

# 光学学报

## 高功率激光光学元件超精密制造技术

许乔, 陈贤华\*, 汪圣飞, 钟波, 谢瑞清, 王健

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 用于惯性约束聚变的高功率固体激光装置需使用上万件大口径光学元件, 激光装置极端的设计性能对光学元件提出了全空间频段(空间频率范围为  $\mu\text{m}^{-1}$  级至  $\text{m}^{-1}$  级)精度指标和高抗激光损伤的制造要求, 形成确定性、高性能的强激光光学元件制造能力是制造激光装置的基础。总结了近年来大口径高功率激光光学元件超精密制造技术及装备方面的研究进展, 重点介绍了超精密磨削成形技术、保形快速抛光技术、确定性抛光技术、晶体超精密切削技术及低缺陷制造技术, 并分析了高功率激光光学元件制造的未来发展趋势。

**关键词** 测量; 先进光学制造; 高功率激光; 超精密制造

中图分类号 TH74 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1712004

### Ultra-Precision Manufacturing Technology of High Power Laser Optics

Xu Qiao, Chen Xianhua\*, Wang Shengfei, Zhong Bo, Xie Ruiqing, Wang Jian

Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

**Abstract** A high power solid laser facility used for inertial confinement fusion (ICF) demands over ten thousands of large aperture optics. Extremely precise machining accuracy specified over a continuous range of spatial frequencies ( $\mu\text{m}^{-1}$  level to  $\text{m}^{-1}$  level) as well as high resistance to laser damage is the fundamental requirement for high power laser optics. Advanced and deterministic optical manufacturing technologies are the basis to realize mass manufacturing of the large aperture laser optics. In this review, recent progresses in the ultra-precision manufacturing technologies and equipment for high power laser optics are summarized. Advances of ultra-precision grinding, rapid conformal polishing, deterministic polishing, ultra-precision fly-cutting, and low-density defect manufacturing technologies are emphasized. Besides, future developments of fabrication of high power laser optics are analyzed.

**Key words** measurement; advanced optical manufacturing; high power laser; ultra-precision manufacturing

## 1 引言

用于惯性约束聚变(ICF)的高功率固体激光装置是当今世界最大、最复杂的精密光学系统。数百束激光链路将半米口径的激光束按设计的编组方式精确聚焦到直径为百微米量级的靶上, 纳秒脉冲兆焦耳激光的注入将创造出超过  $10^7$  atm ( $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$ ) 和上亿度的极端高能量密度物质状态, 从而获得受控聚变的科学研究条件。这类巨型的激光装置需使用上万件米级口径的光学元件, 包括最大口径接近 1 m 的磷酸盐钕玻璃放大片和平面反射镜、偏轴或离轴的非球面聚焦透镜, 以及大口径非线性晶体等。激光装置的极端使役性能对强激光光学元件提出了接近制造技术极限的苛刻要求, 光学制造技术面临如下挑战。

### 1) 全空间频段制造误差纳米级精度控制

为保证激光系统稳定运行在高通量条件下并获得理想的光束聚焦质量, 对光学元件提出了全空间频段(空间频率范围为  $\mu\text{m}^{-1}$  量级至  $\text{m}^{-1}$  量级)制造误差的控制要求, 包括与光束可聚焦能力相关的低频段波前梯度、与非线性损伤和光束传输质量相关的中频段波前功率谱密度、与激光损伤相关的高频段表面粗糙度等。全空间频段指标实现 nm 级精确控制是光学制造技术面临的严峻挑战。

### 2) 高抗激光损伤的低缺陷制造

光学元件的抗激光损伤能力是影响高功率激光装置使役性能的决定因素。特别地, 在 355 nm 波长超过  $8 \text{ J/cm}^2$  的激光运行通量下, 不仅要求紫外光学材料需达到极高的纯度和极低的吸收, 而且对制造过程产生的缺陷及痕量污染也提出了严格的控制要求。

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-25; 录用日期: 2022-08-02

通信作者: \*chenmail2@163.com

3) 高精度光学元件的批量制造能力

巨型激光装置工程研制内在的周期和成本控制要求,体现为对米级强激光光学元件需形成年产千余件的供货能力,这是对国家光学制造工业基础的挑战,因此必须改变传统光学制造的经验传承模式,提高制造技术的确定性、可控性,减小对加工者经验的依赖性。

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)在国家点火装置(NIF)的研制过程中,联合 Tinsley、Zygo、Moore 和 QED 等公司,发展了电解液在线修整技术、合成盘抛光、确定性抛光、单点金刚石切削和化学刻蚀等先进光学制造技术,将米级光学元件的制造能力提升了 10 倍以上,而制造成本下降至 1/3 以下<sup>[1-2]</sup>。面向我国惯性约束聚变激光装置的研制需求,国内相关单位围绕以“超精密、确定性”为核心的批量制造流程技术开展研究<sup>[3]</sup>,突破了多项关键工艺技术,并通过工艺牵引,实现了系列超精密光学制造装备的国产化,大幅提升了强激光光学元件的制造技术水平和批量化制造能力。本文将对这些技术的发展进行概括性总结,并对进一步的发展提出建议。

2 超精密磨削成形技术

传统光学加工以铣磨或研磨方式进行表面成形,

其成形误差为几十微米至数百微米,加工余量极大。而后续抛光技术的去除效率通常不足  $1 \mu\text{m}/\text{h}$ ,控形分辨率仅为百纳米级,这就使得大口径光学元件呈现加工过程冗长、加工精度收敛性差的特点。提高成形加工的精度和亚表面缺陷控制精度是缩短高精度激光光学元件制造周期的关键所在。在高刚度、超精密机床上,使用金刚石砂轮基于微切削作用的微量去除来达到低表面粗糙度值,通过砂轮的包络复制来实现高精度的成形。这种超精密磨削加工技术可大幅度提高光学元件的成形精度和加工效率,并减少表面及亚表面缺陷。传统的磨削方法由于磨削点固定、易在工件中心出现磨削残留,难以实现非球面元件高精度加工<sup>[4]</sup>。针对非轴对称非球面光学元件成形加工方法柔性不足和成形精度低的问题,采用图 1 所示的圆弧金刚石砂轮的平行磨削方法来实现非球面磨削加工。磨削过程中,元件随工作台沿  $x$  轴移动,金刚石砂轮沿  $y$  轴和  $z$  轴运动,由于砂轮切削方向与工件运动方向相同,砂轮上磨削位置不固定,参与磨削的有效切削刃增多,砂轮磨损明显减少,非球面元件成形精度得以显著提高<sup>[5-8]</sup>。

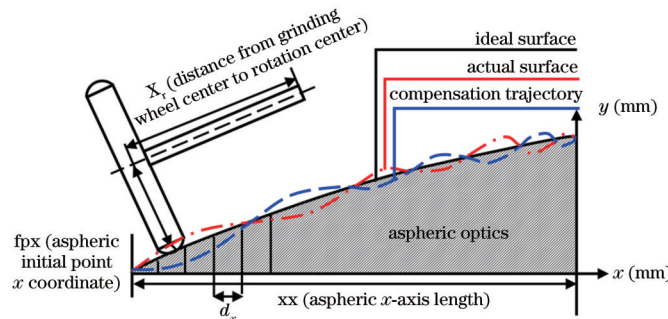


图 1 非球面平行磨削方法

Fig. 1 Aspheric surface parallel grinding method

为保证非球面光学元件的成形精度,厦门大学与中国机械科学研究总院海西分院联合研制了三轴联动全液体静压超精密磨削机床,如图 2 所示。通过建立机床关键部件的流-固-热耦合仿真模型及运动误差准静态分析模型,获得了流量控制器参数对液体静压导

轨运动精度的影响规律。研制大行程拼接式全封闭液体静压导轨,实现了微量精确进给,大幅提升了静压支撑刚度和直线轴运动精度<sup>[9-10]</sup>,机床导轨刚度为  $2554 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,  $1320 \text{ mm}$  行程直线轴定位精度和重复定位精度分别为  $0.9 \mu\text{m}$  和  $0.7 \mu\text{m}$ 。

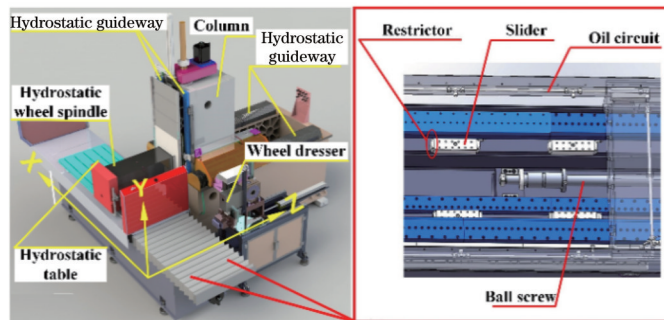


图 2 大口径光学非球面元件超精密磨削机床

Fig. 2 Ultra-precision grinding machine for large aperture aspheric optics



在加工环境(温度和振动等)满足要求的前提下,非球面元件的成形精度主要取决于机床运动精度与砂轮的形状精度,砂轮圆弧面的形状误差将在加工过程中直接复制到工件上,影响非球面加工精度<sup>[11]</sup>。针对圆弧金刚石砂轮的精密修整,发展了砂轮对滚修整方法(图 3),用修整砂轮圆周面对金刚石砂轮进行圆弧

包络修整,修整砂轮宽度是影响修整效率和精度的关键因素。利用螺旋扫描测量方法可快速精确测量圆弧金刚石砂轮的三维形状误差,如图 4 所示,将测量数据进行重构、插值和拟合,获得砂轮外圆弧面不同截面的三维轮廓误差和圆度误差<sup>[12-13]</sup>,从而实现圆弧金刚石砂轮的高效、高精度修整。

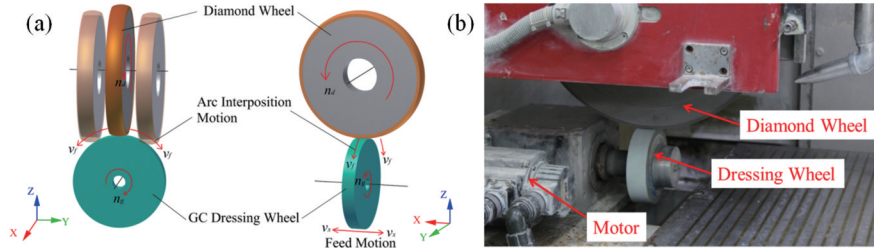


图 3 圆弧金刚石砂轮对滚研磨修整<sup>[12]</sup>。(a)修整原理;(b)修整设备

Fig. 3 Dressing arc diamond wheel by roll abrading<sup>[12]</sup>. (a) Principle of dressing; (b) dressing equipment

