

文章编号 1004-924X(2016)12-2902-06

大口径传输反射镜的研究进展

易 葵^{1*}, 马 平², 邱 红³, 王力军⁴, 魏朝阳¹, 赵元安¹, 朱美萍¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041;

3. 成都光明光电有限公司, 四川 成都 610100;

4. 北京有色金属研究总院 稀有金属冶金材料研究所, 北京 100088)

摘要:针对我国惯性约束聚变装置(ICF)对高性能传输反射镜元件的性能要求,探索了大口径传输反射镜制备涉及的关键技术与工艺。深入开展了 K9 玻璃坯片研制、光学冷加工、传输反射镜镀膜和激光预处理等方面的研究工作。提出了 400 mm 口径 K9 反射类坯片精密退火工艺,形成了高精度平面加工技术路线;制备了低缺陷薄膜,并且建立了大口径光学元件预处理装置。最后,综述了大口径高性能传输反射镜研制方面的主要成果。研制的 400 mm 口径传输反射镜在 1 053 nm 处以 45°入射时,其表面粗糙度优于 99.8%,面形 PV 值小于 $\lambda/3$ ($\lambda=1\ 053\ \text{nm}$),损伤阈值大于 $30\ \text{J}/\text{cm}^2$ (5 ns)。基于提出的技术研制的大口径传输反射镜已成功应用于我国神光系列高功率激光装置,有力支撑了我国大型激光装置的稳定运行。

关键词:传输反射镜;高功率激光器;K9 玻璃;光学冷加工;镀膜技术;激光预处理;综述

中图分类号: TN305.2; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.2902

Progress on large aperture transport mirrors

YI Kui^{1*}, MA Ping², QIU Hong³, WANG Li-jun⁴,
WEI Chao-yang¹, ZHAO Yuan-an¹, ZHU Mei-ping¹

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610000, China;

3. CDGM Glass Limited Liability Company, Chengdu 610000, China;

4. Rare Metals Metallurgy & Materials Research Institute,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

* Corresponding author, E-mail: ky@siom.ac.cn

Abstract: For the requirements of Inertial Confinement Fusion(ICF) facility for large aperture transport mirrors with higher performance, key technologies and special processing involved in mirror machining are explored. Some kinds of machining technologies, including the manufacturing of K9 glass blanks, optics cold processing, coating for transport mirrors and laser conditioning are investigated.

收稿日期:2016-10-26;修订日期:2016-11-08.

基金项目:国家科技专项资助项目

The precision annealing process of 400 mm aperture K9 glass blank is proposed to implement the high precision optical finishing. Moreover, Low-defect coating is achieved. A preprocessing device for the larger aperture optical element is established and a laser conditioning platform for large aperture transport mirror is also realized. Finally, the paper reviews main achievements of development of large aperture transport mirrors. A 400 mm aperture transport mirror with an incidence angle of 45° shows its surface roughness to be higher than 99.8%, surface figure(PV value) lower than $\lambda/3$, and the laser-induced damage threshold higher than 30 J/cm^2 (5 ns) at 1 053 nm. The large aperture transport mirrors have been successfully used in the higher power laser equipment of SG ICF facility, which supports the stable operation of the facility.

Key words: transport mirror; high-power laser; K9 glass; optical cold processing; coating technology; laser conditioning

1 引 言

传输反射镜作为大型高功率激光装置中光束引导与传输的重要组成器件,对激光系统的负荷强度、可靠性和光束质量有着非常重要的影响^[1]。为了获得高性能的传输反射镜,研究人员在大口径基片加工、介质膜制备和激光预处理等方面开展了大量的研究工作。美国 LLNL 国家实验室在国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)的研制过程中,联合多家工业合作伙伴,开展了“NIF 光学元件制造发展计划”,研发了电解液在线修整(ELID)、合成盘抛光、确定性抛光(抑制波纹的小工具数控抛光、确定性连续抛光)和化学刻蚀等先进的光学冷加工技术^[2-4],将米级光学元件的制造能力提升了十倍以上。为提高膜层的损伤阈值,研究人员在介质膜驻波场设计和保护膜等方面也开展了一系列工作^[5-6]。在薄膜制备方面,结合有效的膜系设计,选用金属 Hf 取代 HfO_2 作为镀膜材料^[7-8]从而将多层膜中节瘤缺陷密度降低了 2~3 倍,是近年来最显著的成果之一。此外,研究表明^[8-11]激光预处理可以有效提高反射膜的损伤阈值。

