DOI: 10.3901/JME.2021.20.001

熔石英光学元件加工亚表面缺陷检测及抑制技术研究进展*

陈明君^{1,2} 王会尧¹ 程健^{1,2} 赵林杰¹ 杨浩¹
刘启¹ 谭超¹ 尹朝阳¹ 杨子灿¹ 丁雯钰¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 熔石英材料因具有硬度大、热膨胀系数低、透射光谱范围广等良好的机械性能和热学、光学特性,广泛应用于国防、航天等领域中关键光学元件的制造。作为一种典型的硬脆材料,在传统的研磨抛光加工中,不可避免地会引入亚表面层的微裂纹、划痕等结构性缺陷,这些缺陷会严重降低熔石英元件在高功率激光使用环境下的激光损伤阈值,并影响其在高冲击载荷使用环境下的抗断裂损伤能力。从硬脆材料的磨削机理出发,对熔石英光学元件亚表面缺陷的产生机制、亚表面缺陷的检测技术、熔石英亚表面缺陷抑制技术的研究现状进行综述,重点对比针对加工亚表面缺陷的有损检测和无损检测技术的优缺点,探讨多种先进表面加工技术在抑制熔石英光学元件亚表面缺陷中的应用。希望为优化大口径、高精度、高质量熔石英光学元件加工工艺,并提升其在高功率激光、高冲击载荷等极端服役环境下使用性能、延缓其使用寿命提供有益参考。

关键词: 熔石英元件; 亚表面缺陷; 磨削机理; 检测技术; 缺陷抑制

中图分类号: TH145; TN247

Progress in Detection and Suppression Techniques for Processing-induced Sub-surface Defects of Fused Silica Optical Elements

CHEN Mingjun^{1,2} WANG Huiyao¹ CHENG Jian^{1,2} ZHAO Linjie¹ YANG Hao¹
LIU Qi¹ TAN Chao¹ YIN Zhaoyang¹ YANG Zican¹ DING Wenyu¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Since fused silica material possesses good mechanical properties, thermal and optical properties, such as high hardness, low coefficient of thermal expansion, and wide transmission spectrum, it is widely applied in manufacturing key optical components in the fields of national defense and aerospace. As a typical hard and brittle material, subsurface micro-cracks and scratches would be inevitably introduced in the traditional grinding and polishing process, which will seriously reduce the laser damage threshold of components employed in high-power laser environment and also affect the anti-fracture damage ability under extremely high impact load. Starting from the grinding mechanism of hard and brittle materials, this paper reviews the generation mechanism of sub-surface defects in fused silica optical components, the detection technology of sub-surface defects, and the suppression techniques of sub-surface defects in fused silica. The advantages and disadvantages of destructive and non-destructive detection techniques for processing-induced sub-surface defects are compared and the application of a variety of advanced surface processing techniques in suppressing sub-surface defects of fused silica optical components is discussed. This work is helpful in providing useful guidance for

* 国家自然科学基金(51775147, 51705105)、基础加强(2019JCJQZDxx00)、科学挑战计划(TZ2016006-0503-01)、哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室自主课题(SKLS201718A, SKLS201803B)和中国科协“青年人才托举工程”(2018QNRC001)资助项目。20201109 收到初稿, 20210712 收到修改稿

optimizing the processing technique of fused silica optical components with large-aperture, high-precision and high-quality, and improving their performance and service life when used in the extreme service environments such as extremely high power laser and high impact load.

Key words: fused silica optical element; subsurface defects; grinding mechanism; detection technology; suppression of defects

0 前言

熔石英是一种高纯度的非晶二氧化硅材料, 硬度高, 弹性模量大, 热膨胀系数高, 耐高温, 化学性能稳定, 在 185~2 600 nm 的大光谱范围内具有优异的透射性能^[1]。因此, 熔石英材料被广泛应用于国防、航空航天、激光核聚变等领域中关键光学元器件的制造。基于优异的耐热冲击特性和机械性能, 熔石英材料是载人航天器窗口、导弹的红外窗口以及卫星太阳能电池防护层等选择的主要材料^[2-4], 在极端工作条件下能够承受剧烈的冷热变化并具有相当高的抵抗高冲击载荷的能力, 使得其比其他透明材料具有显著优势^[5]。另一方面, 基于良好的紫外光透射性能和抗强激光损伤能力, 熔石英材料是高功率激光系统中大口径光学元件选用的主要材料^[6], 如在美国的国家点火装置^[7]、法国的兆焦激光装置^[8]以及我国的神光 III^[9]激光系统中, 熔石英材料被广泛用于制作聚焦透镜、碎片屏蔽片、采样光栅等紫外光学元件。

熔石英作为一种典型的硬脆性材料, 为实现良好的形状精度和表面质量, 一般需要经过磨削、精密研磨、超精密抛光等加工工序^[10]。在研磨和抛光过程中, 熔石英元件受到突出磨粒、抛光粉的作用, 实现了材料的微量去除并降低了表面粗糙度。但由于熔石英材料的高强度和低断裂韧性, 该过程不可避免地在表面和亚表面产生大量结构性缺陷, 包括划痕、微裂纹等^[11]。熔石英光学元件的亚表面结构一般由抛光沉积层、亚表面缺陷层、变形层以及未损伤的本体四部分组成^[12]。

在高功率激光系统中, 熔石英光学元件亚表面缺陷的存在, 提供了激光损伤的前驱体, 导致其激光诱导损伤阈值远小于本征值^[13-17]。其主要原因在于亚表面裂纹和划痕等结构性缺陷导致熔石英元件表层机械强度降低^[18-23]。针对熔石英光学元件亚表面结构缺陷对激光损伤的影响, LI 等^[24]采用三维有限时域差分法模拟了紫外激光辐照时, 熔石英亚表面裂纹附近的电场强度分布, 并分析了裂纹尺寸以及裂缝倾角对入射光场的调制作用, 发现亚表面裂纹导致局部电场以及光强显著增强, 累积的热效应会导致局部温度升高, 使得材料产生永久性损伤,

从而导致其激光损伤阈值降低。针对熔石英光学元件亚表面机械强度降低对激光损伤的影响, ZHENG 等^[25]采用 HF 去除熔石英表面的化学沉积层, 对亚表面缺陷层的硬度进行了表征, 结果表明激光损伤阈值和表面硬度呈正相关, 即表面机械强度的降低会导致激光损伤阈值的降低, 其根本原因是机械强度的降低会导致表面附近原子容易发生电离, 进而形成破坏性吸收前驱体, 最终导致元件激光损伤的扩展^[26]。

熔石英加工亚表面缺陷的产生, 使得熔石英光学元件应用于航天器窗口等场合时, 面临高冲击载荷的挑战^[27-28]。随着太空环境的恶劣, 大量高速空间粒子对光学元件功能完整性产生巨大威胁, 当熔石英元件受到高冲击载荷时, 加工引入的亚表面微裂纹、划痕等会进一步扩展, 加快元器件损伤进程, 最终导致熔石英元件产生破坏性损伤, 使得光学元件寿命大大降低^[29-30]。因此, 加工亚表面缺陷的存在对熔石英光学元件抵抗高速载荷冲击的能力产生巨大威胁。

综上所述, 无论是在高能激光系统, 还是在高冲击载荷的极端服役条件下, 熔石英光学元件加工引入的亚表面结构性缺陷, 都将对其使用性能和使用寿命构成严重的威胁。因此, 对熔石英光学元件亚表面结构性缺陷进行深入研究, 掌握加工亚表面缺陷的检测技术并采取有效技术手段对其进行抑制甚至去除, 对于提高熔石英光学元件的使用性能以及延缓其使用寿命具有十分重要的现实意义。

1 熔石英元件亚表面缺陷的产生机制

熔石英元件加工过程中形成的微裂纹、划痕等亚表面缺陷, 严重制约了元件的光学性能、机械强度以及表面质量^[31]。因此, 深入研究熔石英光学元件表面材料的去除机理以及亚表面缺陷的类型、形貌特征等, 对进一步优化制造工艺、降低亚表面缺陷引起的危害具有指导性作用。本节总结了国内外学者针对亚表面缺陷形成机理、缺陷类型及预测、工艺参数影响等方面的重要研究成果。

1.1 脆性材料磨削机理

作为导致脆性材料亚表面缺陷的直接原因, 无

论是精密磨削、研磨和抛光技术，其工艺原理均是基于硬压头或磨粒在外载荷作用下对表层材料的磨削，导致单个或多个交叉裂纹断裂，实现元件表面的材料去除。近年来，国内外学者针对脆性材料的磨削机理进行了一系列的研究。在 20 世纪 70 年代，针对脆性材料的去除方式，LAWN 等^[32]提出并建立了静态压痕的断裂力学模型，如图 1 所示，载荷作用下，静态压头下方形成一塑性区，在材料内部形成与表面平行的横向裂纹^[33]以及与表面垂直的径向裂纹^[34]。

图 1 静态压痕的断裂力学模型

基于断裂力学原理，WANG 等^[35]建立磨削过程中的材料去除方式及裂纹扩展模型，试验结果表明，随着单粒度划痕深度的增加，熔石英材料的去除模式依次由塑性模式转变为半脆性模式、全脆性模式。实际上，随着外加载荷的逐渐增加，磨削过程的材料去除方式发生转变，当作用在压头或磨粒的法向载荷超过临界载荷 P_m ，材料表现为脆性去除^[36]

$$P_m = \left(\frac{54.47\alpha}{\eta^2 \theta^4} \right) \left(\frac{K_C}{H} \right)^3 K_C \quad (1)$$