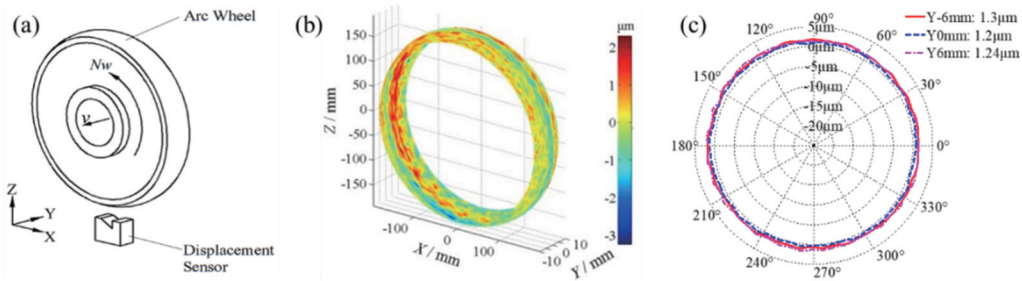


图 4 金刚石砂轮三维形状误差在位检测和评价<sup>[13]</sup>。(a)三维形状误差在位检测原理;(b)三维轮廓误差;(c)圆度误差

Fig. 4 *In-situ* measurement and evaluation of 3D shape error of diamond wheel<sup>[13]</sup>. (a) Principle of *in-situ* measurement of 3D shape error; (b) 3D outline error; (c) roundness error

通过非球面面形在位检测和补偿磨削技术,可抑制加工轨迹误差对元件面形精度的影响。将非接触式位移传感器测头安装于超精密磨床主轴上,按同向光栅式轨迹运动对元件面形进行全口径检测<sup>[14]</sup>。将面形误差进行修正后叠加到非球面理论加工轨迹中,生成离散化补偿加工数控程序,并进行补偿磨削,以进一步减小元件面形误差<sup>[5]</sup>,如图 5 所示。

应用非球面元件超精密磨削机床加工大口径离轴非球面元件,530 mm×530 mm 口径离轴非球面元件经一次补偿磨削后,面形误差峰谷(PV)值达到 3.38 μm,如图 6 所示。

### 3 保形快速抛光技术

在大口径光学元件超精密成形后,需要在保持成形精度的基础上,快速去除前级产生的亚表面损伤层并减小表面粗糙度,这也是降低强激光元件制造成本、提升加工效能的重要环节。围绕表面缺陷层快速去除以及低频误差高效收敛问题,针对大口径平面、非球面元件的保形快速抛光需求,分别发展了平面快抛技术和气囊抛光技术。

#### 3.1 平面快抛技术

在传统的平面光学元件制造流程中,通常采用古典的单轴机抛光工艺来实现面形的初步收敛和表面粗

糙度的改善,由于缺乏量化的工艺控制手段,工序精度和生产效率较低。为实现大口径平面光学元件磨削亚表面破坏层的快速去除,美国 LLNL、Zygo 等提出采用合成盘抛光技术进行元件初抛光的方法,但并未解决元件材料高去除效率与面形精度控制之间的矛盾<sup>[15-16]</sup>。美国 LLNL 进一步提出了“收敛抛光”,期望同步实现平面抛光的高效率与高面形精度,并于 2017 年研制了用于大口径平面元件快速收敛抛光的 CISR2 型工程样机,265 mm×265 mm 口径熔石英元件材料的加工效率达到 4 μm/h,元件面形误差 PV 值为 λ/2 (λ=632.8 nm)<sup>[17-18]</sup>。

为了同时提高平面元件的加工效率及面形精度,提出了平面快抛技术方案,该方案基于超精密机械精度传递和化学机械抛光材料去除原理,建立了全口径确定性快抛工艺系统,采用形状精度可控、具有良好耐磨性及保形性的聚氨酯抛光光盘替代传统的沥青抛光盘,抛光工艺参数采用数字化控制,从而实现大口径平面光学元件的高效、高精度抛光。该方案的工作原理如图 7(a)所示,图 7(b)为北京微纳精密机械有限公司研制的 KPJ-2000 型平面快抛机床。

针对硬脆玻璃材料抛光效率提升问题,采用超精密气浮回转轴系、高稳定性花岗岩床身、高分辨率进给轴系,抑制快速抛光过程中轴向跳动、温度波动、倾覆

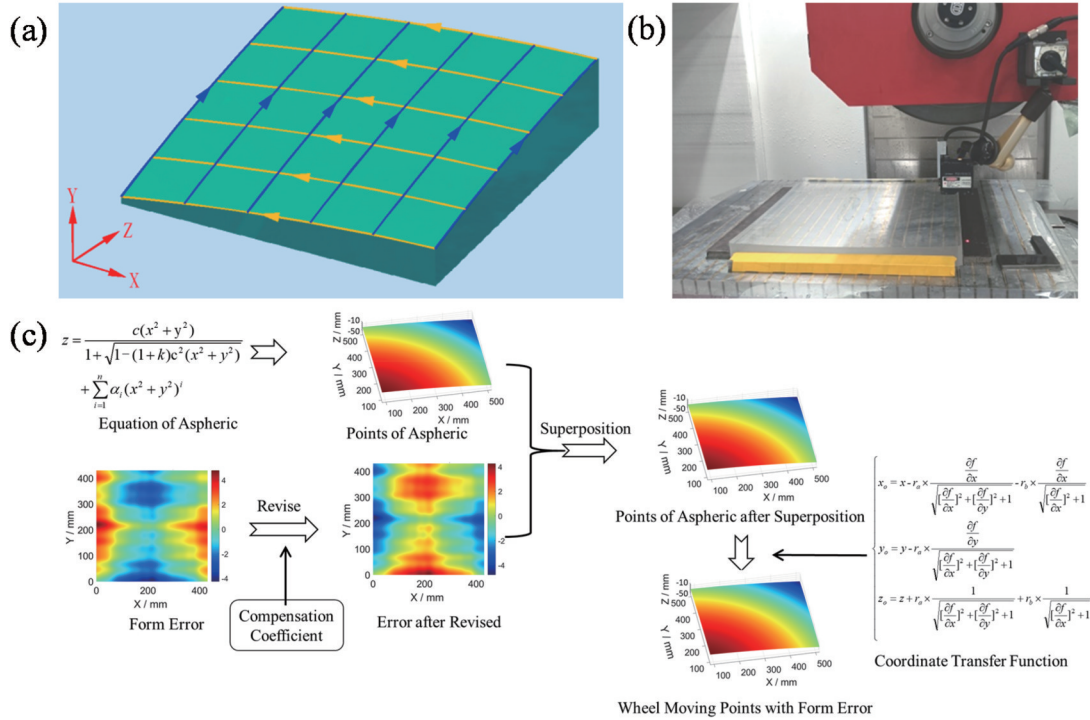


图 5 非球面面形在位检测和补偿<sup>[5,14]</sup>。(a)在位检测轨迹;(b)在位检测实物图;(c)补偿加工原理

Fig. 5 *In-situ* measurement and compensation of aspheric surface shape<sup>[5,14]</sup>. (a) Trajectory of *in-situ* measurement; (b) physical image of *in-situ* detection; (c) compensation process principle

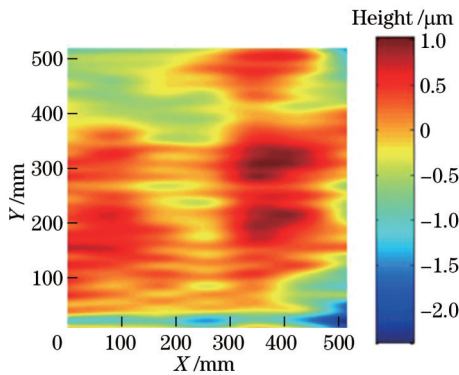


图 6 大口径非球面磨削加工结果

Fig. 6 Results of large aperture aspheric surface grinding  
力矩等扰动误差,保证了全口径快抛精度传递机制的

有效性及稳定性。通过大偏心距、高转速/摆速及大负载浮动加压装置,大幅提高了抛光过程中的相对线速度及压力,熔石英材料的最高去除效率由  $4 \mu\text{m}/\text{h}$  提高到  $12 \mu\text{m}/\text{h}$ <sup>[19]</sup>。围绕平面快抛面形精度保形控制要求,建立平面快速抛光元件非均匀材料去除模型,发现了抛光盘等效轮廓与元件面形之间的线性相关规律。采用基于超精密铣削原理的抛光盘轨迹包络式修整方法<sup>[20]</sup>,对抛光盘表面形貌进行高精度快速修整,实现精度传递基准的长期保持性。

应用平面快抛机床加工  $610 \text{ mm} \times 440 \text{ mm}$  的反射镜,经过约 3 h 抛光后,表面粗糙度均方根(RMS)值降低到  $0.5 \text{ nm}$  以下,面形误差 PV 值可降低至  $\lambda/4$  以下,如图 8 所示,制造效率较传统平面抛光工艺提高 10 倍以上。

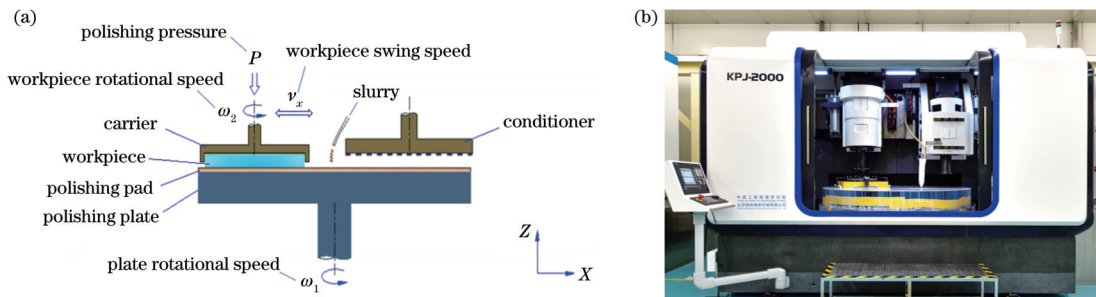


图 7 平面快速抛光原理图与实物图。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 7 Schematic figure and physical picture of plane rapid polishing. (a) Principle diagram; (b) physical picture



