

金属非球面反射镜的加工和检测技术

谢启明^{1,2}, 杨静^{1,2}, 徐放¹, 肖建国¹, 李刚¹,
木锐¹, 杨彦辉¹, 张若寅¹, 张万清¹, 田湫¹

(1. 云南北方宏光光电有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 金属反射镜是空间和军用红外光学系统中关键元件之一, 分析了适用于空间光学系统反射镜的主要材料, 指出了铝合金作为反射镜材料的优点与缺陷, 介绍了用 SPDT 加工铝合金反射镜的方法, 以及反射镜的镀膜和检测技术, 并完成了口径为 235 mm 的铝合金非球面反射镜的加工, 用 Zygo 干涉仪进行面形检测, 其面形精度达到 RMS 0.13λ (λ=632.8 μm), 镀膜后用红外傅里叶光谱仪检测, 在红外中波波段 (3.7~4.8 μm) 反射率大于 99%。

关键词: 红外热成像; 金属反射镜; 非球面; 单点金刚石切削; 反射膜

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)02-0119-05

Manufacturing and Test Technology for Metal Aspherical Reflector

XIE Qi-ming^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, XU Fang¹, XIAO Jian-guo¹, LI Gang¹, MU Rui¹, YANG Yan-hui¹,
ZHANG Ruo-yin¹, ZHANG Wan-qing¹, TIAN Qiu¹

(1. Yunnan KIRO-CH Photonics Co., Ltd, Kunming 650217, China; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Metal reflector is one of the key elements in aerospace and IR optical systems. In this paper, the materials used in aerospace reflector were analyzed, and the advantages and disadvantages were pointed out. The manufacturing method of aluminum alloy reflectors by SPDT was also introduced, which included coating and testing. By this method, an aluminum aspherical reflector with a diameter of 235 mm was manufactured. The reflector was measured by Zygo interferometer and FTIR Spectrometer. The results show that the form accuracy is RMS 0.13λ (λ=632.8 μm) and the reflectance is more than 99% from 3.7 μm to 4.8 μm waveband after coating.

Key words: thermal imaging, metal reflector, aspherical surface, SPDT, reflect coating

0 引言

随着科学技术的发展, 红外热成像技术作为高新技术在空间遥感和军事上的应用得到了越来越广泛的重视。为了实现更高的分辨力, 需要光学系统具有相当大的光学口径。相比而言, 红外热像仪对能量更敏感, 对大口径光学系统的需求也更迫切。目前空间光学系统多为折反式或全反式, 大口径反射镜成为此类系统的一个关键元件^[1-3]。

反射镜的制造技术包括了材料的选择、加工、镀膜和检测等, 与地面光学系统不同, 空间光学系统不但要求体积小、重量轻和结构坚固稳定, 还要考虑严酷的力学环境和大范围变化的温度环境对系统的影响, 反射镜材料选择的重要性不言而喻^[3-9]。由于是远

距离观测, 为了达到理想的性能, 与地面光学系统相比, 其面形精度的要求也高得多。另一方面, 轻量化是此类反射镜的一个共同特点, 由此导致一定的强度和刚度损失, 这些因素都为反射镜的加工造成了相当的难度。其特殊的结构和较高的光谱性能要求, 为此类反射镜的镀膜带来了新的课题。

1 材料的选择

目前大口径反射镜使用的材料主要有 ULE、Zerodur、SiC、Al/SiC、铍和 Al 等。此外, 熔石英和 Si 也有应用, 表 1 列出其主要性能。

1) ULE: 即超低膨胀系数石英玻璃, 是美国 Corning 公司研制开发的一种掺入 7.5% TiO₂ 的改性石英玻璃, 该玻璃密度小, 可抛光性强, 能通过焊

收稿日期: 2014-05-22; 修订日期: 2014-11-11.

作者简介: 谢启明 (1966-), 男, 湖南长沙人, 工程硕士, 研究员级高工, 主要从事光学设计和检测, 以及超精密加工、光学薄膜等技术研究。E-mail: xieqiming@sina.com.