式中， α 是由压头几何形状确定的量纲一因子， η 和 θ 是两个由加工条件决定的量纲一因子， K_C 是材料断裂韧性， H 是材料硬度。基于临界载荷的定义，哈尔滨工业大学的 CHEN 等^[37]根据纳米压痕试验和 Griffith 准则建立了可以根据切削深度来区分塑性去除和脆性去除的临界切深 a_p 模型

$$a_p = \lambda \cot \varphi \sqrt{\frac{2k_1}{\beta}} \left(\frac{K_C}{H} \right)^2 \quad (2)$$

式中， λ 为基于试验条件的系数， φ 为磨粒半顶角， k_1 为无量纲常数， β 为磨粒与工件的接触半径。

在磨削加工过程中，当未变形的切屑厚度小于临界切深时，脆性材料在塑性模式下加工，不会产生裂纹扩展，是一种可以获得光滑无裂纹的高质量光学表面的理想方法^[38]，但要求实际加工的磨削深度极小，往往只有几十纳米，材料的加工去除效率

极低，无法应用于实际生产；当未变形切屑厚度大于临界切深时，塑性变形和裂纹扩展同时发生，大部分材料在脆性模式下高效去除^[39]，因此，脆性断裂是熔石英材料表面加工时最常用且高效的材料去除机制^[40]。

1.2 亚表面裂纹的产生机理

基于压痕断裂力学模型，并根据局部应力场分析，在材料去除过程中，静态压头可导致三种基本类型的裂纹，即赫兹裂纹(也称锥形裂纹)、径向裂纹和横向裂纹^[41]。如图 2 所示，赫兹裂纹是由钝形压头加载产生的，对于给定载荷，随着压头曲率半径的减小，压头下部接触区域的局部应力升高；当接触应力超过临界值时，压头下方的材料发生塑性变形，形成径向裂纹和横向裂纹，径向裂纹是加载时在塑性变形区下方形成，横向裂纹是卸载时塑性区松弛导致^[42]。根据对三种裂纹的结构形式分析，横向裂纹方向与材料表面平行，可能向光学元件表面扩展，因此，该类裂纹扩展断裂是磨削、研磨过程中表面材料去除最有效的方法^[43-44]。赫兹裂纹和径向裂纹的扩展方向与材料表面垂直，因此，一般认为径向裂纹和赫兹裂纹是脆性材料亚表面缺陷的主要构成^[45]。

图 2 三种静态压头加载导致的裂纹形成机制示意图^[42]

JING 等^[46]根据材料特性、磨粒几何形状以及晶粒的侵入深度，推导出横向裂纹深度 c_l 的函数

$$c_l = \left[\frac{3(1-2\nu)}{5-4\nu} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi(5-4\nu)} \frac{E}{\sigma_y} \cot \varepsilon \right]^{1/2} \tan \alpha \cdot h_i \quad (3)$$

式中， E 是材料的弹性模量， ν 是泊松比， σ_y 是屈服应力， ε 是磨粒的半顶角， h_i 是磨粒的侵入深度。

GU 等^[47]根据锐利压头的压痕力学模型，推导出脆性材料径向裂纹深度 c_r 的函数

$$c_r = 0.206 \frac{(E \cdot H)^{1/3}}{(K_C \cdot B)^{2/3}} (\cot \alpha)^{4/9} (\tan \alpha)^{4/3} \cdot h_i^{4/3} \quad (4)$$

式中， B 为弹性回复所确定的材料参数。

美国 LLNL 实验室的 SURATWALA 等^[48]进行了一系列脆性材料的加工试验，探寻材料亚表面损伤的形貌分布特征，简化磨削模型，并结合 LAWN 的经验公式，推导并验证了赫兹裂纹深度

c_h 的函数

$$c_h = \left(\frac{\chi_h P}{K_C} \right)^{2/3} \quad (5)$$

式中, χ_h 是一与加工条件相关的量纲一系数, P 是磨粒的法向载荷。

当压头或磨粒相对材料表面产生滑动或滚动时, 磨粒除了受到法相载荷之外, 还受到一平行于去除材料表面沿着磨料运动方向的切向载荷, 材料断口的形态转变为拖尾状的压痕断裂, 宏观表现为一系列的圆弧^[49]。美国 LLNL 实验室通过磨抛试验^[50], 观察到拖尾裂纹在磨削加工后的熔石英亚表面层广泛存在, 并且结合理论模型推导出拖尾裂纹深度 c_t 的函数

$$c_t = \left(\frac{\chi_h (1 + \mu^2)^2 P}{K_C} \right)^{2/3} \quad (6)$$

式中, μ 是材料的表面摩擦因数。图 3 给出磨料的动态加工过程示意图。

图 3 磨料动态加工过程示意图

2 亚表面缺陷检测技术

亚表面缺陷影响着光学元件的强度、性能和使用寿命, 为了制造出拥有良好光学性能的熔石英光学元件, 通过有效的技术手段精确检测出磨抛工艺中产生的亚表面缺陷尤为重要。在熔石英抛光加工之后, 往往会在亚表面缺陷层上形成一层抛光沉积层, 因此, 难以通过传统的光学显微镜对亚表面缺陷层进行直接观察和检测。经过多年的探索, 研究者们开发出了一系列的亚表面缺陷的检测技术, 根据检测方式的差异, 将其归纳为有损检测和无损检测两大类。

2.1 有损检测技术

有损检测技术通常采用一定的技术手段, 破坏光学元件的表面原有的物理结构, 使得覆盖于表面抛光沉积层之下的缺陷结构暴露出来, 直观地对亚

表面缺陷的形貌以及尺寸进行表征和测量。

2.1.1 角度抛光技术

传统的角度抛光技术, 如图 4 所示, 将加工后的元件与光学表面成一定的角度进行切割, 然后对分割面进行抛光以去除切割过程中引入的机械损伤, 再对抛光面进行酸蚀, 进而将暴露出来的亚表面缺陷进行测量^[51]。

图 4 角度抛光测量亚表面缺陷深度原理^[52]

根据楔形面裂纹的分布, 可以计算亚表面缺陷的深度 d ^[52]

$$d = \sin \alpha \cdot x \quad (7)$$

式中, x 为楔形抛光面顶部至无裂纹区域的长度, α 为楔面倾斜角度。该方法操作简单快捷, 但忽视了在角度抛光过程中, 会引入新的表面损伤, 同时也会促进原有缺陷的进一步扩展, 因此, 测量的结果存在较大的误差。

随着精密加工技术的发展, 磁流变抛光技术被应用于角度抛光以及亚表面缺陷的检测^[53]。如图 5 所示, 对经过光学加工后的材料通过磁流变液, 外加磁场作用下进行抛光, 以此形成楔形面, 通过酸性溶液对楔形面进行酸蚀, 进一步暴露亚表面结构, 用表面轮廓仪沿楔形面进行轮廓测量, 再将样品放置在显微镜下的平台上, 用显微镜沿着与轮廓仪相同的路径扫描楔块, 然后将显微镜和轮廓仪的结果进行比较, 通过数字化设备对数据和图像进行处理, 进而输出清晰的表面轮廓, 获得亚表面缺陷的分布以及深度尺寸信息^[54]。

图 5 磁流变角度抛光检测亚表面缺陷工艺流程^[54]

作为一种先进的抛光加工技术, 磁流变抛光以剪切的形式去除材料, 在加工过程中不会引入新的损伤, 是一种加工表面的理想方法^[55]。采用磁流变角度抛光技术, 有效地避免了传统角度加工中抛光引入的加工误差, 能够准确地获得熔石英亚表面缺陷形貌特征信息。但作为一种局部加工与缺陷检测手段, 不能获得整个光学表面亚表面缺陷的全局信息和空间分布。在磁流变加工后需要对表面进行酸

蚀, 刻蚀深度依赖于试剂类型、浓度以及刻蚀时间, 因此很难准确控制酸蚀的进程, 若刻蚀过度会对测量的结果产生影响^[56]。同时, 整个加工的周期较长、且该方法涉及的操作很复杂, 设备及加工成本昂贵, 应用环境具有一定的局限性。

2.1.2 键合界面技术

键合界面技术最早由 MULHEARN^[57]应用于记录金属材料在压痕试验的变形情况, 后被许多学者发掘应用于硬脆材料亚表面缺陷的测量^[58-59], 该技术的原理如图 6 所示。将两部分的键合界面打磨光滑, 用黏结剂黏结, 然后对组合块的整体顶面沿不平行于胶层的方向研磨、抛光, 加工完成后将黏结剂化学分解, 将两部分分离, 在键合面通过光学显微镜可直接观察亚表面的形貌。该方法操作简单并且亚表面缺陷的观测较为直观, 但实际上键合后的两部分并非一个整体, 在磨抛加工中键合面存在应力场异常的情况, 最大应力位置偏离了键合面。因此, 实际加工元件的亚表面缺陷最大深度远离黏结界面, 且大于测量的损伤深度。HELBARI 等^[60]通过试验验证了键合界面技术, 在应用于熔石英的亚表面缺陷检测时存在很大的弊端, 该方法不推荐使用在脆性材料的检测。

图 6 键合界面技术检测亚表面缺陷工序原理^[57]