针对我国惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)驱动装置对高性能传输反射镜元件的性能要求,研究人员在 K9 坯片研制、光学冷加工、传输反射镜镀膜和激光预处理等方面进行了深入的研究,本文综述了大口径高性能传输反射镜研制方面的主要成果。

2 K9 玻璃坯片

K9 玻璃是一种性能优异的光学材料,作为传输反射镜的基底材料,其稳定性和可控性直接影响着传输反射镜的性能。K9 坯片研制的主工艺流程线按工艺环节分可分为配料、熔炼、成型、退火、加工和检测。

近年来,研究人员针对 400 mm 通光口径传输反射镜 K9 坯片的制备及检测技术进行了深入的研究和探索,基本解决了坯片的熔炼、成型、精密退火等工艺的技术难题,并完善了相关测试方法。基于 K9 玻璃材料精密退火技术,通过不断优化确定了最佳的精密退火工艺参数,并且通过对比多种材料确定了铜板为较好的精密退火工装。此外,研究人员研制了可改善玻璃体温度分布的“恒温均热腔”,有效控制了玻璃在垂直方向上的温度梯度,大大改善了玻璃内部温度分布的均匀性和对称性,并在一定程度上降低了玻璃的边角应力。通过优化成型与精密退火工艺,减小了 K9 玻璃坯片的应力双折射,提高了光学均匀性,改善了可加工性能,降低了条纹度和气泡度(含包裹体)。同时还分析了不同支撑方式对应力的影响,确定了合理的支撑工装,并研究了上下翻转拼接测试方法,提高了测试的效率和准确性。最终实现了 400 mm 口径 K9 反射类坯片的应力双折射 $\leq 5 \text{ nm/cm}$,导致不小于 30 nm 光程差的条纹密度 $\leq 1\%$,气泡直径 $\leq 0.44 \text{ mm}$ 。

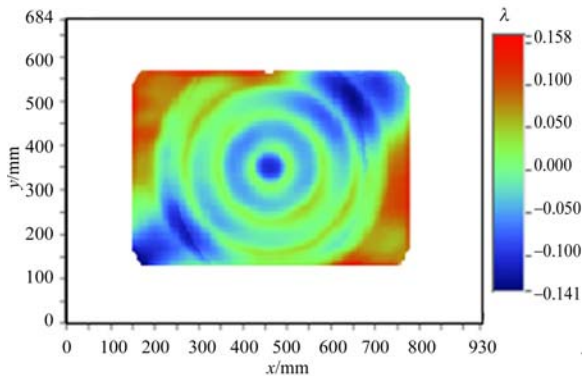
目前,400 mm 口径 K9 反射类坯片的研制工艺路线已经固化,坯片批量生产线的全流程工艺也已定型。

3 光学冷加工

在光学冷加工方面,针对传输反射镜全频谱的波面质量要求,分别开展了主动匹配式环形抛光、小尺度匀滑、超光滑抛光等技术的研究,确立了“环抛+低波纹度数控小工具+表面处理”的技术路线。采用组合抛光结合光顺束匀滑技术来实现平面元件的高精度加工,突破了大口径平面反射类元件在小工具数控抛光中频误差控制方面的技术瓶颈。采用分步匀滑式数控抛光技术,大幅提高了元件抛光过程中的确定性、均匀性及稳定性,有效抑制并在很大程度上消除了小尺度加工波纹,突破了大口径平面反射类元件在小工具数控抛光中频误差控制方面的技术瓶颈,实现了低频面形 PV、波前梯度 GRMS 及中频 PSD、高频 RMS 指标的同步收敛加工。通过精确标定小磨头及优化磁流变抛光去除函数和路径规划,完成了磁流变抛光的低波纹高精度修形,从而实现了冷加工面形精度的精确控制。

