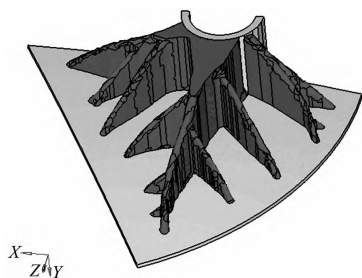


图5 1/6 反射镜实体模型

笔者建立的有限元模型如图6所示。

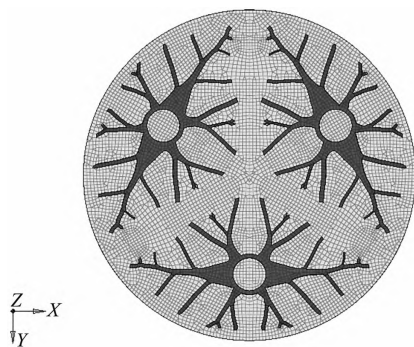


图6 反射镜有限元模型

为了进一步提高反射镜的轻量化率,笔者再次对反射镜进行轻量化处理,处理后的反射镜有限元模型如图7所示。

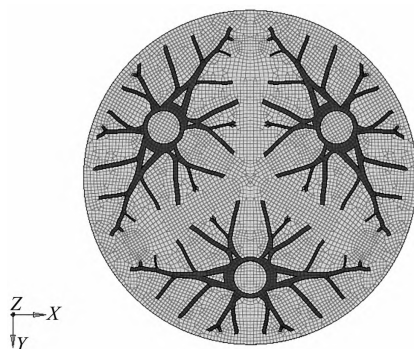


图7 再次轻量化处理的反射镜有限元模型

在此基础上,笔者对反射镜进行抗弯能力的提升处理。

提升抗弯能力后的反射镜模型如图8所示。

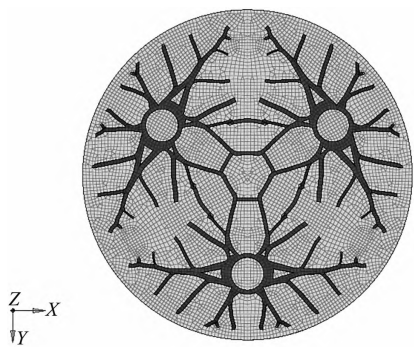


图8 提升抗弯能力的反射镜有限元模型

图8中,笔者在靠近镜体中心的位置补充高度为10 mm的加强筋,并将其与拓扑优化生成的加强筋进行连接,使背部加强筋具有更好的整体性。

3.3 有限元分析

笔者对反射镜进行了X、Y、Z三向自重面形精度分析。

面形精度计算结果如表1所示。

表 1 反射镜面形精度计算结果 (单位: nm)

	PV	RMS
X 向重力	58.6	7.8
Y 向重力	58.4	7.8
Z 向重力	164.3	27.6

从分析结果可见,在 X、Y、Z 三向自重载荷作用下,拓扑优化反射镜结构的面形精度均满足设计指标要求,且留有足够的设计余量。

对反射镜进行模态分析,其一阶模态如图 9 所示。

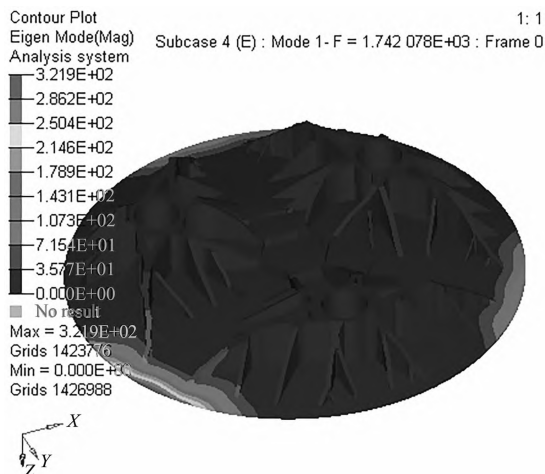


图 9 反射镜一阶模态

从上述分析结果可见:反射镜一阶模态表现良好;反射镜结构质量为 4.75 kg,轻量化率达到 85%,各项性能指标优良。

3.4 缩比模型与原模型固有频率等效计算

由于原尺寸模型 3D 打印费用高昂,暂时无法加工 1:1 模型。笔者进一步将图 8 中的结构缩放 0.32 倍,利用缩比模型对该结构的可制造性与成形质量进行说明。

