

碳化硅轻型反射镜技术

马文礼 沈忙作

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要 给出了常用的轻质材料,对比分析了碳化硅的材料特性。介绍了碳化硅反射镜制造中的几个关键技术,包括 RB 碳化硅反射镜毛坯制造, SiC 涂层技术和 SiC 反射镜的加工技术。

关键词 轻型反射镜 碳化硅

1 概 述

随着轻小型卫星、天基监视器、拦截器等空间应用技术的发展,对空间光学系统提出了更高的要求。要求光学系统具有宽波段范围,从紫外到可见,再到长波红外,光学系统都应具有良好的成像质量。此外,光学系统还应具有结构紧凑、重量轻。我们知道,光学系统的重量直接影响整个空间仪器或空间系统的重量。目前,空间系统的发射费用大于 2 万美元/kg,光学系统减轻 100kg 的重量,有效载荷就能够减少 250~300kg,其结果不单节省了几千万美元的发射费用,而且提高了空间探测器的飞行性能,特别是拦截器的飞行性能。

发展轻型光学系统,一体化优化设计可以使整个系统的结构合理、紧凑,缩小体积、减少重量。然而仅仅一体化设计还不能使光学系统达到最轻的重量,必须选用密度低、比刚度大的新型材料,如铍、碳化硅等。用这些轻质材料制造光学系统元件和结构件,可以大幅度减轻整个光学系统的重量。

在紫外到长波红外宽波段范围工作的光学系统只有全反射式光学系统能满足这一要求。在全反射式光学系统中,反射镜是最为关键的。减轻反射镜的重量,也相应地减少了反射镜支撑固定部分的重量。最近几年,碳化硅反射镜的发展格外引人注目。碳化硅具有(1)铍一样的比刚度;(2)玻璃的光学性能,能够达到可见光的衍射极限分辨率;(3)从常温到低温有较好的光学/热稳定性;(4)铝合金反射镜的价格。而成为空间光学系统轻质反射镜的优选材料。

美国 SSG 公司研制了一系列高形态比的碳化硅轻型反射镜, 典型的有: 直径 90mm, 重量小于 30g; 230mm 直径, 网格结构的反射镜重量小于 400g。SSG 公司还设计了直径 0.6m 碳化硅基体轴上的三反射镜二次成像的望远镜, 这个望远镜主镜的重量小于 6kg^[1]。美国 Morton Thiokol 公司 NASA 研制了 400mm 直径的碳化硅反射镜^[2]。美国 Rockwell International 公司研制了 90mm × 128mm 的碳化硅扫描反射镜^[3]。美国 HDOS 公司研制 0.8 × 1.1m, 重 27kg 的 RB 碳化硅反射镜^[4]。这些研究推动了碳化硅轻型反射镜的发展, 为空间光学的轻型化奠定了基础。

2 碳化硅的材料特性

空间光学系统常用的轻质材料有铍、铝合金、熔石英及复合材料, SiC 与这些材料的性能比较见表 1。

Table 1. Candidate lightweight optical materials

property	CVD	reaction	typical fused		6061-T6	silica
	SiC	bonded SiC	Be	silica zerodur	aluminum	matrix
density g/cm^2	3.2	3.1	1.85	2.53	2.78	2.97
elastic modulus GPa	440	320	303	91	69	145
microyield PSI × 10 ³	60	35	5	2	12	18
coefficient of thermal expansion in/in/K (10 ⁻⁶) 300K ~ 30K	2.4	1.8	11	0.03 ~ 0.56	23.3	10.8
thermal conductivity W/cm.K	1.56	1.4	1.8	0.016	1.89	1.2
thermal expansion PPM, 0K ~ 300K	360	275	1310	- 50	4150	variable
thermal diffusivity 10 ⁶ H ² /s, 300K	9.1	9	65	0.84	66	TBD
figures of merit thermal stability 1K · 10 ⁸ (m/W)	1.3	1.2	7.1	55	11	9.1