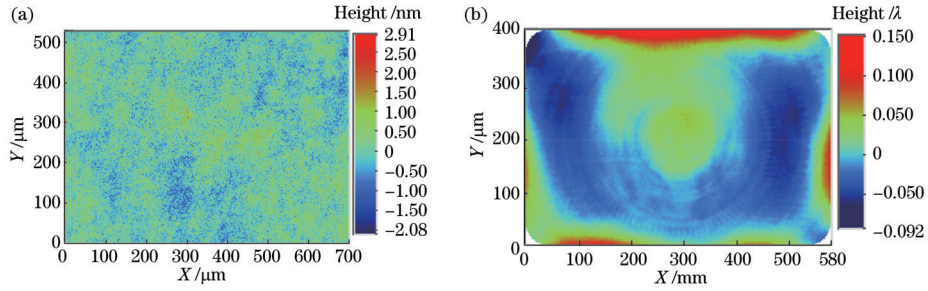


图 8 平面快抛加工结果。(a)表面粗糙度(RMS为0.42 nm);(b)最优面形精度(PV为0.24λ)

Fig. 8 Plane rapid polishing results. (a) Surface roughness (RMS is 0.42 nm); (b) optimal profile accuracy (PV is 0.24λ)

### 3.2 半柔性气囊保形抛光技术

经过超精密磨削成形后,非球面光学元件面形精度达到微米量级,表面粗糙度约几十纳米,缺陷深度约数微米,因此需在保持非球面成形精度的基础上实现光学表面的高效创成。传统研抛方式去除效率低,且很难保证工具与元件曲率的贴合,导致磨削缺陷难以去除,易造成形状精度恶化。在大口径非球面制造流程中,快速抛光手段的缺失严重制约了非球面光学元件制造效能,等离子体抛光<sup>[21]</sup>、复合柔性工具抛光<sup>[22]</sup>等技术被用于实现非球面快速抛光。针对强激光非球面

光学元件快速抛光,中国工程物理研究院激光聚变研究中心与厦门大学以“高去除率、高保形性”为目标发展了半柔性气囊保形抛光技术<sup>[23]</sup>。基于进动抛光原理,研制了七轴五联动数控气囊抛光机床,通过调节气囊刚度、充气压力及工具转速等参量实现材料去除效率的大幅提升,结合多步进动控制算法可获得近高斯型叠加去除特性,从而实现非球面高效保形抛光及大尺度误差的快速修正。图 9 为离轴非球面气囊抛光实物与原理图。

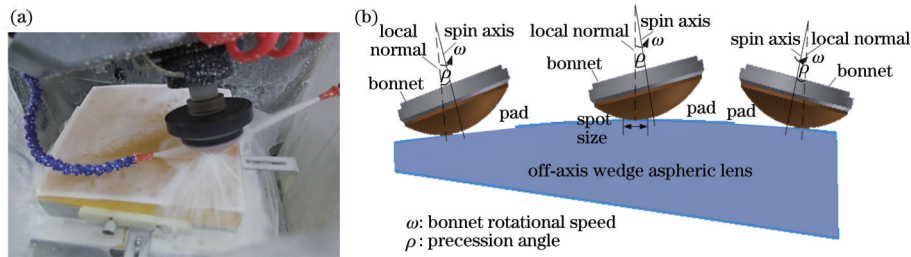


图 9 离轴非球面镜气囊抛光实物图与原理图。(a)实物图;(b)原理图

Fig. 9 Bonnet polishing picture and principle for off-axis aspheric lens. (a) Bonnet polishing picture; (b) principle diagram

针对传统柔性工具材料去除率低的问题,采用金属内嵌强化结构,设计研制了系列叠层式半柔性气囊抛光工具<sup>[24]</sup>,如图 10 所示。建立气囊静/动态加载仿真模型,结合循环应力加载、旋转动态接触仿真和拉伸测试,精确稳定调控气囊工具刚度,解决了工具与曲面自适应吻合问题。为避免气囊工具大应力、长时间使用条件下的磨损失效问题,采用基于包络修整的气囊

抛光工具在位精密修整方法,用于气囊表面修整以保证长时加工去除稳定性。基于多体运动学理论获得磨粒在气囊表面的运动轨迹,以轨迹均匀性为目标优化修整工艺参数,结合气囊分步微量进给及低粒度修整砂轮,可以获得优异的气囊轮廓精度和表面质量<sup>[25-27]</sup>。图 11 为气囊修整实物与数学模型。

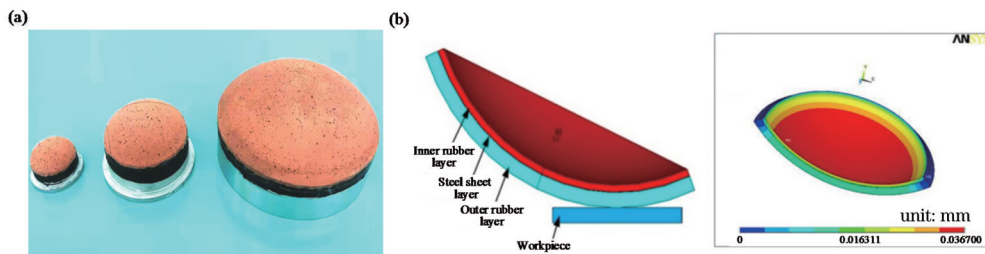


图 10 系列化气囊工具<sup>[23]</sup>。(a)工具实物;(b)工具结构设计及仿真

Fig. 10 Serialization of bonnet tools<sup>[23]</sup>. (a) Tool picture; (b) tool structure design and simulation

通过气囊抛光进动控制、轨迹规划、去除函数与面形误差预测、表面磨损与修整处理等关键技术的突

破<sup>[28-31]</sup>,半柔性气囊抛光成功应用于大口径非球面元件的保形快速抛光<sup>[32-33]</sup>,最高去除效率 $\geq 30 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,

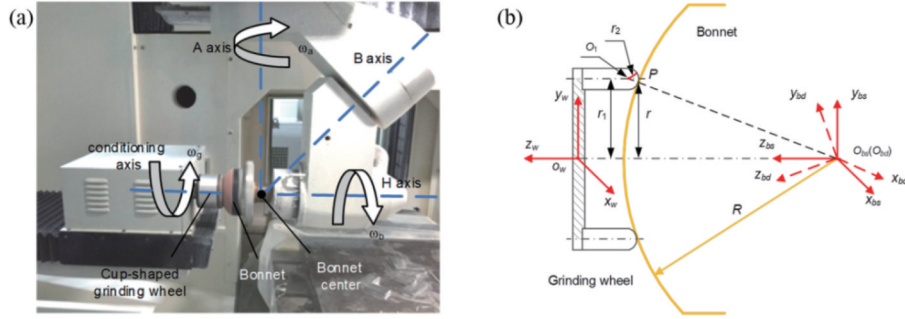


图 11 气囊修整实物与数学模型<sup>[26]</sup>。(a)气囊修整实物;(b)气囊修整数学模型

Fig. 11 Bonnet dressing picture and mathematical model<sup>[26]</sup>. (a) Bonnet dressing picture; (b) bonnet dressing mathematical model

数小时内非球面去除深度大于  $10\ \mu\text{m}$ , 并且面形基本保持不变; 同时气囊保形抛光还具有快速修形能力, 面

形误差 PV 值可快速收敛至  $0.3\lambda$  以下, 最优可达  $0.1\lambda$ , 如图 12 所示。

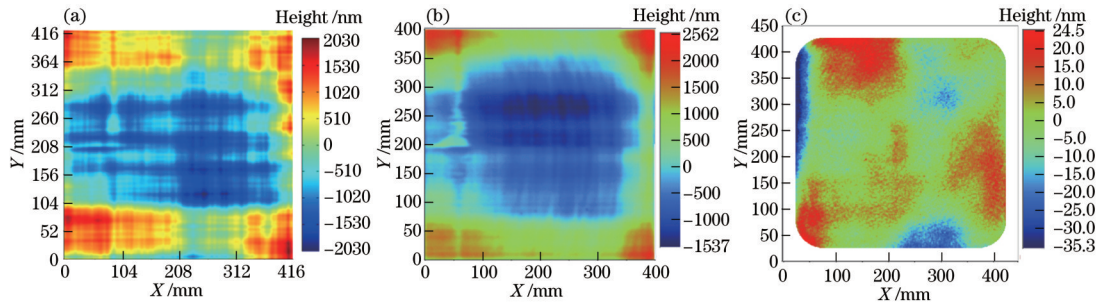


图 12 非球面透镜气囊抛光结果。(a)初始面形;(b)保形抛光面形;(c)快速修面形

Fig. 12 Results of aspheric lens by bonnet polishing. (a) Initial surface shape; (b) conformal polishing surface shape; (c) fast correction polishing surface shape

## 4 确定性抛光技术

应用于精密抛光工序的确定性抛光技术将承担光学元件面形误差收敛达标、表面质量提升(包括表面疵病和表面粗糙度)的功能, 是高精度光学元件整个制造流程中最重要的技术环节, 此工序的可控性在很大程度上决定了光学元件的制造周期和成本。

### 4.1 全口径环抛技术

全口径环抛通过大尺寸沥青抛光盘进行平面光学元件加工, 如图 13 所示, 具有低频大尺度面形误差收敛效率高、表面匀滑和易于获得超光滑表面等优点, 是实现大口径平面批量加工的重要技术手段<sup>[34]</sup>。环抛加工的难点在于元件的材料去除是多因素综合作用的结果, 尤其是沥青盘的黏弹特性导致抛光压力在时域及空域内均呈非均匀变化, 严重影响元件形状精度收敛的可控性及加工周期。国内外相关研究机构围绕如何实现确定性环形抛光开展了大量研究, 重点包括环抛加工精度理论建模<sup>[35-40]</sup>、工艺方法创新<sup>[41-42]</sup>、机床装备性能提升<sup>[43-45]</sup>等方面。国内相关研究团队重点研究了环抛过程元件面形误差收敛机制, 发现平面元件在稳态抛光工况下将会收敛至稳态面形, 且元件的稳态面形误差取决于运动速度、抛光压力(盘面形状误差)和材料去除系数等工艺因素的分布均匀性<sup>[41, 46]</sup>。

为了获得运动速度的分布均匀性及其对面形误差的影响规律, 采用运动轨迹有效弧长来分析运动速度

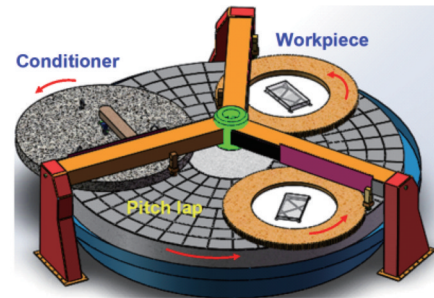


图 13 全口径环形抛光的加工原理示意图

Fig. 13 Principle of full-aperture ring polishing process

和材料去除均匀性<sup>[39]</sup>, 如图 14 所示。结果表明, 光学元件和抛光盘的转速越接近、光学元件的偏心距越大, 则运动轨迹弧长的均匀性越好。抛光盘环形槽特征容易引起光学元件表面产生环形纹理, 从而影响材料去除均匀性, 采用径向槽、方形槽和螺旋槽有利于改善光学元件表面各点运动速度的分布均匀性。

