

紫外熔石英元件高精度低缺陷控形控性 制造技术研究进展*

石 峰^{1,2,3}, 舒 勇⁴, 宋 辞^{1,2,3}, 田 野^{1,2,3}, 铁贵鹏^{1,2,3}, 薛 帅^{1,2,3}, 肖 航^{1,2,3}

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 装备综合保障国防科技重点实验室, 长沙 410073;
3. 湖南省超精密加工技术重点实验室, 长沙 410073; 4. 空军工程大学 航空机务士官学校, 河南 信阳 464000)

摘 要: 传统的紫外熔石英元件加工方法本身会引入各类制造缺陷, 需要后期加工来消除前期加工带来的缺陷, 限制了熔石英元件的加工质量和加工效率。针对这些问题, 课题组提出了采用磁流变、离子束、保形光顺和流体动压抛光等可控柔体加工技术提升熔石英元件的加工效果, 并开展了相关研究。主要介绍了课题组在关键技术取得的重要进展, 包括亚纳米精度表面控形制造技术、纳米精度本征表面控性生成方法、熔石英元件高精度低缺陷组合工艺与设备等一系列关键技术。通过探讨关键技术及其发展现状, 为未来紫外熔石英元件高精度低缺陷制造技术的发展提供参考。

关键词: 熔石英元件; 高精度; 低缺陷; 纳米精度; 表面控形制造; 本征表面
中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190399

Advances in shape controllable and property controllable manufacturing technology for ultraviolet fused silica components with high precision and few defects

Shi Feng^{1,2,3}, Shu Yong⁴, Song Ci^{1,2,3}, Tian Ye^{1,2,3}, Tie Guipeng^{1,2,3}, Xue Shuai^{1,2,3}, Xiao Hang^{1,2,3}

(1. College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Hunan Key Laboratory of Ultra-precision Machining Technology, Changsha 410073, China;
4. Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Various manufacturing defects would be introduced in traditional processing of ultraviolet fused silica components, which need to be eliminated by post-processing technique. Because of the defects, the processing efficiency and surface quality cannot meet the requirements. To solve these problems, the research group proposed controllable compliant techniques including magnetorheological finishing, ion beam figuring, conformal smoothing and hydrodynamic polishing to improve processing effect of fused silica components, and carried out related research. This paper mainly introduces the important progress made by the research group on key technologies, including sub-nanometer precision surface controlled manufacturing technology, nano-precision intrinsic surface property controlled manufacturing method, high-precision and low-defect combination process, equipment of fused silica component. Discussing key technologies and their development status, it provides references for the development of high precision and few defects manufacturing technology of ultraviolet fused silica components in the future.

Key words: fused silica components; high precision; few defects; nano-precision; surface controlled manufacturing; intrinsic surface

随着社会的发展和科技的进步, 人类对洁净高效能源的需求与日俱增, 核聚变反应作为一种洁净的、几乎用之不竭的能源方式得到了世界各国的关注。可控核聚变的实现途径之一就是惯性约束核聚变 (ICF)^[1], 美国国家“点火”装置 (NIF)^[2] 和我国“神光”系列激光装置^[3] 等惯性约束聚变系统就是典型的高功率固体激光器系统。作为

* 收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51835013); 国家自然科学基金联合基金项目 (U1801259); 国家自然科学基金面上项目 (51675526)

作者简介: 石 峰 (1980—), 男, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 从事超精密加工和先进光学制造领域的教学科研工作; sf.wind@yahoo.com。

一种宽禁带光学材料,熔石英在高功率激光系统中作为窗口元件、聚焦透镜、光栅和防护板等得到了广泛的应用^[4]。位于 ICF 系统光路中的熔石英元件经受高通量强激光辐照,既要有高精度面形、又要具备高抗激光损伤能力^[5]。为了提升紫外熔石英元件的抗激光损伤阈值,国内外研究者们致力于研究获得熔石英元件本征表面的加工方法与工艺,包括逐级去除加工缺陷工艺和后处理延缓技术^[6]等方法。但是目前采用的缺陷抑制技术都是用后期的精细加工来消除前期加工带来的缺陷,本质上都属于“先污染再治理”或“边治理边污染”的技术路线。因此,通过发展可控柔体的加工方法获得低损伤洁净表面,成为进一步提升熔石英元件抗激光辐照损伤能力的新思路和技术发展趋势。本课题组提出使用磁流变、离子束等可控柔体加工技术提升熔石英元件的激光损伤阈值,并开展了相关研究。经过近些年的研究,本课题组在许多关键技术上取得重要进展,突破了亚纳米精度表面控形制造技术、纳米精度本征表面控性生成方法、熔石英元件高精度低缺陷组合工艺与设备等一系列关键技术,提高了熔石英元件的加工效率和加工效果,为紫外熔石英元件高精度低缺陷控形控性制造技术提供了一条新的技术途径。

