

· 综合评述 ·

增材制造空间反射镜结构拓扑优化技术发展综述

孙宇欣 樊延超 董得义 李超 姜肖楠

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

摘要: 通过对空间反射镜拓扑优化及增材制造技术当前发展现状趋势的调研,总结了当前反射镜拓扑优化及增材制造的较为成熟的技术。针对空间反射镜拓扑优化与增材制造工艺制造相结合存在的问题进行阐释,对拓扑优化反射镜的增材制造工艺模拟和技术路线进行详细介绍,以保证拓扑优化设计的空间反射镜具有可制造性并在进行增材制造后达到良好的性能。通过对当前增材制造空间反射镜结构拓扑优化发展的总结,指出当前增材制造空间反射镜结构拓扑优化存在问题及未来发展趋势,以期对我国拓扑优化与增材制造相结合制造空间反射镜的研制具有借鉴意义。

关键词: 增材制造; 拓扑优化设计; 空间反射镜; 轻量化反射镜

中图分类号: TH74 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.07.001

A Review of space mirror topology optimization technology based on additive manufacturing

SUN Yuxin, FAN Yanchao, DONG Deyi, LI Chao, JIANG Xiaonan

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China

Abstract: Through the investigation of the current development trend of space mirror topology optimization and additive manufacturing technology, the current relatively mature technologies of mirror topology optimization and additive manufacturing are summarized. The problems existing in the combination of topology optimization and additive manufacturing process manufacturing of space mirrors are explained, and the additive manufacturing process simulation and technical route of topology optimization mirrors are introduced in detail to ensure that the space mirrors designed with topology optimization are manufacturable properties and achieve good performance after additive manufacturing. By summarizing the development of the topology optimization of the current additive manufacturing space mirror structure, the existing problems and future development trends of the current additive manufacturing space mirror structure topology optimization are pointed out, with a view to have reference significance for the development of space mirrors manufactured by combining topology optimization and additive manufacturing in my country.

Key words: additive manufacturing; topological optimization; space mirror; lightweight mirror

1 引言

随着航空航天天文等领域的快速发展,反射镜作为影响空间望远镜光学性能的重要元件,其轻量化、高性能的结构设计及制造一直受到广泛关注^[1-5]。

拓扑优化设计(Topology Optimization)是一种新兴的设计方法,可设计出性能优异的结构^[6-7],但其设计结果通常较为复杂,传统的机械加工技术难以制造。通过传统工艺对反射镜进行轻量化加工处理,在一定程度上限制了结构的轻量化设计。增材制造(Additive Manufacturing, AM)不用于传统加工的减材或等材制造,它通过添加材料的方式可以快速地成型复杂形状结构,具有材料利用率高、可实现复杂结构零件一体化成形的优点^[8-9],为拓扑优化设计反射镜结构的制造提供了一个有效技术途径,并为光学组件的创新设计提供了可能。

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11873007)

作者简介: 孙宇欣(1995-),女,硕士,研究实习员,主要从事空间光学遥感器载荷机械工程分析研究。E-mail: sunyuxin@ciomp.ac.cn

通信作者: 樊延超(1984-),男,硕士,副教授,主要研究方向为空间光学遥感器载荷总体设计及光机结构结构设计。E-mail: fanyanchao@ciomp.ac.cn

<http://www.laserjournal.cn>

将增材制造工艺的制造约束与拓扑优化设计相结合,使用拓扑优化方法进行可制造的反射镜结构设计构型、利用增材制造对其设计结构进行加工,是将增材制造与拓扑优化结合的重点。增材制造与拓扑优化两者结合,大大提高设计自由度,并且可以实现更复杂的空间反射镜轻量化结构,能够创造更大的制造能力,提升空间反射镜轻量化率和面形精度,改变空间反射镜设计及制造的格局,提升光学遥感能力。

本文首先对拓扑优化技术和增材制造技术进行说明,并对增材制造空间反射镜反射镜的拓扑优化技术进行调研,针对反射镜理论拓扑优化构型和实际增材制造中关键的工艺数值模拟进行详细说明,梳理了拓扑优化反射镜增材制造技术路线,总结增材制造拓扑优化反射镜的当前问题以及未来发展趋势,以期能对增材制造拓扑优化空间反射镜的研制提供借鉴意义。

2 增材制造空间反射镜拓扑优化技术发展现状及趋势

增材制造和拓扑优化作为发展的新型技术,近年来各自都获得了丰硕的研究成果^[10-11],但将二者结合应用于空间反射镜的研制是新的发展方向,如图1(a)所示,具有广阔的应用前景。

2.1 拓扑优化与增材制造

拓扑优化是通过在设计域内,设置约束条件,进行空间内材料的分配布局,以实现在设计域及约束条件下得到最优结构,如图1(b)所示。

对结构的优化设计,可以按照拓扑优化-形状优化-尺寸优化依次进行,分别对构型、形状、尺寸进行优化,最终获得设计的最优结构。因此,拓扑优化是设计过程中非常关键的一步,具有十分重大的作用。得益于计算机计算能力的提升以及有限元方法的成熟,在结构设计方面,进行拓扑设计的设计周期大大缩短。

与增材制造相结合的拓扑优化设计主要关注点为可设计优异性能结构的设计方法和考虑可制造性工艺约束的拓扑设计^[12-13]。

2.1.1 拓扑优化设计理论方法

2.1.1.1 常见的拓扑优化设计方法

拓扑优化中心思想一般是通过将设计域离散成有限单元,对单元进行删减来进行整体结构的设计。对于连续体的拓扑优化,应用比较普遍的优化方法有均匀化法、变密度法、水平集、渐进结构优化、相场法、独立连续映射法等^[14]。

均匀化方法是最早提出的拓扑优化方法,由

Bendsoe^[15]提出可对连续体进行优化。其中心思想是采用带孔的微结构作为基本单元,通过单元的孔洞大小来判断基本单元的增删,但由于优化计算时设计变量过多,导致计算量巨大并复杂,并且优化结果容易产生大量孔隙,导致结构不易加工,因此在工程上应用较少。

变密度法是Mlejnek^[16]等在均匀化法基础上创建出的算法,中心思想是将材料弹性模量与微结构的密度建立函数关系,在设计域上通过计算获得每个单元的密度值,以得到结构的最优拓扑构型。变密度法相较于均匀化法计算效率大大提升。Bendsoe^[17]等人此变密度法基础上发明了固体各向同性材料惩罚法(Solid Isotropic Material with Penalization SIMP),是将每个离散单元的密度当作优化变量,该法应用广泛,操作比较简单,能够快速收敛得到优化结果。通过对密度的中间值进行分流,得到离散0-1的结果,使得连续变量优化问题的最优解趋近于原离散变量优化,材料模型示意如图1(c)所示。

水平集方法解决高维问题的数学理论由Osher和Sethian^[18]提出,随后Allaire^[19]等人针对水平集方法在结构拓扑优化进行研究。在拓扑优化方面水平集法因其无灰色单元和棋盘格网格等优点在载荷力学等研究问题上应用具有优势。水平集法可以获得拓扑结构光顺边界上具有显著效果^[20-23]。

渐进结构优化法^[24-25](Evolutionary Structural Optimization, ESO)原理是将设计域内无用及作用小的单元淘汰删除,其剩余的单元组成拓扑优化的结构。该方法迭代格式简单,在应力约束等方面具有一定应用。但ESO只能删除单元无法增加单元,容易造成误删,使得优化效率变低。为了解决单元在增加和删除双向优化问题,Querin^[26]等提出了双向渐进结构优化方法(BESO),提高了优化效率和优化能力。

相场法^[27-30]应用于拓扑优化设计中可以描述多相材料过渡中的中间区域。其中心思想是采用显式计算对设计域求解以描述结构的拓扑构型,其中相场函数的值为1表示存在材料,0代表清除材料,在0-1之间的区域是材料扩散界面。这种计算方式中间设计变量少,求解更加直观。

独立连续映射法^[31]应用于拓扑优化设计中,其中心思想是采用独立于单元物理特性的拓扑变量,采用显式计算,先将离散的拓扑变量由过滤函数映射成连续变量,再进行迭代计算求解,演算将拓扑变量反演为离散变量,根据独立拓扑变量的大小进行单元增减来进行结构拓扑优化设计。

2.1.1.2 与拓扑优化结合的其他设计方法

为了进一步提升结构优化设计的能力,可以将拓

拓扑优化法与其他优化方法相结合,如晶格优化法(又称镶嵌多面体优化)和沃罗诺伊(Voronoi)细胞优化法。

(a) 晶格优化法

晶格优化的基础是寻找可以互相镶嵌结合而空间内不产生缝隙的基础多面体单元,如菱形十二面体和截断八面体,这些单元进行镶嵌拼接可以获得最大的体积-表面积比。同时在晶格中不同的单个多面体可以赋予不同的密度分级进行结构进一步优化^[32]。