表 1 常用反射镜材料的主要性能 Table 1 Main performance of materials for mirror

常用反射镜材料	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	泊松比 ν	热导率 $\kappa/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$
ULE	2.21 ^[4]	67 ^[4]	0.015 ^[4] 0.03 ^[5]	0.17 ^[4]	1.3 ^[4]
Zerodur	2.53 ^[4]	92 ^[4]	-0.09 ^[4] 0.05 ^[5]	0.24 ^[4]	1.64 ^[3] 1.3 ^[4]
Be	1.85 ^[4]	287 ^[4] 340 ^[4]	11.3 ^[4]	0.07 ^[4]	216 ^[4]
RB-SiC	3.04 ^[4]	400 ^[6]	2.4 ^[4]	0.14 ^[4] 0.18 ^[6]	170 ^[4]
CVD SiC	3.21 ^[7]	460 ^[4]	4.0 ^[4] 2.4 ^[7]	0.21 ^[7]	300 ^[4]
Al	2.71 ^[7]	69	23 ^[7]	0.33 ^[7]	171 ^[7]
Fused Si	2.2 ^[7]	72 ^[5]	0.5 ^[5] 0.56 ^[7]	0.17 ^[7]	1.37 ^[7]
Si	2.33 ^[3]	131 ^[3]	2.6 ^[3]	0.28 ^[10]	137 ^[3]
Al/SiC	3.0 ^[3] 2.94 ^[6]	180 ^[6]	8.1 ^[6]	0.2 ^[6]	225 ^[3]

接技术实现轻量化，是较理想的镜体材料。但与普通优质石英玻璃相比，它的化学组成相对不均，会使其线膨胀系数呈微区分布不均^[4]。

2) Zerodur: 是德国 Schott 公司生产的膨胀系数近似为零的微晶玻璃。相比而言，微晶玻璃的比刚度、导热率、热稳定性等均略优于 ULE，性价比也优于 ULE，它所具有的良好机械加工性质使它更有利于采用钻铣法制造轻质镜坯^[5]。

3) Be: 是一种金属材料，相比其他反射镜材料，它的各项性能极佳，但最大的缺点是其氧化物有剧毒，在制造过程中，为防止毒性带来的影响，需要采取复杂的防护措施，这无疑增加了制造成本。

4) 碳化硅: 是一种综合性能优良的反射镜材料，密度低、比刚度高、热膨胀系数小、导热性良好，可得到极好的抛光表面，且无毒，制造过程不需要特殊的防护设备。但目前其毛坯材料和加工成本都很高，是除航天大项目课题之外不能承受的^[3]。碳化硅因制备工艺不同可分为若干种，主要包括反应烧结碳化硅（RB-SiC）和化学气相沉积碳化硅（CVD-SiC）。其中，RB-SiC 能够制备出近乎完全致密的碳化硅陶瓷，可制备形状复杂轻量化程度高的大尺寸镜坯，且收缩率小，但材料的均匀性和光学加工性能较差。CVD-SiC 各向同性，可以得到良好的光学表面，但制备速度缓慢，不能用于复杂的形状，一般将其用于 SiC 镜体的表面改性上^[4]。

5) 铝合金: 其热膨胀系数和热传导系数与玻璃材料相比大得多，对温度变化更敏感，且弹性好，

在加工和安装过程中易变形，这些特点限制了它在相对较大口径反射镜上的应用。但与其它反射镜材料相比，铝合金也有明显的优势。首先，它采购容易，价格低廉；其次，它易于加工成形，特别是随着单点金刚石切削（SPDT）技术的发展，采用 SPDT 加工的铝合金反射镜的面形精度和表面质量完全可以满足红外光学系统成像质量的要求，且可以直接高效、经济地加工非球面，因而受到设计人员的青睐；最后，空间光学系统的温度波动非常大，若镜体和支撑结构所用材料热膨胀系数相差很大，将导致各结构尺寸的变化量相差很大，最终使反射镜产生应力变形，像质退化。而且温度变化还会使反射镜面形发生变化，导致系统像面位移。而空间光学系统的支撑结构也多采用金属（包括铝合金）材料，采用铝合金作反射镜材料，使其和支撑结构的材料特性相近，有利于消除热应力变形，减小像面位移^[7]。为了保证足够的强度，用于反射镜的铝合金应为超硬铝合金，常用的牌号有 6061-T6、7075 等。