采用激光位移传感器以螺旋路径扫描抛光盘面, 测量抛光盘表面的三维形状, 如图 15 所示。结合光学元件与抛光盘的接触力学模型, 可以分析接触压力分布对抛光盘面形状误差的影响规律。建立沥青抛光盘的黏弹性蠕变模型, 分析沥青抛光盘在修正盘加载压力作用下的黏弹性变形机制<sup>[37]</sup>, 结果表明沥青盘离开修正盘接触区域后将呈现时变特性, 据此可建立沥



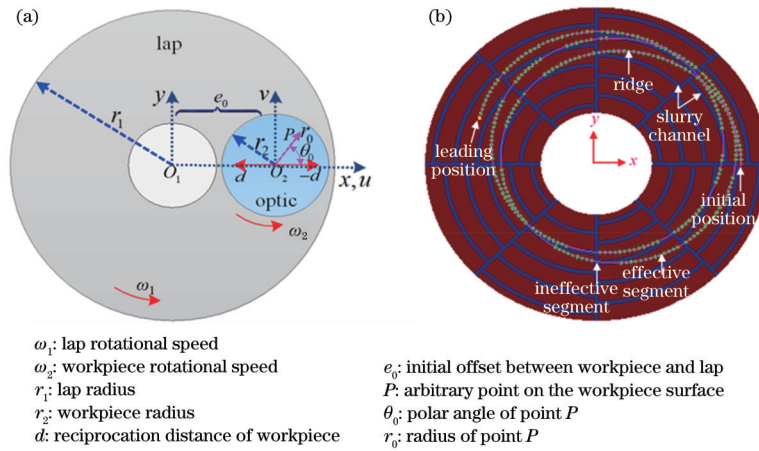


图 14 全口径环形抛光的运动学模型。(a)运动参量;(b)轨迹弧长

Fig. 14 Kinematics model of full-aperture continuous polishing process. (a) Kinematics; (b) sliding distance

青盘形状误差复合修正方法,并通过多尺度修整工具实现高效修正<sup>[37,47]</sup>。沥青盘表面的钝化状态将造成非均匀的磨料空间分布,从而引起界面非均匀的材料去

除系数<sup>[40-41]</sup>,如图 16 所示。开发了基于盘面纹理特征及摩擦系数分析的盘面钝化监测技术,通过周期性自动修复策略,获得空间分布均匀的材料去除系数。

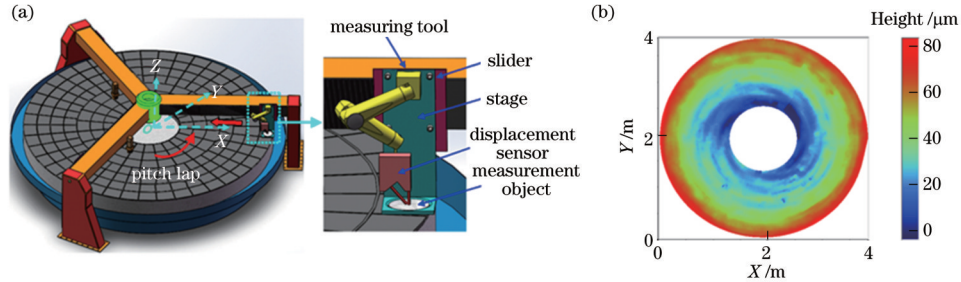


图 15 抛光盘形状误差的检测方法和检测结果。(a)检测方法;(b)检测结果

Fig. 15 Method and result of measuring the lap shape error. (a) Measuring method; (b) measuring result

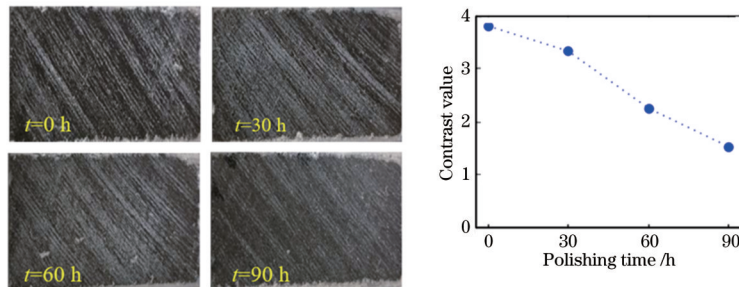


图 16 不同工作时间的沥青盘面钝化状态图像及特征值变化曲线

Fig. 16 Passivation state images and characteristic value change curve of pitch plate for different working time

上海中晶企业发展有限公司完成了  $\Phi 5\text{ m}$  全口径确定性环形抛光机床研制,如图 17 所示。该机床采用  $\Phi 5\text{ m}$  重型气浮转台抛光盘<sup>[45]</sup>,实现了环抛机床长时间平稳运行,同时通过多功能桥架机构实现了抛光盘形状误差检测与主动修正。结合外齿圈精密驱动、抛光液循环精密温控技术,对速度波动、倾覆力矩及温度梯度<sup>[41-42]</sup>等干扰因素进行主动补偿,实现了米级元件形状误差的高精度稳定收敛,米级平面元件的加工精度 PV 值优于  $100\text{ nm}$ ,均方根梯度值优于  $5\text{ nm/cm}$ 。

#### 4.2 高稳定性去除控制技术

基于线性抛光理论的子口径抛光技术,以定量检测数据为输入,使得抛光过程具备定量化品质,从而大大提高了高精度元件的加工效率和加工质量。针对米级光学元件全空间频段纳米级制造误差的控制要求,子口径抛光技术的研究焦点是研制高稳定性抛光工具:一方面要求抛光工具的去屑特性要达到亚纳米的控形分辨能力,另一方面抛光工具要具备多尺度控形能力。

磁流变抛光通过磁场改变抛光液的流变特性,以



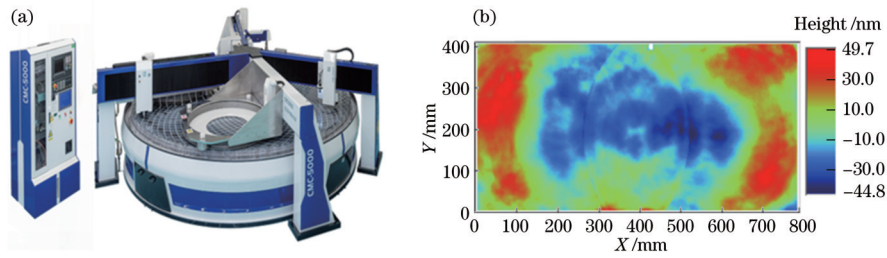


图 17  $\Phi 5$  m 全口径确定性环形抛光机床以及元件加工结果。(a) 机床照片; (b) 元件面形结果

Fig. 17  $\Phi 5$  m full aperture deterministic continuous polisher and workpiece surface figure results. (a) Polisher photograph; (b) workpiece surface figure

之为抛光工具对光学元件表面误差进行修正<sup>[48]</sup>。该技术既具有固着磨粒加工高效的优点,又保留了散粒磨料抛光光滑的优势。针对去除函数稳定性控制的问题,建立耦合抛光液流变响应特性的高置信梯度漏磁场仿真模型,获得了以“励磁线包、磁路结构、工作气隙”等参数优化匹配的高稳定磁场控制方法,研制了一体化随动式磁流变液循环系统<sup>[49]</sup>(图 18),流量稳定性

优于 $\pm 1\%$ ,实现的去除函数体积去除率稳定性优于 95%。基于磁流变双抛光头( $\Phi 50$  mm,  $\Phi 400$  mm)工具系统及其工艺匹配方法,获得了去除效率为 0.002~0.8 mm<sup>3</sup>/min 的宽范围加工能力,并开发了系列化的抛光工具,满足了元件不同误差频段的精密修形需求<sup>[50-51]</sup>。

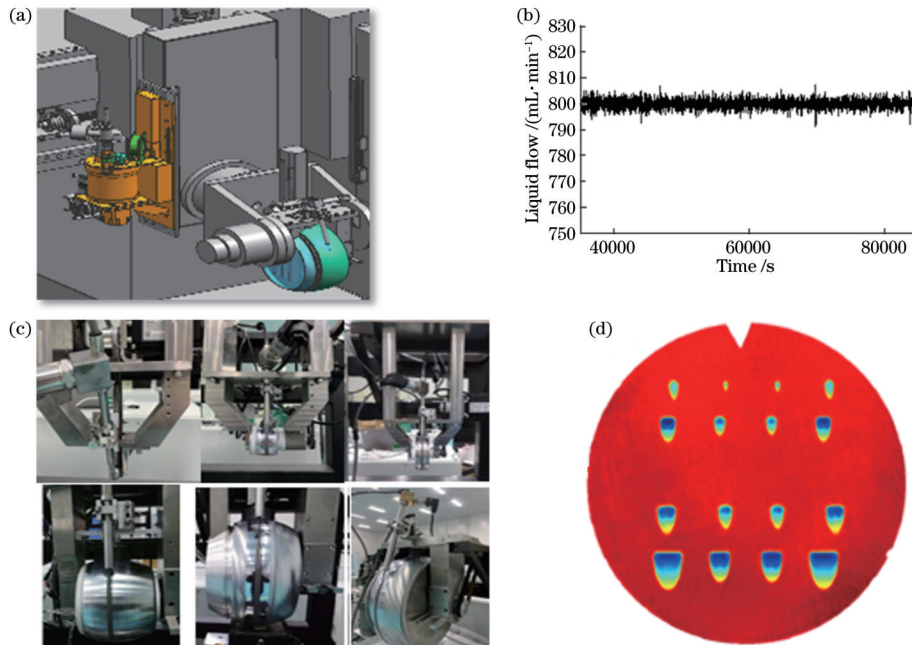


图 18 磁流变单元技术及结果。(a) 一体化随动式循环系统; (b) 磁流变液流量稳定控制; (c) 模块化系列抛光头(直径为 20~400 mm); (d) 磁流变宽范围加工能力

Fig. 18 Magnetorheological cell technology and results. (a) Integrated follow-up circulating system; (b) stable flow control of magnetorheological fluid; (c) modular series polishing head (diameter is 20~400 mm); (d) wide range magnetorheological processing capability

