

增材制造金属反射镜的发展综述

谭淞年^{1,2,3*}, 丁亚林^{1,3}, 许永森^{1,3}, 刘伟毅^{1,3}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 随着光学测量与遥感领域的不断发展, 折反式光学系统对重量、体积和环境适应性等需求不断提高。基于增材制造技术的金属反射镜以其便于实现优化设计、快速制造和加工工艺性好等优点, 逐渐获得国内外学者的关注与研究。与传统金属反射镜相比, 增材制造金属反射镜可以提高反射镜的结构刚度, 同时可实现更程度的轻量化。增材制造反射镜可以满足光学系统对环境适应性和快速性的需求。本文首先讨论了金属反射镜的评价指标; 其次, 综述了国内外基于增材制造技术制备金属反射镜领域的发展现状和技术参数, 从增材制造金属反射镜的基体设计与制备和基体的后处理2个方面展开论述; 然后, 通过分析, 总结了增材制造金属反射镜的技术路线和关键技术; 最后, 对增材制造反射镜的应用前景提出了展望。

关键词: 增材制造技术; 金属反射镜; 折反式光学系统; 表面改性; 定向散射

中图分类号: TG665; V261.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20201301.0075

Development of additively manufacturing metal mirrors

TAN Song-nian^{1,2,3*}, DING Ya-lin^{1,3}, XU Yong-sen^{1,3}, LIU Wei-yi^{1,3}

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
 3. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: tansongnian@126.com*

Abstract: With the rapid development of optical measurement and remote sensing, the demand for weight, volume and environmental adaptability in folding optical systems are continuously increasing. Metal mirrors based on additive manufacturing technology are gradually gaining the attention and research of scholars at home and abroad for their easy to realize optimum design, rapid manufacturing process and high processing performance. Compared to conventional metal mirrors, additively manufacturing metal mirrors strengthen the stiffness of the mirror and achieve a higher degree of weight reduction simultaneously. Furthermore, additively manu-

收稿日期: 2019-09-09; **修订日期:** 2019-10-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFC0822405, No. 2017YFC0822403); 中国科学院国防科技重点实验室基金项目(No. CXJJ-19S014)

Supported by National Key R&D Program of China(No. 2017YFC0822405, No. 2017YFC0822403); National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund Project of the CAS(No. CXJJ-19S014)

facturing mirrors can meet the environmental adaptability and rapidity requirements of optical systems. This paper first discusses the evaluation indicators of metal mirrors. Second, the development status and technical parameters of metal mirrors based on additive manufacturing technology are reviewed. The design and preparation of metal mirrors for additive metal fabrication and the post-treatment of substrates are discussed. Then, through analysis, the preparation process and key technologies of additively manufacturing metal mirrors are summarized. Finally, prospects for additively manufacturing mirror applications are presented.

Key words: additive manufacturing technology; metal mirror; folding optical system; surface modification; directional scattering

1 引言

折反式光学系统被广泛应用于测量与遥感等领域。随着科技的迅速发展,光电遥感设备的折反式光学系统^[1]向着灵巧型、轻质和高分辨率方向发展,从而对折反式光学系统中光学元件的体积、重量等参数提出了更高的要求。

折反式光学系统中的光学元件通常采用碳化硅材料、微晶材料^[2-3]和金属材料,其轻量化方式是通过传统机械加工,在不影响外形尺寸、结构完整性和满足机械加工工艺的条件下对反射镜进行加工去除。

碳化硅材料是航空航天领域中最常用的反射镜材料,其具有良好的热稳定性和比刚度,表面改性后面形精度可以达到可见光级精度要求。但是碳化硅反射镜,从镜坯成形,到最终的表面改性、抛光,其加工工艺路线繁琐,加工周期较长,很难满足快速性的要求,同时成本较高。

微晶玻璃材料反射镜也可以获得良好的面形精度,但是无法做到高度轻量化,另外也存在材料质地脆、热导率低等缺点。

通过锻造方式获得的金属基反射镜,因其具有加工工艺性好、材料价格低等优势也逐渐获得应用,典型的金属基材料包括铝合金等。但是由于传统机械加工方式的限制,铝合金反射镜很难同时满足轻质和高刚度的需求,也在一定程度上限制了铝合金反射镜的应用。

为解决以上问题,针对折反式光学系统的光学元件,基于增材制造的铝合金材料金属反射镜技术应运而生。增材制造金属基反射镜具有以下优势:

(1) 增材制造金属基反射镜同样具备传统工艺制造的金属反射镜的优势,例如加工工艺性好,与碳化硅等材料相比有着明显的价格优势等。

(2) 由于机械结构材料通常为铝合金,增材制造反射镜有着与之相近的热膨胀系数,便于实现无热化设计;

(3) 可以将拓扑优化思想应用于金属反射镜的设计。在金属反射镜设计过程中,考虑增材制造技术的工艺限制,建立拓扑优化数学模型,设计背板封闭/周边封闭式金属反射镜,并对面形精度进行仿真分析,在理论上获得增材制造金属反射镜的最优结构形式与面形精度。

但是增材制造金属反射镜由于加工设备和工艺的限制,无法制备大口径反射镜,同时,其比刚度也弱于碳化硅材料,在大口径反射镜的设计与制备上不具备优势。

本文对增材制造金属反射镜的评价指标进行了介绍,分析了国内外目前基于增材制造技术制备金属反射镜的发展现状,并总结了增材制造金属反射镜的技术路线,最后提出了增材制造金属反射镜的关键技术。