6) Al/SiC: 高体份 Al/SiC 在性能上仅次于 Be 和碳化硅，也具有高比刚度、高导热、低膨胀、高尺寸稳定性等优点。国外已将其用来制作各种激光反射镜和空间扫描镜等。近年来国内也开始了相关研究，加工的大尺寸反射镜的表面质量和面形精度都满足空间光学系统的要求^[3]。

2 单点金刚石切削加工金属非球面反射镜

SPDT 是一项始于 20 世纪 50 年代的超精密加工

技术^[1]，该技术利用天然金刚石卓越的切削性能，结合现代计算机、自动控制及机械制造技术，制造出超精密机床，用天然金刚石作刀具，可对部分晶体（如 Ge、ZnSe、ZnS 等）和 Cu、Al 等有色金属切削加工出“镜面”级的表面质量，表面粗糙度 Ra 可在 5 nm 以下，可加工的面形包括平面、球面、非球面和衍射面等，非常适合铝合金非球面的加工。

空间用金属反射镜均为轻量化设计，由于零件极易变形，因此对此类反射镜进行 SPDT 加工的关键即通过对毛坯的处理提高材料强度，以及通过夹具设计尽可能在保证装夹可靠的前提下，减小紧固力或使紧固力均匀，使零件受力小或受力均匀，即使零件变形也尽可能是均匀变形。另外对零件安装基准面的面形要求也应和零件精度相匹配。本课题加工的反射镜为铝合金非球面反射镜，口径为 $\phi 235$ ，除工作面以外整个零件主体均为凹槽结构，无法采用弹性夹头或粘接等装夹方式，为此需根据上述设计原则，设计和加工一整套专用工装，结果见图 1。

实际加工是在德国进口金刚石机床上进行，该机床稳定性较高，最大加工直径 $\phi 800$ mm，适于加工中大口径非球面光学零件。加工前所有安装基准面均用单点金刚石车削或人工研磨处理，以保证面形精度和形位公差要求；为避免零件在高速旋转切削过程中由于振动影响表面质量，对局部结构进行了特殊处理；连接螺钉锁紧力度保持一致，以保证零件下盘后的面形达到要求。

由于零件口径超过 $\phi 200$ mm，弧高超过 25 mm，且中央有孔，加工现场检测设备无法对面形进行全口径测量，为此制作了 $\phi 150$ mm 的调刀件，该调刀件除口径外，其余参数均和反射镜相同。通过车削调刀件，对面形进行调整。通过不断调整切削参数，既要保证面形，还要保证表面质量，最终达到调刀件 PV（峰谷值） $< 0.3 \mu\text{m}$ ，RMS（均方根） $< 0.03 \mu\text{m}$ ，然后立即对实际反射镜进行车削，利用

机床的稳定性保证反射镜的面形质量。零件完工后表面质量较好，刀纹和彩环较弱。

3 反射膜的制备

为了进一步提高反射镜的反射率，一般需在反射镜上镀制反射膜，常用的反射膜膜料有金、银和铝等，其中镀金的反射膜，在红外中波波段反射率最高，因此空间光学系统的反射镜一般镀制金反射膜。在实际制备过程中，应重点控制镀膜前的清洁和预处理、镀膜夹具设计和镀膜工艺优化几个关键步骤。

由于反射镜采用了轻量化设计，结构复杂。在车削加工的过程中，镜体不可避免地被铝屑、冷却液及有机溶剂污染，如何彻底有效地对反射镜进行镀膜前的清洁，直接关系到膜层的牢固度。本课题加工的反射镜为铝质基底，硬度较低，表面残留的各种印渍容易被氧化和腐蚀，采用一般清洗方法不能保证有效的清除所有车削残留液和污物，还易造成表面损伤。实际镀制是采用手工清洁方式对反射镜进行处理，具体包括：

- 1) 仔细去除零件边缘及中孔边缘的细小毛刺；
- 2) 将反射镜浸泡在清洁剂中，充分溶解其上的各种残留液和残留物；
- 3) 用适当的温度烘焙反射镜，去除清洁剂；
- 4) 使用湿擦的方法，用不同的清拭溶液和极轻的手法擦拭零件表面，尽可能地去去除腐蚀或氧化较深的印渍。