应用中国工程物理研究院机械制造工艺研究所研发的磁流变抛光机床,实现了大口径类自由曲面元件的高精度加工,加工 430 mm $\times$ 430 mm 的连续相位板元件,其相位设计指标为: PV 为 2.1 $\lambda$ , RMS 为 212 nm,最小空间周期为 5 mm,加工后残差仅为 12 nm(RMS),如图 19 所示。

离子束抛光是一种基于真空环境下粒子物理碰撞原理的加工技术,具备原子级去除能力,其加工原理如图 20(a)所示,可实现低频误差的快速精密修正<sup>[52-53]</sup>,

图 20(b)为中国兵器工业集团第五二研究所研制的离子束抛光机床。通过束能质心偏移监测、法拉第杯扫描,获得了离子源长时间工作下去除函数形态变化规律,进而采取对离子束能量、氩气流量、真空度等关键参数的监测与稳定控制措施,实现了去除速率波动在 $\pm 1.71\%$ 之间的超稳定性控制,为离子束亚纳米低频误差修正提供了重要基础。

通过图 21 所示的等效一维轮廓自适应步长轨迹段划分算法,解决了传统等步长算法存在依赖经验、计

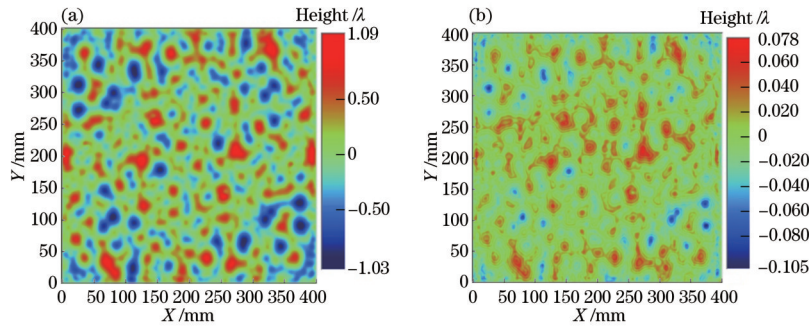


图 19 磁流变加工连续相位板。(a)连续相位板设计图;(b)连续相位板加工残差图

Fig. 19 Continuous phase plate processed by magnetorheological method. (a) Designed continuous phase plate; (b) machining residual diagram of continuous phase plate

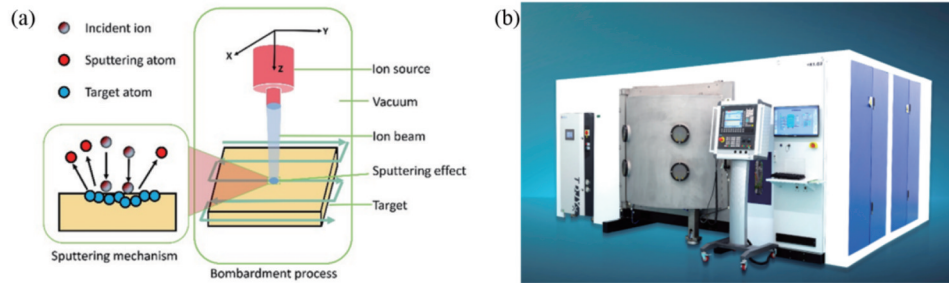


图 20 离子束抛光机床及精密修形原理。(a)精密修形原理;(b)离子束抛光机床

Fig. 20 Ion beam polishing machine and its processing principle. (a) Principle of precision shaping; (b) ion beam polishing machine

算效率与精度难以兼顾等问题,并将去除函数在轨迹段上以不同的进给速度进行积分,获得残余误差仿真加工结果,避免了传统时间模式仿真与机床运行时控

制速度不一致导致仿真与实际符合性差的问题<sup>[54]</sup>,实现了仿真与实际加工 PV 值符合性 > 95% 的高确定性加工,如图 22 所示。

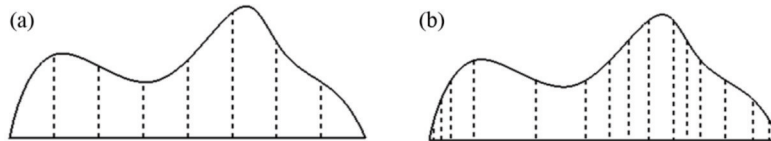


图 21 自适应步长轨迹段划分算法示意图<sup>[54]</sup>。(a)等步长法;(b)自适应步长法

Fig. 21 Diagrams of adaptive step trajectory segment partition algorithm<sup>[54]</sup>. (a) Same step size path segment; (b) adaptive step size path segment

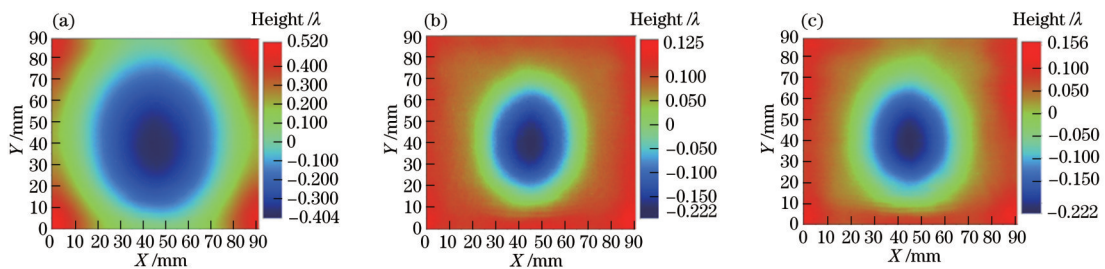


图 22 离子束加工确定性验证实验。(a)原始面形(PV 为 0.903λ);(b)仿真结果(PV 为 0.360λ);(c)加工结果(PV 为 0.364λ)

Fig. 22 Deterministic verification experiment for ion beam polishing. (a) Original surface (PV is 0.903λ); (b) simulation result (PV is 0.360λ); (c) processed result (PV is 0.364λ)

采用离子束抛光机床与技术,实现了光学元件 Φ400 mm 口径 PV 小于 λ/100、RMS 小于 1.0 nm 的超高精度加工,如图 23 所示。

### 4.3 子口径抛光中频误差控制技术

应用于强激光系统的光学元件,其中频误差会引起相位非线性增长和近场调制,导致后续元件损伤。采用子口径抛光技术可实现低频误差的确定性快速收



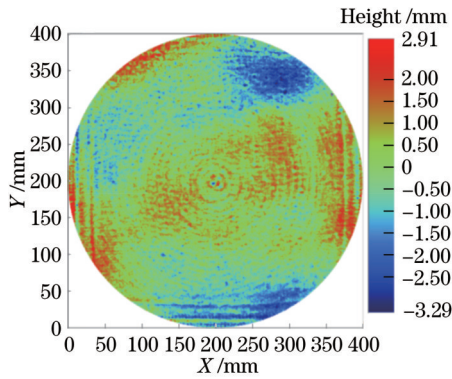


图 23 大口径元件离子束加工结果

Fig. 23 Result of ion beam polishing for large aperture optical elements

敛,其最大挑战在于中频误差的纳米级控制。子口径抛光中频误差主要来源于卷积效应与去除函数波动,

其控制技术途径主要有轨迹规划<sup>[26,55-57]</sup>、小尺寸工具局部修正<sup>[58]</sup>与半刚性抛光工具匀滑<sup>[8,59-60]</sup>。

由线性抛光理论可知,卷积效应所引入的中频误差由去除函数、路径方式、路径间距等参数共同决定。通过建立不同类型轨迹残余中频误差定量分析模型<sup>[26]</sup>,可分析不同类型轨迹加工过程产生的中频误差,如图 24 所示,以残余波纹 RMS 值及特征频率的功率谱密度(PSD)值为评价指标,去除函数宽度、轨迹间距、轨迹方式的重要性依次减弱。在不同工艺阶段可选择不同的参数组合来控制中频误差,如:在高效抛光阶段,可采用大尺寸的去除函数、较大间距轨迹以及光栅轨迹进行加工以抑制中频误差引入;在匀滑抛光阶段,主要针对平滑前道工序残留的规律性轨迹误差,可采用大尺寸的去除函数、较小间距路径以及随机轨迹进行加工;在精密修形阶段,可选择较小尺寸的去除函数、小间距路径、光栅路径进行加工。

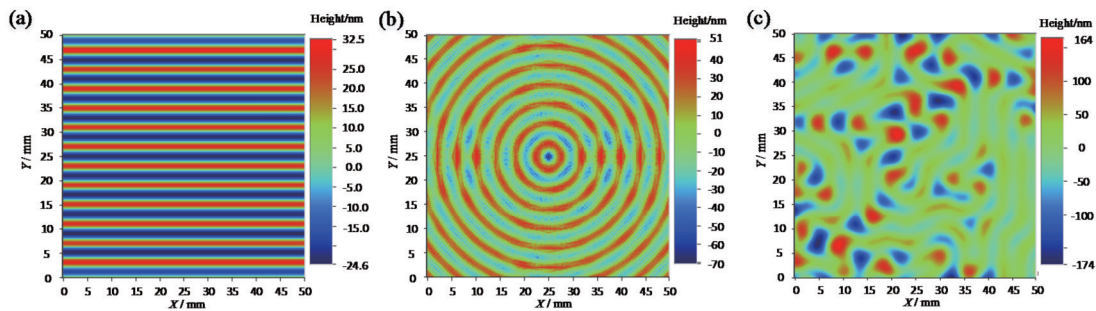


图 24 不同路径方式模拟加工后的残余波纹<sup>[26]</sup>。(a)光栅路径(RMS为 18.134 nm);(b)同心圆(RMS为 18.378 nm);(c)随机路径(RMS为 50.152 nm)

Fig. 24 Contours of residual ripples obtained by three paths<sup>[26]</sup>. (a) Raster path (RMS is 18.134 nm); (b) circle path (RMS is 18.378 nm); (c) random path (RMS is 50.152 nm)

在合理规划加工轨迹的基础上,抛光工具去除函数的不稳定是导致元件中频误差产生的最重要因素。基于故障模式影响及危害度分析方法,建立了沥青抛光工具去除函数稳定性的控制方法,将去除速率波动由大于 60% 降低至小于 14%<sup>[8]</sup> [图 25(a)],大幅降低

了匀滑加工过程产生的中频误差。建立了与实际偏差小于 5% 的小工具中高频误差参数化匀滑修正模型<sup>[61]</sup>,该模型可实现中频波纹误差随抛光时间的增加呈指数型收敛 [图 25(b)],解决了子口径抛光加工中高频误差纳米级控制难题。