1 亚纳米精度表面控形制造技术

超光滑表面对于提升元件的阈值特性具有重要意义,根据 Wood 的研究,光学元件的阈值与表面粗糙度呈正比^[7]。表面粗糙度越好,则光学元件的阈值就可能越高。在这些年的研究中,课题组大力发展离子束、表面弹性发射加工方法和光顺技术,以获得全频段亚纳米精度光学表面。

1.1 亚纳米精度表面离子束生成方法

课题组设计的第一代离子束加工系统是一个三轴系统,离子源只能在平面内移动,其入射方向始终与工件光轴方向平行(如图 1(a)所示)。当工件的陡度比较大时,离子束入射方向与工件表面方向夹角变化较大,会引起工件表面质量的不一致。如图 1(b)所示,研究表明,随着离子束入射方向与工件表面法向夹角的增大,加工后表面粗糙度逐渐增大^[8]。

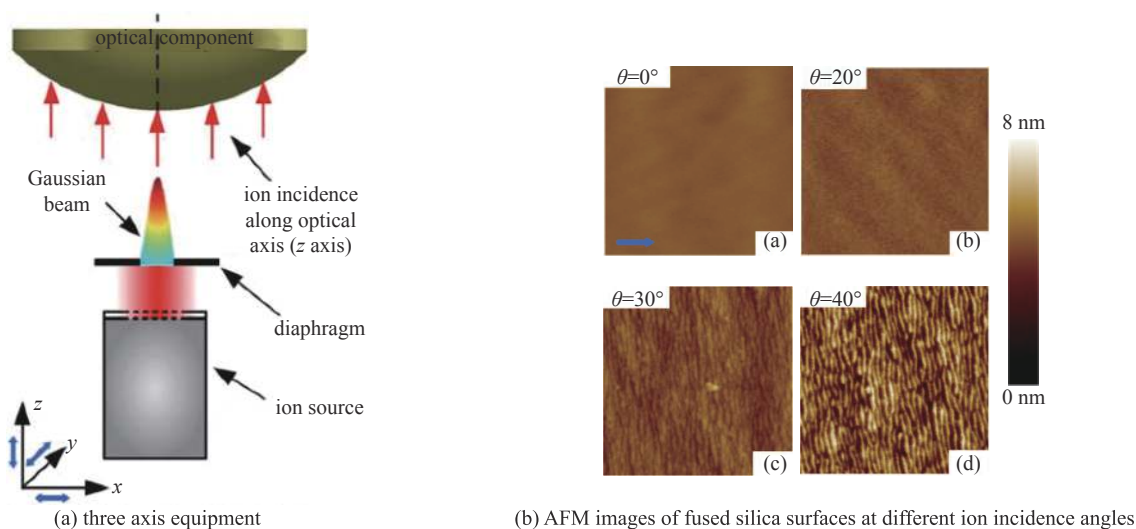


Fig. 1 Three axis IBF machine and IBF polished surface

图 1 三轴系统及加工后表面质量

为了消除离子束入射角度对工件表面质量的影响,课题组设计了五轴离子束加工系统(如图 2(a)所示),新系统中离子源的空间方位可以进行调整,使得离子束入射方向处处与工件表面垂直。如图 2(b)所示,由于各加工点处离子入射条件一致,加工后工件表面质量一致性较好^[8]。

基于离子束入射角度增大会恶化表面粗糙度的现象,课题组对离子束加工过程中伴生微纳结构机理与可调控性进行了研究。通过观察不同入射角加工后表面的微纳结构形貌图发现,入射角度增加后,离子束的溅射粗糙效应增强,导致表面生成粗糙微纳结构,增大表面粗糙度。进一步研究表明,离子束能量能够调控微纳结构的表面周期,与 400 eV 能量相比,800 eV 能量轰击后的表面,其微纳结构尺度更大。然而,离子束的束流密度对微纳结构的影响可以忽略不计,当束流密度从 $670 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 增加到 $1080 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时,表面微纳结构的尺度基本保持不变^[8]。