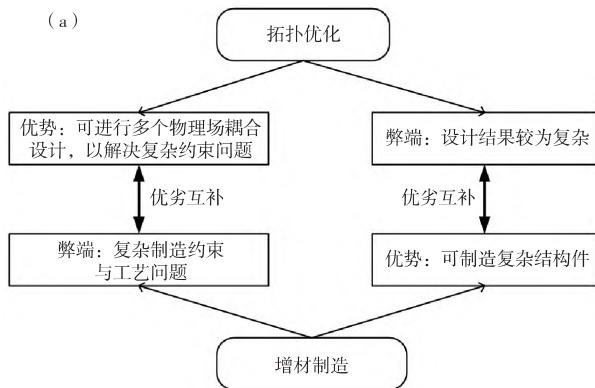
Ajit Panesar^[33]等人通过对多种晶格结构与拓扑优化结合,并考虑实际增材制造的处理问题得出:将规则晶格单元结构和拓扑优化结合所设计出的结构相较于规则晶格优化的结构其比刚度更高。综合当前结构设计难度与增材制造的可制造性,比较不同晶格结构的仿真所需时间及内存、支撑结构要求、加工时间、设计制造差异,其中,分级晶格的拓扑优化结构更稳健,但不规则晶格单元设计的结构制造处理难度方面远远高于规则晶格-拓扑优化,不同晶格结构设计的优缺点比较可见表1。

(b) 沃罗诺伊(Voronoi)细胞优化法

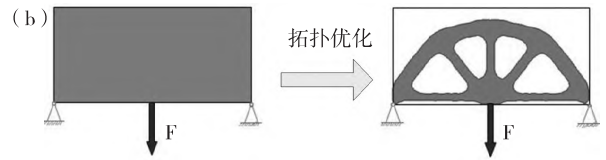
Voronoi细胞结构是一种相邻种子细胞中心连线垂直平分单元边界线的结构,可以分为二维Voronoi细胞结构和三维Voronoi细胞结构,如图2所示^[34]。利用Voronoi细胞优化与拓扑优化结合设计,可以获得更优质的结构构型^[35]。

表1 不同晶格优化设计策略比较^[33]

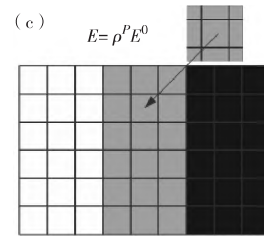
晶格种类	最优性-预期	弹性性能	支撑结构需求	加工工作	设计与制造之间差异性
	加载				
实体晶格	最大	稍微	最多	最小	最小
相交晶格	较大	较大	较多	较小	稍微
分级晶格	稍微	最大	稍微	稍微	较小
缩放晶格	较小	较小	较小	较大	较大
均匀晶格	最小	最小	最小	最大	最大



(a) 拓扑优化和增材制造的特点

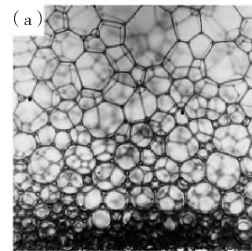


(b) 拓扑优化原理示意图^[12]

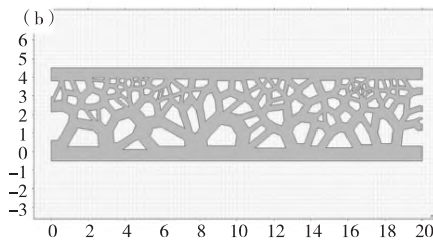


(c) SIMP 法的材料模型^[17]

图1 拓扑优化设计与增材制造的融合



(a) 三维泡沫型的 Voronoi 细胞结构



(b) 二维 Voronoi 细胞结构(越靠近反射镜镜面其细胞单元排列越细密)

图2 采用 Voronoi 细胞的拓扑优化结构^[34]

2.1.2 拓扑优化设计的可制造性约束

拓扑优化通常是结构初始的概念设计,为了所设计的拓扑优化结构能够进行后续增材制造工艺,避免出现无法制造的情况,在拓扑优化设计时,需考虑增材制造工艺的可制造性约束,方可获得符合制造要求且性能优异的构型设计^[36]。可制造性约束主要括:

(a) 尺寸约束控制

考虑到后续增材制造打印过程中机器的生产精度及生产能力,需要针对结构单元的最小尺寸和最大尺寸进行约束控制,如图3(a)所示,若不考虑尺寸控制,则出现的结构毛细部分,对于结构性能提升无法起到作用且难以制造,当前在尺寸约束方面以及建立了比较全面的控制方法^[37-39]。

(b) 无封闭空腔约束:

在进行基于增材制造的拓扑优化结构设计时,需

要进行单连通约束,保证结构内部不能含有封闭的孔洞,避免打印后空腔内部材料无法清除。李取浩^[40]在拓扑优化设计中引入虚拟温度比拟的结构连通性等效方法,建立与结构拓扑相关内容的虚拟温度场模型,以实体设定为高导热材料,孔洞区域设定为绝热材料,采用虚拟温度场的最大温度值约束近似结构的连通性约束,提升拓扑优化结构的可制造性,如图3(b)所示。

(c) 悬垂约束

一般在增材制造中,当打印制造方向与结构表面所成角度为 40° – 50° 之间时需要增加打印的支撑结构^[41]。因此,在进行拓扑设计时应避免结构产生大悬挑结构,以防止支撑结构不易在加工后去除,建立打印支撑结构较少的结构设计甚至是具有自支撑设计的结构也是目前研究人员追求基于拓扑优化设计的一个重点^[42–47],如图3(c)所示。

(d) 其他约束:

为便后续实际的打印制造,需避免出现影响表面精度的打印层间出现阶梯面,避免出现造成应力集中的细尖端结构等。

2.1.3 增材制造方法

增材制造技术是按照数字模型采用材料逐层累加的方式进行零件制造打印的方法,以其无需模具、加工周期短、可打印制造复杂构型的结构等优点在各领域的零件制造生产中受到广泛关注与应用^[48]。增材制造技术按常见能量源可以分为:激光、电子束、电弧增材制造等^[49–52],如图4所示。

(1) 以激光为热源的常用增材制造技术:

立体光固化成型(Stereo Lithography Apparatus, SLA)、连续液面制造(Continuous Liquid Interface Production, CLIP)、激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、直接金属激光烧结(Direct Metal Laser Sintering, DMLS)、激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)、叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)、数字光处理(Digital Light Processing, DLP)、激光近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS);

(2) 以电子束为热源的常用增材制造技术:

电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)、电子束自由形状制造(Electron Beam Free Form Fabrication, EBF3);

(3) 以电弧为热源的增材制造技术:

电弧增材制造(Wire Arc Additive Manufacture, WAAM);

(4) 其他增材制造技术:

熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling,

FDM)、三维喷印(Three Dimensional Printing, 3DP)技术、聚合物喷射(Polymer Jetting, PolyJet)等。

其中用于金属应用最广泛的是增材制造方法是SLM法^[53–54],针对SiC增材制备应用比广泛的是SLS法^[55–57]。

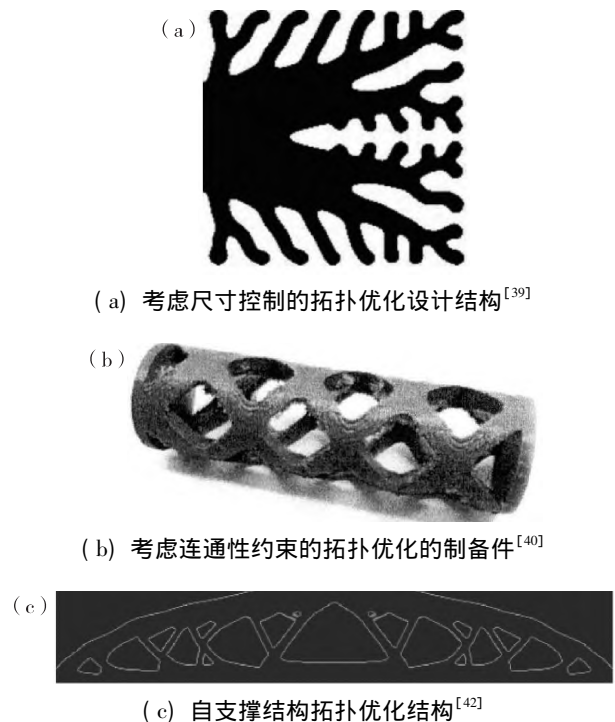


图3 考虑可制造约束的拓扑优化结构

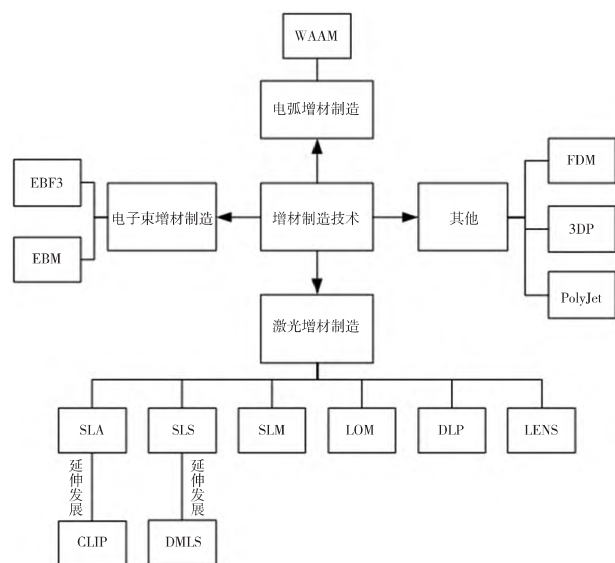


图4 增材制造技术分类

2.2 拓扑优化与增材制造在反射镜方面应用

2.2.1 拓扑优化设计在空间反射镜的应用

空间反射镜作为空间光学遥感载荷的核心部件,质量轻及高面形精度是重要评价指标,直接关系到遥感器的工作性能以及所需发射成本。采用拓扑优化的方式对反射镜结构进行优化,可以设计出与传统设