判定缩比模型能否模拟原模型的重要依据是,模态分析中的固有频率是否能满足结构相似性^[15]。笔者利用相似准则理论,对缩比模型和原尺寸模型的固有频率进行推算,即原尺寸模型的固有频率为缩比模型固有频率的 0.32 倍。

此处,笔者以前三阶固有频率为例。

缩比模型与原模型的固有频率对比如表 2 所示。

表 2 缩比模型与原模型的固有频率对比

(单位: Hz)			
阶数	缩比模型 仿真值	原模型 预测值	原模型 仿真值
1	873.9	279.6	279.7
2	1 514.8	484.7	484.4
3	1 791.1	573.1	573.2

从表 2 数据中可以发现,仿真值与预测值基本吻合。

为进一步说明缩比模型与原模型的等效关系,笔者将缩比模型与其前三阶振型云图进行对比,以此来验证两个模型的各阶振型是否一致。

缩比模型与原模型的振型云图对比如表 3 所示。

表 3 缩比模型与原模型的振型云图对比

阶数	缩比模型	原模型
1		
2		
3		

由表 3 可知,前三阶固有频率振型一致。由此可见,缩比模型与原模型力学性能具有一定的等效性。

4 反射镜增材制造试验

为了验证增材制造技术在还原反射镜背部复杂拓扑优化加强筋结构方面的可行性,检验该技术的还原度,笔者采用选区激光熔化(SLM)方法^[16],以 Al-Si10Mg 铝合金粉末为材料,对拓扑优化反射镜结构进行 3D 打印。

笔者将原模型缩放后,导出 STL 格式,再将 STL 文件导入切片软件;依据标准设置激光功率、扫描速度、每层铺粉厚度等方面的参数,规划打印路径;之后,将其导入 SLM 打印机,进行增材制造。

首先通过铺料机构把金属粉末铺洒到工作台上,同时注入保护气体,防止粉末氧化,保证成形质量;激光束沿着扫描轨迹移动,熔融后的金属粉末冷却凝固,然后工作台降低一层的厚度,铺洒一层新的金属粉末。这样,反射镜镜坯被逐层构建。最后进行线切割去除支撑结构、清理表面残留粉末等后处理工作。

3D 打印过程与后处理过程如图 10 所示。

笔者采用 SLM 方法,历时 138 h 成功打印了反射镜镜坯。其中,3D 打印后,又进行了手动打磨清灰的后处理工作,清理了镜坯表面残留的粉末。

最终得到的反射镜镜坯如图 11 所示。

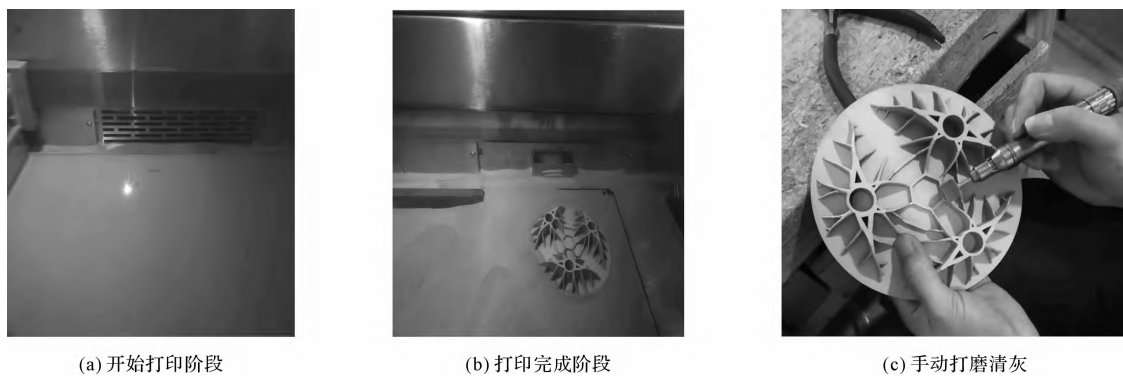


图 10 3D 打印与后处理

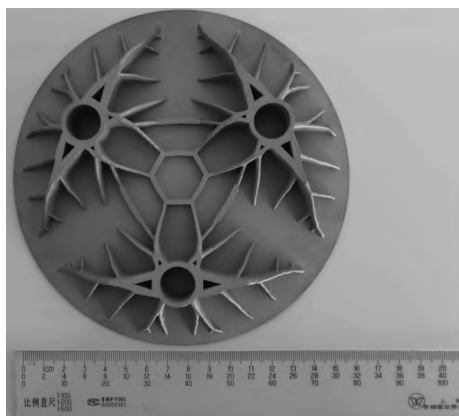


图 11 反射镜镜坯

由图 11 可以看出: 其表面呈细腻的磨砂状, 孔隙率低, 说明采用增材制造加工背部具有复杂加强筋结构的拓扑优化反射镜的方法是可行的, 且还原度较高、成形质量良好。