深入研究离子束溅射过程发现,离子溅射去除会导致局部凹坑的去除速率大于局部凸起的去除速率,使得表面变粗糙,这是离子溅射导致的粗糙效应;同时,离子溅射过程中引起的热致表面扩散、弹性碰撞和表面粘性流动

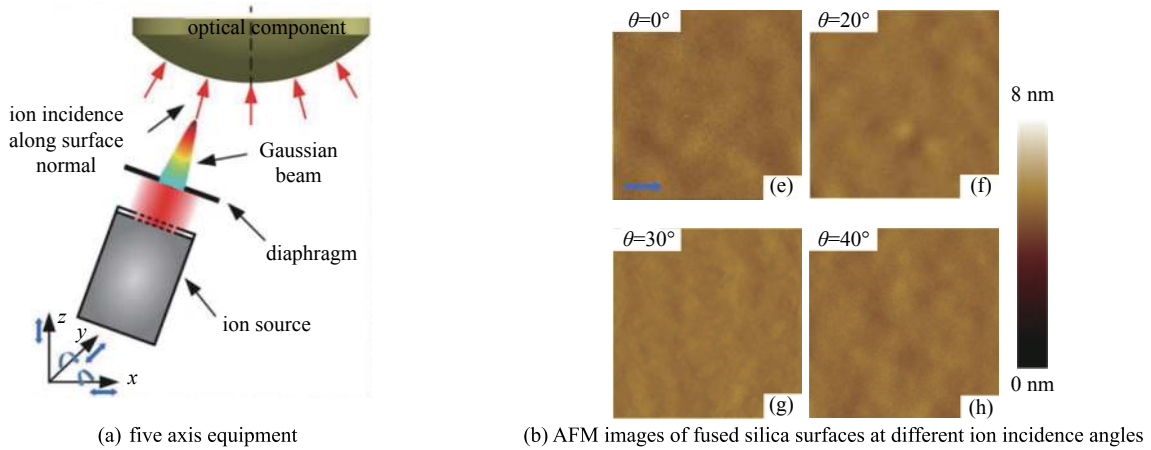


Fig. 2 Five axis IBF machine and IBF polished surface

图2 五轴系统及加工后表面质量

等反应,会诱导平滑效应。离子溅射过程中原子/分子材料的去除与流动能够同时诱导粗糙效应和平滑效应的产生,二者相互作用影响最终的表面粗糙度^[9]。

在研究离子束加工时表面微观形貌衍化机理的基础上,课题组创新提出了材料添加去除结合的亚纳米精度加工方法,具体方法如图3所示。首先在工件表面添加一层材料,然后再使用离子束对添加材料后的表面进行去除加工,最终获得超光滑表面。使用此方法,在分别添加 Si 和 SiO₂ 的情况下,获得了均方根值为 0.11 nm 和 0.12 nm 的超光滑表面^[10-11]。

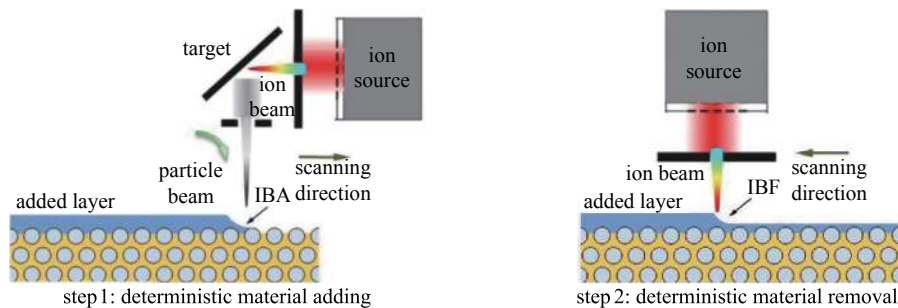


Fig. 3 Combined polishing method of material adding and removal

图3 材料添加与去除结合抛光方法

1.2 超光滑表面流体动压加工方法

超光滑表面的典型特征为原子级水平表面粗糙度、无表面和亚表面损伤、无加工残余应力和完整晶格表面。课题组根据动压润滑理论和流体动力学仿真,通过对比分析提出了一种光学材料弹性域去除的流体动压超光滑加工方法。通过建模和分子动力学仿真,验证了弹性域材料去除(抛光颗粒与表面发生弹性接触,实现材料去除)的可实现性。在此基础上建立了弹性域流体动压超光滑加工模型(如图4(a)所示),指导后续工艺实验的开展。通过控制细微抛光纹路,调整抛光液化学分配比和工艺优化改进,获得了均方根值为 0.145 nm 的超光滑和完整晶格表面^[12],如图4(b)所示。