计相比性能更优异的轻量化反射镜构型。

Park^[58]等对空间反射镜进行了考虑自重和抛光压力的拓扑优化研究。选取带有中心孔的反射镜为研究对象,以RMS作为优化目标函数,对仅考虑自重和考虑自重和抛光压力同时影响的情况进行拓扑优化,结果如图5所示。

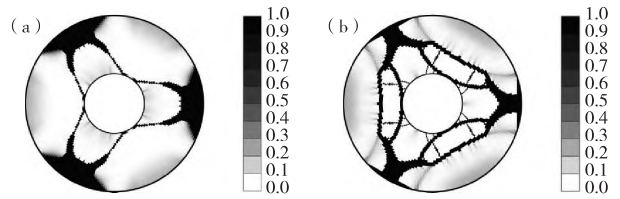
沙巍^[59]等人针对直径500 mm圆反射镜,依据变密度法建立SIMP模型,完成了拓扑优化设计,如图6所示。反射镜重量为8.7 kg,轻量化率为75.83%,自重载荷作用下镜面面形变化为4.12 nm,面密度约为44.3 kg/m²。

针对背部开放式的反射镜,胡瑞^[60]采用以筋板式基结构为基本单元对2 m圆形反射镜进行拓扑优化设计,采用SIMP优化法,在传统轻量化反射镜基础上,以面形误差作为约束函数,质量最小作为目标函数,最终建立了工艺制造性好并且光学性能优异的拓扑优化构型,质量减重了25.3%,面形误差PV值降低了23.1%,RMS值降低了13.3%。

筋板式基结构法的数学模型较简单,在优化过程中易得到收敛结果,但无法实现背部支撑筋的布局 and 高度大小设计,可采用三维实体单元进行背部开放式反射镜拓扑优化可以解决这一问题^[61]。在单元组中引入含参数的Heaviside函数表示筋板的高度,以获得含拔模约束的显式拓扑优化模型,可以对反射镜背部支撑筋的高度大小与位置分布进行优化,示意图如图8(a)所示。针对2 m的大口径圆形反射镜,采用此种方法,采用镜面柔顺度最小作为目标函数,间接实现反射镜RMS最小的目标,最终获得具有轻量化的反射拓扑优化结构结构。优化后的面密度约为82.2 kg/m²,光轴水平和竖直时对应的面形误差RMS值分别为12.55 nm和10.24 nm,图8(b)所示。对非圆形离轴反射镜来说三维实体单元拓扑优化也同样可以适用,也可获得提高了镜面质量的轻量化反射镜结构,如图8(c)所示。

不同于背部开放式的反射镜,背部封闭反射镜在拓扑优化设计时需要考虑连通性约束,以保证实际增材制造时方便去除残余粉末。在数字模型中进入挤压约束,如图9所示,可保证在夹层内部实现竖直筋板并且避免内部出现孔洞,大大提升了拓扑优化背部封闭式反射镜的可制造性。对于背部封闭的反射镜进行的拓扑优化,选择将除镜面、后背板和支撑孔的镜体的其余部分作为设计域,引入连通性约束和挤压约束,以质量最小为目标进行背部封闭式反射镜拓扑优化,如图9(b)所示,对拓扑优化结构进行可制造性改造,得到最终构型,如图9(c)所示,背部封闭反射镜相比开放式反射镜轻量化程度更具有优势。^[62]

施胤成^[63]等为更好地针对反射镜面形进行优化,采用SIMP法,在有限元模型中,以Zernike多项式的系数为目标函数,通过对反射镜支撑结构的拓扑优化提升组件整体的性能。屈艳军^[64-65]等以口径1420 mm反射镜为研究对象,分别采用传统方法、基于均一密度约束以及挤压约束和模式组约束的拓扑优化设计方法完成了反射镜轻量化设计,如图10所示。优化后的反射镜重量为126.02 kg,自重载荷作用下镜面面形变化为3.4 nm,轻量化率为76.4%,面密度约为79.6 kg/m²。



(a) 仅考虑自重的反射镜材料分布 (b) 同时考虑自重和抛光压力下反射镜材料分布

图5 基于自重和抛光压力的反射镜拓扑优化设计^[58]

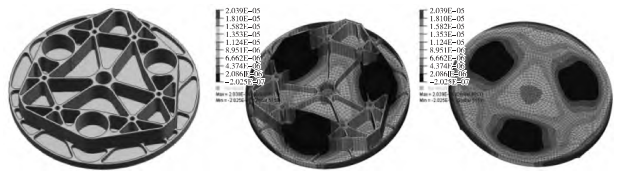
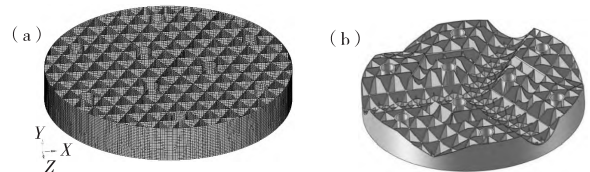
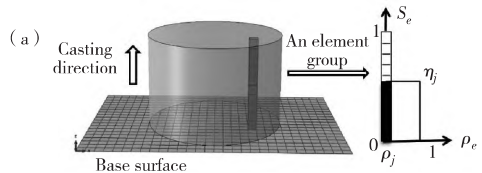


图6 $\Phi 500$ mm 反射镜拓扑优化构型及面形变化^[59]

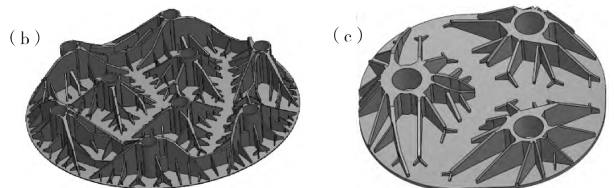


(a) 初始设计域 (b) 拓扑优化后的反射镜几何结果

图7 采用2D单元的反射镜拓扑优化^[60]

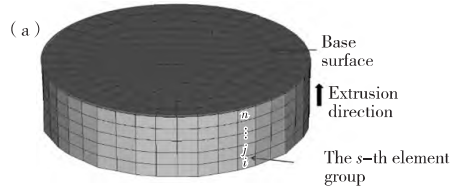


(a) 引入 Heaviside 函数的单元密度示意图

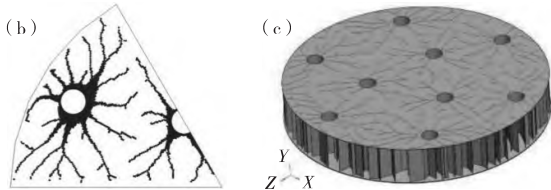


(b) 圆形反射镜拓扑优化结果 (c) 离轴反射镜拓扑优化结果

图8 采用三维实体单元的反射镜拓扑优化^[61]

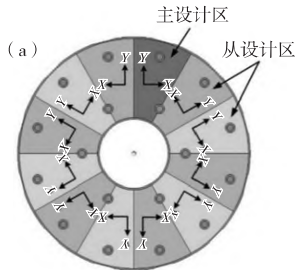


(a) 挤压约束参数化示意图

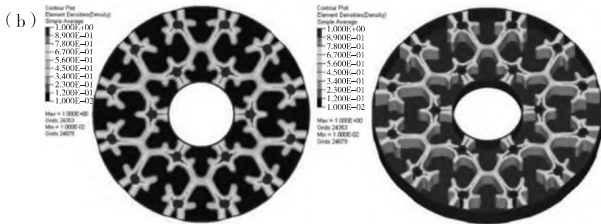


(b) 反射镜夹层筋板拓扑优化构型布局 (c) 可制造性修改后的完整背部封闭式反射镜模型

图9 背部封闭式反射镜拓扑优化^[62]