相较于传统的反射镜加工方式, 这种无模敏捷制造反射镜的方式提高了材料的利用率, 缩短了加工周期。

5 结束语

为了缩短大口径空间反射镜的研制周期并节约成本, 笔者将拓扑优化与增材制造技术相结合, 以满足反射镜面形精度要求为前提, 对高轻量化率的反射镜结构进行了拓扑优化设计与增材制造, 笔者首先研究了基于增材制造的优化反射镜, 在拓扑优化过程中引入了可制造性约束, 得到了反射镜的背部创新加强筋结构, 并进行了优化后的缩比模型的增材制造试验。

研究结论如下:

(1) 在 Z 向自重工况下 (最恶劣的工况), $\phi 500$ mm 口径空间光学反射镜的面形精度为 PV164.3 nm, RMS27.6 nm, 轻量化率达到 85%; 在满足面形精度要求的同时, 实现了反射镜的高轻量化率设计;

(2) 采用 SLM 方法打印了反射镜的缩比模型, 利

用增材制造技术实现了对拓扑优化后的空间反射镜的快速高效研制, 且其结构还原度高、加工周期短, 较传统反射镜的成形方法, 其技术更先进;

(3) 采用拓扑优化与增材制造技术相结合的技术路线, 突破了传统设计与制造方法的局限性, 在保留拓扑优化结构的同时, 可极大地缩短反射镜的研制周期, 并可节约成本。

在下一步的研究工作中, 笔者将会对反射镜的表面进行加工处理, 并采用试验的方式, 对其光学性能与力学性能进行验证。

参考文献 (References):

- [1] 韩 潇, 曹珺雯, 焦建超, 等. 面向空间光学遥感器的增材制造技术的发展与应用 [J]. 航天返回与遥感, 2021, 42 (1): 74-83.
- [2] PARK K S, LEE J H, YOUN S K. Lightweight mirror design method using topology optimization [J]. **Optical Engineering**, 2005, 44 (5): 1-6.
- [3] 胡 瑞. 基于拓扑优化的空间反射镜与柔性支撑结构设计方法 [D]. 大连: 大连理工大学运载工程与力学学部, 2017.
- [4] 屈艳军. 空间大口径反射镜拓扑优化设计及运动学支撑技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.
- [5] HILPERT E, HARTUNG J, RISSE S, et al. Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting [J]. **Precision Engineering**, 2018, 53 (53): 310-317.
- [6] HILPERT E, HARTUNG J, LUKOWICZ H, et al. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications [J]. **Optical Engineering**, 2019, 58 (9): 1-9.
- [7] HERZOG H, SEGAL J, SMITH J, et al. Optical Fabrication of Light Weighted 3D Printed Mirrors [C]//Optomechanical Engineering 2015. International Society for Optics and Photonics. San Diego, California, United States: Proceedings of SPIE, 2015, 9573: 1-15.

- [8] HOULLIER T, ROUSSELET N, SURREL Y, et al. Advanced Optical Freeform Substrates Fabricated by Ceramic 3D Printing and Controlled by Deflectometry [C]//Optical Fabrication, Testing, and Metrology VI. International Society for Optics and Photonics. Frankfurt, Germany: Proceedings of SPIE., 2018, 10692: 1-12.
- [9] 王 冲, 王强龙, 陈苒生, 等. 基于拓扑优化的金属反射镜设计及增材制造 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2021, 44(4): 13-18.
- [10] 梁 雄, 杜 平, 朱丽君, 等. 面向增材制造的拓扑优化设计模块分析 [J]. 制造技术与机床, 2021(5): 76-80.
- [11] EBERLE S, REUTLINGER A, CURZADD B, et al. Additive Manufacturing of an AlSi40 Mirror Coated with Electroless Nickel for Cryogenic Space Applications [C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2018. Chania, Greece: Proceedings of SPIE., 2019, 11180: 1-12.
- [12] ZHANG H, YANG Y, HU K, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of lightweight and high-strength Cf/SiC ceramics [J]. **Additive Manufacturing**, 2020, 34(14): 1-9.
- [13] 王 超, 张 宁, 王玉金, 等. 基于 3D 打印的空间光学相机结构设计 [J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(1): 85-90.
- [14] 谭淦年, 丁亚林, 许永森, 等. 增材制造金属反射镜的发展综述 [J]. 中国光学, 2020, 13(1): 75-86.
- [15] 韩 璐. 某大型舰用燃气轮机支撑结构冲击动力学模型研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学机械工程学院, 2019.
- [16] 樊思想, 刘小欣, 吴欢欢. 激光选区熔化增材制造技术的发展 [J]. 机械制造, 2021, 59(8): 45-49.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