2.1.3 球窝法

传统的球窝法, 通过钢球在试件表面加载产生压痕, 当压痕深超过亚表面层的深度, 可以通过压痕侧面观察并检测亚表面缺陷^[61]。该方法操作简单, 但缺点也十分突出, 在加载产生压痕的过程中, 会为原有表面引入新的损伤, 并且存在的法向载荷将导致亚表面裂纹进一步扩展, 带来较大测量误差。

磁流变抛光去除材料基于剪切效应, 在抛光过程中不会带来新的损伤, 因此, 一种基于磁流变的球窝法广泛应用于熔石英亚表面缺陷的局部检测。其基本原理是利用磁流变技术在元件表面产生斑点状凹坑, 并用 HF 溶液适度酸蚀, 从而暴露出元件

的亚表面缺陷层, 并根据亚表面裂纹的横向尺寸和酸蚀后的磁流变凹坑的轮廓, 凹坑充当亚表面裂纹放大器, 将微米尺度裂纹深度的测量转化为毫米级水平裂纹扩展尺寸的测量^[62]。

相比传统球窝法, 通过磁流变液产生凹坑不会引入额外的机械损伤; 与磁流变楔形抛光相比, 作用区域更小, 操作相对简单、工作周期短, 适用于脆性材料局部的亚表面缺陷形貌快速测量。

2.1.4 化学湿法刻蚀技术

化学湿法刻蚀技术是选用合适的化学试剂, 分阶段对表面抛光沉积层以及亚表面缺陷层进行溶解酸蚀, 并通过光学方法观测每个阶段的亚表面裂纹的分布规律。针对熔石英材料的化学蚀刻通常采用一定浓度的 HF 溶液, HF 溶解去除表面材料通过以下化学反应式描述为

通常在 HF 溶液中加入 HNO₃ 等强酸, H₃O⁺离子在溶解过程中起催化作用, 提高了刻蚀速率, 并有利于抛光沉积层的金属杂质溶解^[63]。

HF 溶液在蚀刻熔石英材料过程中, 检测亚表面缺陷的方法可以分为两种^[63]: 一种是通过测量每个蚀刻阶段的表面粗糙度, 在抛光沉积层溶解去除后, 亚表面裂纹逐渐暴露出来, 表面粗糙度会随刻蚀深度的增加逐渐增大并达到一个峰值, 之后平稳下降, 其中峰值位置对应的蚀刻深度即为亚表面缺陷的深度值; 另一种方法是, 在研磨液中加入少量的钡元素, 并采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES), 测量每个阶段蚀刻溶液的钡元素浓度, 建立起亚表面缺陷深度与钡元素浓度的关系曲线, 获得亚表面缺陷的深度信息。

采用 HF 化学湿法刻蚀的方法, 能够有效去除表面沉积层, NEAUPT 等^[64]通过检测探针测量了每个蚀刻阶段的表面轮廓曲线, 测量出亚表面裂纹的深度值, 并随着刻蚀深度的加深, 观测到不同深度下亚表面裂纹密度的分布。因此, 化学湿法刻蚀是研究熔石英光学元件亚表面缺陷的一种有效手段。但作为一种有损测量方法也存在一定的局限性和弊端, 无法完整表达深度方向的形貌特征信息, 同时酸性溶液对裂纹扩展有一定的促进作用, 对亚表面裂纹进行改性, 使得实际测得深度值偏大^[65]。

综上所述, 亚表面缺陷有损检测技术相对直接可靠, 但也都存在一定的局限性, 在未来有待解决, 亚表面缺陷有损检测技术的优点以及存在的问题如表 1 所示。

表 1 亚表面缺陷无损检测技术的优点和存在的问题

检测技术	优点	存在的问题
角度抛光技术	1. 磁流变角度抛光, 不引入新的损伤及缺陷 2. 准确获取不同深度的亚表面缺陷形貌信息	1. 局部检测方法, 无法获得全局信息 2. 加工效率低, 周期长 3. 操作复杂, 加工成本高
键合界面技术	在截面直观地观测到亚表面缺陷的形貌	键合面存在应力异常, 检测结果误差大
球窝法	磁流变球窝法可实现局部的精确、快速检测	传统球窝法存在法向载荷, 导致裂纹扩展
化学湿法刻蚀技术	1. 操作简单 2. 可获得不同深度下亚表面缺陷分布信息	1. 酸蚀深度不易控制 2. 酸性溶液促进裂纹扩展

2.2 无损检测技术

无损检测技术的原理往往基于一个事实, 即用于探测的光束、声波、电磁波等的特性在穿透被检测熔石英材料, 遇到亚表面裂纹时会发生强度或者方向的改变。相比有损检测方法, 无损检测采用间接的手段测量亚表面缺陷, 不会对检测样品造成损害, 同时检测效率高、检测成本低。

2.2.1 全内反射显微技术

由 TEMPLE^[66]提出的全内反射显微技术(Total internal reflection microscopy, TIRM)基于光的全反射, 原理如图 7 所示, 将检测样品置于棱镜之上, 两者之间存在一层相匹配的流体, 线偏振光以等于或者略大于临界全反射角的入射角穿过棱镜和匹配的流体, 照射样品。

图 7 全内反射显微技术检测原理示意图

如果样品的表面和亚表面没有缺陷, 则全反射发生在样品与空气之间的界面上, 没有光会散射到显微镜中, 镜头捕捉一种全暗场图像; 反之, 如果被测样品存在表面以及亚表面缺陷, 一部分入射光将发生散射, 出射的缺陷散射光被显微镜接收后得到散射图像。实际上得到的散射图像同时包括了表面缺陷和亚表面信息^[67], 因此, 对被检测光学元件

的表面质量有着很高的要求, 并且由于缺陷通常位于不同的深度, 散射点的图像会略有失焦, 略大于缺陷的实际尺寸, 故传统的全内反射显微技术无法对亚表面缺陷进行定量分析。

随着计算机技术以及数字化图像处理技术的快速发展, 对全内反射显微技术进行改进, 为区分表面和亚表面缺陷信息提供了可能性。XU 等^[68]采用一种改进的全内反射显微技术, 并结合数字图像处理技术, 对熔石英亚表面缺陷进行定量检测, 利用高倍镜的焦深相对较小, 通过微聚焦控制显微镜在表面下不同深度聚焦, 捕获一系列亚表面缺陷的图像。

NI 等^[69]进一步建立了基于单层小波变换的清晰度评价函数, 利用评价函数计算亚表面缺陷的曲线, 如图 8 所示, 获得亚表面缺陷的深度信息, 证明全内反射显微技术和数字图像处理系统相结合的方法, 能够实时有效地测量熔石英光学元件亚表面缺陷。

图 8 TIRM 系统获得两点缺陷清晰度曲线

2.2.2 共聚焦激光扫描显微技术

共聚焦激光扫描显微(Confocal laser scanning microscopy, CLSM)技术测量光学元件亚表面缺陷的原理, 是利用了亚表层的缺陷对入射光的散射特性以及缺陷在激光激发下的光致发光效应, 散射光及激发荧光的强度反映了缺陷信息^[70]。基本测量原理如图 9 所示, 激光通过照明针孔, 经过一个准直透镜, 然后被分束器反射至聚焦物镜, 将光源聚焦于光学元件的亚表面缺陷层, 并在缺陷层发生散射及光之发光效应, 聚焦透镜将散射光及激发荧光聚焦, 透过检测针孔被检测器接收。

其中只有位于焦平面的光才能透过检测针孔被接收, 其余位置的光被遮光片遮挡。通过改变物镜的焦平面位置即可获得亚表面不同深度的缺陷信息, 同时结合水平面内的扫描, 可以获取亚表面缺陷层的三维形貌信息。共聚焦扫描显微测量技术的

分辨率与透镜的数值孔径相关。

图9 共聚焦扫描显微技术原理示意图^[70]

由于检测器对光强十分敏感，但实际上缺陷层散射光及激发荧光的光强较弱，进而导致获取的亚表面缺陷图像往往不够清晰。针对这个问题，一些研究者通过在研磨液和抛光液中添加荧光物质，应用共聚焦显微镜在荧光模式下观察熔石英亚表面形貌，如图10所示。

图10 荧光染色剂染色亚表面缺陷的共聚焦显微图像

NEAUPORT 等^[71]通过荧光染色剂对亚表面缺陷进行标记，并采用共聚焦显微镜在荧光模式和反射模式下对熔石英的亚表面缺陷进行观测，发现在常规反射模式下观测到的亚表面损伤密度，明显低于荧光模式下的检测结果，结果表明常规的共聚焦显微技术用于检测光学元件的亚表面缺陷存在相当的局限性。

WANG 等^[72]用纳米级的荧光量子点溶液对熔石英元件研磨和抛光加工亚表面缺陷处进行荧光标记，用共聚焦荧光显微镜对熔石英元件进行逐层扫描，通过特定点最大相对荧光强度的变化检测出光学元件亚表面裂纹深度，并且通过磁流变抛光的有损方法测量，对两种方法的亚表面裂纹深度测量结果进行对比，如图11所示，两者的测量误差不超过10%，验证了荧光模式下共聚焦显微检测

的准确性。

图11 不同方法观测到亚表面缺陷深度对比

2.2.3 光学相干层析技术

光学相干层析技术(Optical coherent tomography, OCT)最早应用生物学和医学诊断，其应用随后扩展到了工程陶瓷材料，近些年被应用于光学元件表面及亚表面缺陷的测量^[73-74]。光学相干层析技术测量原理基于迈克尔逊干涉测量法^[75]。