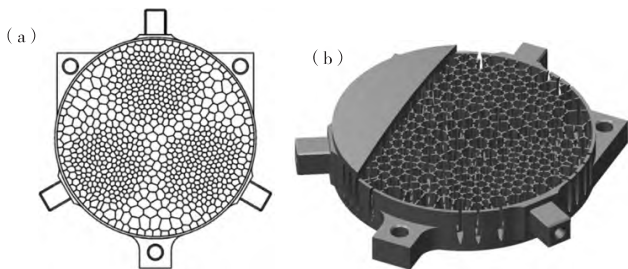
(a) 设计域及约束示意图



(b) 拓扑优化设计结果

图10 直径1420 mm 反射镜拓扑优化过程^[64]

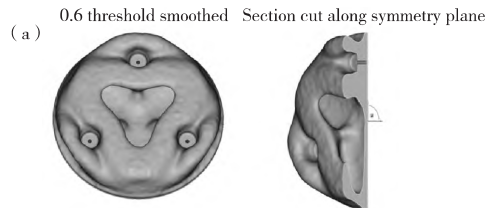
对反射镜拓扑优化的进一步发展中, Hilpert E^[66]等人将拓扑优化和 Voronoi 细胞优化法相结合, 以最小能量原理为约束对结构进行有限元分析, 对 Voronoi 细胞进行拓扑优化排列, 从而对 AlSi40 合金镜结构形式进行进一步结构优化, 如图 11 所示。



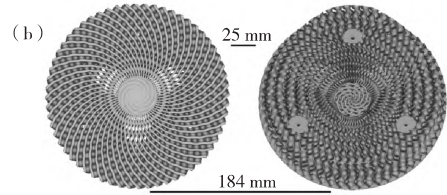
(a) 反射镜优化后的 Voronoi 细胞排列截面 (b) 采用拓扑优化和 Voronoi 细胞优化相结合的反射镜结构

图11 最小能量原理拓扑优化的反射镜^[66]

Horvath N^[67]等人采用先采用拓扑优化对直径为 184 mm, 厚度为 36.8 mm 的反射镜进行形状优化, 再通过晶格填充优化进行进一步减重, 在进行晶格优化排列时需注意 AM 过程中粉末的开放路径, 以避免打印过程中产生被困粉末, 经过拓扑优化-晶格优化设计的反射镜面密度降低 24%, 并且比传统反射镜具有更高的比刚度, 如图 12 所示。



(a) 拓扑优化生成的反射镜



(b) 对拓扑优化后的反射镜进一步进行晶格优化

图12 空间反射镜拓扑优化-晶格优化结合设计^[67]

Eberle S^[68]等人分别采用 Ansys 和 TopOpt 软件以最小化柔度为目标函数进行光学反射镜拓扑优化, 以保证反射镜能够有更小的波前误差和自重变形。图 13(b) 为利用 ANSYS 软件, 设计域采用固体材料的设计优化结果, 但得到的反射镜模型背部结构含有比较大的空腔且含有大量夹层支撑结构, 在打印结束时难以去除, 不便于实际制备。针对设计构型进行进一步约束, 图 13(c) 为利用 TopOpt 软件, 采用晶格材料进行设计域填充并使用固体材料进行反射镜表面封闭的反射镜构型, 图 13(d) 为晶格-固体材料混合的多材料模型进行拓扑优化, 拓扑优化结果不仅可满足各项光学性能指标, 并相较于传统设计的基线反射镜可以减重 35% 左右。

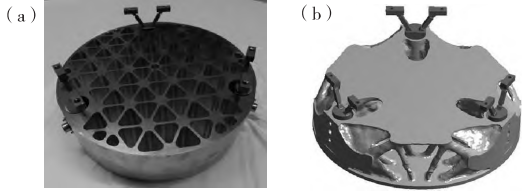
2.2.2 增材制造在空间反射镜中的应用

可进行增材制造的空间反射镜分为金属反射镜和非金属反射镜, 常用材料包括铝合金、碳化硅等^[69-71]。针对不同材料的空间反射镜适用的增材制造方法总结如图 14 所示。

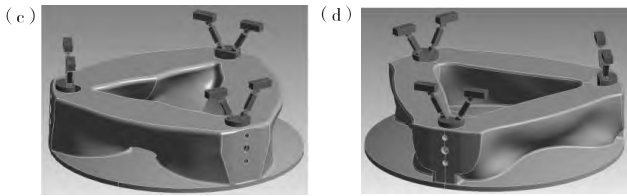
2.2.2.1 金属反射镜增材制造

Herzog H^[72]等人以反射镜最大刚度、质量最小为目标函数对反射镜进行拓扑优化设计, 最终分别设计出背部结构为顶部安装和背部安装的拓扑优化反射镜。采用 DMLS 技术对采用顶部安装背部结构的 AlSi₁₀Mg 反射镜进行增材打印制造(如图 15 所

示) 采用 EBM 技术对采用侧面安装背部结构形式的 Ti_6Al_4V 反射镜进行增材打印制造(如图 15 所示),并对两种反射镜进行研磨抛光等后处理操作,反射镜最终面形精度均小于 $\lambda/20$ RMS。



(a) 传统设计的反射镜设计 (b) 完全由固体材料填充的拓扑优化构型



(c) 晶格材料填充设计域,固体材料表面封闭的构型 (d) 采用晶格-固体材料混合的多材料模型

图 13 基于增材制造的 $AlSi_{40}$ 反射镜拓扑优化构型^[68]

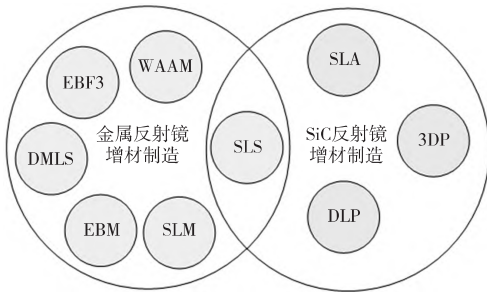
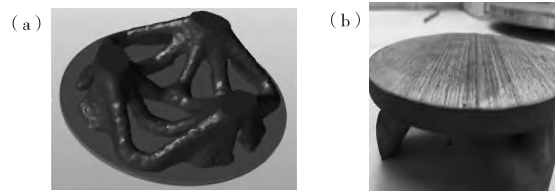


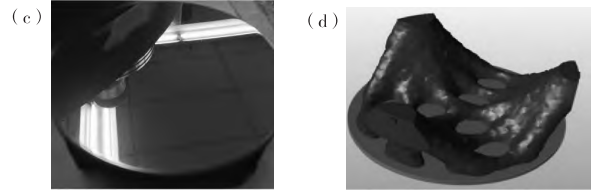
图 14 适用于空间反射镜的增材制造方法

Hilpert E^[73] 等人采用 SLM 技术制造了口径为 86 mm 的蜂窝夹层轻量化结构形式的 $AlSi_{12}$ 反射镜,经过后处理的反射镜光学性能达到要求,其 PV 值 109 nm, RMS 值 12.5 nm, 经过两年保存后其 RMS 值仅降低 0.1 nm, 验证了 SLM 技术在空间反射镜制造方面的适用性。

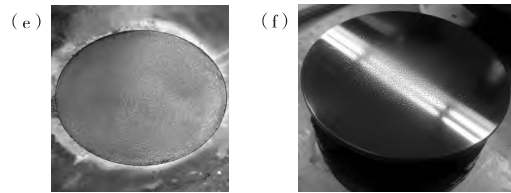
Atkins. C^[74-76] 等人利用增材制造技术制造出 $\Phi 40$ mm 的夹层轻量化结构 $AlSi_{10}Mg$ 反射镜,随后以此为初始原型镜,如图 17(a) 所示,采用有限元分析方法,以五面体单元为基本单元对夹层反射镜进行进一步的拓扑优化设计,最终设计结果如图 17(b) 所示,通过 DMLS 技术并经过后处理最终的反射镜如图 17(c) 所示,值得注意的是在增材制造过程中为更便捷处理未固化的材料,该团队优化设计了打印底板如图 17(d) 所示。结构表面拓扑优化设计反射镜相较于普通反射镜减重约 18%,同时 PV 数值和 RMS 数值均有一定程度降低,但表面粗糙度产生退化。