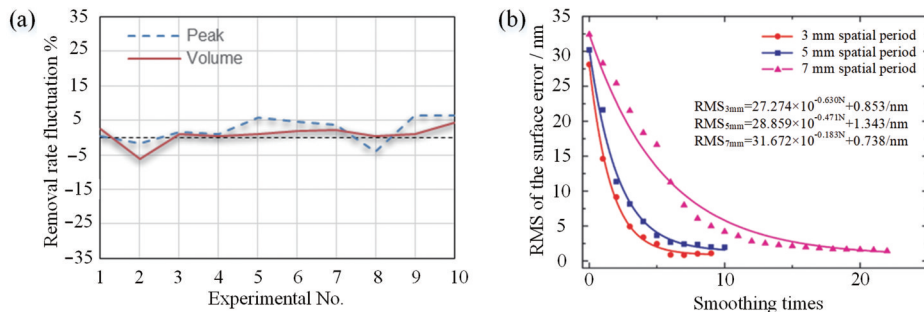


图 25 中频误差控制工艺。(a)去除函数稳定性控制<sup>[8]</sup>; (b)匀滑修正中高频误差<sup>[61]</sup>

Fig. 25 Control technology for middle frequency error. (a) Removal function stability control<sup>[8]</sup>; (b) smoothing correction for middle and high frequency errors<sup>[61]</sup>

采用子口径抛光中频误差控制技术加工 430 mm × 430 mm 非球面光学元件,低频误差 PV 达到

49 nm,中频 PSD1 误差 RMS 值为 1.67 nm,表面粗糙度 RMS 值为 0.25 nm,如图 26 所示。



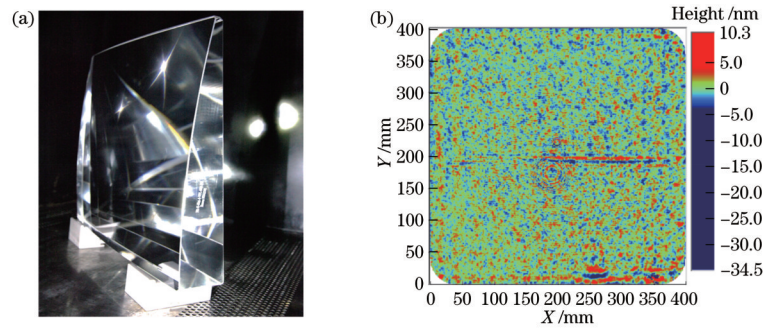


图 26 非球面匀滑结果。(a) 430 mm×430 mm 非球面元件;(b) 中频误差 PSD1(RMS 为 1.67 nm)

Fig. 26 Aspheric smoothing results. (a) 430 mm×430 mm aspheric lens; (b) middle frequency error PSD1 (RMS is 1.67 nm)

## 5 软脆晶体超精密切削技术

磷酸二氢钾(KDP)晶体是目前唯一适用于高功率激光装置的大口径非线性光学晶体,主要用作光学频率转换元件及电光开关器件。ICF 激光装置对 KDP 晶体的加工表面误差提出了严苛的全频段控制指标,如低频误差 PV 不大于  $5\lambda$ 、中频误差 PSD1 不大于 5 nm、PSD2 不大于 1.5 nm、粗糙度 RMS 不大于 1.5 nm。KDP 晶体为各向异性软脆材料,具有易潮

解、易开裂等不利于加工的物化性能,使用研磨抛光方法加工时极易嵌入抛光粉颗粒,导致元件激光损伤阈值降低<sup>[62]</sup>。目前单点金刚石超精密飞切是 KDP 晶体最理想的加工方法,其加工原理及加工机床如图 27 所示。飞切过程中,安装于飞刀盘边缘的金刚石刀具随主轴高速旋转以完成主切削运动,装卡于真空吸盘上的 KDP 晶体随滑台做进给运动。为获得光滑的 KDP 晶体表面,在飞切加工中多采用半径较大的圆弧刀具以实现材料的塑性域去除。

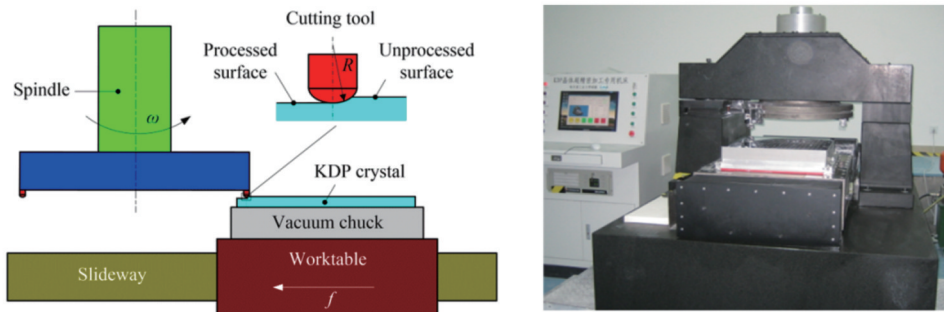


图 27 单点金刚石飞切加工原理及飞切加工机床

Fig. 27 Schematic diagram of single point diamond fly-cutting process and fly-cutting equipment

由于单点金刚石飞切加工为断续冲击切削,机床的动态响应会刚性复印至加工表面形成中高频波纹误差,其影响机制不明确是制约 KDP 晶体加工表面精度提升的关键问题。通过建立如图 28 所示的涵盖切削力、振动、旋转精度等物理量的在线监测平台,并结合机床动态特性仿真分析,探明了飞切机床动态响应与 KDP 晶体表面波纹误差的映射关系,解决了晶体表面中高频误差溯源难题<sup>[63-64]</sup>。研究表明,与基频呈分数关系的轴向异步误差及主轴部件 500~700 Hz 的冲击响应将分别导致晶体表面微米和毫米级周期的波纹误差<sup>[65-66]</sup>。哈尔滨工业大学提出了基于频域误差分配的超精密加工装备设计方法,其成功应用于飞切机床结构优化设计,满足了 KDP 晶体表面低波纹误差加工要求。

围绕 KDP 晶体纳米级光滑表面高效创成问题,基于弹塑性力学及断裂力学基本理论建立了各向异性软脆晶体本构模型,并通过纳米压/划痕实验结合有限元仿真的方法确定了模型参数<sup>[67-68]</sup>。进一步建立 KDP 晶

体切削加工过程的有限元仿真模型,获得脆-塑转变深度随切削方向的变化规律,确定了最优的切削方向[如(001)晶面内的  $45^\circ$  方向]及对应的脆-塑转变深度(约 150 nm),如图 29 所示。在此基础上,明确了脆-塑混合切削模式下的光滑表面形成条件,即在满足裂纹不扩展至最终加工表面的前提下,选取尽可能大的进给量,以实现纳米级光滑表面的高效创成<sup>[69-70]</sup>。

使用超精密飞切机床加工 430 mm×430 mm KDP 晶体元件,低频误差 PV 值达到  $2.1\lambda$ ,中频 PSD1 误差 RMS 值为 3.14 nm, PSD2 误差 RMS 值为 0.68 nm,表面粗糙度 RMS 值为 0.61 nm,如图 30 所示。

## 6 低缺陷制造技术

### 6.1 熔石英低缺陷控制技术

光学元件加工后通常会在元件表面残留深度约为数十纳米到数微米的缺陷层,这些缺陷是诱发元件激光损伤的主要因素,严重制约了强激光系统高通量稳

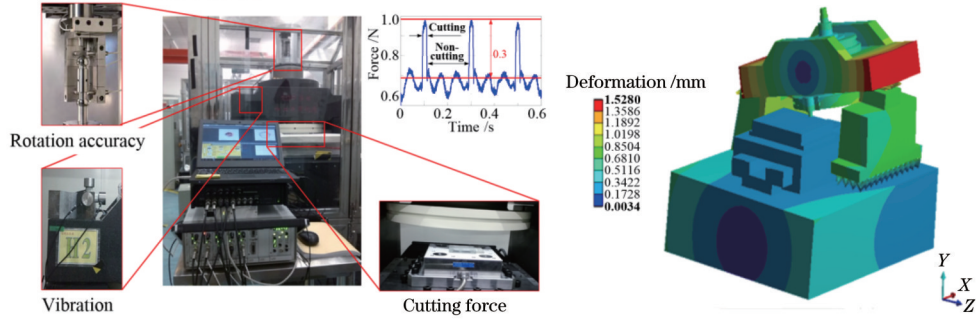


图 28 飞切机床动态性能监测平台及仿真模型

Fig. 28 Monitoring platform and simulation model of dynamic performance of fly-cutting machine

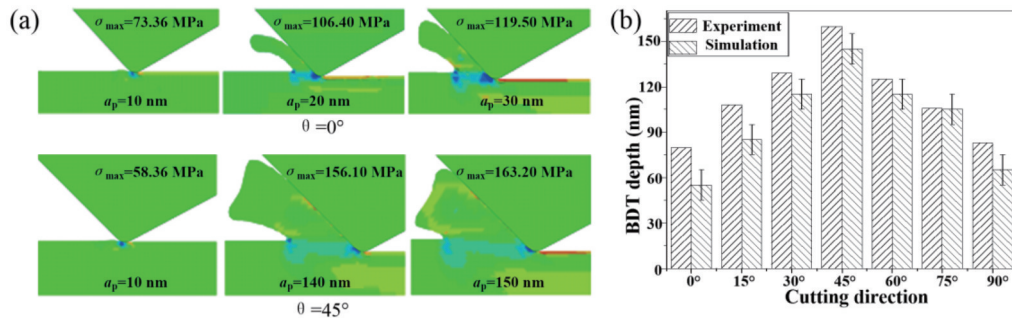


图 29 KDP 晶体脆-塑转变(BDT)仿真结果<sup>[67]</sup>。(a)切削区域应力分布;(b)脆-塑转变随切削方向的变化

Fig. 29 Simulation results of BDT of KDP crystal<sup>[67]</sup>. (a) Stress state in cutting zone; (b) variation of BDT with cutting direction