光学相干层析技术测量基本原理为激光光源通过分束器被分为两束，一束通过聚焦透镜照射样品，部分光发生反射被检测器接收；另一束光作为参考光束，被反射镜反射，通过移动反射镜，调整光程，使两束光发生干涉，并由检测器获取干涉信号。干涉信号通过计算机的后处理生成干涉函数，干涉函数的最大值与反射镜的位置相对应，进而精确计算出样品的亚表面缺陷轮廓。GUSS 等^[76]采用光学相干层析技术准确获取了熔石英亚表面损伤的图像，并通过显微镜对观测结果进行对比验证，如图12所示。

与共聚焦显微镜测量分辨率受数值孔径限制不同，光学相干层析技术测量的深度分辨率依赖于光源的相干长度 L ^[77]

$$L = \ln(2) \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (9)$$

式中， λ 为光源的波长， $\Delta\lambda$ 为相干性函数在半个最大值处的全宽与波长的比值。

光学相干层析法的优点在于，它适用于较大的工作距离，可以在保持相对高的分辨率对厚光学元件较深位置的缺陷进行观测^[78]。光学相干层析技术适用于具有强光散射特性的材料，对于某些光学材料，其散射性能差，从亚表面层散射的光较弱难以产生干涉效应；受限于光源相干长度对分辨率的影响，难以对微米级的裂纹进行宽度和深度的表征；同时，由于表面散射和反射会引起噪声干扰对目标

信号的处理^[79]。因此，对检测的光学元件表面质量

有较高要求。

图 12 OCT 检测与显微镜观察亚表面损伤结果对比图

2.2.4 其他无损检测技术

南京科技大学的WU等^[80]采用在线数字全息显微技术(In-line digital holographic microscopy, IDHM),通过将物镜直列式排列以实现在 CCD 上全息成像,在横向以及深度方向具有较高的分辨率,实现了光学元件亚表面裂纹的三维重建。

BALOGUN 等^[81]通过扫描声学显微镜(Scanning acoustic microscopy, SAM),利用超声波对亚表面缺陷进行测量,通过检测反射声波获取元件亚表层的信息,是一种典型的无损检测方法,深度方向分辨率高,可以达到微米级,同时检测效率高。但受到系统脉冲回波结构产生的几何波场扩展的限制,其横向分辨率只能达到数十微米,因此不适用于熔石英元件微纳米级别亚表面缺陷检测。

X 射线计算机断层扫描(Computed tomography, CT),是一种能够有效检测亚表层缺陷的技术手段,检测分辨率可以达到微米级甚至更高,但 X 射线穿透深度受限于检测材料,且其高辐射性将会对人体造成损害,应用场合受到限制^[82]。

综上所述,亚表面缺陷无损检测技术能够保证检测样品的完整性,节省样品制备时间,有利于提高整体制造效率,降低成本。但同时也存在一定的局限性,在未来有待解决。亚表面缺陷无损检测技术的优点以及存在问题如表 2 所示。

表 2 亚表面缺陷无损检测技术的优点和存在的问题

检测技术	优点	存在的问题
TIRM	全局扫描和在线检测	1. 难以定量测量亚表面缺陷的深度 2. 对表面条件要求高,只适用于精密抛光样品
CLSM	1. 可实现全局扫描 2. 适用于亚表面缺陷的三维构型和空间分布 3. 高分辨率	1. 对表面条件要求高,只适用于精密抛光样品 2. 表面散射光的干扰影响检测精度
OCT	1. 可实现全局扫描 2. 适用于亚表面缺陷的三维构型和空间分布	1. 不适用于低光散射材料 2. 受到表面散射光的干扰 3. 图像处理难度大
IDHM	1. 适用于亚表面缺陷的三维构型和空间分布 2. 检测分辨率高,可达微米级,甚至亚微米级	1. 图像处理难度大 2. 检测效率低
SAM	1. 检测效率高 2. 深度方向分辨率高	横向分辨率低,数十微米
CT	检测分辨率高,可达微米级	1. 透射深度受限于材料 2. X 射线对人体有害

3 熔石英元件亚表面缺陷的抑制技术

熔石英光学元件亚表面缺陷的存在,会不同程度地降低其在高能量、高功率以及高冲击载荷工作环境下的使用性能。国内外许多学者在探寻熔石英等硬脆材料亚表面缺陷有效抑制方法方面做了大量工作,本小节综述了几种先进表面加工技术在熔石

英材料亚表面缺陷的抑制方面的应用效果及存在的问题。

3.1 磁流变抛光在亚表面缺陷抑制的应用

磁流变抛光技术作为一种先进的表面加工技术, CATRIN 等^[83-84]将其成功应用于光学元件亚表面缺陷的抑制当中。磁流变抛光对于材料的去除机制基于磁流变抛光液的性质, 抛光液由磁性羰基铁、非磁性抛光磨料、水或者其他非水性流体以及稳定剂组成^[85]。抛光加工时, 磁流变液通过喷嘴喷洒在旋转的抛光轮上, 在抛光轮的驱动下, 其通过工件和抛光轮之间的间隙时, 在高梯度磁场作用下粘度发生改变, 完成从液态到固态的可逆转变, 形成瞬间的柔性“抛光磨头”, 实现对表面材料的去除^[86]。

将磁流变抛光技术应用于熔石英材料的亚表面缺陷抑制中, 能够均匀地去除抛光加工形成的表面沉积层以及亚表面的裂纹和划痕等缺陷。KAFKA 等^[87]的报道表明, 磁流变抛光能有效地减少激光损伤前驱体, 弱化加工表面缺陷层对于光场的调制作用, 提高熔石英元件在高能激光环境下的激光损伤阈值。YANG 等^[88]研究了磁流变抛光前后熔石英元件在 355 nm 激光辐照下的损伤阈值变化, 观测到通过磁流变抛光亚表面层的裂纹密度由 103 cm^{-2} 降低到 1 cm^{-2} , 同时, 激光诱导损伤阈值提高到了原来的 2.8 倍, 报道表明随着抛光沉积层以及亚表面缺陷层的去除, 熔石英元件的抗激光损伤能力得到显著提高。

磁流变抛光技术基于剪切的材料去除方式, 能够保证在加工过程中不会引入新的表面损伤, 能够有效提升元件表面的机械强度^[89]。但由于磁流变液中含有羰基铁粉, 抛光过程非常复杂, 会将 Fe、Ce 等污染物引入光学元件表面, 这种污染限制了熔石英元件激光损伤阈值的提升; 并且其材料去除效率较低, 加工设备成本较高, 增加了实际应用的难度。

针对磁流变抛光加工效率低的问题, SHI 等^[90]将磁流变抛光技术与 HF 刻蚀相结合对熔石英元件进行表面处理, 该方法并未完全去除亚表面缺陷层, 而是通过两种技术实现对亚表面裂纹、划痕的轮廓钝化, 提高了亚表面结构的宽深比, 如图 13 所示。并通过有限时域差分法模拟了亚表面缺陷对光场的调制作用, 数值计算结果和试验的检测结果相一致, 即较钝轮廓且宽深比大的结构对光场的调制作用较差, 且随着缺陷结构宽深比的增大, 元件表面的激光诱导损伤阈值明显升高。由于该方法并未完全去除亚表面缺陷结构, 相比传统磁流变抛光, 加工效率提高了 2~3 倍, 并实现了熔石英元件的抗激光损

伤性能的有效提高, 对于光学元件的亚表面缺陷检测及抑制具有良好的应用前景。

图 13 熔石英表面处理前后表面轮廓变化

3.2 离子束刻蚀在亚表面缺陷抑制的应用

离子束刻蚀(Ion beam etching, IBE)是一种基于物理溅射效应的原子尺度的材料去除方法^[91]。离子束刻蚀技术是在加工过程中利用电场加速提高离子动能, 依靠微观物理撞击能量来实现工件表面材料的去除^[92]。在真空条件下, 通常应用 Ar 氩等惰性气体电离发出离子, 产生的离子束经过加速聚焦, 与工件材料的原子核直接产生弹性碰撞, 将离子的动能传递给工件材料的原子, 通过撞击效应使表面原子逸出, 从而达到原子尺度材料的去除^[93]。

离子束刻蚀技术在材料去除过程中具有各向异性的特点, 同时刻蚀深度稳定可控, 因此, 许多研究人员将离子束刻蚀应用于熔石英光学元件的亚表面缺陷的抑制和去除。KAMIMURA 等^[94]利用低能量的离子束去除熔石英元件的抛光沉积层和亚表面缺陷层, 同时保证良好的表面质量, 在 266 nm 和 1 064 nm 波长的激光辐照下, 测得熔石英的表面激光诱导损伤阈值分别提高了 2.0 倍和 1.3 倍。经过离子束刻蚀, 熔石英表层材料改性, Si-O-Si 键角减小, 表层密度增加, 获得致密强化的表面, 在激光的热效应下不易发生断裂^[95]。XU 等^[96]不仅应用离子束刻蚀去除了熔石英表面缺陷, 同时将离子束刻蚀消除了激光辐射引起的表面损伤, 使元件的激光损伤阈值恢复到受损前的水平。GUO 等^[97]通过 Ar 离子束降低了熔石英元件的亚表面缺陷密度, 在改善表面质量并提升激光损伤阈值的同时, 大幅度降低了以熔石英为基底的增透膜的损伤概率。