本课题的反射镜边缘台阶面极小，无法利用台阶面把零件固定到镀膜机工件架上。对于此类高精度的反射镜，利用其本身的螺钉孔来固定，对面形精度会造成一定的影响，镀膜时的高温近似于对零件进行热处理，完工后恐产生不可逆转的形变，降低反射镜面形精度。针对该反射镜的结构，设计和

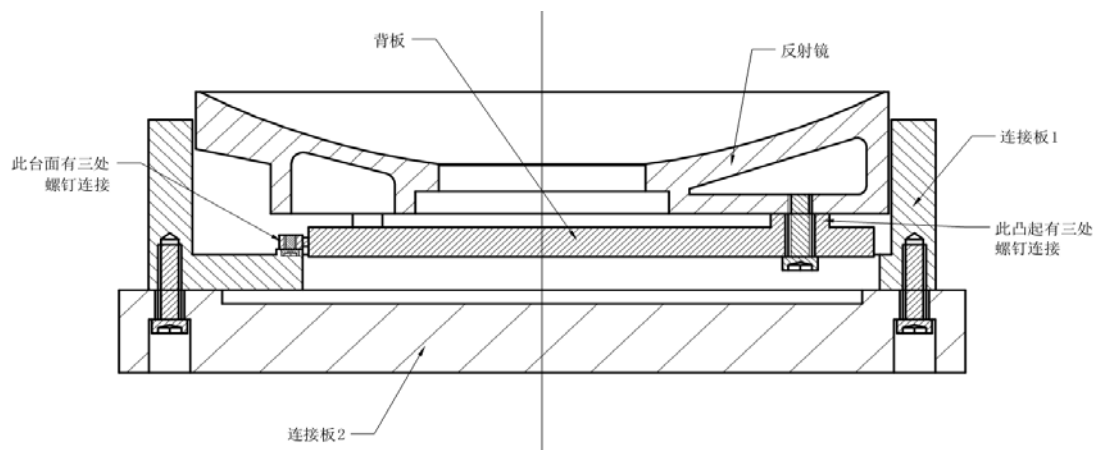


图 1 SPDT 工装示意图

Fig.1 Diagram of SPDT fixture

加工了专门的夹具（见图2），最终将反射镜吊装到工件盘上进行反射膜的制备。

为了保证膜层的光谱性能，及必需的环境适应性，也为了避免在膜层制备过程中零件变形，需要对膜系和制备工艺进行优化，包括根据反射镜在镀膜机里的实际位置和运动轨迹，重新设计修正挡板，以确保镀制的膜层均匀性和光学性能达到最优。镀制过程应特别注意对温度的控制，缓慢的进行加温和冷却，使得镀膜完工后，零件表面的面形变化在允差范围之内。另外，因零件较重，需对单件制备的零件做平衡配重处理，以保持转动平顺。

4 检测

对非球面反射镜的检测主要包括面形和反射率的测量。其中，面形检测主要有接触式和非接触式测量两大类，采用轮廓仪进行测量属接触式测量，用干涉仪或阴影法测量则属于非接触式测量，对反射率的测量则用傅里叶红外光谱仪进行。

用轮廓仪测量非球面面形，方便快捷，除仪器本身配备的附件外，几乎不需要额外的用具。但因为是接触式测量，对类似铝合金一类的材质，测试过程中会在被测件表面划出细微的划道，影响表面质量。另外，目前的轮廓仪在量程和弧高上均有所限制，对大口径反射镜不适用。一般而言不建议用轮廓仪对完工反射镜进行面形检测。但在加工过程中，用轮廓仪来测试面形不失为一种较好的方法。

随着激光干涉仪的普及，现大多采用干涉仪对反射镜面形进行最终的非接触式测量。用干涉仪测量非球面面形需加工专用补偿器，对补偿器的精度有相应的要求，且测量过程中调校过程相对复杂。

本课题反射镜的SPDT加工过程就是采用轮廓仪对面形进行测试。对 $\phi 150\text{mm}$ 调刀件，采用Taylor Hobson公司PGI1240轮廓仪，进行面形测量，根据测量结果，对机床进行参数调整，直到在不进行任何补偿的情况下，将调刀件的面形精度控制到 $PV < 0.3\text{ }\mu\text{m}$ ， $RMS < 0.03\text{ }\mu\text{m}$ 。