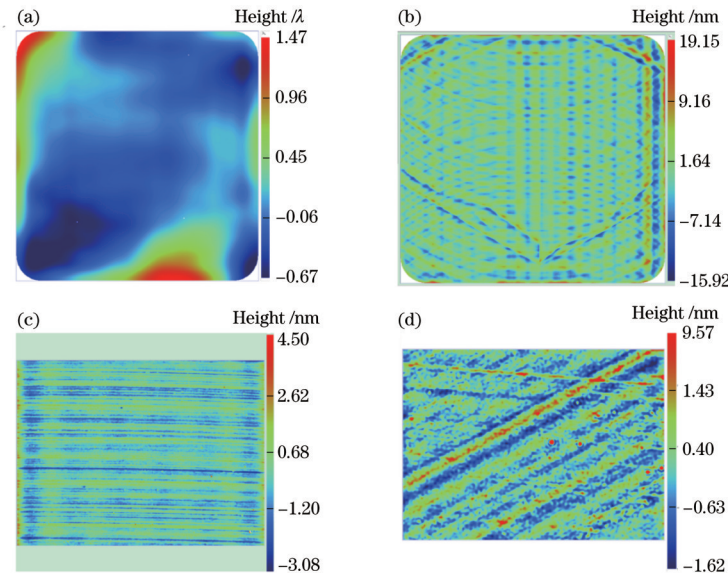


图 30 KDP 晶体飞切加工表面检测结果。(a)低频误差 (PV 为 2.1λ);(b)中频 PSD1 (RMS 为 3.14 nm);(c)中频 PSD2 (RMS 为 0.68 nm);(d)粗糙度 (RMS 为 0.61 nm)

Fig. 30 Measurement results of KDP surface for fly-cutting. (a) Low frequency error (PV is 2.1λ); (b) middle frequency PSD1 (RMS is 3.14 nm); (c) middle frequency PSD2 (RMS is 0.68 nm); (d) roughness (RMS is 0.61 nm)

定运行。熔石英元件加工过程中引入的缺陷主要包括物理结构缺陷(如表面/亚表面划痕、裂纹、坑点、电子缺陷)及化学异质缺陷(如抛光粉残留的 Ce、Fe 等金属元素,以及各类有机污染)。美国 LLNL 在 NIF 装置光学元件制造流程中采用了电解在线砂轮修整(ELID)技术、磁流变抛光技术、刻蚀技术和紫外激光处理技

术,元件损伤密度下降了 4 个数量级<sup>[71]</sup>。近年来,为了进一步增强熔石英光学元件的抗激光损伤能力,美国 LLNL 开发了基于氢氟酸湿法刻蚀的 AMP (Advanced Mitigation Processing) 技术,通过在刻蚀过程中对痕量化学沉积物和微纳尺度污染物进行控制,装置运行的激光通量得以大幅提升<sup>[72-74]</sup>。针对我国强



激光装置高通量多发次稳定运行需求,近年来重点开展了“缺陷全流程定量控制”和“缺陷化学后处理”研究:通过改进磨削及抛光工艺,实现亚表面缺陷密度逐级控制;通过优化清洗刻蚀技术实现化学异质缺陷去除,并钝化残余微量结构缺陷,进而提升熔石英光学元件损伤性能。

### 1) 缺陷全流程定量控制

在超精密磨削过程中,金刚石磨粒对光学元件表

面进行刚性划擦切削,光学材料主要以脆性断裂方式去除,因此元件亚表层会残留大量的裂纹缺陷。针对金刚石砂轮边缘和表面局部损伤产生加工应力集中导致缺陷的问题,采用复合截面轮廓砂轮研磨修形与弹性修锐技术<sup>[75]</sup>,有效地抑制了砂轮边缘位置的接触应力,结合磨削液精细循环处理技术<sup>[76]</sup>,显著减少了元件表面规律性分布的虚线缺陷及偶发深砂眼缺陷,如图 31 所示。

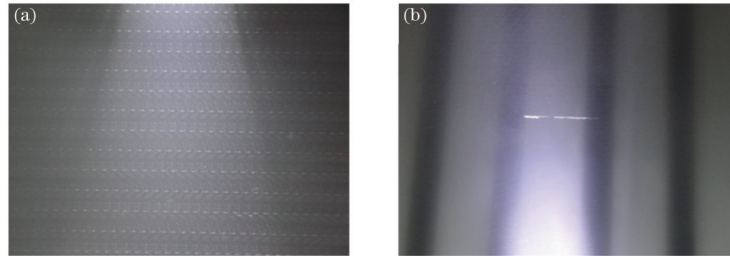


图 31 两种典型的磨削缺陷。(a)规律性分布的虚线缺陷;(b)偶发深砂眼缺陷

Fig. 31 Two typical grinding defects. (a) Regularly distributed dotted line defects; (b) occasional deep pit defect

为实现磨削亚表面缺陷深度稳定性控制,研究了硬脆光学材料加工砂轮磨损失效机制,提出了基于磨损磨粒密度和磨耗面积的砂轮磨损量化表征方法<sup>[77]</sup>,揭示了元件磨削亚表面缺陷深度、特征物理信号(声发射、磨削力、主轴功率负载等)随砂轮磨损的演化规

律<sup>[78]</sup>,建立了基于特征物理信号实时监测和以亚表面缺陷深度为评判依据的砂轮磨损状态的在线评价方法<sup>[79]</sup>。通过上述工艺技术,使用国产超精密磨削机床加工 430 mm × 430 mm 口径熔石英元件,亚表面缺陷深度在 7 μm 以内,最优达到 3 μm<sup>[8]</sup>,如图 32 所示。

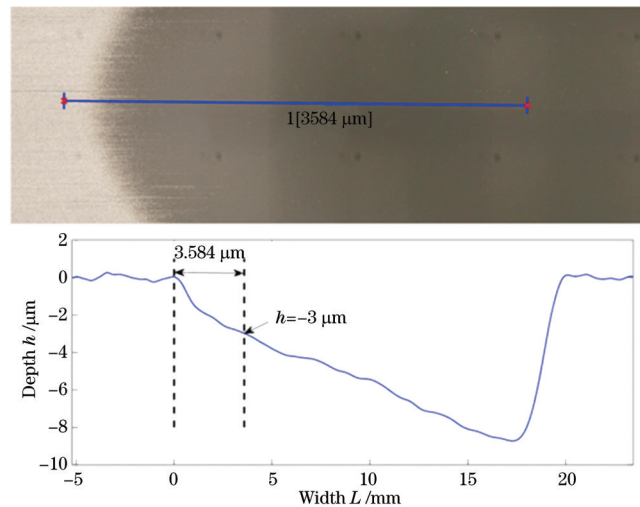


图 32 磨削亚表面缺陷深度

Fig. 32 Depth of grinding subsurface defects

抛光表面/亚表面质量主要取决于抛光界面的相互作用,熔石英抛光过程中的材料去除是水解反应、机械去除和塑性流动共同作用的结果<sup>[80]</sup>。抛光产生的亚表面缺陷主要与参与去除的磨料粒度分布有关,当抛光液中存在粗大颗粒时,如图 33 所示,其抛光载荷会远大于平均载荷,导致元件局部所承受的载荷超过材料强度并发生破坏,进而产生亚表面损伤<sup>[81]</sup>。

为提高抛光过程中的磨料均匀性,建立了“物理去除+化学分散”的磨料质量综合控制方法。根据流体动力学仿真结果优化抛光液多级微滤装置结构,有效

地去除了抛光液中的大颗粒杂质。基于静电分散机制优化了抛光液组分,增大微纳米抛光颗粒间的静电斥力,防止产生团聚“尾部”大颗粒,提高了抛光液的分散性及悬浮稳定性。基于上述技术,近年来大口径熔石英光学元件的表面/亚表面缺陷密度水平持续降低<sup>[19]</sup>,实现元件抛光阶段表面近无缺陷、亚表面缺陷密度小于 0.06 cm<sup>-2</sup>,部分元件缺陷密度优于 0.03 cm<sup>-2</sup>。

### 2) 缺陷化学后处理

由于现有各类抛光技术仍不能实现绝对零缺陷加工,因此需在抛光之后采用化学后处理工艺去除表面



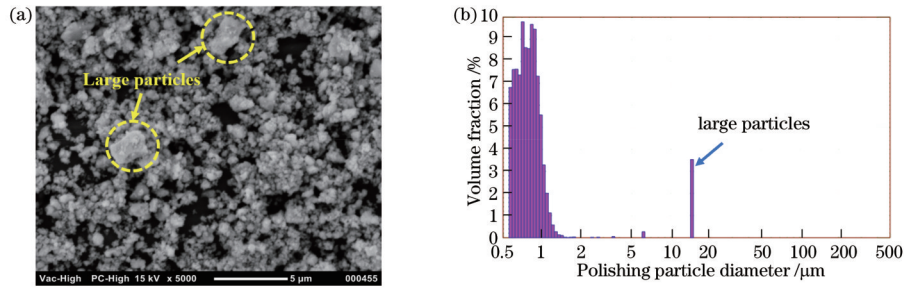


图 33 氧化铈抛光颗粒形貌及其粒度分布图。(a)颗粒形貌图;(b)粒度分布图

Fig. 33 Morphology and particle size distribution of ceria polishing particles. (a) Particle morphology; (b) particle size distribution diagram

残留污染物,缓解残余亚表面缺陷对激光损伤阈值的不利影响。实验发现采用氢氟酸(HF)、缓冲刻蚀剂(BOE)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)等溶液对石英玻璃进行处理,均可使样品表面的金属元素含量大幅降低,检测结果如图 34 所示,并使得无划痕区域的损伤阈值得到提高<sup>[82]</sup>。此外,HF、BOE 溶液还具有钝化裂纹的显著作用。值得注意的是,随着刻蚀深度的增加,深刻蚀样品的金属杂质含量反而有较大幅度的增加,元件表面粗糙度出现急剧恶化,激光损伤阈值呈现先升后降的变

化规律<sup>[83]</sup>,如图 35 所示,该现象主要是由于反应物再沉积造成的。进一步建立了基于“氧化清洗+兆声酸刻”的化学刻蚀改进工艺,使用硝酸与过氧化氢混合溶液在加热条件下对元件进行氧化清洗以去除绝大部分金属杂质,再使用 HF 溶液在兆声波作用下对元件进行刻蚀,重点防止反应物再沉积,并准确控制刻蚀深度以确保裂纹得到钝化<sup>[84]</sup>。通过上述低缺陷磨削、抛光及后处理工艺,目前大口径熔石英光学元件满足了现阶段强激光装置高通量运行要求。