离子束刻蚀技术作为一种非接触式的加工技术, 选用合适的加工参数, 可以在不引入额外缺陷和污染物的前提下, 去除表层缺陷, 进而实现熔石英元件超光滑表面的加工^[98]。加工中的刻蚀速率、加工后的表面质量和形貌, 受到离子束刻蚀工艺参

数,特别是入射角度的影响。

LI 等^[99]研究发现在离子束入射角度小于 30° 或者大于 70° 时,可以获得光滑的熔石英表面。尤其是在大于 70° 入射时,表面金属杂质污染被消除,亚表面层的划痕、裂纹等缺陷逐渐暴露并去除,并且无纵向的裂纹复制与横向的尺度扩展。同时发现随着离子束刻蚀深度的逐步增加,表面粗糙度存在先增大后减小的趋势,如图 14 所示^[99]。

图 14 熔石英表面粗糙度随离子束刻蚀深度的变化趋势

XU 等^[100]采用大角度入射的离子束刻蚀技术,去除了熔石英表面的化学沉积层,有效降低了 Ce 的浓度。在亚表面层,塑性划痕被完全去除,而脆性裂纹增大了宽深比,实现了轮廓钝化,在去除了 $1\ \mu\text{m}$ 的表面材料时,熔石英的激光损伤阈值提高了 36%。

作为一种高度确定的加工方法,离子束刻蚀采用合理的工艺参数,可以有效地抑制熔石英光学元件的亚表面缺陷,并保证良好的表面质量。

3.3 等离子体在亚表面缺陷抑制的应用

等离子体加工作为一种新兴的光学制造技术,在近些年被应用于熔石英光学元件亚表面缺陷的抑制与去除^[101]。2008 年,ZHANG 等^[102]首次引入等离子体炬去除单晶硅的表面及亚表面尺度缺陷。WANG 等^[103]报道,证明等离子体改性是熔石英光学元件快速获得无损表面的一种具有开发前景的方法。等离子体去除熔石英表面材料的原理如图 15 所示。

图 15 等离子体材料去除机理示意图^[103]

基于 NF_3 、 SF_6 、 CF_4 等富氟气体(以 CF_4 为主)

通过等离子体电子碰撞,分解产生高活性的 F 原子,并在等离子体射流携带,扩散到熔石英元件表面与 SiO_2 反应,生成具有高挥发性的 SiF_4 完成纳米级的材料去除,反应式为^[104]

等离子体反应材料去除作为一种非接触式的干化学刻蚀方法,在抑制、消除亚表面缺陷的同时不会引入新的机械损伤,并且高密度、高活性的氟原子保证了高效的去除效率^[105]。

SUN 等^[106]在反应气体中加入 Ar 氩气,利用反应离子刻蚀工艺,去除了熔石英的亚表面划痕,有效地提高了熔石英元件的损伤性能,如图 16 所示,在材料去除深度达到 $6\ \mu\text{m}$ 时,表面激光损伤阈值提高了 37.6%。

图 16 激光损伤阈值随等离子体蚀刻深度变化趋势

JIANG 等^[107]采用电感耦合等离子体,将等离子体和低压惰性气体粒子撞击相结合,使刻蚀具有高度的各向异性,有效改善了亚表面缺陷的横向刻蚀,如图 17 所示。与反应离子刻蚀不同,电感耦合等离子体刻蚀系统中衬底功率和线圈功率相互独立,能够更好地控制等离子体浓度和离子的轰击能量,蚀刻速率较非电感耦合的反应离子刻蚀大幅度提高^[108]。

等离子体反应一般在真空环境下进行,这无疑增加了加工的难度和成本。JIN 等^[109]研究了在常压进行的大气压等离子体加工工艺,对亚表面缺陷进行去除。然而,大气压下刻蚀以各向同性为主,亚表面缺陷的横向刻蚀和表面粗糙化现象严重。哈尔滨工业大学的 XIN 等^[110-111]对大气压等离子体加工过程中的各向同性刻蚀现象进行研究,并对等离子体加工后的表面化学成分、表面形貌以及表面粗糙度进行定量的表征,选用合适的工艺参数,采用感应耦合等离子体成功去除熔石英亚表面缺陷,获得光滑光学加工表面。

FUKUMOTO 等^[112]发现,在等离子体刻蚀工艺

中, 电子碰撞反应在 CF_4 放电工程中, 除了产生高活性的氟原子和 SiO_2 反应生成挥发性化合物去除, 还会产生大量的 CF_2 自由基, 和 SiO_2 发生聚合反应, 在元件表面形成固态的化合物沉积层, 严重降低元件表面粗糙度和激光损伤阈值。LI 等^[113]对大气等离子体处理后的熔石英表面形貌进行表征, 并对沉积层的形成机理进行分析。JIN 等^[114]分析了等离子体加工后, 表面粗糙度增大以及表层氟碳沉积物的形成原因, 根据表面物的化学成分和 CF_4 等离子体的发射种类, 分析了表面沉积膜的形成机理。通过在反应气中添加 O_2 , 有效减少了离散的 CF_2 自由基的数量, 有效抑制了氟碳化合物的沉积效应, 保证了等离子体去除熔石英亚表面损伤后, 获得无污染的高质量光滑表面。

3.4 湿化学刻蚀技术在亚表面缺陷抑制的应用

在第 2.1.4 节中提到以 HF 溶液为主的湿化学刻蚀技术, 常作为亚面缺陷检测的辅助手段, 通过化学反应去除抛光残留的化学沉积层, 并溶解激光吸收杂质, 进而暴露隐藏在表层之下的亚表面裂纹划痕等。基于快速、高效以及可以对样品进行整体处理的特点, HF 化学刻蚀作为一种可能的缺陷缓解技术, 被用于进一步移除亚表面层的材料。

美国 LLNL 实验室的 FEIT 等^[115]为了解化学刻蚀过程中表面形貌随材料去除的变化, 建立了有限差分刻蚀模型以及表面积体积模型, 利用模型成功预测亚表面裂纹的生长及钝化过程, 如图 17 所示为划痕宽度随蚀刻时间平方根的变化曲线。

图 17 不同划痕宽度随时间平方根变化曲线

化学刻蚀过程中, 表面沉积层首先被溶解, 金属等吸收性杂质随之去除, 随着刻蚀进程的推进, 暴露的亚表面划痕和裂纹逐渐钝化, 表面质量水平提升, 抗激光损伤的能力增强^[116]。SURATWALA 等^[117]采用不同浓度的 HF 溶液对熔石英表面进行整

体刻蚀, 报道表明蚀刻速率和 HF 浓度呈正相关, 适度刻蚀能钝化裂纹, 355 nm 波长激光下的表面损伤阈值从 7 J/cm^2 提高到 41 J/cm^2 。在去除一定深度范围内, 能够有效抑制亚表面缺陷, 提高表面激光损伤阈值。但进一步增加刻蚀深度, 在大刻蚀深度下, 表面质量和激光损伤阈值反而降低, 这与化学反应产物在表面的再沉积有关^[118]。YE 等^[119]在 HF 溶液化学刻蚀后, 采用超声多频搅拌和化学浸出相结合的先进缓解工艺, 有效避免了反应产物再沉积, 提高了熔石英光学元件的激光损伤阈值。

在刻蚀过程中, 亚表面缺陷层形貌轮廓的变化, 最直接地体现在表面粗糙度的变化上。酸蚀效应使得隐藏在熔石英表层之下的裂纹和划痕钝化, 表面轮廓的宽深比增大。但刻蚀是一个各向同性的材料去除过程, 随着刻蚀深度的增加, 裂纹将进一步向径向扩展, 导致表面粗糙度恶化^[120]。哈尔滨工业大学的 CHENG 等^[121]发现在 HF 刻蚀熔石英时, 表面粗糙度的发展存在三个阶段。首先, 刻蚀深度小于 500 nm, 随着表面沉积层的去除表面粗糙度逐渐增大; 当刻蚀深度达到 $0.5 \mu\text{m}$ 至 $2.15 \mu\text{m}$, 在酸蚀作用下裂纹和划痕轮廓钝化, 表面粗糙度为下降趋势; 当刻蚀深度超过 $2.15 \mu\text{m}$, 随着刻蚀深度加深, 裂纹和划痕向深度方向扩展, 导致表面粗糙度大幅度增加, 表面质量恶化。

优化刻蚀工艺参数, 选用合适浓度的酸蚀溶液, 控制刻蚀速率和深度, 采用有效的表面清洗手段去除反应沉积物, 化学湿法刻蚀技术可以有效抑制熔石英光学元件亚表面缺陷, 获得具有低表面粗糙度、高激光损伤阈值的高质量表面。

3.5 CO_2 激光加工技术在亚表面缺陷抑制的应用

激光处理作为一种光学元件的后处理手段, 通常采用能量低于激光诱导损伤阈值的激光照射元件表面, 利用热效应改善表面质量。基于 SiO_2 对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光具有较高的吸收系数以及较低的热膨胀系数的特点, CO_2 激光被广泛应用于熔石英的表面处理。

CO_2 激光加工是一个涉及相变传热和流体流动的多物理场耦合的过程^[122]。激光辐照时, 基于对激光能量的高吸收率, 激光能量转化为热量, 照射区局部材料迅速升温, 当温度超过软化点温度, 表面材料开始软化, 随着温度继续升高, 材料的粘性下降, 当温度升高至一定值后, 材料呈现为熔融状态, 材料发生流动, 实现亚表面微裂纹的愈合^[123]。FEIT