2 金属反射镜的评价指标

无论是通过传统锻造方式制备的金属反射镜,还是基于增材制造技术制备的金属反射镜,都需要明确金属反射镜的评价指标以判断制备的金属反射镜是否满足光学设计要求。

2.1 表面粗糙度

表面粗糙度测量是评估光学元件表面特性的重要手段,反射镜表面的粗糙度对入射光的散射有直接的影响。通过分析反射镜表面的粗糙度,

可以评估反射镜的总积分散射值。根据反射镜的总散射积分理论(TIS)有^[4]:

$$TIS = 1 - \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta}{\lambda}\right)^2\right), \quad (1)$$

式中: θ 为入射光角度; σ 为表面粗糙度值; λ 为入射光波长;

当反射镜的表面粗糙度RMS值远小于入射光波长,且入射光接近零度角入射时,TIS可以简化为:

$$TIS = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

对于2 500 nm(红外波段)入射光,当表面粗糙度(Ra)为8 nm时,总积分散射值近似为0.16%。

一般来说,应用于红外波段的反射镜表面粗糙度值优于8 nm,应用于可见光波段的反射镜表面粗糙度值优于3 nm,对于激光级,光学表面粗糙度值需优于1 nm。

2.2 面形精度

反射镜镜面的面形变化对光学系统的成像质量至关重要,因此面形变化的分析与评价十分必要。目前最常用的方法是峰谷值(PV)法和均方根值(RMS)法^[5]。

PV值法是指变形表面相对于拟合表面误差的峰谷值之差,可以表示为:

$$PV = \Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min}. \quad (3)$$

RMS值法是指所有数据点相对于拟合表面偏差的均方根值,可以表示为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i - \bar{\Delta Z})^2}, \quad (4)$$

式中: n 为节点总数; ΔZ_i 为第*i*个节点相对拟合表面的偏差; $\bar{\Delta Z}$ 为节点相对拟合表面的平均偏差。

一般来说,由于红外波段波长较长,反射镜面形对光学成像质量的影响较小,而可见光波段波长较短,对反射镜面形的要求较高。通过光学仿真软件对反射镜的面形进行公差分析,在保证成像质量(红外光学传函优于0.1,可见光学传函优于0.2)的前提下,对于在红外波段应用的反射镜,其在重力作用下的裸镜面形精度指标为: $PV \leq \lambda/2, RMS \leq \lambda/10$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$);对于在可见光波段应用的反射镜,其在重力作用下的裸镜

面形精度指标为: $PV \leq \lambda/8, RMS \leq \lambda/40$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

2.3 定向散射

金属反射镜在经过单点车工序之后,会在反射镜表面残留刀痕。残留的单点车刀痕会影响光学表面的性能,从而产生衍射效应和杂散光。

可以使用功率谱密度(PSD)分析来估计反射镜表面的定向散射效应^[6,7]。理想状态时,PSD曲线为一条斜率为负的直线。由于存在周期性单点车刀痕,PSD曲线会存在显著的峰值,因此,可以通过PSD曲线的趋势来评估金属反射镜表面的定向散射效应。

3 国内外研究成果

国外对于基于增材制造技术的金属反射镜研究已经比较成熟,主要集中在金属反射镜基体设计研究和增材制造金属反射镜基体后处理研究等方面。

3.1 增材制造金属反射镜基体的设计研究

3.1.1 增材制造金属反射镜传统轻量化设计

国外研究人员利用增材制造技术实现了反射镜基体的设计与制备。不同于传统反射镜的轻量化结构,增材制造反射镜可以实现背部/周边近似封闭结构的形式。

美国硅谷的一家增材制造公司——太空制造公司,正致力于研究在太空中利用增材制造技术制造零部件,比如反射镜、桁架、用于地面通信的光纤等航天器结构部件^[8]。

2015年,美国康宁公司通过增材制造技术制备了一个蜂窝状轻质高性能铝镜,如图1所示,其轻量化形式与传统金属反射镜轻量化形式相同,都采用了背部蜂窝状轻量化结构^[9,10]。与传统金属反射镜基体制备相比,增材制造技术提高了反射镜基体的加工成形效率。

德国弗劳恩霍夫激光技术研究所提出了一种应用增材制造技术制备金属反射镜的技术路线。其在反射镜加工成形的过程中,在内部预留出复杂的流道,使其可以应用于水冷镜等领域,如图2(a)所示。该成形工艺无需传统复杂的模具或焊接工艺,提高了加工效率,减小了内应力。同时,

其设计了可以通过增材制造技术而制备的高度轻量化金属反射镜,整个反射镜呈夹层式的封闭蜂窝状结构,通过内部加强筋上的孔使所有蜂窝状空间连通起来,保证能够顺利排粉,如图 2(b)所示^[11]。与传统金属反射镜的背部轻量化形式相比,该结构提高了反射镜的刚度。

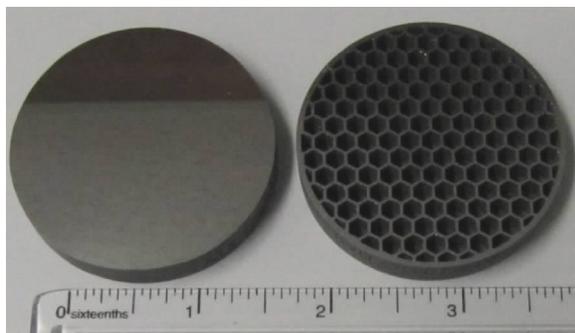
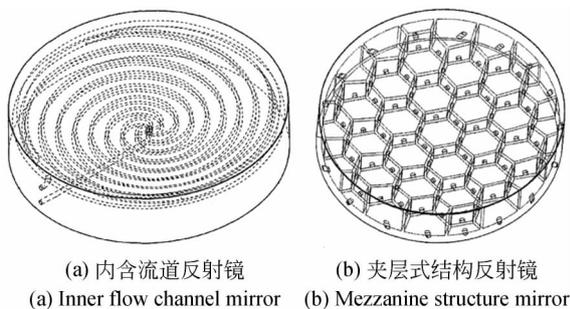