(a) 基于顶部安装的拓扑优化形式 (b) DMLS 制备的 $AlSi_{10}Mg$ 反射镜

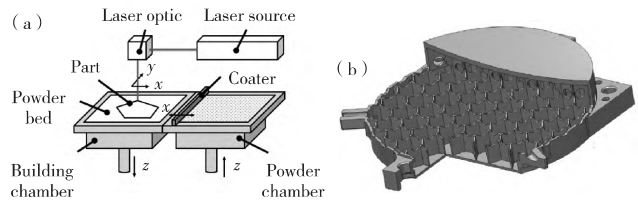


(c) 最终完成的 $AlSi_{10}Mg$ 反射镜 (d) 基于侧面安装的拓扑优化形式

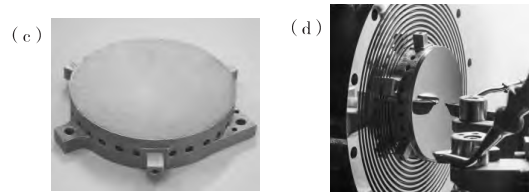


(e) EBM 制备的 Ti_6Al_4V 反射镜 (f) 最终完成的 Ti_6Al_4V 反射镜

图 15 $AlSi_{10}Mg$ 和 Ti_6Al_4V 反射镜拓扑优化以及增材制造^[72]



(a) SLM 制造原理图 (b) 反射镜的三维模型

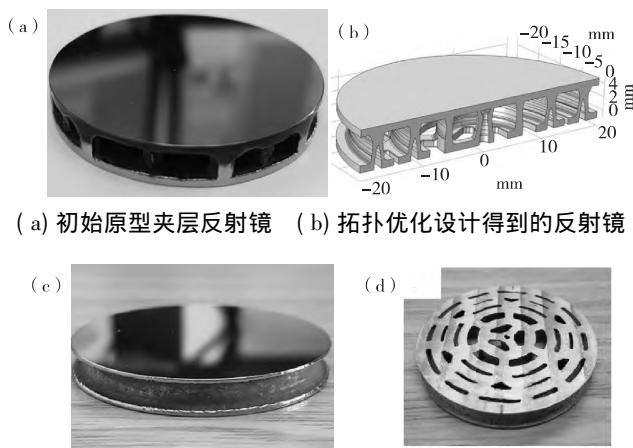


(c) 经过 SLM 增材制造的反射镜镜坯 (d) 反射镜金刚石车削处理

图 16 增材制造的 $AlSi_{12}$ 反射镜^[73]

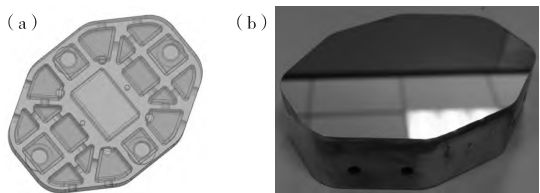
采用增材制造的加工工艺可以使拓扑优化的反射镜有更大的设计自由度,其轻量化结构更灵活^[77]。谭淞年^[78-79] 提出了一种金属反射镜增材制造的工艺流程,采用增材制造对反射镜预制后,需要进行致密化和热处理来消除孔隙及残余应力,紧接着需要进行表面改性、抛光等以获得优异的光学性能。如图 20(a) 所示,并采用 SLM 对应用于红外光学系统中的 $AlSi_{10}Mg$ 快摆镜(67 mm×50 mm) 进行制备,如图 18(b) (c) 所示,反射镜表面质量可满足 $PV < 0.4\lambda$, RMS

$<\lambda/10$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) ,并对其进行热试验,验证了表面质量具有稳定性。王冲^[80]等人采用 SIMP 法,选取体积份数为约束,一阶模态和结构柔度加权和为拓扑优化目标函数,拓扑优化设计出背部半封闭支撑结构的反射镜结构,如图 19(a) 所示,值得注意的是为了进行增材制造,需要修整最优拓扑反射镜结构表面不光滑,因此对结构进行可制造改进,最终使用 Al-Si₁₀Mg 粉末采用 SLM 方法,以对拓扑优化所设计的直径 $\Phi 210\text{ mm}$ 反射镜进行制造,打印结果如图 19(b) 所示。



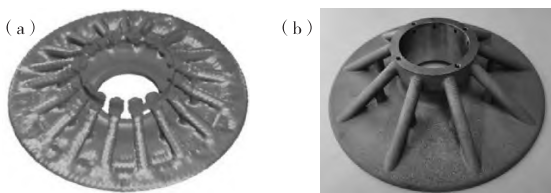
(a) 初始原型夹层反射镜 (b) 拓扑优化设计得到的反射镜
(c) 经过后处理的增材制造拓扑优化设计反射镜 (d) 用于增材制造的反射镜基板

图 17 采用 DMLS 方法制备的拓扑优化反射镜^[74]



(a) 快摆镜 CAD 模型 (b) 加工后的增材制造反射镜

图 18 AlSi₁₀Mg 反射镜增材制造^[78]



(a) 反射镜最优拓扑结构构型 (b) 最终 AlSi10Mg 空间反射镜成品

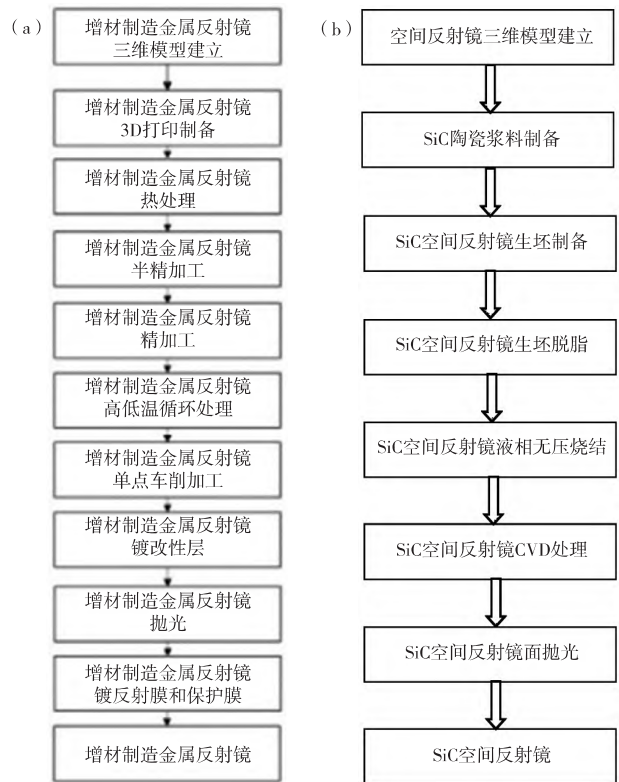
图 19 空间金属反射镜拓扑优化及增材制造

2.2.2.2 SiC 反射镜增材制造

非金属空间反射镜增材制造方面,由于 SiC 具有机械强度高、密度低、抗冲击性能强、化学性能稳定等特点,是空间反射镜的热门原材料。传统加工 SiC 反射镜加工周期时间难度大、加工费用昂贵,采用拓扑优化和增材制造方式对 SiC 反射镜镜坯进行快速成形,

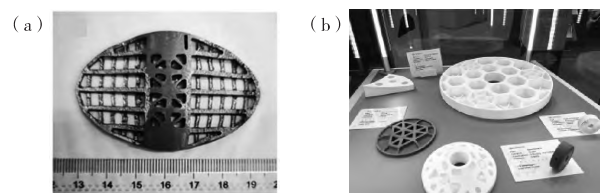
进行烧结和光学加工,对提升反射镜轻量化率和提高面形精度有积极意义,有助于我国光学遥感的发展。

何汝杰^[81-82]等人提出了碳化硅陶瓷空间反射镜的 DLP 增材制造工艺流程,如图 20(a) 所示,并通过该技术成功制备出 SiC 空间反射镜,其后又采用 SLA 方法制备出碳化硅陶瓷,拓展了增材制造反射镜的可能性。张恒^[83]等人采用液态硅渗透和 DLP 技术相结合的方法制备了 Cf / SiC 陶瓷复合材料,对 SiC 反射镜进行预制,经过碳化硅渗透进行致密化处理,如图 21(a) 所示。法国 3D Ceram 公司提出采用 SLS 技术以实现碳化硅反射镜的镜胚制造,制造后的反射镜成品如图 21(b) 所示。Horvath N^[84]等人针对增材制造的 SiC 预制体,对 CVI 工艺与 CVD 工艺进行对比,CVI 工艺的比磨削能小于 CVD,但受增材制造产生的残余孔隙影响,经过 CVI 后的反结构表面光洁度收到影响。



(a) 金属反射镜增材制造工艺流程^[79] (b) SiC 反射镜的增材制造工艺流程^[81]

图 20 空间反射镜增材制造工艺流程



(a) 采用 DLP 制造的反射镜^[83] (b) SLS 制造的反射镜镜坯^[85]

图 21 增材制造的 SiC 反射镜

3 拓扑优化反射镜增材制造工艺模拟及制备技术路线

3.1 拓扑优化反射增材制造工艺数值模拟

反射镜结构拓扑优化设计需要考虑反射造性约束,以便于顺利实现结构的增材制造,如何实现成型过程中的工艺仿真,尤其成型过程中的温度场、应力场等关键物理场的演化规律预示仿真,可以为反射镜的拓扑优化设计提供约束条件,是实现增材制造反射镜拓扑优化的研究关键。