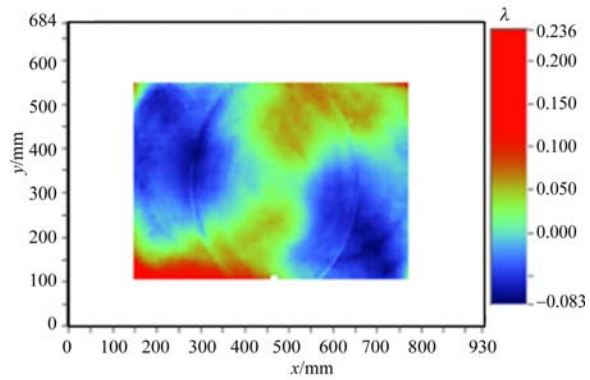
在环形抛光阶段,在传输反射镜的波前精度控制方面注重全频段指标的控制,在优化理论模型的同时通过开展大量工艺实验,对转速、压力、修正盘位置、槽形等工艺参数进行了优化,在低频波前 PV 精度受控的基础上,稳定实现了 PSD1 优于 2 nm、PSD2 优于 0.4 nm 的控制要求。图 1 显示了环抛改进前后的面形结果,改进前环状加工纹路明显,改进后无明显规则的加工纹路。

研究人员利用磁流变抛光不产生亚表面缺陷的优点,建立了基于磁流变斜面抛光和氢氟酸蚀



(a) 改进前加工面形

(a) Surface shape before process optimization



(b) 改进后加工面形

(b) Surface shape after process optimization

图 1 环形抛光面形结果

Fig. 1 Surface shapes after free annular polishing

刻技术的亚表面缺陷表征方法。基于准确的亚表面缺陷深度表征技术,建立了研磨阶段亚表面缺陷与粗糙度的变化规律,研究了抛光粉颗粒度与表面疵病的关系,如图 2 所示。磁流变抛光残留对元件损伤阈值有重要影响,研究人员通过优化酸洗工艺,实现了传输反射镜的保形酸洗和抛光残留的有效去除,提高了传输反射镜的损伤阈值。

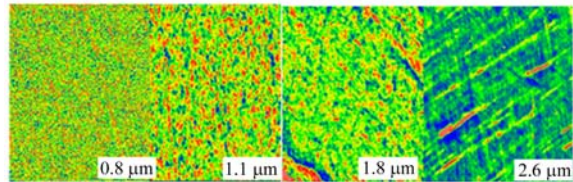


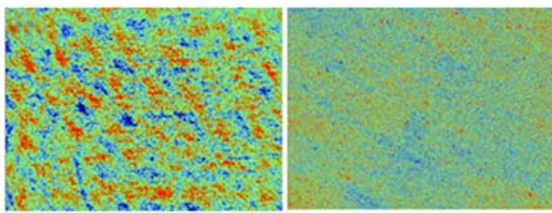
图 2 抛光粉颗粒度与表面疵病的关系

Fig. 2 Relationship between polishing powder particle size and surface defects

结合主动匹配式环形抛光技术和光顺束匀滑技术,在保证低频波前控制精度的基础上,通过选用粒度较细、粒径分布较均匀的抛光液进行精密超光滑抛光(图 3),同时采用磁力悬浮分散技术来增强抛光液的悬浮性并减少抛光颗粒的团聚,从而有效控制中频误差和元件的表面粗糙度,使传输反射镜元件的加工面形 PSD2 及表面粗糙度 RMS 优于 0.4 nm。

4 传输反射镜镀膜

基于高性能介质激光薄膜的综合设计技术,研究人员采取“基片的严格筛选+无损基片清洗



(a) PSD2=0.2 nm (b)RMS=0.15 nm

图 3 超光滑抛光结果

Fig. 3 Characteristics of surface shape after super-smooth polishing

“高纯度金属 Hf 材料+电子束蒸发控制”的技术路线,通过工艺集成实现了低缺陷反射膜的制备。

膜系结构设计时除优化膜层厚度达到所需的光谱性能外,还需优化膜系结构的驻波场和温度场,通过降低驻波场和温度场来提升膜层的抗激光损伤阈值;此外,需匹配设计膜层厚度以降低膜层应力。结果表明,外保护膜能够有效增强 HfO₂/SiO₂ 反射膜的损伤阈值。小光斑扫描测试结果显示:未加外保护膜的基频反射膜在 27.72 J/cm² 的能流密度下出现大面积的连续破坏,而带有厚度为 SiO₂ 外保护层的基频反射膜样品在经过最后一个能量台阶(94.36 J/cm²)的测试后,选取损伤点尺寸较大的 10 个点,每个点辐照 1 000 个脉冲进行生长测试,损伤点仍没有生长。