在此基础上,结合磁流变抛光对圆形平面镜进行了全频域误差控制实验,实验结果表明流体动压超光滑加工对低频面形误差具有优良的保持性能,对中高频表面粗糙度具有明显的抑制能力^[13]。从图5中阈值实验结果可以看出,对比传统抛光后样件,流体动压超光滑加工可以有效降低表面损伤,从而提高损伤阈值^[14]。

1.3 中频亚纳米精度保形光顺

光学元件的中频误差的优劣直接关系到整个系统的成败,光顺加工是控制光学镜面中频误差的最重要手段之一,对于光学元件全频段误差的一致收敛具有重要意义。

课题组基于有限单元法建立了广义压强分布模型(如图6(a)所示),较好地解决了任意微小中频误差约束下的光顺区域内压强分布的求解问题^[15];通过数值积分方法建立了光顺加工中的额外材料去除量分布模型,为光顺加工的工艺优化提供了理论指导。采用刚度分析方法对比研究了刚性盘和半刚性盘的光顺效果,压强分布计算和实

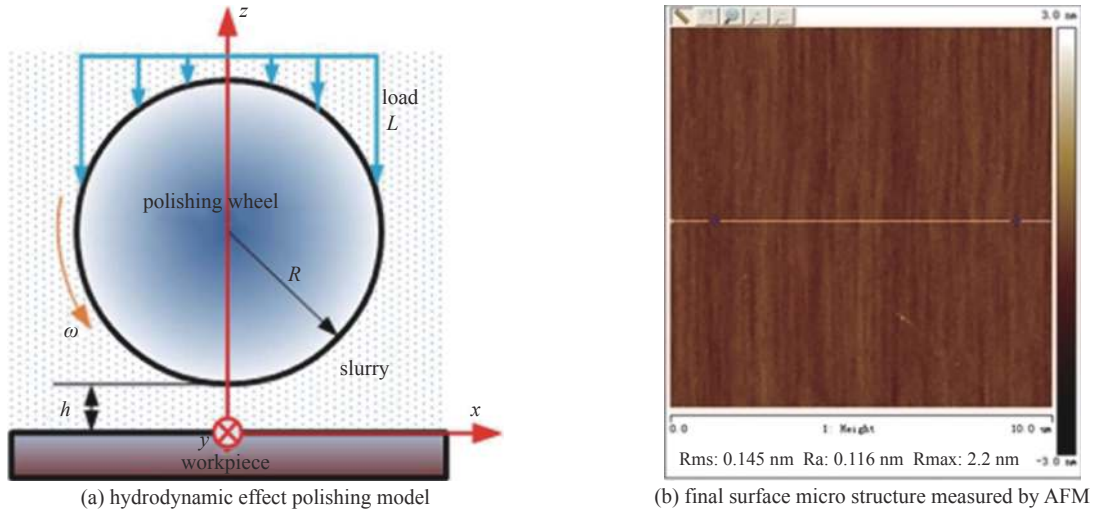


Fig. 4 Schematic of hydrodynamic effect polishing and polished surface

图 4 流体动压加工原理模型与加工效果

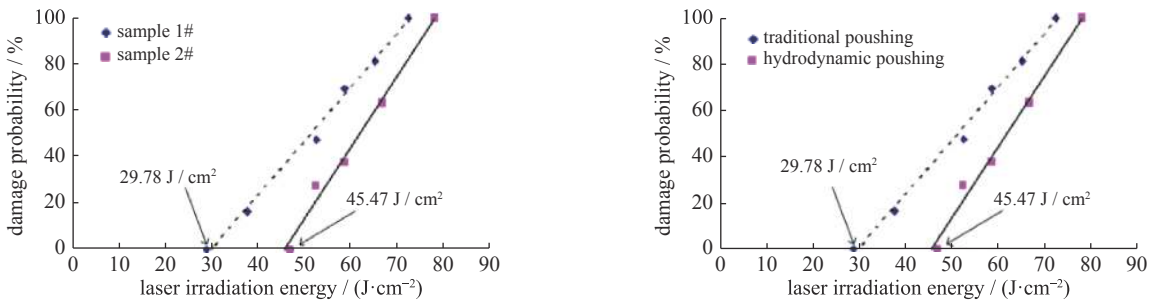


Fig. 5 Laser induced damage threshold of sample 1# and 2#

图 5 样品激光损伤阈值测试结果

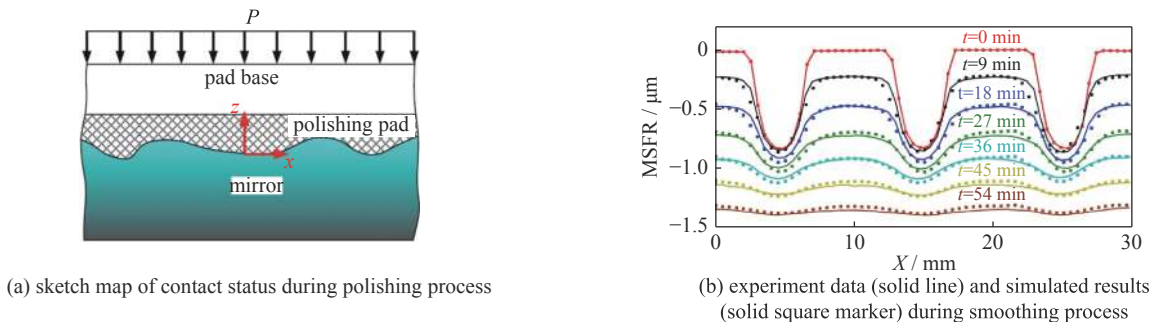


Fig. 6 Generalized numerical pressure distribution model and experimental verification

图 6 广义压强分布模型与实验验证