刘 多, 江显含, 董得义, 等. 基于增材制造的空间反射镜拓扑优化设计 [J]. 机电工程, 2022, 39(7): 1010-1016.

LIU Duo, JIANG Yu-han, DONG De-yi, et al. Topological optimization design of space mirror based on additive manufacturing [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(7): 1010-1016.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1009 页)

参考文献 (References):

- [1] 丁 震. 气垫式带式输送机在煤矿(选煤厂)输煤系统的应用分析 [J]. 中国煤炭, 2017, 43(6): 89-92.
- [2] 曾 兵, 陈炎临, 罗宇东. 悬浮带式输送机在电厂运煤系统中的应用探讨 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 115-119.
- [3] YAN F, RINOSHIKA A. An Experimental study of horizontal self-excited pneumatic conveying [J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2012, 134(4): 1-7.
- [4] PENG B Y, YAN J H, CAO S. Design & Calculation of Air Chamber of Air CushionBelt Conveyor [J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2014, 473(5): 3-6.
- [5] GUO S, LIU J, ZHIREN L I, et al. Experimental research on air film formation behavior of air cushion belt conveyor with stable load [J]. 中国科学: 技术科学英文版, 2013(6): 1424-1434.
- [6] LI J F, ZHANG S L. Optimization of Groove-hole distribution with equidistant and unequal diameter on air-cushion belt conveyor [J]. **Advanced Materials Research**, 2008, 44(46): 635-642.
- [7] AMROMIN E L, METCALF B, KARAFIATH G. Synergy of resistance reduction effects for a ship with bottom air cavity [J]. **ASME J Fluids Eng**, 2011, 133(2): 1-7.
- [8] CADAFALECH J, PEREZ-SEGARRA C D, CONSUL R, et al. Verification of finite volume computations on steady-state fluid flow and heat transfer [J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2002, 124(1): 11-21.
- [9] 庞明军, 张锁龙. 气垫带式输送机气垫压力场研究与数值模拟 [J]. 煤矿机械, 2006, 27(1): 59-62.
- [10] 郭 盛, 邹超平, 刘 建. 悬浮式物料输送系统的动态激励特性 [J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(6): 57-63.
- [11] COLE R E, NEU W L. Validation of a commercial fluid structure interaction solver with applications to air cushion vehicle flexible seals [J]. **Ocean Engineering**, 2019, 189(29): 1-16.
- [12] 康 静. 低速重载气垫悬浮支承系统设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机械动力工程学院, 2020.
- [13] 彭晓霞. 气垫输送机气垫参数量化研究 [J]. 机械研究与应用, 2010, 23(6): 4-6.
- [14] 李剑锋, 张锁龙, 周寒秋. 气垫带式输送机气垫流场实验研究 [J]. 煤矿机械, 2009, 30(9): 71-73.
- [15] 刘大昌. 高速重载气垫带式输送机气膜形成机理及其实现 [D]. 北京: 北京交通大学机械工程学院, 2015.
- [16] 谭 蔚, 张天保, 郭 凯. 发夹式换热器管束流致振动数值模拟研究 [J]. 压力容器, 2020, 37(3): 15-20, 49.
- [17] ZHAO Xin-tong, KANG Jing, LEI Tian-qi, et al. Research on air cushion suspension support system with low speed and heavy load [J]. **Journal of Physics**, 2020, 1549(5): 1-11.
- [18] 彭 枫, 李志鹏, 张程钊, 等. 空气阀浮球吹堵特性分析 [J]. 流体机械, 2022, 50(2): 97-104.

[编辑: 李 辉]