图 1 背部蜂窝轻量化结构反射镜

Fig. 1 Honeycomb lightweight structural mirror



(a) 内含流道反射镜

(a) Inner flow channel mirror

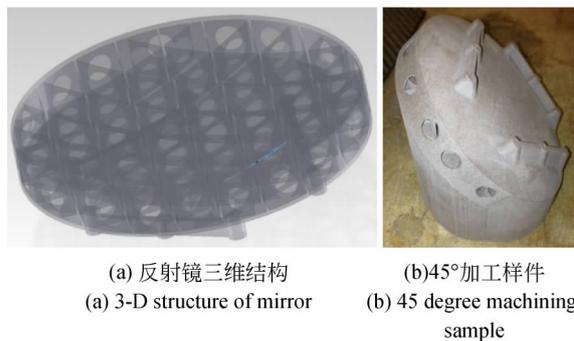
(b) 夹层式结构反射镜

(b) Mezzanine structure mirror

图 2 增材制造金属反射镜概念设计

Fig. 2 Concept design of additively manufacturing metal mirror

M. Sweeney 等人总结了将增材制造技术应用于金属反射镜制造的优势,增材制造技术可以大大缩短加工时间,节省加工材料,同时拥有与铸造相同的尺寸稳定性和均匀性,其可以通过进一步的精加工和热处理,保证在光学领域应用的尺寸稳定性。另外,M. Sweeney 等人完成了增材制造金属反射镜的设计与制备,如图 3 所示。通过设计背部封闭的结构形式,提高金属反射镜的刚度与轻量化程度。在增材制造工序中,采用 45° 放置形式,实现了反射镜内部支撑筋的自支撑,同时减少了激光加工时每层熔化粉末的数量,减小了内应力^[12]。



(a) 反射镜三维结构

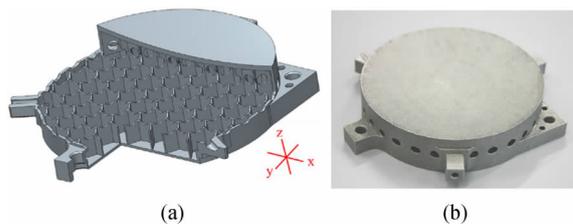
(a) 3-D structure of mirror

(b) 45°加工样件

(b) 45 degree machining sample

图 3 增材制造金属反射镜的设计与制备

Fig. 3 Design and preparation of additively manufacturing metal mirror



(a)

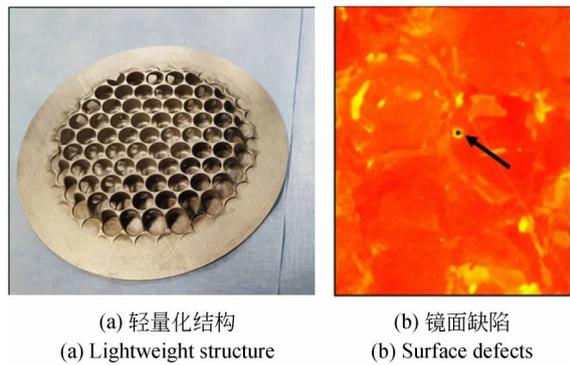
(b)

图 4 背板封闭式结构反射镜模型(a)和样件(b)

Fig. 4 Model (a) and prototype (b) of backplane closed structure mirror

2017 年,E. Hilpert 等人通过对比 5 种结构形式的金属反射镜,分析了增材制造技术制备金属反射镜的优势,金属镜材料为 AlSi12。5 种结构形式分别是实体结构反射镜、侧面钻孔结构反射镜、背板封闭式蜂窝结构反射镜、背板开放式蜂窝结构反射镜、背板封闭式中空结构反射镜。背板封闭式蜂窝结构反射镜口径为 86 mm,可获得 63.5% 的轻量化。对增材制造反射镜的稳定性进行了研究,将反射镜在合适的条件下保存 2 年,反射镜的面形 PV 值从 108.9 nm 变化为 161 nm, RMS 值从 12.5 nm 变化为 12.4 nm,保证了良好的稳定性^[13]。图 4 为背板封闭式蜂窝结构反射镜模型和样件。Matthew Brunelle 等人通过 3D 打印分别制备了圆形和方形反射镜,主要应用于红外波段。图 5(a) 为设计的圆形反射镜背部轻量化结构,采用 FeNi36 材料,FeNi36 这种材料的线膨胀系数很小,可以在低温光学和空间环境中应用。对制备完的反射镜镜面进行表面缺陷的研究,对反射镜镜面进行了微观扫描,发现表面没有达到 100% 致密,仍有尺寸接近 9 μm 的孔洞,如

图 5 (b) 所示,如果应用于可见光波段,表面需要镀膜改性^[14]。



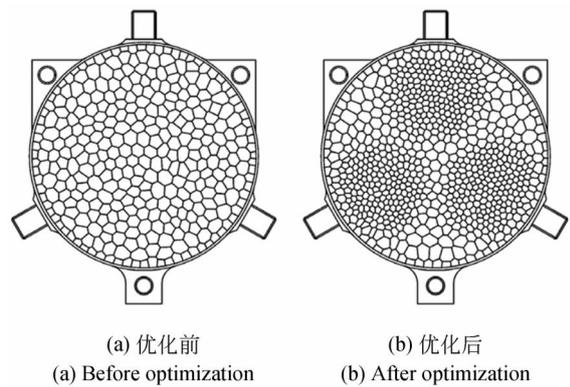
(a) 轻量化结构 (a) Lightweight structure (b) 镜面缺陷 (b) Surface defects