等^[124]建立 CO₂ 激光加工的理论模型, 分析了熔石英在熔融状态下, 表面裂纹的愈合机理, 并给出愈合时间 τ_c

$$\tau_c = \eta w / (\pi \sigma) \quad (11)$$

式中, η 是黏滞系数, w 是裂纹宽度, σ 是表面张力。

HE 等^[125]建立了熔石英材料在 CO₂ 激光辐照下的融熔流动模型, 并对比了光压、重力、表面张力以及马兰哥尼效应作用下的材料表面形貌, 如图 18 所示, 结果表明表面张力在材料熔融流动、裂纹愈合、平滑表面的过程中起主导作用。

图 18 熔石英 CO₂ 激光加工过程仿真模型^[125]

YAO 等^[126]研究了不同的 CO₂ 激光加工参数对熔石英的刻蚀深度以及黏度影响, 最终确定激光扫描速度为 0.2 m/s, 激光功率为 10.5~12 W 为最佳的激光加工参数, 实现了亚表面缺陷的修复以及裂纹的愈合, 并有效降低表面粗糙度。CORMONT 等^[127]采用无损检测方式获取了亚表面划痕的深度及宽度信息, 控制温度在退火点到软化点之间对缺陷进行修复, 成功消除了 16 μm 深的划痕, 并将激光损伤阈值从 4 J/cm² 提高到 16 J/cm²。

哈尔滨工业大学的 ZHAO 等^[128-129]提出一种基于 CO₂ 激光加工技术, 改进传统光学元件加工工艺, 用 CO₂ 激光抛光替代传统抛光方法, 加工熔石英光学元件, 快速去除磨削裂纹, 实现高效精密抛光, 加工示意如图 19 所示。

图 19 CO₂ 激光抛光熔石英光学元件示意图

CO₂ 激光加工中, 加热区域存在一定的温度梯

度, 加工后往往会产生较高的残余热应力, 因此, CO₂ 激光一次加工后, 采用恒温炉或者低功率的激光进行二次加热, 进行局部退火, 以去除残余应力, 提高表面轮廓精度。DOUALLE 等^[130]在不同的温度下分别对 CO₂ 激光加工后的熔石英进行等温退火, 结果表明 1 050 °C 温度下退火 12 h, 能够有效地提高表面的激光损伤阈值, 并大大降低激光加工部位周围的残余应力, 同时表示较高的退火温度不利于元件表面平整度的提高。

CO₂ 激光作为新型的先进加工技术, 能够有效抑制机械抛光产生的亚表面缺陷, 同时不引入新的机械损伤, 因此, CO₂ 激光加工技术作为一种无损加工技术, 为应用在航天飞行器、激光武器、高功率固体激光聚变装置中熔石英光学元件的抛光提供一种新的技术手段, 以满足高冲击、高载荷、高功率使用环境要求。

4 结论

熔石英光学材料因具备优异的物理、机械和化学性能, 广泛应用于高能激光核聚变、高速航天飞行器、强激光武器等领域。在主流的研磨、抛光等加工工艺中, 硬脆熔石英材料通常以脆性断裂的形式去除, 这将导致在元件表面或亚表面产生微裂纹、划痕等缺陷, 从而影响光学元件在高功率、高能量激光和强冲击载荷等极端服役环境下的使用强度、性能和寿命。

通过不同的检测手段获取熔石英亚表面层裂纹等缺陷的形貌、深度以及分布信息, 可为加工亚表面缺陷的抑制和去除提供有益参考。有损检测技术往往通过物理或者化学手段, 破坏表面原有结构, 暴露亚表面缺陷结构, 可实现缺陷形貌尺寸的直接测量, 测量结果准确可靠, 但该测量过程需破坏零件, 不能提供零件的全局缺陷信息, 并且一般耗时较长, 加工效率低; 相反, 无损检测技术通常利用亚表面缺陷层的结构特性, 采用间接手段对元件进行整体检测, 不会对检测样品造成损害, 同时检测效率高、检测成本低。随着光学元件定制化越来越流行, 无损检测方式的应用将越来越广泛, 另外, 随着人们对大口径、高精度、高质量熔石英光学元件需求及检测设备水平的不断提高, 高精度的无损检测技术为光学元件加工工艺迭代优化奠定基础。

采用磁流变抛光、离子束刻蚀、等离子体加工

以及 CO₂ 激光加工等先表面加工技术, 可以抑制熔石英加工亚表面缺陷, 通过去除表面金属杂质及残余应力、愈合或钝化微裂纹和划痕等方式, 可改善熔石英光学元件表面的机械性能, 并提高其抗激光损伤能力。CO₂ 激光抛光、离子束刻蚀、磁流变抛光等先进表面加工技术, 在硬脆熔石英光学元件加工中不会引入新的表面/亚表面损伤, 随着工艺技术的成熟和进步, 将逐渐代替传统抛光工艺, 在熔石英光学元件的无损、超光滑表面的加工中拥有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] RUGGIERO A, IANNITTI G, TESTA G, et al. High strain rate fracture behaviour of fused silica[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(18): 182036.
- [2] BURT R R, CHRISTIANSEN E L. Hypervelocity impact testing of transparent spacecraft materials[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29(1-10): 153-166.
- [3] RUSSELL G, CAYSON S, JONES M, et al. Laser window design for the army hypersonic compact kinetic energy missile[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 43(5): 982-989.
- [4] WANG Hengkun, LI Guannan, SHI Long, et al. Excluding water characteristics of fairing materials for seeker based on giant pulse energy medium wave infrared laser[J]. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11: 1291-1298.
- [5] KHABIBULLIN M V, KRIVOSHEIN M N, SAMMEL A Y. Mathematical modeling of the shock action of fragments of space debris on spacecraft windows[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, 92(6): 1501-1508.
- [6] YE Hui, LI Yaguo, YUAN Zhigang, et al. Laser induced damage characteristics of fused silica optics treated by wet chemical processes[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357: 498-505.
- [7] NEAUPORT J, LAMAGNÈRE L, BERCEGOL H, et al. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm[J]. *Optics Express*, 2006, 13(25): 10163-10171.
- [8] DENIS V, BEAU V, LACAMPAGNE L, et al. The laser megajoule facility : Laser performances and comparison with computational simulation[J]. *High Power Lasers for Fusion Research IV*, 2017, 1008401: 1-9.
- [9] ZHU Qihua, ZHENG Wanguo, WEI Xiaofeng, et al. Research and construction progress of the SG-III laser facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 9266(22): 11306-11312.
- [10] BRINKSMIEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, et al. Ultra-precision grinding[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(2): 652-671.
- [11] LIN Bin, JIANG Xiangmin, LI Shiping, et al. Mechanism of material removal by fixed abrasive lapping of fused quartz glass[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 46: 279-285.
- [12] SHEN Jian, LIU Shouhua, YI Kui, et al. Subsurface damage in optical substrates[J]. *Optik*, 2005, 116(6): 288-294.
- [13] LIU Hongjie, HUANG Jin, WANG Fengrui, et al. Subsurface defects of fused silica optics and laser induced damage at 351 nm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12204-12217.
- [14] LAURENCE T A, NEGRES R A, LY S, et al. The role of defects in laser-induced modifications of silica coatings and fused silica using picosecond pulses at 1053 nm: II. Scaling laws and the density of precursors[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15381-15401.
- [15] ZHANG Lijuan, CHEN Jing, JIANG Yilan, et al. Investigations on variation of defects in fused silica with different annealing atmospheres using positron annihilation spectroscopy[J]. *Optical Materials*, 2017, 72: 540-544.
- [16] LAMAGNÈRE L, GAUDFRIN K, DONVAL T, et al. Laser-induced damage of fused silica optics at 355 nm due to backward stimulated Brillouin scattering : Experimental and theoretical results[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11744-11755.
- [17] LI Yaguo, YUAN Zhigang, WANG Jian, et al. Laser-induced damage characteristics in fused silica surface due to mechanical and chemical defects during manufacturing processes[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 91: 149-158.
- [18] YE Hui, LI Yaguo, XU Qiao, et al. Resistance of scratched fused silica surface to UV laser induced damage[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10741.
- [19] MILLER P E, BUDE J D, SURATWALA T I, et al. Fracture-induced subbandgap absorption as a precursor to optical damage on fused silica surfaces[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2702-2704.
- [20] WANG Hongxiang, WANG Chu, ZHANG