增材制造的工艺制造过程是一个多物理场影响的过程,为了更好的模拟打印制造过程,仅对优化模型进行单一物理场分析与实际制造过程偏差较大,因此在进行增材制造工艺模拟仿真时需要考虑多物理场耦合作用,可以提高模型优化的准确性。采用仿真软件对增材制造加工过程进行模拟分析,主要是针对温度场及应力场进行仿真分析。其中力学模拟方面主要是查看结构的残余应力与应变对结构件的影响,热分析方面主要是查看结构在打印制造过程中随着热源的变化,温度急速上升与下降过程中结构件的性能变化。因此需开展拓扑优化的反射镜增材制造工艺预示仿真方法研究,对揭示增材反射镜制备关键工艺过程中温度场、支撑约束等边界条件对反射镜性能的影响规律,以确保增材制造出优异性能拓扑优化反射镜具有重要意义。

随着计算机领域的快速发展,当前进行增材制造模拟的仿真商业软件主要有 ANSYS Additive, Workbench Additive, Abaqus, Simufact Welding, Simufact Additive 等,均有增材制造分析的模块集成。在进行反射镜的工艺仿真时为了提高计算效率,若反射镜模型为对称结构,可以采取 1/6-1/2 的模型进行拓扑优化及仿真设计,但要注意边界条件的设定,以保证部分模型的计算结果准确率更高^[86]。对于工艺仿真分析的前处理如图 22(a) 所示,增材制造的实际运用增材制造模拟仿真分析采用生死单元法,当热源未作用单元时将单元处于 DEAD 阶段,此时材料属性为 0,当热源作用到该单元时,再将单元激活,此时单元的材料属性转换成所设定的相应数值,可以更真实的模拟打印过程。

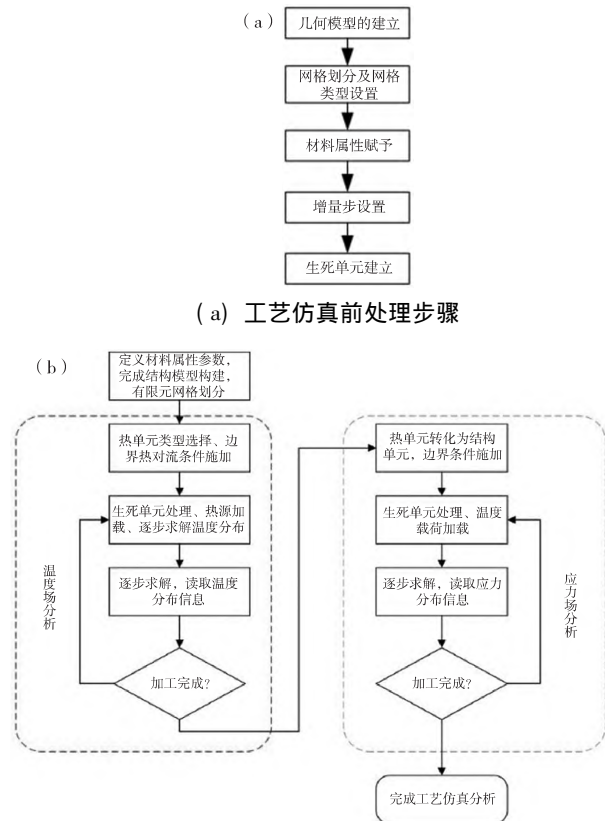
在增材制造过程的热-力分析中,耦合形式是一种弱耦合,热分析对应力场分析产生较大影响,但应力场对温度场的影响很微小。因此,对于拓扑优化的反射镜模型,先单独考虑温度场影响,得到热分析下的结果,再将热分析结果导入结构中,在此基础上分析应力场影响^[87-90]。针对增材制造的工艺仿真分析,尤其是温度场及后续应力场分析,热源的选择类

型将会直接影响仿真结果的准确度。应用较为广泛的热源类型有:高斯热源模型、双椭圆热源类型、半球热源模型、集中点热源模型以及组合热源模型等,当前使用较多的是高斯热源,表达式如下:

$$q(r) = \frac{2Ap}{\pi R} e^{-\frac{2r^2}{R^2}} \quad (1)$$

其中 $q(r)$ 表示分析点上的能量强度, p 为打印热源的功率, A 为打印材料的热吸收率, r 为分析点距热源中心点的距离, R 为热源的作用半径。

增材制造成型过程仿真模拟分析流程如图 22 所示。开展拓扑优化反射镜增材制造物理性能预示仿真研究,可以对增材反射镜制备关键工艺过程中温度场、应力场、支撑约束等边界条件对拓扑优化反射镜性能的影响规律进行分析,可以反射镜的拓扑优化的可制造性约束进行迭代更新以及通过拓扑优化对增材制造仿真中的结构变形等进行反向补偿。结构设计-仿真分析-增材制造打印过程中不同软件之间的多次数据转换处理问题也是空间反射镜从设计到制造的研究重点。针对结构数据转换问题,刘书田^[91]等人提出一种采用自适应 B 样条曲线拟合获得平整结构边界的 CAD 模型,将拓扑优化结果自动转换 STL 文件以适用于增材制造加工的方法,以保证了模型在不同软件转换之间的数据完整性。



(b) 工艺仿真热-力耦合分析^[87]

图 22 工艺仿真分析流程图

3.2 拓扑优化反射镜增材制造制备技术路线

针对 SiC 反射镜及金属基反射镜结合国内外关于拓扑优化反射镜的研究进展,归纳总结了拓扑优化反射镜增材制造制备技术路线,拓扑优化空间反射镜的增材制造主要分为拓扑优化-工艺模拟-增材制造打印三个阶段,同时在反射镜增材制造过程中,应注意打印过程中的孔隙率和残余应力问题,避免产生翘曲、断裂影响制备的反射镜精度,在预制后及时进行致密化和热处理以及改性、抛光、镀膜,以保证拓扑优化反射镜的性能,制备的空间反射镜如图 23 所示,具体流程如图 24 所示。

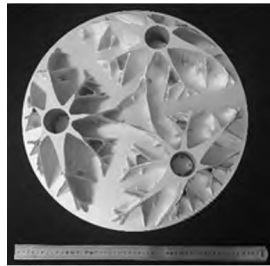


图 23 采用增材制造制备的拓扑优化反射镜

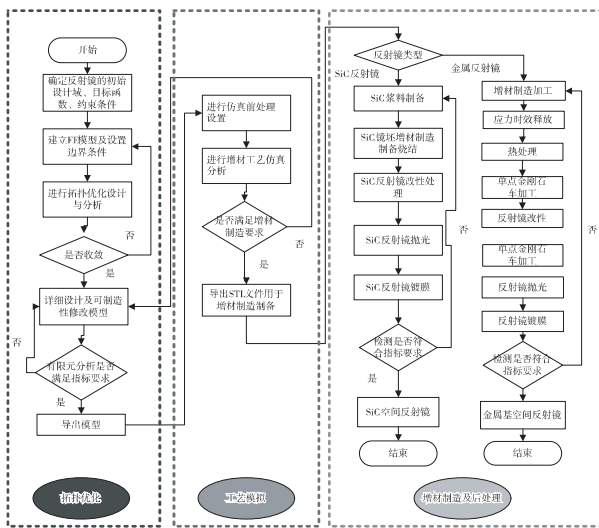


图 24 空间反射镜拓扑优化增材制造制备技术路线

4 增材制造拓扑优化空间反射镜当前问题及未来发展趋势

4.1 当前面临的问题

4.1.1 反射镜最佳构型问题

拓扑优化设计的反射镜结构作为初始设计,以及考虑当前增材制造技术的能力,采用拓扑优化的反射镜结构可能存在不适合增材制造的局部结构,需要对初始结构进行可制造性的改造,改造后的结构有可能存在破坏拓扑最佳构型问题。拓扑优化设计后考虑现有增材制造工艺,可能会对其拓扑优化设计构型进行工艺化的二次设计,可能会影响拓扑的最优设计。

4.1.2 反射镜组件拓扑优化问题

当前关于空间反射镜的拓扑优化研究仅基于单独的反射镜,对反射镜组的其余组件关注比较少,在反射镜组件拓扑优化方面,还未达到最优性。

4.1.3 SiC 空间反射镜增材制造

相较于金属拓扑优化反射镜的增材制造的研究比较成熟, SiC 拓扑优化反射镜的增材制造发展较晚,为进一步提升 SiC 空间反射镜的性能,对增材制造原料的要求更加严格,提升适用于 SiC 增材制造加工工艺的不同原料状态的精细程度,可制备更加精密的 SiC 反射镜。

4.2 未来发展趋势

针对当前增材制造反射镜拓扑优化的研究,为增加采用 AM 制造的拓扑优化反射镜的实际工程应用性,提升空间反射镜的性能,主要有如下方面:

面向增材制造反射镜开展多尺度、多元轻量化结构、多材料梯度布局拓扑优化设计方法研究,在反射镜拓扑优化中考虑多材料、多尺度的优化模型,在进行模型优化中结合拓扑优化和其他优化方法,基于宏观和微观尺度联合对反射镜优化,对空间反射镜轻量化和光学性能至关重要。

针对当前增材制造的工艺模拟,在实际计算中引入的仅是理论的制造缺陷模型,因此需要开展增材制造试验对成形机理进一步研究获取真实的缺陷模型引入拓扑优化中,便于建立更完整的增材制造约束数据库,对获得可制造性更好的拓扑优化空间反射镜有重要意义。

提升增材制造原料精度、增材制造打印质量,并且提高应用于增材制造反射镜的后处理工艺,可以提升增材制造的反射镜光学及机械性能,具有广泛的应用前景。

随着光学遥感领域的发展,所需空间反射镜口径增大,开展增材制造反射镜组件拓扑优化设计方法研究,可以大大提升反射镜组件整体的性能,实现功能结构一体化的拓扑设计,提高反射镜组件的空间适应性,为研制大口径、低面密度的增材制造空间光学反射镜奠定基础,也是未来研究重点。

5 结论

光学遥感领域的快速发展,反射镜作为直接参与成像的光学元件,面形精度直接影响成像质量,其轻量化对节约运载燃料有重要作用。相较于传统反射镜减重设计及传统加工,采用拓扑优化-增材制造结合方式具有提升轻量化率接近设计极限,提高光学性能,缩短加工周期等优点。针对反射镜的拓扑优化

需要考虑可制造性约束并且晶格优化法和 Voronoi 细胞优化法相结合,在宏观微观多层面对反射镜进行优化。在拓扑优化反射镜的增材制造方面,针对适用于金属反射镜和 SiC 反射镜的制备方法进行论述。

为减少反射镜制备的试错次数,本文对拓扑优化反射镜的增材制造工艺模拟进行重点介绍,并对拓扑优化空间反射镜增材制造技术路线进行详细说明,针对当前反射镜拓扑优化和增材制造面临的问题并对未来提升反射镜性能的重点方面进行阐释,以期对我国空间反射镜及空间遥感领域提供借鉴意义。

参考文献

- [1] Wu J. Design of High-lightweight Space Mirror Component Based on Automatic Optimization [C]// 2020 International Conference on Internet of Things, Artificial Intelligence and Mechanical Automation, IoTAIMA 2020, July 10, 2020 – July 12, 2020. Hangzhou, China: Institute of Physics Publishing, 2020.
- [2] Shao M, Zhang L, Jia X. Optomechanical integrated optimization of a lightweight mirror for space cameras [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(3): 539–546.
- [3] Yu Q, Meng X, Li A, Chen J, Zhang Z, et al. Ultra-precision processing and detection technology for space lightweight mirror [C]// 2021 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO 2021, August 2, 2021 – August 6, 2021. Xi'an, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021: 315–318.
- [4] Butova DV, Tolstoba ND, Fleysher AG, Starichenkova VD. Options of lightweight mirror design and mounting such mirrors in telescope [C]// Optical Design and Engineering VII 2018, May 14, 2018 – May 17, 2018. Frankfurt, Germany: SPIE, 2018: OPTATEC; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [5] Qu H, Wei J, Dong D, Hu H, Guan Y. Lightweight structural design of rectangular space mirror assembly [J]. *Hongwai yu Jiguang Gongcheng/Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6).
- [6] White DA, Voronin A. A computational study of symmetry and well-posedness of structural topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59(3): 759–766.
- [7] Rong J, Tang G, Yang Z, Fu J. A THREE-DIMENSION STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION DESIGN METHOD [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2005, 26(3): 289–296.
- [8] DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92(112–224).
- [9] Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Muelhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing [J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(15): 10212–10290.
- [10] Allaire G, Jouve F, Toader AM. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 194(1): 363–393.
- [11] Deaton JD, Grandhi RV. A survey of structural and multi-disciplinary continuum topology optimization: post 2000 [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, 49(1): 1–38.
- [12] Liu S, Li Q, Liu J, Chen W, Zhang Y. A Realization Method for Transforming a Topology Optimization Design into Additive Manufacturing Structures [J]. *Engineering*, 2018, 4(2): 277–285.
- [13] Zhu J, Zhou H, Wang C, Zhou L, Zhang W. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020.
- [14] Guest JK, Prevost JH, Belytschko T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(2): 238–254.
- [15] Bendsoe MP, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, 71(2): 197–224.
- [16] Mlejnek HP. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 1993, 106(1): 1–10.
- [17] Bendsoe MP, Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69(9): 635–654.
- [18] Osher S, Sethian JAJ. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. *SIAM Review*, 1988, 30(1): 12–49.
- [19] Lenz D, Stollmann PJ. A level-set method for shape optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2002.
- [20] Nguyen SH, Sohn D, Kim H-G. A novel hr-adaptive mesh refinement scheme for stress-constrained shape and topology optimization using level-set-based trimmed meshes [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(2).
- [21] Lin Y, Zhu W, Li J, Ke Y. Structural topology optimization using a level set method with finite difference updating scheme [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 63(4): 1839–1852.
- [22] Hyun J, Kim HA. Level-set topology optimization for effective control of transient conductive heat response using ei-

- genvalue [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176(
- [23] Deng H, To AC. A parametric level set method for topology optimization based on deep neural network [J]. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2021, 143(9).
- [24] Xie HYM. A further review of ESO type methods for topology optimization [J]. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 2010.
- [25] Yi MX, Huang X, Zhi HZ, Ji WT, Jian HR. Recent advances in evolutionary structural optimization (ESO) and bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(4): 462-471.
- [26] Querin OM, Steven GP, Xie YM. Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm [J]. 1998, 15(8): 1031-1048.
- [27] Harald G, Paul H, Patrik K. Shape and topology optimization involving the eigenvalues of an elastic structure: A multi-phase-field approach [J]. *Advances in Nonlinear Analysis*, 2021, 11(1).
- [28] Gao J, Song B, Mao Z. Combination of the phase field method and BESO method for topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61(3).
- [29] Auricchio F, Bonetti E, Carraturo M, Hömberg D, Reali A, et al. A phase-field-based graded-material topology optimization with stress constraint [J]. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2020, 30(08).
- [30] Carraturo M, Rocca E, Bonetti E, Hömberg D, Reali A, et al. Graded-material design based on phase-field and topology optimization [J]. *Computational Mechanics*, 2019, 64(6).
- [31] Sui YK, Ye HL, Du JZ. DEVELOPMENT OF STRUCTURAL TOPOLOGICAL OPTIMIZATION AND IMMINENCY OF ITS MODEL TRANSFORMATION INTO INDEPENDENT LEVEL [J]. *Engineering Mechanics*, 2005.
- [32] Atkins C, Brzozowski W, Dobson N, Milanova M, Nistea IT. Lightweighting design optimisation for additively manufactured mirrors [C]// *Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems II*. 2019.
- [33] Apa B, Maa C, Dh A, Ia A. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19(81-94).
- [34] Atkins C, Feldman C, Brooks D, Watson S, Cochrane W, et al. Topological design of lightweight additively manufactured mirrors for space [C]// *Conference on Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*. Austin, TX, 2018.
- [35] Mici J, Rothenberg B, Brisson E, Wicks S, Stubbs DM. Optomechanical performance of 3D-printed mirrors with embedded cooling channels and substructures [C]// *Optomechanical Engineering 2015*, August 10, 2015 - August 12, 2015. San Diego, CA, United States: SPIE, 2015: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [36] Peng X, Sui Y. Lightweight topology optimization with consideration of the fail-safe design principle for continuum structures [J]. *Engineering Optimization*, 2021, 53(1): 32-48.
- [37] Sigmund O. Morphology-based black and white filters for topology optimization [J]. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 2007, 33(4): 401-424.
- [38] Bai W, Li Q-H, Chen W-J, Liu S-T. A novel projection based method for imposing maximum length scale in topology optimization [J]. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 2017, 34(9): 18-26.
- [39] Shutian L, Quhao L, Wenjiong C, Yongcun Z. Combination of Topology Optimization and Additive Manufacturing: an Integration Method of Structural Design and Manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 10.16080/j.issn1671-833x.2017.10.02610): 26-31.
- [40] Li Q, Chen W, Liu S, Tong L. Structural topology optimization considering connectivity constraint [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 54(4): 971-984.
- [41] Wang D, Yang Y, Yi Z, Su X. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(9-12): 1471-1484.
- [42] Liu J, Gaynor AT, Chen S, Kang Z, Suresh K, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 57(6): 2457-2483.
- [43] Walton D, Moztarzadeh H. Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation [C]// *27th CIRP Design Conference 2017*, May 10, 2017 - May 12, 2017. Cranfield, United Kingdom: Elsevier B.V., 2017: 205-210.
- [44] Zhou Y, Lu H, Ren Q, Li Y. Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree [J]. *Graphical Models*, 2019, 101(8-16).
- [45] Gaynor AT, Guest JK. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 54(5): 1157-1172.
- [46] Zhang W, Zhou L. Topology optimization of self-supporting structures with polygon features for additive manufacturing