图 5 FeNi36 反射镜和表面缺陷
Fig. 5 FeNi36 mirror and surface defects

3. 1. 2 增材制造金属反射镜拓扑优化设计

增材制造技术的一大优势是可以实现最优化结构制备,将拓扑优化思想与增材制造技术相结合,可以实现反射镜的最优结构设计。国外针对金属反射镜的拓扑优化设计进行了大量的研究。

J. Mici 等人将拓扑优化思想应用在增材制造金属反射镜上,对金属反射镜进行了优化分析与设计,并且在设计过程中,考虑了热传导等问题,分析了不同结构下,金属反射镜的温度梯度分布^[15]。



(a) 优化前 (a) Before optimization (b) 优化后 (b) After optimization

图 6 反射镜内部支撑结构优化前后结果
Fig. 6 Internal support structure of mirror before and after optimization

2019 年,E. Hilpert 等人在传统轻量化方式的基础上,充分利用增材制造技术特异成形的优势,对反射镜的轻量化形式进行优化设计和分析,使

其在保证金属反射镜刚度的情况下,实现了 60.5% 的轻量化,轻量化形式如图 6 所示^[16]。

德国 Hartung 等人根据光学设计需要,将离轴三反光学系统的主镜和三镜作为一个光学元件,并通过增材制造技术进行制备。通过优化光学元件内部的加强筋结构,获得了轻量化程度更高的结构形式,如图 7 所示^[17-18]。

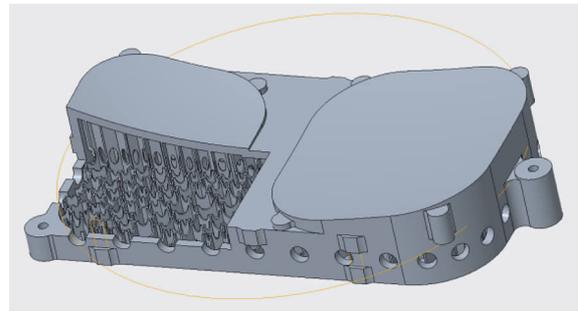


图 7 一体式金属反射镜三维结构
Fig. 7 3-D structure of one-piece metal mirror

美国 M. Roulet 等人通过增材制造技术制备应用于航空领域的金属反射镜,通过 CAD 软件设计了基于增材制造技术的弓形金属反射镜原型,如图 8 所示,并仿真对比了弓形金属反射镜与传统机械加工成型的蜂窝式金属反射镜的镜面法向位移,基于增材制造技术的弓形金属反射镜获得了更好的仿真结果,面形精度更高。同时,通过拓扑优化方法对内部弓形支撑柱进行设计,获得了不同体积分数下的不同结构形式。这种创新技术可以应用于后续的金属反射镜拓扑优化设计中^[19-20]。

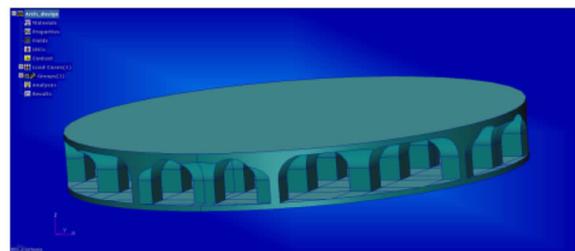


图 8 弓形支撑设计
Fig. 8 Bow-type support design

C. Atkins 等人对基于增材制造技术的拓扑优化进行了研究。其充分利用增材制造技术的成形优势,提出了一种将沃罗诺伊细胞 (Voronoi

Cells) 形式应用于反射镜的轻量化形式,可以获得更稳定的结构,图 9 为设计的沃罗诺伊细胞轻量化结构的二维视图。靠近反射镜镜面一侧设计更密集的加强细胞,而靠近反射镜背板一侧支撑结构变得疏松,以此来获得更高的轻量化程度和更高的刚度^[21]。

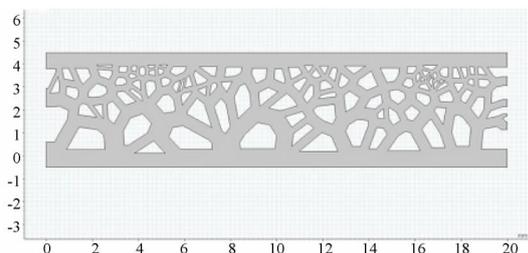


图 9 沃罗诺伊细胞轻量化结构

Fig. 9 Voronoi cell lightweight structure

3.2 增材制造金属反射镜基体后处理研究

2014 年,美国康宁公司提出了基于 6061-T6 合金基底的表面改性工艺,其提供了包括由基板支撑的性能增强涂层的光学元件以及制造该光学元件的方法。性能增强涂层可以包括 Al 或 Al 的合金,涂层可以为一层或者多层,处理后表面 RMS 粗糙度小于 40 \AA ^[22]。

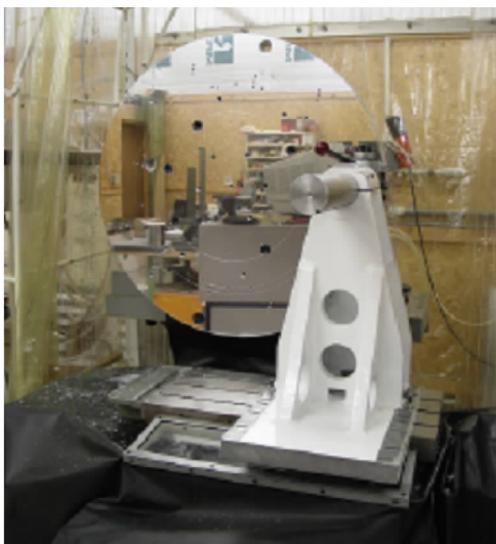


图 10 增材制造非球面反射镜

Fig. 10 Additively manufacturing aspherical mirror

2017 年,美国国家航空航天局 H. Philip Stahl 在可见/红外望远镜的先进光学系统和制造技术报告中提出了利用增材制造技术制备高轻量

化的非球面镜,通过激光选区烧结 AlSi10Mg 粉末制备 500 mm 口径的反射镜,如图 10 所示。通过金刚石单点车对基体进行加工,其应用领域为深空光通信(DSOC)、类地行星搜索等,也可以应用在其他需要低造价高轻量化光学元件的科学领域^[23]。