验结果均充分论证了半刚性盘对非球面镜保形光顺的可实现性(如图 6(b) 所示)。

建立了基于联合熵值的光顺能力分析模型, 采用该模型对光顺轨迹、抛光垫材质和抛光盘表面沟槽结构进行了优化研究^[16], 以获得最优的光顺效果。基于对光顺工艺稳定性的研究, 提出了组合光顺技术, 实现了额外材料的极大均匀去除, 解决了光顺加工对低频面形精度的有效控制问题。基于上述理论准备和工艺优化, 运用基于光顺和子口径抛光技术的联合工艺链, 成功实现了各型光学元件的中频误差控制。从图 7 中的 PSD 分析结果可以看出, 联合工艺获得了全频段

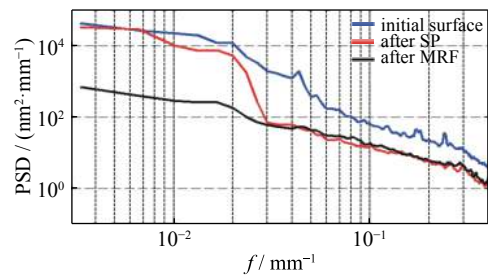


Fig. 7 Power spectrum density analysis of the data in three manufacture stages: initial data, smoothed data and finished data

图 7 初始面形、光顺后面形和 MRF 加工后面形的 PSD 数据

一致收敛的亚纳米级加工精度^[17]。

2 纳米精度本征表面控性生成方法

研究表明,熔石英元件加工过程带来的机械破碎性划痕、污染缺陷和化学结构缺陷改变了其光学表面本征特性,极大地降低其激光能量负载能力。课题组对熔石英元件本征表面加工方法与工艺进行了一系列研究,通过磁流变、离子束等技术,去除光学元件表面缺陷,获得纳米精度本征表面,提升熔石英元件抗激光损伤阈值。

2.1 破碎缺陷弹塑性域磁流变抛光法

强光元件的传统加工过程多采用散粒磨料进行研磨和抛光,其加工过程中不可避免地产生破碎缺陷。一般本道工序中的材料去除量为前道工序中使用磨粒直径的3~9倍,才能基本保证前道工序中产生的破碎缺陷在本次加工过程中能够被去除。尽管如此,散粒磨料加工的特点使其难以避免破碎缺陷的产生,而破碎缺陷极大影响熔石英元件阈值的提升。