- Mingzhuang, et al. Investigation of subsurface damage density and morphology impact on the laser-induced damage threshold of fused silica[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(36): 9839-9845.
- [21] NEAUPORT J, CORMONT P, LAMAGNERE L, et al. Concerning the impact of polishing induced contamination of fused silica optics on the laser-induced damage density at 351 nm[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(14): 3802-3805.
- [22] BAXAMUSA S, MILLER P E, WONG L, et al. Mitigation of organic laser damage precursors from chemical processing of fused silica[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29568.
- [23] LIU Hongjie, WANG Fengrui, HUANG Jin, et al. Experimental study of 355 nm laser damage ignited by Fe and Ce impurities on fused silica surface[J]. *Optical Materials*, 2019, 95: 109231.
- [24] LI Li, XIANG Xia, ZU Xiaotao, et al. The electric field modulation by three-dimensional crack on fused silica subsurface[J]. *Optik*, 2011, 122(16): 1423-1425.
- [25] ZHENG Zhi, ZU Xiaotao, JIANG Xiaodong, et al. Effect of HF etching on the surface quality and laser-induced damage of fused silica[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(4): 1039-1042.
- [26] GENIN F Y, SALLEO A, PISTOR T V, et al. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. *Journal of The Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 2001, 18(10): 2607-2616.
- [27] LAI S T, MURAD E, MCNEIL W J. Hazards of hypervelocity impacts on spacecraft[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1): 106-114.
- [28] MOUSSI A, MANDEVILLE J C, VIDAL L, et al. Oblique hypervelocity impacts: Implication for the analysis of material retrieved after exposure to space[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 474-484.
- [29] WALKER J D. From Columbia to discovery: Understanding the impact threat to the space shuttle[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 303-317.
- [30] MANNING H L K, GREGOIRE J M. An upgraded high-velocity dust particle accelerator at Concordia College in Moorhead, Minnesota[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1-12): 402-409.
- [31] WANG Changchu, FANG Qihong, CHEN Jianbin, et al. Subsurface damage in high-speed grinding of brittle materials considering kinematic characteristics of the grinding process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83: 937-948.
- [32] LAWN B R, EVANS A G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12(11): 2195-2199.
- [33] AHN Y, CHO N, LEE S, et al. Lateral crack in abrasive wear of brittle materials[J]. *JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*, 2003, 46(2): 140-144.
- [34] SHAFRIR S N, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Subsurface damage and microstructure development in precision microground hard ceramics using magnetorheological finishing spots[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5500-5515.
- [35] WANG Wei, YAO Peng, WANG Jun, et al. Controlled material removal mode and depth of micro cracks in precision grinding of fused silica A theoretical model and experimental verification[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(15): 11596-11609.
- [36] SU Yunhua, LIN Bin, CAO Zhongchen. Prediction and verification analysis of grinding force in the single grain grinding process of fused silica glass[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 597-606.
- [37] CHEN Mingjun, ZHAO Qingliang, DONG Shen, et al. The critical conditions of brittle-ductile transition and the factors influencing the surface quality of brittle materials in ultra-precision grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 168(1): 75-82.
- [38] WANG Wei, YAO Peng, WANG Jun, et al. Elastic stress field model and micro-crack evolution for isotropic brittle materials during single grit scratching[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(14): 10726-10736.
- [39] LI Beizhi, NI Jiaming, YANG Jianguo, et al. Study on high-speed grinding mechanisms for quality and process efficiency[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(5): 813-819.
- [40] ZHANG Lei, CHEN Wei, HU Lili. Systematic investigation on light intensification by typical subsurface cracks on optical glass surfaces[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 980-989.
- [41] QUAN Junkui, FANG Qihong, CHEN Jianbin, et al.

- Investigation of subsurface damage considering the abrasive particle rotation in brittle material grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9-12): 2461-2476.
- [42] MILLER P E, SURATWALA T I, WONG L L, et al. The distribution of subsurface damage in fused silica[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 5991: 599101.
- [43] WANG JIAN, LI Yaguo, HAN Jinghua, et al. Evaluating subsurface damage in optical glasses[J]. Journal of the European Optical Society, 2011, 6: 60.
- [44] SURATWALA T I. Materials science and technology of optical fabrication[M]. Hoboken: The American Ceramic Society, 2018.
- [45] SURATWALA T I, WONG L, MILLER P E, et al. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2006, 352(52): 5601-5617.
- [46] JING Xiaoning, MAITI S, SUBHASH G. A new analytical model for estimation of scratch-induced damage in brittle solids[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(3): 885-892.
- [47] GU Wei, YAO Zhen, LI Ke. Evaluation of subsurface crack depth during scratch test for optical glass BK7[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(12): 2767-2774.
- [48] SURATWALA T I, STEELE W A, WONG L L, et al. Subsurface mechanical damage correlations after grinding of various optical materials[J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 92604.
- [49] SURATWALA T I, STEELE R, FEIT M D, et al. Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2008, 354(18): 2023-2037.
- [50] SURATWALA T I, STEELE R, WONG L, et al. Towards predicting removal rate and surface roughness during grinding of optical materials[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2490-2499.
- [51] TONNELIER X, SHORE P, LUO X, et al. Wheel wear and surface/subsurface qualities when precision grinding optical materials[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 627308.
- [52] WANG Hongxiang, WANG Chu, ZHANG Mingzhuang, et al. Investigation of subsurface damage density and morphology impact on the laser-induced damage threshold of fused silica[J]. Applied Optics, 2019, 58(36): 9839-9845.
- [53] CATRIN R, TAROUX D, CORMONT P, et al. MRF, ELSM and STED: Tools to study defects in fused silica optics[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8885: 88852D.
- [54] MENAPACE J, DAVIS P, STEELE W, et al. MRF applications: Measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 5991: 599103.
- [55] CHENG Haobo, FENG Zhaojian, WANG Yongwei, et al. Surface roughness and material-removal rate with magnetorheological finishing without subsurface damage of the surface[J]. Journal of Optical Technology, 2005, 72(11): 865-871.
- [56] CHENG Haobo, DONG Zhichao, YE Xu, et al. Subsurface damages of fused silica developed during deterministic small tool polishing[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18588-18603.
- [57] MULHEARN T O. The deformation of metals by vickers-type pyramidal indenters[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1959, 7(2): 85-88.
- [58] XU H H K, JAHANMIR S. Simple Technique for observing subsurface damage in machining of ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(5): 1388-1390.
- [59] GUIBERTEAU F, PADTURE N P, LAWN B R. Effect of grain size on hertzian contact damage in alumina[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(7): 1825-1831.
- [60] HELBAWI H, ZHANG Liangchi, ZARUDI I. Difference in subsurface damage in indented specimens with and without bonding layer[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(4): 1107-1121.
- [61] ZHOU Yiyang, FUNKENBUSCH P D, QUESNEL D J, et al. Effect of etching and imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 77(12): 3277-3280.
- [62] SHU Yong, DUAN Weiran, JIAO Changjun. SSD evolution model in HF etching of fused silica optics[J]. Optik, 2019, 181: 372-377.
- [63] WONG L, SURATWALA T I, 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.

- [64] NEAUPORT J, AMBARD C, CORMONT P, et al. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20448-20456.
- [65] YE Hui, LI Yaguo, XU Qiao, et al. Effects of wet chemical etching on scratch morphology and laser damage resistance of fused silica[J]. Silicon, 2020, 12(2): 425-432.
- [66] TEMPLE P A. Total internal reflection microscopy: A surface inspection technique[J]. Applied Optics, 1981, 20(15): 2656-2664.
- [67] KUZNETSOVA O B, SAVCHENKO E A, ANDRYAKOV A A, et al. Image processing in total internal reflection fluorescence microscopy[C]// Journal of Physics: Conference Series. Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019. March 21-22, 2019, Saint Petersburg, Russia: IOP Publishing Ltd. 2019, 1236(1): 012039.
- [68] XU Longbo, NI Kaizao, ZHU Rihong, et al. Enhanced internal reflection microscopy for subsurface damage inspection[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9983: 99830Z.
- [69] NI Kaizao, CHENG Xin, HUANG Baoming, et al. Quantitative evaluation of subsurface damage by improved total internal reflection microscopy[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1819.
- [70] YEE K S, CHEN J S. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1997, 45(3): 354-363.
- [71] NEAUPORT J, CORMONT P, LEGROS P, et al. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- [72] WANG Hongxiang, HOU Jing, WANG Jinghe, et al. Experimental investigation of subsurface damage depth of lapped optics by fluorescent method[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(7): 1678-1689.
- [73] NAM H S, YOO H. Spectroscopic optical coherence tomography: A review of concepts and biomedical applications[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2018, 53: 91-111.
- [74] ZORIN I, KILGUS J, SU R, et al. Multimodal mid-infrared optical coherence tomography and spectroscopy for non-destructive testing and art diagnosis[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11058: 110580N.
- [75] YIN Jingfei, BAI Qian, ZHANG Bi. Methods for detection of subsurface damage: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 41.
- [76] GUSS G, BASS I, HACKEL R, et al. High-resolution 3D imaging of surface damage sites in fused silica with optical coherence tomography[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6720: 67201F.
- [77] SERGEEVA M, KHRENIKOV K, HELLMUTH T, et al. Sub surface damage measurements based on short coherent interferometry[J]. Journal of the European Optical Society Rapid Publications, 2010, 5: 10003.
- [78] DUFOUR M L, LAMOUCHE G, VERGNOLE S, et al. Surface inspection of hard to reach industrial parts using low-coherence interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6343: 63430Z.
- [79] LIU Jian, LIU Jing, LIU Chenguang, et al. 3D dark-field confocal microscopy for subsurface defects detection[J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 660-663.
- [80] WU Xiuping, GAO Wanrong, HE Yong. Estimation of parameters for evaluating subsurface microcracks in glass with in-line digital holographic microscopy[J]. Applied Optics, 2016, 55(3): A32.
- [81] BALOGUN O, COLE G D, HUBER R, et al. High-spatial-resolution sub-surface imaging using a laser-based acoustic microscopy technique[J]. IEEE Trans. Ultrason Ferroelectr. Freq. Control, 2011, 58(1): 226-233.
- [82] LAVERY L, HARRIS W, GELB J, et al. Recent advancements in 3D X-ray microscopes for additive manufacturing[J]. Microscopy and Microanalysis, 2015, 21(S3): 131-132.
- [83] CATRIN R, NEAUPORT J, TAROUX D, et al. Magnetorheological finishing for removing surface and subsurface defects of fused silica optics[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 92010.
- [84] CATRIN R, TAROUX D, CORMONT P, et al. Efficiency of magnetorheological fluid finishing on the elimination of defects in fused silica optics[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8884: 8840A.
- [85] MIAO Chunlin, SHAFRIR S N, LAMBROPOULOS J C, et al. Shear stress in magnetorheological finishing for glasses[J]. Applied Optics, 2009, 48(13): 2585.
- [86] JI Jian, GAO Wei, WANG Chao, et al. Evolution and removal of surface scratches on fused silica under magnetorheological finishing[J]. Optical Engineering,