E. Hilpert 等人对制备好的反射镜基体进行机械加工、单点车(SPDT)等后处理工序,经过表面改性后,在抛光工序上先采用磁流变抛光进行修行,然后通过化学机械抛光工艺来提高表面粗糙度,最后获得了良好的面形和表面粗糙度。图 11(b) 为单点车加工后的反射镜。制备的铝金属反射镜的表面粗糙度为 0.4 nm ,面形 RMS 值为 12.5 nm ^[13]。该反射镜通过机械加工-单点车-改性-抛光工艺流程制备,可以获得满足可见光波段光学指标要求的表面粗糙度。



图 11 (a) 增材制造反射镜单点加工过程及 (b) 加工后产品

Fig. 11 (a) SPDT process of mirror and (b) mirror obtained after SPDT

2015 年,亚利桑那大学 H. Herzog 等人提出了基于增材制造技术的金属反射镜的工艺流程,并提出了通过热等静压技术来提高金属反射镜致密度的方法,并对反射镜直接进行了单点车和抛光等后处理加工工艺,在没有进行表面改性镀膜的情况下,获得了良好的光学镜面质量,图 12 为增材制造反射镜抛光中和抛光后的示意图。制备的铝金属反射镜的表面粗糙度为 22 nm ,P-V 值为 255 nm ^[24]。该反射镜通过机械加工-单点车-抛光工艺流程制备,由于没有进行表面镀膜改性,粗糙度无法满足可见光波段的光学指标要求。

美国 G. Leuteritz 等人对基于增材制造的反射镜的后处理工艺进行了研究,对比了 3 种后处理方式处理后的样件表面 RMS 粗糙度,讨论了更适用于利用增材制造技术制备的后处理工艺^[25]。

2018年,C. Atkins等人通过增材制造技术制备了应用结构优化算法的AlSi10Mg金属反射镜,金属反射镜的直径为40 mm,高度为6 mm,为了获得致密度更高的光学表面,通过在反射镜表面镀NiP改性层来进行镜面改性处理,图13(a)为通过改性抛光后制备的增材制造反射镜,反射镜重量仅为11.7 g,面形RMS值为31 nm^[2, 26-27]。

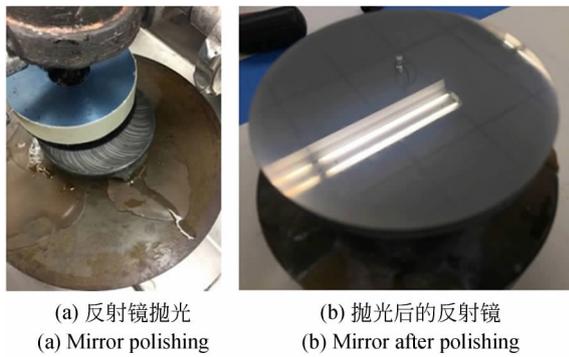


图 12 增材制造反射镜抛光加工

Fig. 12 Polishing process of additively manufacturing mirrors

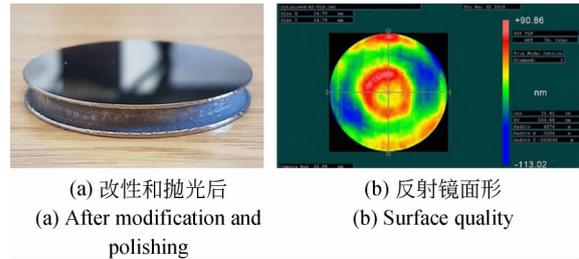


图 13 金属反射镜的改性和抛光

Fig. 13 Modification and polishing of metal mirrors

Eberle等人对表面镀NiP增材制造反射镜进行了稳定性的研究,基体材料为AlSi40。由于NiP镀层和基体材料有着相近的热膨胀系数,在低温环境下仍然具有很好的稳定性,所以可以被应用在低温光学等领域^[28]。

综合上述国外文献资料,总结了基于增材制造技术制备金属反射镜的技术参数,如表1所示。主要列举了国外研制的增材制造金属反射镜的基体材料、口径、表面粗糙度和面形质量等相关参数。

表 1 增材制造金属反射镜技术参数

Tab. 1 Technical parameters of additively manufacturing metal mirror

研制公司	基底材料	口径	改性镀层材料	面形精度	粗糙度	定向散射
美国康宁公司 ^[9,23]	AlSi7Mg0.3	20 mm	Al/Al-alloy	30.3 nm (PV) 1.5 nm(RMS)	1 ~ 4 nm	消除
英国天文科技中心 ^[19,21, 26-27]	AlSi10Mg	40 mm	NiP	16 nm(RMS)	1.9 nm	/
德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 ^[13]	AlSi12	200 mm	NiP	12.5 nm(RMS)	0.4 nm	未消除
德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 ^[16]	AlSi40	200 mm	NiP	7.3 nm(RMS)	0.4 nm	/
坎普望远镜光学有限公司 ^[28]	AlSi40	210 mm	NiP	300 nm(PV) 74 nm(RMS)	/	/
通用电力公司 ^[12]	AlSi10Mg	150 mm	/	43.2 nm(RMS)	7 nm	/
亚利桑那大学 ^[15, 24]	AlSi10Mg	220 mm	/	255 nm (PV)	22 nm	/