从表 1 对碳化硅、铍、熔石英、铝合金和铝基复合材料的特性比较中, 我们可以知道: 碳化硅的比刚度仅次于铍, 而优于其它各种材料, 碳化硅的热稳定性优于所有材料, 如图 1 所示。碳化硅具有良好的热传导性能, 它的导热率与铝合金接近, 当环境温度变化时, 碳化硅内部很容易达到温度平衡, 不会引起很大的内应力。碳化硅的线膨胀系数比铝小 10 倍, 当温度变化的

时候,碳化硅具有较好的尺寸稳定性,因此用它制造的光学系统能在宽温度范围内工作,环境适应能力强。

从图 1 中我们可看到,在所有空间轻质光学材料中,铍的比刚度最大。但铍的加工有毒,使光学和结构件的制造变得困难。而碳化硅可以采用常规的方法加工,不需要特殊的保护。与铍相比,碳化硅具有较好的热稳定性和各向同性性能,更适合在温度恶劣的环境下工作。

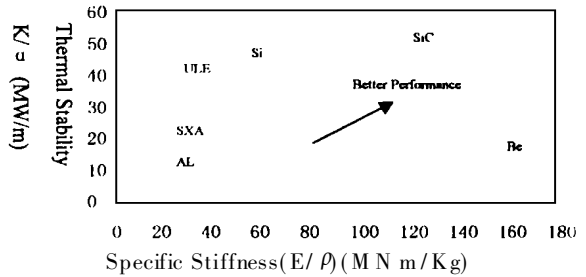


Fig. 1 Candidate lightweight optical materials

3 反射镜的制造

空间光学系统都需要轻质、刚度好和稳定性高。从前面对碳化硅材料的分析中,我们知道碳化硅是最理想的轻型光学系统材料。反射镜的制造有以下几个关键步骤:

3.1 反射镜毛坯的成形

碳化硅反射镜毛坯成形有反应烧结 RB (Reaction Bonded) 方法,真空热压 VHP 方法,物理气相沉积 PVD 方法,化学气相沉积 CVD 方法和热等压 HIP 方法,美国 HDOS 与 CSP 公司合作,对上述方法做了大量的对比研究,研究结果表明, RB 方法就反射镜毛坯制造性能,网络状毛坯成形,可测量性和低花费方面来讲,提供了更大的适应性,尤其是对大尺寸碳化硅反射镜。因此, RB 方法是目前被多数国家采用的制造碳化硅反射镜的优选方法。从碳化硅材料特性的分析中知道,虽然 CVD SiC 与 RB SiC 相比具有比刚度大、致密性好等优点,但 CVD SiC 生长速度较低,每天小于 2mm,如果制造 1m 直径,厚度 10cm 的反射镜,要花 7 周的时间,材料的均匀性和稳定性都可能受到损害。更重要的是 CVD SiC 很难形成网格状毛坯结构,无法进一步减轻重量。采用 CVD 方法在 RB SiC 上镀一层 SiC 膜层,可以提高 SiC 反射镜表面的致密性,对加工出超光滑、低散射率高精度镜面是十分有利的。

RB SiC 的基本流程如下:

- (1) 加工网格状的铸造模型;
- (2) 准备粘合剂: SiC 粉, 水, 附加物;
- (3) 注粘合剂到模内, 通过真空吸入, 直到有粘合剂流出为止;
- (4) 干燥并移开模子;
- (5) 在 950 °C 下预烧, 形成一个多孔的纯 SiC “绿色”坯料;
- (6) 在绿色状态下对坯料作粗加工;
- (7) 如果需要则为坯料安装基座;
- (8) 最后在 1550 °C 下精烧, 渗硅。

3.2 SiC 涂层

美国 HDOS 公司已在裸 RB SiC 上做出了小于 1nm RMS 的光学表面。为了获得 0.1 ~ 0.3nm RMS 的超抛光 SiC 面和超低散射性能, RB SiC 表面必须有涂层。在过去几年中, HDOS 对几种 SiC 涂层材料和涂层工艺做了研究, 这些涂层包括: (1) 离子喷涂 (IPS) SiC; (2)

化学气相沉积 CVD SiC; (3) 物理气相沉积 PVD SiC。这些涂层经过抛光后都能使 SiC 反射镜表面粗糙度小于 0.3nm RMS。CVD SiC 涂层的性质与 RB SiC 基体在热膨胀系数、热稳定性等方面十分接近, 因此, 在热冲击和较大温度变化的场合中有极强的适应能力, 如用于高能量激光光路中的 SiC 反射镜。