- 2019, 58(5): 055102.
- [87] KAFKA K, HOFFMAN B, PAPERNOV S, et al. Methods for improving the damage performance of fused silica polished by magnetorheological finishing[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10447: 1044709.
- [88] YANG Minghong, QI Hongji, ZHAO Yuanan, et al. Reduction of the 355-nm laser-induced damage initiators by removing the subsurface cracks in fused silica[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8206(1): 22.
- [89] LIU Jiabao, ZHANG Yunfei, JI Jianwei, et al. Impact of process parameters on super-smooth surface of the fused silica created by magnetorheological finishing: Simulation and experimental study[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11068: 110681V.
- [90] 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(4): 598-604.
- [91] LIAO Wenlin, NIE Xunqing, LIU Zongzheng, et al. Researches on formation mechanism of ultra-smooth surface during ion beam sputtering of fused silica[J]. Optik, 2019, 179: 957-964.
- [92] WU Weibin, DAI Yifan, ZHOU Lin, et al. Research on material removal accuracy analysis and correction of removal function during ion beam figuring[J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 095101.
- [93] ZHAO Fengxuan, ZHOU Lin, FAN Zhanbin, et al. Research on surface processing of quartz wafer based on magnetorheological finishing and ion beam figuring[C]// 4th CIRP Conference on Surface Integrity, July 11-13, 2018, Tianjin, China: Elsevier B.V., 2018, 71: 496-499.
- [94] KAMIMURA T, AKAMATSU S, YAMAMOTO M, et al. Enhancement of surface-damage resistance by removing subsurface damage in fused silica[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5273: 244-249.
- [95] LI Bo, HOU Chunyuan, TIAN Chengxiang, et al. Layer by layer exposure of subsurface defects and laser-induced damage mechanism of fused silica[J]. Applied Surface Science, 2020, 508: 145186.
- [96] XU Shizhen, ZHENG Wanguo, YUAN Xiaodong, et al. Recovery of fused silica surface damage resistance by ion beam etching[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2008, 266(15): 3370-3374.
- [97] GUO Kesheng, WANG Yanzhi, CHEN Ruiyi, et al. Effects of ion beam etching of fused silica substrates on the laser-induced damage properties of antireflection coatings at 355 nm[J]. Optical Materials, 2019, 90: 172-179.
- [98] PENG Wenqiang, GUAN Chaoliang, LI Shengyi. Efficient fabrication of ultrasmooth and defect-free quartz glass surface by hydrodynamic effect polishing combined with ion beam figuring[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13951-13961.
- [99] LI Bo, XIANG Xia, TIAN Chengxiang, et al. Anisotropic ion beam etching of fused silica to mitigate subsurface damage[J]. International Journal of Modern Physics B, 2020, 34(8): 2050060.
- [100] 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.
- [101] SUN Laixi, HUANG Jin, YE Xin, et al. Surface modification and etch process optimization of fused silica during reaction CHF₃-Ar plasma etching[J]. Optik, 2016, 127(1): 206-211.
- [102] ZHANG Jufen, WANG Bo, DONG Shen. Design of the atmospheric pressure low temperature plasma polishing system for the machining of ultra-smooth surfaces[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008, 6(3): 222-226.
- [103] WANG Feng, WU Weidong, JIANG Xiaofeng, et al. Study of surface modification of fused silica optical component by reactive plasma[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0522003.
- [104] SHI Baolu, DAI Yifan, XIE Xuhui, et al. Arc-enhanced plasma machining technology for high efficiency machining of silicon carbide[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(3): 891-900.
- [105] DAI Zuocai, CHEN Shanyong, XIE Xuhui, et al. Investigation of grinding and lapping surface damage evolution of fused silica by inductively coupled plasma etching[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(8): 1311-1323.
- [106] SUN Laixi, LIU Hongjie, HUANG Jin, et al. The effect of RIE-modified surface contamination on optical performance of fused silica[J]. Proc. SPIE, 2013,

- 8786; 87860P.
- [107] JIANG Xiaolong, LIU Ying, LIU Zhengkun, et al. Optimum inductively coupled plasma etching of fused silica to remove subsurface damage layer[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355(15): 1180-1185.
- [108] LI Xinghua, TAKASHI A, MASAYOSHI E, et al. Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF₆ plasma[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2001, 87(3): 139-145.
- [109] JIN Huiliang, XIN Qiang, LI Na, et al. The morphology and chemistry evolution of fused silica surface after Ar/CF₄ atmospheric pressure plasma processing[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 286(1): 405-411.
- [110] XIN Qiang, SU Xin, WANG Bo. Modeling study on the surface morphology evolution during removing the optics surface/subsurface damage using atmospheric pressure plasma processing[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 382: 260-267.
- [111] LI Duo, WANG Bo, XIN Qiang, et al. Form control in atmospheric pressure plasma processing of ground fused silica[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9281: 928107.
- [112] FUKUMOTO H, FUJIKAKE I, TAKAO Y, et al. Plasma chemical behaviour of reactants and reaction products during inductively coupled CF₄ plasma etching of SiO₂[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18(4): 045027.
- [113] LI Duo, LI Na, SU Xing, et al. Characterization of fused silica surface topography in capacitively coupled atmospheric pressure plasma processing[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 489(30): 648-657.
- [114] JIN Huiliang, FAN Fei, YUAN Zhigang, et al. Investigation of the formation mechanism of the fluorocarbon film in CF₄ plasma processing of fused silica[J]. *Optik*, 2019, 202: 163693.
- [115] FEIT M, SURATWALA T, WONG L, et al. Modeling wet chemical etching of surface flaws on fused silica[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7504: 75040L.
- [116] HUANG Jin, ZHOU Xinda, LIU Hongjie, et al. Influence of subsurface defects on damage performance of fused silica in ultraviolet laser[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 24203.
- [117] 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.
- [118] YE Hui, LI Yaguo, YUAN Zhigang, et al. Improving UV laser damage threshold of fused silica optics by wet chemical etching technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9535: 953221.
- [119] YE Xin, HUANG Jin, LIU Hongjie, et al. Advanced mitigation process (AMP) for improving laser damage threshold of fused silica optics[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31111.
- [120] LIU Hongjie, YE Xin, ZHOU Xinda, et al. Subsurface defects characterization and laser damage performance of fused silica optics during HF-etched process[J]. *Optical Materials*, 2014, 36(5): 855-860.
- [121] CHENG Jian, WANG Jinghe, HOU Jing, et al. Effect of polishing-induced subsurface impurity defects on laser damage resistance of fused silica optics and their removal with HF acid etching[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(8): 838.
- [122] ZHANG Chi, ZHOU Jing, SHEN Hong. Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of The ASME*, 2017, 139(4): 41019.
- [123] WANG Du, FAN Fei, LIU Mincai, et al. Top-hat and Gaussian laser beam smoothing of ground fused silica surface[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 127: 106141.
- [124] FEIT M, RUBENCHIK A. Mechanisms of CO₂ laser mitigation of laser damage growth in fused silica[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4932: 91-102.
- [125] HE Ting, WEI Chaoyang, JIANG Zhigang, et al. Super-smooth surface demonstration and the physical mechanism of CO₂ laser polishing of fused silica[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5777-5780.
- [126] YAO P, ABE T, YOSHIHARA N, et al. Repairing damage on ground fused silica by CO₂ laser irradiation[J]. *Advanced Materials Research*, 2010: 401-406.
- [127] CORMONT P, COMBIS P, GALLAIS L, et al. Removal of scratches on fused silica optics by using a CO₂ laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28272-28289.
- [128] ZHAO Linjie, CHENG Jian, CHEN Mingjun, et al. Formation mechanism of a smooth, defect-free surface of fused-silica optics using rapid CO₂ laser polishing[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(3): 35001.

- [129] 赵林杰, 程健, 陈明君, 等. 熔石英光学元件的 CO₂ 激光加工技术研究新进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 202-218.
- ZHAO Linjie, CHENG Jian, CHEN Mingjun, et al. New progress of CO₂ laser processing techniques for fused silica optics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 202-218.
- [130] DOUALLE T, GALLAIS L, CORMONT P, et al. Effect of annealing on the laser induced damage of polished and CO₂ laser-processed fused silica surfaces[J]. Journal

of Applied Physics, 2016, 119(21): 213106.

作者简介: 陈明君, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。

主要研究方向为精密超精密加工、先进制造技术及微纳米制造技术。

E-mail: chenmj@hit.edu.cn

王会尧, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为精密超精密加工及先进制造技术。

E-mail: 18941050266@163.com

程健(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。

主要研究方向为精密超精密加工及表面完整性评价技术。

E-mail: cheng.826@hit.edu.cn