磁流变独特的剪切加工特性使其在加工过程中不产生破碎缺陷。为进一步提升加工效果,课题组基于弹性接触力学和双刃圆模型,分析了磁流变弹性域加工的条件,认为弹性域化学加工是实现磁流变超光滑无损加工的重要条件。图8展示了不同加工域的磁流变去除函数,工艺实验表明,处于弹塑性域的磁流变抛光,其抛光过程包含化学辅助过程,能够有效去除破碎缺陷,提升表面粗糙度,对提升元件的阈值大有裨益^[18]。进一步实验结果表明,通过优化磁流变弹塑性域抛光和HF后处理组合工艺,不用完全去除熔石英元件表面的破碎缺陷,将加工时间缩短到原来的1/3左右,但其阈值同破碎缺陷完全去除的样件基本保持一致^[19]。

2.2 污染缺陷等离子体组合清洗方法

光学元件经过加工后,表面残留有加工过程中产生的杂质污染,极大地影响阈值的提升。美国NIF使用AMP兆声波酸洗工艺^[6],使用一定浓度的HF酸作为腐蚀液浸泡工件以去除污染件提升阈值。一方面,元件表面面形不可控,在酸蚀过程中可能遭到严重破坏;另一方面,酸蚀反应产物溶解度有限,沉积后形成二次污染,反而降低元件的激光损伤阈值。

为进一步提升石英元件的阈值,课题组创新提出使用等离子体对熔石英元件进行清洗的方法(如图9所示)。与AMP工艺相比,等离子体清洗不会破坏面形,也不会产生新的污染。使用离子束对元件表面进行加工后,能够得到均方根值优于0.25 nm的超光滑表面,表面残留的Fe和Ce元素污染几乎被全部清除,表面划痕等结构缺陷得到了很好的抑制,测试表明元件的阈值至少提升了30%^[20-21]。

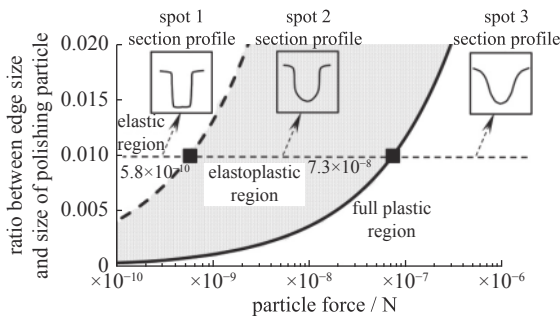


Fig. 8 MRF removal functions in different regions

图8 处于不同域的磁流变去除函数

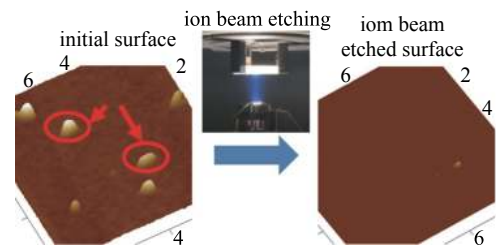


Fig. 9 Ion beam etching process

图9 离子束清洗过程示意图

2.3 化学结构缺陷离子束改善方法

熔石英元件在加工过程中,由于硅氧四面体网络结构中化学键的断裂和杂质离子的引入,会在材料体内产生大量的化学结构缺陷。这些缺陷会造成玻璃网络结构弱化,从而降低熔石英元件的损伤阈值。

课题组建立了离子溅射损伤模型,对不同入射能量和角度作用下溅射损伤的深度分布以及结构缺陷类型的分布特征进行了仿真分析;然后使用荧光光谱和拉曼光谱对离子溅射处理后表面结构致密化程度以及化学结构缺陷浓度进行了分析研究,得到了离子溅射过程中化学结构缺陷的衍化规律。通过优化离子束入射能量、入射角度和材料去除量,抑制了熔石英元件的化学结构缺陷,获得了30%的阈值提升^[22]。化学结构缺陷去除示意图如图10所示。