在上述的涂层中, CVD SiC 涂层是最好的选择。因为 CVD 技术比较成熟, 已经在米级光学元件上实现^[5]。美国 Thermo Trex 公司(TTC) 热电子技术部门在 711mm × 559mm 的 SiC 基体上采用 CVD SiC 技术涂上抛光层。CVD SiC 涂层的厚度为 0.9mm, 均匀性偏差小于 10%。目前, TTC 的独立研究得出结论, CVD SiC 涂层方法在生产量大、质量高和低散射反射镜方面有很大的潜力。他们的 CVD SiC 涂层样品正由中国湖的 Naval 武器中心抛光和测试, 得到了表面粗糙度优于 0.2nm RMS 的超光滑镜面。值得注意的是: 在 CVD SiC 涂层时, 应控制涂层的厚度, 以避免在涂层中产生较高的残余应力, 并且也可以减少 CVD SiC 涂层的花费。

3.3 SiC 反射镜的光学加工

SiC 反射镜毛坯经过 CVD SiC 涂层后, 就开始进入加工阶段。首先是去掉毛坯周围和光学面上的多余涂层部分。一种方法是通过钻石车床加工; 另一种方法是研磨。当选择研磨方法时, 研磨的模具用铸钢制成, 研磨粉是碳化硼或与碳化硼粉尺寸相当的钻石粉。虽然用碳化硼粉研磨的速度比用钻石粉慢, 但它对涂层的伤害也小。研磨前, 先将研磨粉用水调匀, 在研磨过程中, 要把调好的磨料连续不断地加到模具和毛坯之间, 最后要达到 50nm 的面形精度。

粗抛光选用钻石抛光粉, 与水混合后使用, 并尽可能不用沥青研磨盘, 这样做的优点是能提高抛光速度。有 CVD SiC 涂层的反射镜经过粗抛光后, 表面粗糙度达到 1nm RMS, 面形精度达到一个波长的水平, 边缘塌陷小于 0.5 波长。粗抛光结果通过激光波面干涉仪测量。

精抛光选用钻石抛光粉与去离子水混合调匀后使用, 抛光盘用沥青抛光盘, 精抛光后, 碳化硅反射镜的表面粗糙度达到 0.1 ~ 0.3nm RMS。

参 考 文 献

- 1 Anapol Michael I, Hadfield Peter. SiC lightweight telescopes for space applications. Proc SPIE, 1992, 1693 Surveillance Technologies
- 2 Bender John W, Ewing Donald G. Manufacture and finishing of lightweight silicon carbide mirrors. Proc SPIE, 1993, 2018 Passive Materials for Optical Elements
- 3 Goela Jitendra S, Taylor Raymond L. Fabrication of light-weighted Si/SiC LIDAR mirrors. Proc SPIE, 1988, 1062 Laser Applications in Meteorology and Earth and Atmospheric Remote Sensing
- 4 Tobin E, Magida M, Kishner S, Krim M. Design Fabrication and Test of a Meter-Class Reaction Bonded SiC Mirror Blank. Proc SPIE, 2543: 12 ~ 21
- 5 Johnson Steve. SiC Coatings on RB SiC Mirrors for Ultra-Smooth Surfaces. Proc SPIE, 1993, 2018 Passive Materials for Optical Elements

Weightlight SiC Mirror Technology

MA Wen-Li, SHEN Mang-Zuo

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

Abstract

Typical weightlight material is presented and the material property of SiC is analyzed in the paper. Some key technologies of SiC mirror are introduced, such as manufacture of mirror blank, coating of SiC and finishing of SiC mirror.

Key words: Weightlight mirror, SiC

马文礼 男, 1962 年 2 月生, 1994 年获机电一体化学士学位, 副研究员。完成的线阵 CCD 拼接相机、实时测量系统多片面阵 CCD 拼接技术研究和智能激光参量测量仪分别获得中科院三等奖。目前从事光电测量仪器和空间轻量化光学系统方面的研究工作。