- [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 334(56–78).
- [47] Luo Y, Sigmund O, Li Q, Liu S. Additive manufacturing oriented topology optimization of structures with self-supported enclosed voids [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 372(
- [48] Qiang Y, Zhongliang L, Fuxiang H, Dichen L. Research on Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 10. 16080/j. issn1671–833x. 2016. 12. 02612): 26–31.
- [49] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 110(442–458).
- [50] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143(172–196).
- [51] Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Advincula RC. Mechanical characterization of 3D–printed polymers [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20(44–67).
- [52] Bhuvanesh Kumar M, Sathiya P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 159(
- [53] Zhang J, Song B, Wei Q, Bourell D, Shi Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, 35(2): 270–284.
- [54] Pasang T, Tavlovich B, Yannay O, Jakson B, Fry M, et al. Directionally – dependent mechanical properties of Ti6Al4V manufactured by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM) [J]. *Materials*, 2021, 14(13) .
- [55] Xu T–T, Cheng S, Jin L–Z, Zhang K, Zeng T. High–temperature flexural strength of SiC ceramics prepared by additive manufacturing [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2020, 17(2): 438–448.
- [56] Tao Z, Yi–kai Z, Kun Z, Si–wen Y. Fabrication and Mechanical Property of SiC/SiC Composites by Selective Laser Sintering Technology Combined with Precursor Impregnation and Pyrolysis Process [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2020, 25(03): 163–168.
- [57] Zhu W, Fu H, Xu Z, Liu R, Jiang P, et al. Fabrication and characterization of carbon fiber reinforced SiC ceramic matrix composites based on 3D printing technology [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(14): 4604–4613.
- [58] Park KS, Lee JH, Youn SK. Lightweight mirror design method using topology optimization [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 053002.
- [59] 沙巍,陈长征,张星祥,许艳军,任建岳. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计 [J]. *光电工程*, 2009, 36(04): 35–39.
- [60] Liu S–T, Hu R, Zhou P, Dong Z–G, Kang R–K. Topologic optimization for configuration design of web–skin–type ground structure based large–aperture space mirror [J]. *Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1803–1810.
- [61] Liu S, Hu R, Li Q, Zhou P, Dong Z, et al. Topology optimization–based lightweight primary mirror design of a large–aperture space telescope [J]. 2014, 53(35): 8318–8325.
- [62] Hu R, Chen W, Li Q, Liu S, Zhou P, et al. Design Optimization Method for Additive Manufacturing of the Primary Mirror of a Large–Aperture Space Telescope [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(3) .
- [63] Shi Y–C, Yan H–D, Gong P, Liu T, Wang Q–L, et al. Topology Optimization Design Method for Supporting Structures of Optical Reflective Mirrors Based on Zernike Coefficient Optimization Model Zernike [J]. *Guangzi Xuebao/Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6) .
- [64] Qu Y, Jiang Y, Feng L, Li X, Liu B, et al. Lightweight Design of Multi–Objective Topology for a Large–Aperture Space Mirror [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11) .
- [65] Qu Y, Wang W, Liu B, Li X. Topology optimization design of space rectangular mirror [C]// *International Symposium on Advanced Optical Design and Manufacturing Technologies and International Symposium on Astronomical Telescope and Instrumentation*, May 9, 2016 – May 11, 2016. Beijing, China: SPIE, 2016: China High–Tech Industrialization Association (CHIA); Chinese Society for Optical Engineering (CSOE) .
- [66] Hilpert E, Hartung J, Von Lukowicz H, Herffurth T, Heidler N. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(9) .
- [67] Horvath N, Davies M. Advancing lightweight mirror design: a paradigm shift in mirror preforms by utilizing design for additive manufacturing [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(3): 681–696.
- [68] Eberle S, Reutlinger A, Curzadd B, Mueller M, Riede M, et al. Additive manufacturing of an ALSI40 mirror coated with electroless nickel for cryogenic space applications [C]// *International Conference on Space Optics, ICSO 2018*, October 9, 2018 – October 12, 2018. Chania, Greece: SPIE, 2018.
- [69] Zhang W, Zhang G, Guo C–h, Fan T–y, Xu C–x. Fiber–reinforced silicon carbide and its applications in optical mir–

- rors [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 695-704.
- [70] Wang Y, Wu X, Xu L, Ding J, Ma Z, et al. Fabrication of a lightweight Al alloy mirror through 3D printing and replication methods [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 8096-8101.
- [71] Sweeney M, Acreman M, Vettese T, Myatt R, Thompson M. Application and testing of additive manufacturing for mirrors and precision structures [C]// *Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems II*, August 10, 2015 - August 13, 2015. San Diego, CA, United states: SPIE, 2015: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [72] Herzog H, Segal J, Smith J, Bates R, Calis J, et al. Optical fabrication of lightweighted 3D printed mirrors [C]// *Optomechanical Engineering 2015*, August 10, 2015 - August 12, 2015. San Diego, CA, United states: SPIE, 2015: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [73] Hilpert E, Hartung J, Risse S, Eberhardt R, Tunnermann A. Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting [J]. *Precision Engineering*, 2018, 53(310-317).
- [74] Atkins C, Feldman C, Brooks D, Watson S, Cochrane W, et al. Topological design of lightweight additively manufactured mirrors for space [C]// *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III 2018*, June 10, 2018 - June 15, 2018. Austin, TX, United states: SPIE, 2018: 4D Technology; Andor Technology, Ltd.; Astronomical Consultants and Equipment, Inc.; et al.; Giant Magellan Telescope; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [75] Atkins C, Feldman C, Brooks D, Watson S, Cochrane W, et al. Additive manufactured X-ray optics for astronomy [C]// *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy VIII 2017*, August 8, 2017 - August 10, 2017. San Diego, CA, United states: SPIE, 2017: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [76] Atkins C, Brzozowski W, Dobson N, Milanova M, Todd S, et al. Lightweighting design optimisation for additively manufactured mirrors [C]// *Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems II 2019*, August 12, 2019 - August 15, 2019. San Diego, CA, United states: SPIE, 2019: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- [77] Fan Y, Dong D, Li C, Sun Y, Zhang Z, et al. Research and Experimental Verification on Topology - Optimization Design Method of Space Mirror Based on Additive-Manufacturing Technology [J]. *Machines*, 2021, 9(12).
- [78] 谭淦年, 许永森. 金属反射镜及其制造方法: 中国, CN111624691B [P]. 2021-08-20.
- [79] Tan S, Ding Y, Xu Y, Shi L. Design and fabrication of additively manufactured aluminum mirrors [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(01).
- [80] Chong W, Qiang-long W, Yi-sheng C, Rui-qi L, Tao L. Design of Metal Mirror Based on Topology Optimization and Additive Manufacturing [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(04): 13-18.
- [81] 何汝杰, 丁国骄, 张可强, 张路, 白雪建, et al. 一种碳化硅陶瓷空间反射镜的数字光处理增材制造方法: CN110922190A [P]. 2019-12-12.
- [82] 何汝杰, 丁国骄, 张可强, 张路, 白雪建, et al. 一种碳化硅陶瓷光固化成型方法: 中国, CN109467438A [P]. 2019-01-09.
- [83] Zhang H, Yang Y, Hu K, Liu B, Liu M, et al. Stereolithography-based additive manufacturing of lightweight and high-strength Cf/SiC ceramics [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34(14): 101199.
- [84] Horvath N, Honeycutt A, Davies MA. Grinding of additively manufactured silicon carbide surfaces for optical applications [J]. *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 2020, 69(1): 509-512.
- [85] Han X, Cao J, Lyu H, Wang C, Ge J, et al. Applications and Development of Additive Manufacturing for Space Optical Remote Sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(01): 74-83.
- [86] Su X, Yang Y, Liu J. Theoretical study on overlapping mechanism in SLM based on interlayer-staggered scan strategy [C]// *2010 International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, ICFMD2010*, December 11, 2010 - December 12, 2010. Chongqing, China: Trans Tech Publications, 2011: 1482-1486.
- [87] 徐宇星. 面向增材制造的热力耦合拓扑优化方法研究 [D]. 华中科技大学, 2019.
- [88] Zhan MJ, Sun GF, Wang ZD, Shen XT, Yan Y, et al. Numerical and experimental investigation on laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 118(84-92).
- [89] Li Y, Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder [J]. *Materials and Design*, 2014, 63(856-867).
- [90] Li Y, Gu D. Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study [J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1(99-109).
- [91] Liu S, Li Q, Liu J, Chen W, Zhang Y. A Realization Method for Transforming a Topology Optimization Design into Additive Manufacturing Structures [J]. *Engineering*, 2018, 4(2).