3 高精度低缺陷组合工艺与装备

为了达到亚纳米精度表面控形和纳米精度表面控性的目标,课题组研发了相应的超精密加工设备,在深

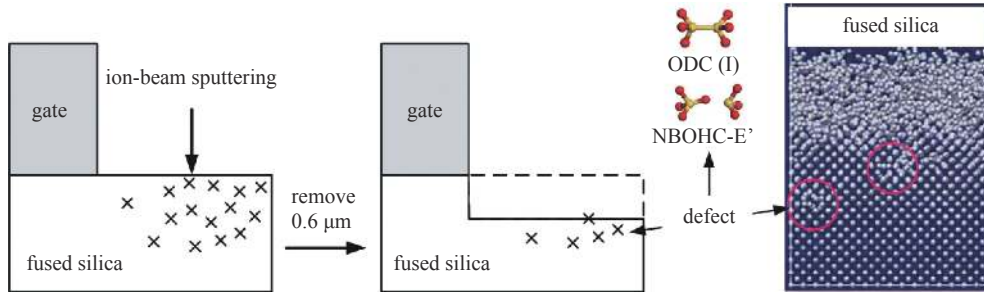


Fig. 10 Removing process of chemical defects

图 10 化学结构缺陷去除示意图

入研究各种加工工艺的基础上,形成了高精度低缺陷组合工艺,实现了熔石英元件的高精度低缺陷控形控性制造。

3.1 熔石英元件高精度低缺陷组合工艺

课题组在深入研究亚纳米精度表面控形和纳米精度表面控性技术的基础上,形成了独特的熔石英元件加工工艺,其典型工艺流程如图 11 所示。

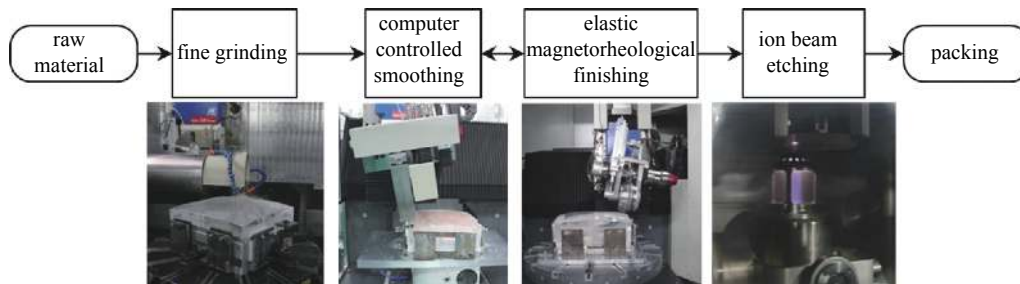


Fig. 11 High efficiency low damage combined machining technology of fused silica

图 11 熔石英元件高精度低缺陷组合工艺流程

图 11 中组合工艺以熔石英元件纳米精度表面控形和控性为目标,综合使用光顺、磁流变和离子束加工技术,形成磨削、光顺抛光、磁流变抛光和离子束清洗的工艺流程。工件首先进行精密磨削,此过程中主要是控制成形精度和损伤深度。其次进行精密数控抛光,主要用于去除磨削纹路,提升面形精度。然后使用弹性磁流变进行抛光,目的在于实现面形精度,去除破碎缺陷。磁流变加工后,再次使用数控抛光进行中频误差的抑制,二者相互配合,实现熔石英元件全频段误差的控制。最终使用离子束进行加工,一方面降低表面粗糙度,另一方面去除污染缺陷和化学结构缺陷,实现熔石英元件的高精度低缺陷加工。

3.2 成套制造装备

在研究磁流变和离子束加工技术时,课题组研发了具有自主知识产权的磁流变和离子束加工原型设备。随着研究的深入,逐步研发一系列制造装备,为熔石英元件的制造奠定了基础。

图 12 展示了课题组研发的 KDMRF-200, KDUPF-700, KDMRF-1000 和 KDMRF-2000 等一系列磁流变加工机床,加工工件的最大口径可达 2 000 mm。所研发的弹性磁流变抛光机,可以对熔石英等光学玻璃和 KDP 晶体进行加工,面形精度收敛比高达 3.0~4.0,当去除材料深度为 2~3 倍磨料粒度时,就可以有效提升去除元件表面的破碎缺陷。



Fig. 12 Magnetorheological finishing machines

图 12 系列磁流变加工机床

图 13 展示了课题组研发的 KDIFS-500 和 KDIFS-700 等一系列离子束加工机床,加工工件的最大口径可达 700 mm。所研发的离子束清洗机,可以清洗熔石英等光学玻璃和 KDP 晶体,清洗后面形精度保持不变,只需去除约 0.2 μm 材料就可以有效去除表面各种污染和化学缺陷。

4 结 论

本文综述了近几年国防科技大学精密工程实验室在紫外熔石英元件高精度低缺陷控形控性制造技术方面取得的主要成果。课题组研发的高精度低缺陷组合加工工艺和系列制造设备已经应用在熔石英强光光学元件的加工过程中,为强光系统中熔石英元件的高精度批量制造奠定了基础。