针对国外对增材制造金属反射镜基体后处理的研究,可以得出增材制造反射镜的特点:

(1) 增材制造反射镜基体的加工工艺性良好,可以直接进行单点车、离子束修形等加工工艺。

(2) 可在增材制造反射镜上直接钻孔或攻丝,易于实现反射镜体与支撑结构的一体化设计。

(3) 增材制造反射镜基体的内应力可以通过

合适的热处理工艺释放,具有良好的尺寸稳定性,可以满足反射镜的使用要求^[12-13]。

(4) 增材制造反射镜不进行表面改性,仅通过单点车和抛光工艺加工,表面面形精度可以满足红外和可见光波段的需求,但是表面粗糙度仅有7 ~ 22 nm^[12,15,24],无法满足可见光波段的需求。这是因为反射镜基体的致密度不足,存在激光选区熔化过程中生成气孔等问题。后续研究可

以在增材制造反射镜的成形工艺参数和热等静压处理参数方面进行进一步的研究和优化,提高增材制造反射镜基体致密度,期望获得无需表面改性镀膜就可以满足可见光波段应用的增材制造反射镜基体。

(5) 目前,为了获得满足可见光波段的镜面指标,反射镜镜面需要经过表面改性镀膜处理。

近几年,国内的金属增材制造技术有了很大的进展,对 AlSi10Mg 合金粉末增材制造成形工艺和力学性能进行了大量的研究。中国航发北京航空材料研究院唐鹏钧等人对激光选区熔化 Al-Si10Mg 样件进行室温拉伸测试,试件的抗拉强度达到 442 MPa^[29]。空间光电技术研究所丁莹等人对比了 CO₂ LSF 制备和 YAG LSF 制备方式对 AlSi10Mg 试样力学性能的影响,YAG LSF 制备的 AlSi10Mg 力学性能较好,试件沉积态的抗拉强度为 356 MPa, T6 热处理后,抗拉强度为 376 MPa^[30]。由此看出,AlSi10Mg 合金力学性能优于压铸铝合金,力学性能可以满足反射镜制备的基本要求。

国内对于将拓扑优化思想与增材制造方法相结合进行了大量的研究。大连理工大学刘君欢等人提出了面向增材制造的拓扑优化设计方法,提出了将拓扑优化理念与增材制造加工方法相结合,并通过数值算例进行了证明^[31]。胡瑞等人提出了将拓扑优化方法应用于空间反射镜结构设计,并针对背部开放式和背部封闭式空间反射镜进行了理论分析,建立了反射镜镜面背部结构与反射镜面形精度的数学模型,并通过 3D 打印方式制备了塑料的反射镜样件^[32]。

综上所述,国外对于增材制造反射镜有了一定的研究基础,但是主要集中在实验室阶段,尚未应用于实际项目中。而国内对于增材制造反射镜的研究较少,事实上,国内已经将金属反射镜应用于航空航天领域,如风云系列卫星中的扫描镜^[33]、昆明物理所谢启明等人研制了口径为 235 mm 的非球面铝合金反射镜^[34]等。增材制造反射镜与传统加工工艺制造的金属反射镜相比,有着独特的优势,可以更好地服务于航空航天领域。随着国内金属增材制造领域的发展,将增材制造技术应用于金属反射镜的制造将会成为增材制造

技术的一个研究方向。

4 技术路线和关键技术

4.1 增材制造金属反射镜技术路线

根据国外有关金属反射镜的典型应用和研究进展,总结了金属反射镜制备的技术路线,如图 14 所示。对于中、长波金属反射镜的制备,无需进行表面镀膜改性,在增材制造反射镜基体上直接通过单点车的方式就可以获得满足红外波段光学指标的面形精度和表面粗糙度。对于应用于可见和短波红外波段的金属反射镜,由于增材制造反射镜基体的致密度满足不了光学指标要求,需要在单点车工序后在反射镜表面进行镀膜改性,通过在表面镀致密的改性层,再经过后续的加工来获得所需的表面粗糙度和面形精度。



图 14 增材制造金属反射镜工艺路线

Fig. 14 Process route of additively manufacturing mirror

4.2 增材制造金属反射镜关键技术

4.2.1 基于增材制造技术的金属反射镜设计

增材制造技术作为先进的特种加工技术,在

制造工艺上也对结构设计有特殊的要求,设计者在设计过程中需要遵循相应的工艺要求。尺寸约束不仅广泛存在于传统制造加工工艺中,对于增材制造工艺也有相应的约束。过小的尺寸会导致整体结构薄弱。对于反射镜来说,在重力作用下,会造成面形变化,导致其无法满足光学设计的要求。

支撑的设计是增材制造技术中需要注意的关键点之一。合理设计内部结构以及打印方向,减少支撑的使用量,甚至实现结构自支撑,可有效减少制造成本,加快制造进程。如果外形存在悬梁式结构,通常需要添加支撑材料来避免坍塌,制备结束后再将支撑材料去除,因此外部的支撑结构需要很容易的被去除,以完成反射镜的加工。

4.2.2 增材制造金属反射镜的致密化技术

在激光选区熔化加工过程中,会存在少数的粉末颗粒没有完全熔化而形成的孔洞,表面的孔洞会对反射镜的表面粗糙度造成影响,因此,在镜面光学加工之前,需要经过进一步的致密化处理,消除金属反射镜内部宏观和微观的孔洞缺陷,提高增材制造金属反射镜的致密化程度。