为了验证上述加工方法的可靠性，采用Taylor Hobson公司的PGI Dimension XL轮廓仪对实际反射镜进行了全口径面形检测，检测设备如图3所示。该轮廓仪的测量传感器可以在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间偏转，并采用拼接的方式实现全口径检测。通过计算，我们将传感器偏转 13° ，分别检测 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、 $60^\circ \sim 240^\circ$ 、 $120^\circ \sim 300^\circ$ 三个方向的零件面形，对应检测结果分别为 $PV = 0.44\text{ }\mu\text{m}$ 、 $RMS = 0.08\text{ }\mu\text{m}$ ， $PV = 0.46\text{ }\mu\text{m}$ 、 $RMS = 0.06\text{ }\mu\text{m}$ ， $PV = 0.47\text{ }\mu\text{m}$ 、 $RMS = 0.08\text{ }\mu\text{m}$ ，考虑到实际零件口径比调刀件口径大36%，初步认为在一定的误差范围内，PGI1240的测量结果和PGI Dimension XL的结果是吻合的。

对反射镜非球面面形的最终检测在Zygo公司的DynaFiz干涉仪上进行，补偿器的精度优于 $\lambda/10$ ，光轴偏差小于 10 nm 。干涉仪镜头选择平面镜，镜头口径大于补偿器口径即可，将补偿器与零件分别放置在五维调整架上，在干涉仪镜头与补偿器之间放置衰减片，使干涉条纹更加清晰，检测装置如图4所示。检测时，需通过五维调整架将干涉仪、补偿器和被测反射镜调整到同轴，并使干涉条纹数量最少。当干涉条纹处于稳定状态时，测量此时的零件面形精度。测量结果为 $RMS = 0.13\lambda$ ，如图5(a)所示。过滤掉象散（Astigmatism） $RMS = 0.108\lambda$ ，见图5(b)。采用同样的方法对镀膜后零件面形进行了检测，结果为 $RMS = 0.18\lambda$ ，过滤掉象散（Astigmatism）后 $RMS = 0.144\lambda$ 。

由于反射镜是大尺寸中孔非球面凹面镜，无法直接测量其反射率。只能测量陪镀片的反射率。采用BRUKER TENSOR 27傅里叶红外光谱仪（见图6）对镀有反射膜的陪片进行了光谱测试，在红外中波段 $3.7 \sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ ，平均反射率大于99%（见图7）。

5 结论

本文分析了适用于空间光学反射镜的各种材料，其中，铝合金由于轻质、高强度、价格低廉和易于采购，可用SPDT技术经济、高效地加工非球

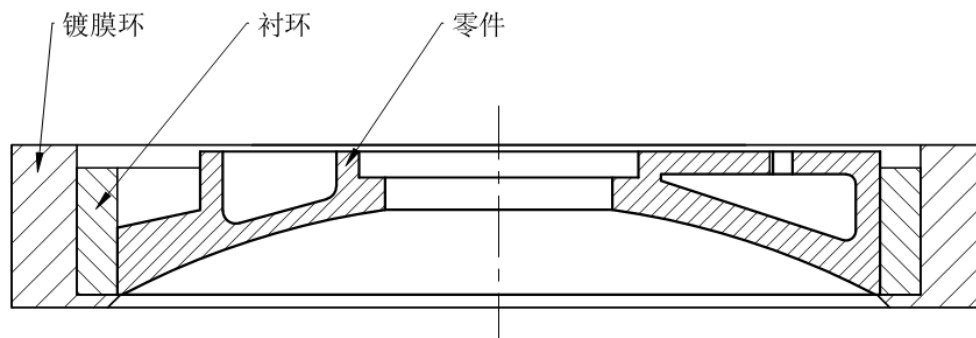


图2 反射膜制备工装示意图

Fig.2 Diagram of reflect coating fixture

面镜，其面形精度和表面质量满足红外热成像系统的要求，是一种较好的反射镜材料。在铝合金反射镜的加工过程中，对毛坯的处理至关重要。在 SPDT 加工中，要通过合理的工装设计和工艺流程，尽可能消除装夹产生的应力和变形，保证反射镜下盘后面形变化最小，或面形变化均匀。镀膜过程中应特