参考文献:

- [1] Wang Ganchang. Suggestion of neutron generation with powerful lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 22(11): 7.
- [2] Hogan W J, Moses E I, Warner B E, et al. The National Ignition Facility[J]. Optical Engineering, 2002, 43(12): 21-51.
- [3] Zheng Wanguo, Zhang Xiaomin, Wei Xiaofeng, et al. Status of the SG-III solid-state laser facility[C]//The Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2008, 112: 032009.
- [4] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]//Proc of SPIE. 2004, 5341: 1-18.
- [5] Baisden P A, Atherton L J, Hawley RA, et al. Large optics for the National Ignition Facility[J]. Fusion Science & Technology, 2016, 69(1): 614-620.
- [6] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, et al. HF based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(2): 416-428.
- [7] Wood R M. Laser-induced damage of optical materials[M]. London: Institute of Physics Publishing, 2003.
- [8] Liao Wenlin, Dai Yifan, Xie Xuhui, et al. Morphology evolution of fused silica surface during ion beam figuring of high-slope optical components[J]. Applied Optics, 2013, 52(16): 3719-3725.
- [9] Liao Wenlin, Dai Yifan, Xie Xuhui. Nanopatterning of optical surfaces during low-energy ion beam sputtering[J]. Optical Engineering, 2014, 53: 065108.
- [10] Liao Wenlin, Dai Yifan, Xie Xuhui, et al. Deterministic ion beam material adding technology for high-precision optical surfaces[J]. Applied Optics, 2013, 52(6): 1302-1309.
- [11] Liao Wenlin, Dai Yifan, Xie Xuhui, et al. Combined figuring technology for high-precision optical surfaces using a deterministic ion beam material adding and removal method[J]. Optical Engineering, 2013, 52: 010503.
- [12] Peng Wenqiang, Guan Chaoliang, Li Shengyi. Ultrasmooth surface polishing based on the hydrodynamic effect[J]. Applied Optics, 2013, 52(25): 6411-6416.
- [13] Peng Wenqiang, Li Shengyi, Guan Chaoliang, et al. Ultra-precision optical surface fabricated by hydrodynamic effect polishing combined with magnetorheological finishing[J]. Optik, 2018, 156: 374-383.
- [14] Peng Wenqiang, Guan Chaoliang, Li Shengyi, et al. The improvement of laser induced damage resistance of optical workpiece surface by hydrodynamic effect polishing[C]//Proc of SPIE. 2016: 968315.
- [15] Nie Xuqing, Li Shengyi, Shi Feng, et al. Generalized numerical pressure distribution model for smoothing polishing of irregular midspatial frequency errors[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1020-1027.
- [16] Nie Xuqing, Li Shengyi, Hu Hao, et al. Control of mid-spatial frequency errors considering the pad groove feature in smoothing polishing process[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6332-6339.
- [17] Nie Xuqing, Li Shengyi, Song Ci, et al. Combined fabrication process for high-precision aspheric surface based on smoothing polishing and magnetorheological finishing[C]//Proc of SPIE. 2014: 928111.
- [18] Shi Feng, Shu Yong, Dai Yifan, et al. Magnetorheological elastic super-smooth finishing for high-efficiency manufacturing of ultraviolet laser resistant optics[J]. Optical Engineering, 2013, 52: 075104.
- [19] Shi Feng, Tian Ye, Peng Xiaoqiang, et al. Combined technique of elastic magnetorheological finishing and HF etching for high-efficiency improving of the laser-induced damage threshold of fused silica optics[J]. Applied Optics, 2014, 53(5): 598-604.
- [20] Shi Feng, Zhong Yaoyu, Dai Yifan, et al. Investigation of surface damage precursor evolutions and laser-induced damage threshold improvement mechanism during Ion beam etching of fused silica[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20842-20854.
- [21] Xu Mingjin, Dai Yifan, Zhou Lin, et al. Investigation of surface characteristics evolution and laser damage performance of fused silica during ion-beam sputtering[J]. Optical Materials, 2016, 58: 151-157.
- [22] Xu Mingjin, Shi Feng, Zhou Lin, et al. Investigation of laser-induced damage threshold improvement mechanism during ion beam sputtering of fused silica[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29260-29271.



Fig. 13 Ion beam figuring machines

图 13 系列离子束加工机床