通过热等静压技术(HIP)处理增材制造金属反射镜可以提高其致密度。热等静压技术通常应用于锻造工件的致密化,也同样可以应用于增材制造工件的后处理。热等静压技术处理参数不同,增材制造金属反射镜在单点车加工后的表面粗糙度也会不一样。一般来说,单点车加工后可

以得到5 nm~22 nm的表面粗糙度。所以需要选取更合适的处理参数,来获得更优的表面粗糙度。过高的热等静压处理压力会使处理样件变形,而过低的热等静压处理压力无法起到致密化的作用。优选的热等静压处理参数可以获得更优的表面粗糙度,使金属反射镜满足在可见光波段下的应用。

4.2.3 增材制造金属反射镜的热处理技术

应用于航天环境的光学元件,由于环境温度不会剧烈变化,对金属反射镜的稳定性要求不苛刻。但是在航空环境条件下部署的金属反射镜,由于航空工作环境恶劣,温差大,要求折反式光学系统的光学元件需要具有较宽的温度适应范围,这就需要通过热处理技术来使增材制造金属反射镜稳定化,以减小材料内应力。

由于增材制造金属反射镜的制备粉末材料通常为AlSi10Mg或AlSi12等,与传统6061材料的成分不同,因此需要更优化的热处理技术来对反射镜基体进行处理,来消除因增材制造加工过程中激光熔融粉末成形而产生的热应力。

4.2.4 增材制造金属反射镜表面镀膜改性技术

由于增材制造金属反射镜基体表面粗糙度无法满足可见光波段的要求,为了获得更高的表面致密度,需要通过镜面改性技术,使其获得光滑、平整和致密的光学镜面。国内外对于铝合金基体采用的表面镀膜改性方案如表2所示。表中列出的对6061材料基体采用的表面镀膜改性处理方法也可以用于增材制造铝材料基体的表面镀膜改性。

表2 铝合金反射镜改性参数

Tab. 2 Modification parameters of aluminum alloy mirror

研制公司	基底材料	改性镀层材料	镀层厚度
美国雷神公司 ^[35-36]	6061-T6	非晶硅和/或镍铬镀层	0.5~0.6 μm
美国雷神公司 ^[37]	6061-T6	NiP	2~3 μm
美国康宁公司 ^[9,23]	AlSi7Mg0.3	Al/Al-alloy	30~300 μm
英国天文科技中心 ^[19,21,26-27]	AlSi10Mg	NiP	/
德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 ^[13]	AlSi12	NiP	/
德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 ^[16]	AlSi40	NiP	20 μm
德国弗劳恩霍夫激光技术研究所 ^[38]	6061-T6	NiP	20 μm

5 结 论

增材制造技术不仅可以用于金属反射镜的制备,也可以应用于其他材料光学元件的制备,比如陶瓷反射镜^[39-40]、多聚物透镜和液体透镜^[41]等。因此,随着增材制造技术的进一步发展,将增材制造技术应用于光学元件的制备具有重要意义。

本文分析了金属反射镜的评价指标,综述了

增材制造金属反射镜的研究进展,归纳和总结了增材制造金属反射镜的技术路线,最后分析了增材制造金属反射镜的关键技术。虽然国内外增材制造金属反射镜还没有投入工程应用,但是随着金属反射镜基体热处理工艺和表面改性处理工艺的不断完善,金属反射镜基体的尺寸稳定性和环境适应性会不断提高,使其可以应用于可见光乃至激光等领域,有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] MATSON L E, CHEN M Y, ATAD-ETTEDGUI E, *et al.*. Enabling materials and processes for large aerospace mirrors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 70180L.
- [2] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 824-833.
KANG J, XUAN F, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 824-833. (in Chinese)
- [3] 王富国, 乔兵, 张景旭. 2m SiC 反射镜柔性被动支撑系统 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2591-2598.
WANG F G, QIAO B, ZHANG J X. Flexible passive support system for 2m SiC reflective mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2591-2598. (in Chinese)
- [4] MILLER J L, FRIEDMAN E. *Photonics Rules of Thumb* [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [5] 严丛林. 反射镜支撑结构设计与分析 [D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2013.
YAN C L. Design and analysis for the support structure of large aperture rectangular mirror [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [6] HUANG Y T, FAN B, WAN Y J, *et al.*. Improving the performance of single point diamond turning surface with ion beam figuring [J]. *Optik*, 2018, 172: 540-544.
- [7] AIKENS D M, WOLFE C R, LAWSON J K. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 281-292.
- [8] 谷扣昕. 美媒展望塑造未来的18项航空航天技术 [J]. *现代军事*, 2016(12): 80-87.
GU H X. The 18 media aerospace technologies that the US media look forward to shape the future [J]. *Arms & Technology*, 2016(12): 80-87. (in Chinese)
- [9] WOODARD K S, MYRICK B H. Progress on high-performance rapid prototype aluminum mirrors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10181: 101810T.
- [10] WOODARD K S, COMSTOCK L E, WAMBOLDT L, *et al.*. Optimum selection of high performance mirror substrates for diamond finishing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9822: 98220C.
- [11] SCHEIDING S, GEBHARDT A, DAMM C, *et al.*. Method for manufacturing a mirror comprising at least one cavity and optical mirror: USA, 20140247512 [P]. 2014-09-04.
- [12] SWEENEY M, ACREMAN M, VETTESE T, *et al.*. Application and testing of additive manufacturing for mirrors and precision structures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9574: 957406.
- [13] 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: 310-317.
- [14] BRUNELLE M, FERRALLI I, WHITSITT R, *et al.*. Current use and potential of additive manufacturing for optical applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10448: 104480P.
- [15] MICI J, ROTHENBERG B, BRISSON E, *et al.*. Optomechanical performance of 3D-printed mirrors with embedded