对于高功率激光薄膜而言,镀膜前基底的表面质量是影响薄膜性能的重要因素,基底的表征和清洗工艺对于高性能激光薄膜元件的制备来说是至关重要的。我们提出了一种基于热处理技术的基底表征与处理方法,实现对基底的筛选。根据基底表面的污染类型和特征,采用并发展了“弱碱性溶液浸泡+揉擦、喷淋清洗+超声波清洗”的基底清洗方法。图 4 所示是用于大口径光学镀膜元件的多槽基底清洗装置,包括了浸泡、揉擦、喷淋和超声清洗工艺用槽。

此外,在镀膜机内配置离子束清洗装置,通过优化选择离子束能量,有效地去除基底表面的二次污染和部分亚表面缺陷,降低基底表面和亚表面缺陷引起的节瘤缺陷源。清洗可以得到洁净表面,从而增强了膜层与基底的附着力,进而综合提升了薄膜元件的抗激光损伤性能。

在镀膜材料的选择方面,超低损耗的氧化硅

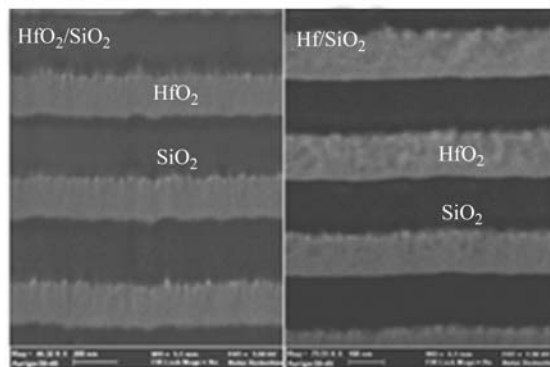


图 4 大口径光学镀膜基片的清洗装置

Fig. 4 Large-aperture optical coating substrate cleaning device

几乎是不可替代的低折射率材料,而高折射率材料则经受了从 TiO₂、Ta₂O₅ 向 ZrO₂、HfO₂ 的变革。目前,氧化铪和氧化硅是制备 1 064 nm 高功率激光薄膜最常用的镀膜材料。近年来,在提高反射膜激光损伤阈值方面最显著的成果之一是使用金属 Hf 来代替氧化铪作为初始镀膜材料。使用金属 Hf 作为镀膜材料可以降低膜层中的缺陷密度。

在金属 Hf 的工艺改进方面,最有效的手段是优化蒸发金属 Hf 采用的电子束扫描轨迹。通过优化电子束扫描轨迹,将 1 053 nm 传输反射镜膜层中的节瘤缺陷密度从 2.4/mm² 降低到 0.6/mm²,反射膜的功能性损伤阈值从 22 J/cm² 提升到 94 J/cm² 以上。以金属 Hf 作为初始镀膜材料除了能够大幅度降低节瘤缺陷密度之外,还能够改善传输反射镜多层膜的界面质量(图 5),



(a) HfO₂

(b) Hf

图 5 不同初始镀膜材料沉积的 HfO₂/SiO₂ 多层膜界面质量

Fig. 5 Interfaces of HfO₂/SiO₂ multilayer coatings deposited with different initial materials

减少界面处的空穴等缺陷,从而减少平底坑和分层剥落的损伤形貌,进而提高传输反射镜的抗激光损伤能力。

由于传输反射镜膜层较厚,薄膜元件呈现较大的应力,继而影响元件的波面质量。在工艺研究的基础上,通过模拟镀膜过程释放基片预应力,建立了热循环工艺流程,稳定基片面形;采用多层薄膜应力匹配耦合模型,进行多层膜应力匹配与补偿,降低多层膜应力;同时进行必要的均匀性修正,以提高膜厚的均匀性,从而达到改善面形的效果。采用面形补偿技术改善了应力水平,进而有效改善了反射镜的面形质量。针对边缘效应严重的现象,采用边缘效应控制工艺优化了边缘效应,改善了面形参数,使传输反射镜的 PSD1-RMS(反射)优于 1.8 nm。

5 传输反射镜的激光预处理

激光预处理技术是指在薄膜沉积后采用激光对薄膜进行后处理,以降低或者一定程度地稳定薄膜中的微缺陷,降低薄膜对激光的敏感性,从而达到提高薄膜激光损伤阈值的目的。针对大口径元件的激光预处理需求,建立了大口径光学元件的激光预处理平台,并基于该激光预处理平台开展了大口径传输反射镜元件的激光预处理工艺研究。通过激光预处理技术,提升了传输反射镜的