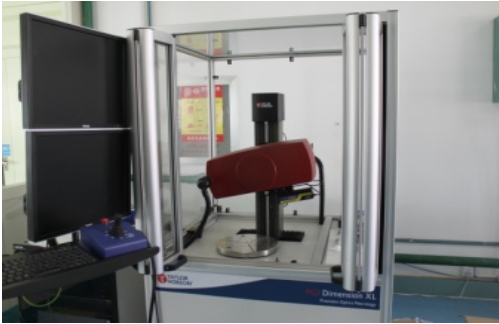


图3 轮廓仪
Fig.3 Talysurf

别注意零件镀膜前的清洁和预处理，并采取有效地装夹技术，并对镀膜工艺进行充分的优化，减小镀膜对零件面形精度的影响。对口径为 $\phi 235\text{ mm}$ 的铝合金非球面反射镜进行加工和镀膜，镀膜前面形精度达到 $\text{RMS } 0.13\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ }\mu\text{m}$)，红外中波波段反射率大于 99%。满足了热像仪的要求。

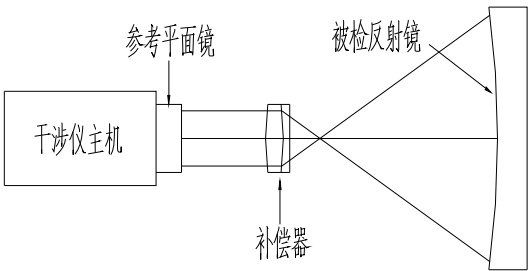
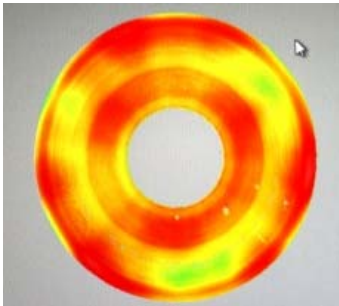
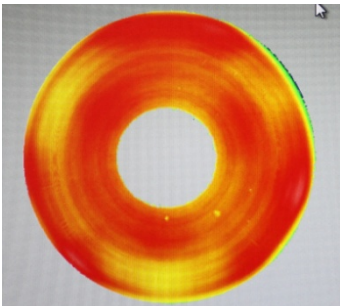


图4 干涉仪检测装置
Fig.4 Setup of interferometer test



(a)
RMS: 0.13λ ($\lambda=632.8\text{ }\mu\text{m}$)
图5 干涉仪测量结果



(b)
RMS: 0.108λ ($\lambda=632.8\text{ }\mu\text{m}$)
图5 Results of interferometer test



图6 傅里叶红外光谱仪
Fig.6 FTIR spectrometer (BRUKER TENSOR 27)

参考文献：

[1] 惠彬, 裴云天, 李景镇. 空间红外光学系统技术综述[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 90-94.
[2] 张新, 付强. 空间光学系统技术发展探讨[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 29-35.
[3] 高明辉, 张军, 李景林, 等. 高体份 SiC/Al 反射镜在空间光学应用可行性的分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1803-1807.
[4] 唐裕霞, 张舸. 大口径碳化硅轻质反射镜坯制造技术的研究进展[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 510-513.
[5] 宋淑梅, 陈亚, 吕学锋, 等. 大口径轻质非球面反射镜制造技术研究[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 246-248.

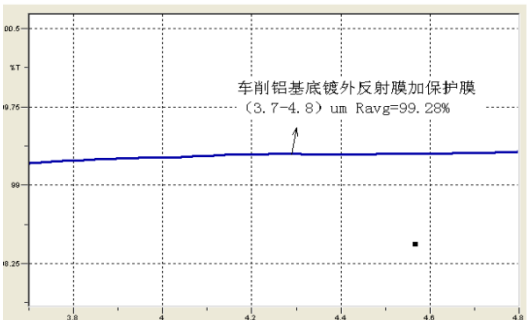


图7 反射率曲线
Fig.7 Curve of reflectivity

[6] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1533-1539
[7] 曹银花, 李林, 王智勇. 非球面金属反射镜在红外热成像系统中的应用研究[J]. 红外技术, 2006, 28(7): 373-377.
[8] 石磊, 许永森, 刘福贺. 光电系统中镀膜反射镜的发展与应用[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 749-758.
[9] 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.
[10] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
[11] 谢启明. 单点金刚石切削在红外光学的应用[D]. 昆明: 昆明物理研究所, 2002.