- cooling channels and substructures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9573: 957306.
- [16] HILPERT E, HARTUNG J, VON 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): 092613.
- [17] HARTUNG J, BEIER M, RISSE S. Novel applications based on freeform technologies [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10692: 106920K.
- [18] HEIDLER N, HILPERT E, HARTUNG J, *et al.*. Additive manufacturing of metal mirrors for TMA telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10692: 106920C.
- [19] ROULET M, ATKINS C, HUGOT E, *et al.*. 3D printing for astronomical mirrors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10675: 1067504.
- [20] STAMPFL J, HATZENBICHLER M. *Additive Manufacturing Technologies* [M]. LAPERRIÈRE L, REINHART G. The International Academy for Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 20-27.
- [21] ATKINS C, FELDMAN C, BROOKS D, *et al.*. Topological design of lightweight additively manufactured mirrors for space [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10706: 107060L.
- [22] COMSTOCK II L E, CRIFASI J C, ROY B P, *et al.*. Mirror substrates with highly finishable corrosion-resistant coating: USA, 20160097885 [P]. 2016-04-07.
- [23] National Aeronautics and Space Administration. Additive manufactured very light weight diamond turned aspheric mirror [R]. Greenbelt, Maryland: SBIR/STTR, 2017.
- [24] HERZOG H, SEGAL J, SMITH J, *et al.*. Optical fabrication of lightweighted 3D printed mirrors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9573: 957308.
- [25] LEUTERITZ G, LACHMAYER R. Additive manufacturing of reflective optics: evaluating finishing methods [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10523: 105230N.
- [26] ATKINS C, FELDMAN C, BROOKS D, *et al.*. Additive manufactured X-ray optics for astronomy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10399: 103991G.
- [27] FELDMAN C, ATKINS C, BROOKS D, *et al.*. Design and modeling of an additive manufactured thin shell for X-ray astronomy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10399: 103991H.
- [28] EBERLE S, REUTLINGER A, CURZADD B, *et al.*. Additive manufacturing of an AlSi40 mirror coated with electroless nickel for cryogenic space applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 1118015.
- [29] 唐鹏钧, 何晓磊, 杨斌, 等. 激光选区熔化用 AlSi10Mg 粉末显微组织与性能 [J]. *航空材料学报*, 2018, 38(1): 47-53.
- TANG P J, HE X L, YANG B, *et al.*. Microstructure and properties of AlSi10Mg powder for selective laser melting [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(1): 47-53. (in Chinese)
- [30] 丁莹, 杨海欧, 白静, 等. 激光立体成形 AlSi10Mg 合金的微观组织及力学性能 [J]. *中国表面工程*, 2018, 31(4): 46-54.
- DING Y, YANG H O, BAI J, *et al.*. Microstructure and mechanical property of AlSi10Mg alloy prepared by laser solid forming [J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(4): 46-54. (in Chinese)
- [31] 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, 2017.
- HU R. Topology optimization-based design method of space mirror and flexible support structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [32] 刘君欢. 面向增材制造的拓扑优化结果精细化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LIU J H. Refined design of topology optimization results for additive manufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [33] 叶虎勇, 陈桂林. 地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑 [J]. *红外技术*, 2003, 25(6): 1-5, 9.
- YE H Y, CHEN G L. Scanning mirror design considerations of 3-axis stability satellite [J]. *Infrared Technology*, 2003,

- 25(6): 1-5, 9. (in Chinese)
- [34] 谢启明, 杨静, 徐放, 等. 金属非球面反射镜的加工和检测技术 [J]. 红外技术, 2015, 37(2): 119-123.
XIE Q M, YANG J, XU F, *et al.*. Manufacturing and test technology for metal aspherical reflector [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 119-123. (in Chinese)
- [35] SCHAEFER J P. High precision mirror, and a method of making it: USA, 20040165296 [P]. 2004-08-26.
- [36] SCHAEFER J P. Advanced metal mirror processing for tactical ISR systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8713: 871306.
- [37] HARRIS G G, MITCHELL D B, BROWN D J, *et al.*. Method and apparatus for fabricating a precision optical surface: USA, 8398251 [P]. 2013-03-19.
- [38] RISSE S, GEBHARDT A, PESCHEL T, *et al.*. Substrate made of an aluminum-silicon alloy or crystalline silicon, metal mirror, method for the production thereof, and use thereof: USA, 20130057952 [P]. 2013-03-07.
- [39] HOULLIER T, ROUSSELET N, SURREL Y, *et al.*. Advanced optical freeform substrates fabricated by ceramic 3D printing and controlled by deflectometry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10692: 106920P.
- [40] ROULET M, HUGOT E, ATKINS C, *et al.*. Superpolished OAPs for WFIRST CGI [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10698: 106982Q.
- [41] HEINRICH A, BÖRRET R, MERKEL M, *et al.*. Additive manufacturing of reflective and transmissive optics: potential and new solutions for optical systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10523: 1052302.

作者简介:



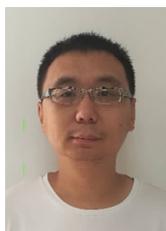
谭淞年(1989—),男,吉林通化人,硕士,助理研究员,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电稳定平台、金属反射镜等方面的研究。E-mail: tansongnian@126.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,硕士,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于东北大学获得硕士学位,主要从事航空相机总体设计方面的研究。E-mail: dingyl_1964@126.com



许永森(1981—),男,河南信阳人,博士,研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空成像与测量方面的研究。E-mail: pml31@sina.com.cn



刘伟毅(1983—),男,山东烟台人,硕士,副研究员,2006年于山东大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事相机标定及航空遥感器稳定成像技术方面的研究。E-mail: 2219101@163.com