损伤阈值。此外,从基础的激光与光学材料元件相互作用的机制出发,以功能性损伤评价体系为基础,分析了缺陷诱导的初始损伤以及在后续激光作用下损伤的发展特性,深度剖析了由于存在初始损伤而引入的吸收损耗、散射损耗以及与在装置中运行相关的光束调制和功率平衡等问题,形成了一套完整的针对光学元件激光预处理能流台阶优化选择的方案,确立了“小光斑扫描+微区修复”的激光预处理技术路线。区域稳定的技术方案可以有效控制损伤的扩展。传输反射镜预处理后的损伤阈值能够达到 30 J/cm^2 ,功能性损伤阈值提高了 1 倍。

6 总结与展望

经过多年的研究积累,我国在高功率激光用传输反射镜的研制方面取得了长足的进展,通过深入的研究和探索突破了大口径传输反射镜制备的关键技术与工艺。研制出 400 mm 通光口径的传输反射镜,该反射镜在 1 053 nm 波长、 45° 角入射的情况下,其 S 分量反射率 $\geq 99.8\%$,面形 PV 值 $\leq \lambda/3$ ($\lambda = 1\ 053 \text{ nm}$),膜层损伤阈值 $\geq 30 \text{ J/cm}^2$ (5 ns)。这种大口径传输反射镜已成功应用于我国神光系列高功率激光装置,有力支撑我国大型激光装置的稳定运行。

参考文献:

- [1] CAMPBELL J H, HAWLEY-FEDDER R A, STOLZ C J, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics, 2004: 84-101.
- [2] MENAPACE J A, DAVIS P J, STEELE W A, *et al.*. MRF applications: on the road to making large-aperture ultraviolet laser resistant continuous phase plates for high-power lasers [C]. *Boulder Damage Symposium XXXVIII: Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers*. International Society for Optics and Photonics, 2006: 64030N-64030N-12.
- [3] OHMORI H. Electrolytic in-process dressing (ELID) grinding technique for ultra precision mirror surface machining[J]. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1993, 59(9):1451-1457.
- [4] WONG L, SURATWALA T, FEIT M D, *et al.*. The effect of HF/NH₄F etching on the morphology of surface fractures on fused silica[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355(13): 797-810.
- [5] DEFORD J F, KOZLOWSKI M R. Modeling of electric-field enhancement at nodular defects in dielectric mirror coatings[C]. *Optical Materials for High Power Lasers*, International Society for Optics and Photonics, 1993: 455-472.
- [6] GENIN F Y, STOLZ C J, REITTER T A, *et al.*. Effect of electric field distribution on the morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multilayer polarizers[C]. *Laser-Induced Damage in Op-*

- tical Materials, International Society for Optics and Photonics*, 1997; 342-352.
- [7] BEVIS R P, SHEEHAN L M, SMITH D J, *et al.*. The advantages of evaporation of Hafnium in a reactive environment to manufacture high damage threshold multilayer coatings by electron-beam deposition[J]. *SPIE*,1999,3738:318-324.
- [8] STOLZ C J, WEINZAPFEL C L, RIGATTI A L, *et al.*. Fabrication of meter-scale laser resistant mirrors for the National Ignition Facility: a fusion laser[J]. *SPIE*, 2003,5193:50-58.
- [9] STOLZ C J, GÉNIN F Y. *Laser Resistant Coat-*
- ings, Optical Interference Coatings*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2003; 309-333.
- [10] BERCEGOL H. What is laser conditioning? A review focused on dielectric multilayers[J]. *SPIE*. 1999, 3578: 421-426.
- [11] WOLFE C R, KOZLOWSKI M R, CAMPBELL J H, *et al.*. Laser conditioning of optical thin films [J]. *SPIE*,1989;1438:360-375.
- [12] FAN Z, ZHAO Q, WU Z. Temperature field design of optical thin film coatings[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials, International Society for Optics and Photonics*, 1997; 362-370.

作者简介:



易 葵(1970—),男,正高级工程师,现任中国光学学会光学薄膜专业委员会副主任委员、上海市激光学会薄膜专业委员会主任委员,主要从事光学薄膜的研究,包括高功率激光薄膜、软 X 射线激光薄膜、薄膜测试技术和薄膜生长监控控制技术等。E-mail:kyl@siom.ac.cn