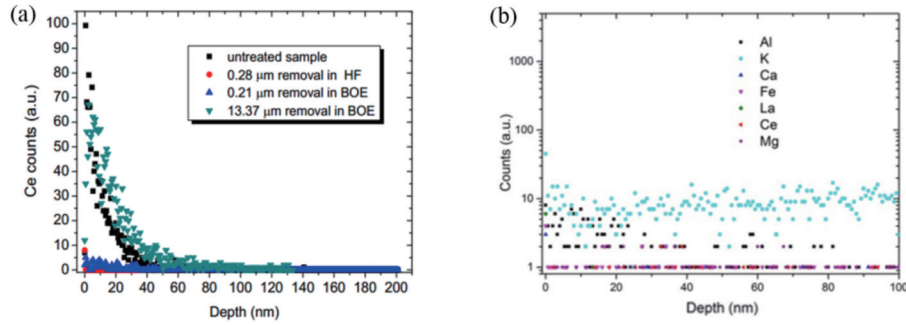


图 34 不同方法处理后的熔石英表面金属元素含量<sup>[82]</sup>。(a)采用 HF/BOE 刻蚀后的铈元素含量;(b)采用 HNO<sub>3</sub> 刻蚀后的金属元素含量

Fig. 34 Content of metallic elements on surface of fused silica treated by different methods<sup>[82]</sup>. (a) Ce content after HF/BOE etching; (b) metallic element content after HNO<sub>3</sub> etching

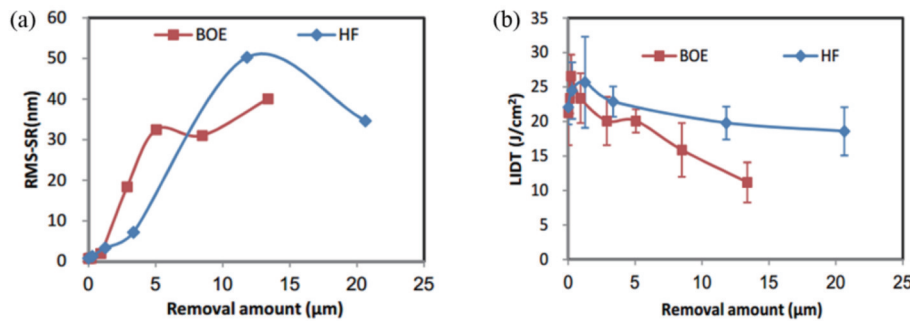


图 35 化学刻蚀深度对熔石英元件的表面粗糙度和激光损伤阈值的影响<sup>[83]</sup>。(a)表面粗糙度;(b)激光损伤阈值

Fig. 35 Effect of chemical etching depth on surface roughness and laser damage threshold of fused silica<sup>[83]</sup>. (a) Surface roughness; (b) laser damage threshold

### 6.2 三倍频晶体低缺陷控制技术

三倍频晶体表面缺陷极易成为激光损伤的起始点,使晶体元件在远低于其本征阈值的条件下发生损

伤<sup>[85]</sup>,但导致晶体表面发生低阈值损伤的缺陷类型尚不清楚。针对该问题,基于光学显微、荧光及光热吸收等多种检测技术对晶体表面缺陷进行表征,并通过原

位损伤测试技术对不同缺陷的激光损伤性能进行了分析。研究表明,三倍频晶体表面的断裂型缺陷(脆性压坑、裂纹)和凸起压点会显著降低元件表面的损伤阈值,而塑性缺陷的损伤阈值相对较高,如图 36 所

示<sup>[86-88]</sup>。并且,缺陷的荧光特性与损伤性能表现出高度相关性,其损伤阈值随着荧光强度的增加呈线性下降的趋势。

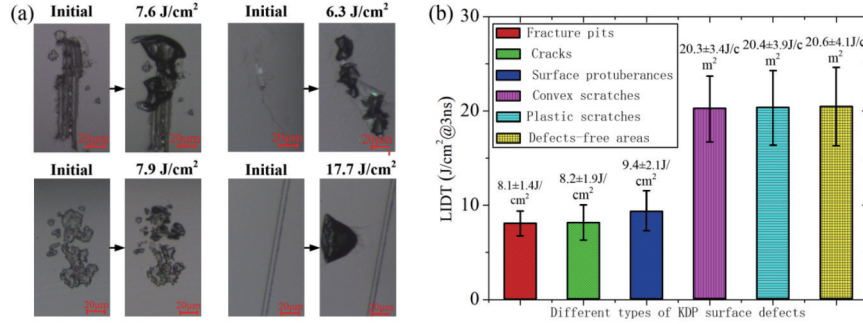


图 36 KDP 晶体表面缺陷激光损伤实验结果<sup>[88]</sup>。(a)缺陷损伤原位测试;(b)缺陷损伤阈值

Fig. 36 Laser-induced damage performance of KDP surface defects<sup>[88]</sup>. (a) *In-situ* defect damage test; (b) damage threshold of surface defects

通过缺陷能谱分析、双束扫描电镜分析并结合缺陷形成过程理论模拟,揭示了晶体表面低阈值缺陷的形成机理<sup>[89]</sup>,发现刀具刃口微观磨损是导致晶体表面形成断裂型缺陷的主要原因,如图 37 所示,而表面凸起压点的形成则与元件装夹过程密切相关。通过对刀

具磨损状态及装夹环境进行严格控制,实现了三倍频晶体表面低阈值缺陷的有效抑制。大口径损伤实验结果表明,三倍频晶体元件在经历多次高通量( $8 J/cm^2$ )激光辐照后基本无损伤。

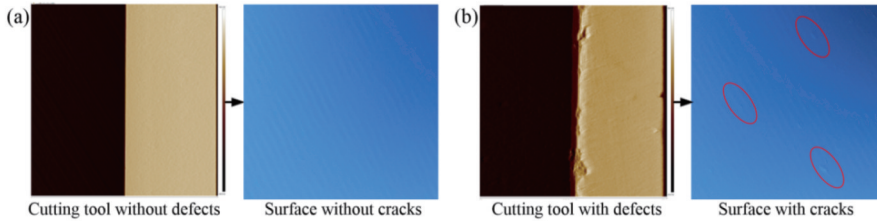


图 37 刀具磨损对晶体表面缺陷的影响。(a)无缺陷刀具及加工表面显微形貌;(b)磨损刀具及加工表面显微形貌

Fig. 37 Influence of tool wear on surface defects of crystal. (a) Defect-free cutting tool and crack-free KDP surface; (b) wear tool and microstructure of machined surface

## 7 结 论

ICF 高功率激光装置对激光光学元件提出了接近材料和制造极限的工程供货要求,是先进光学制造技术创新发展的强大驱动。国际发展状况表明,新质光学加工手段、更高性能制造装备和高确定性的工艺控制技术成为此领域的发展方向和热点。国内相关研究团队立足制造方法创新,提出超精密制造工艺流程,构建了“装备-检测-工具-工艺”的系统技术链条,以工艺为牵引实现了国产超精密光学制造装备的突破,使得高性能激光光学元件的机械化、确定性制造成为可能,大幅提升了米级强激光光学元件的制造技术水平和批量制造能力,满足了我国惯性约束聚变系列高功率激光装置的研制需求。“确定性”和“低缺陷”是高功率激光光学元件制造的永恒主题,激光装置输出能力和使役性能的提升,激光装置的束数不断增大,束间能量或功率平衡对光学元件性能的一致性提出更高的要求。目前,通过以定量检测-补偿加工为特征的

数控抛光技术可以实现制造误差的达标性控制,但光学元件制造误差的空间分布差异较大,将影响激光束的聚焦性能及激光-等离子体不稳定性。在整个制造流程中,如何对制造误差的演化规律(特别是与聚焦性能相关的空间分布特性)获得确定性的认知并建立高精度的控形制造能力,将成为下一步的研究重点。紫外光学元件的激光损伤是巨型激光装置的能力瓶颈,通过降低吸收性缺陷密度和化学刻蚀表面处理的技术途径并未从根本上解决材料本底与制造表面损伤性能巨大差异的问题。抗激光损伤能力的严峻挑战将驱使“近零缺陷”光学制造技术持续发展,制造缺陷诱导激光损伤机理、光学元件制造缺陷的多模态检测与表征、新质光学制造技术手段等方面有待创新性突破,以获得近材料本底的低缺陷制造性能。

## 参 考 文 献

[1] Aikens D M, Rich L, Bajuk D, et al. Developing enabling optics finishing technologies for the National Ignition Facility[M]. California: Lawrence Livermore

- National Laboratory, 1998.
- [2] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- [3] Xu Q, Li W, Wang J, et al. Progress of advanced optical manufacturing technology integrated line[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6149: 614904.
- [4] 郭隐彪, 黄元庆, 田波, 等. 非轴对称非球面平行磨削误差补偿技术研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(5): 118-121.  
Guo Y B, Huang Y Q, Tian B, et al. Study on compensation of parallel grinding non-axisymmetric aspheric surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(5): 118-121.
- [5] Zhou L, Wei Q C, Chen X H, et al. Key technologies in high efficiency and ultra precision grinding of large aperture and complex aspheric lens[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11342: 1134209.
- [6] Wei Q C, Zhou L, Chen X H, et al. The effect of grinding processing parameters on aspheric small-scale waviness[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11342: 113420C.
- [7] Wei Q C, Zhou L, Chen X H, et al. Influence of grinding force on aspherical small-scale waviness uniformity based on parallel grinding[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11068: 106817.
- [8] 樊非, 徐曦, 许乔, 等. 大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200135.  
Fan F, Xu X, Xu Q, et al. Progress on ultra precision manufacturing technology of large-aperture high-power laser optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(8): 200135.
- [9] 施晨淳, 王振忠, 彭云峰, 等. PM 流量控制器参数对液体静压导轨运动精度影响的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 157-165.  
Shi C C, Wang Z Z, Peng Y F, et al. Influence of PM controller parameters on motion accuracy of hydrostatic guideways[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 157-165.
- [10] Shi C C, Wang Z Z, Peng Y F, et al. Quasi-static kinematics model for motion errors of closed hydrostatic guideways in ultra-precision machining[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 90-102.
- [11] 许乔, 王健, 马平, 等. 先进光学制造技术进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3098-3105.  
Xu Q, Wang J, Ma P, et al. Progress of advanced optical manufacturing technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3098-3105.
- [12] Zhou L, Wei Q C, Zheng N, et al. Dressing technology of arc diamond wheel by roll abrading in aspheric parallel grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5): 2699-2706.
- [13] 周炼, 安晨辉, 侯晶, 等. 圆弧金刚石砂轮三维几何形貌的在位检测和误差评价[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3079-3088.  
Zhou L, An C H, Hou J, et al. 3D geometric topographic measurement and error evaluation of arc diamond wheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 3079-3088.
- [14] Wei Q C, Zhou L, Chen X H, et al. Research on full-aperture surface shape *in situ* measurement technology for grinding large diameter optics[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11189: 111890P.
- [15] Suratwala T I, Feit M D, Steele W A. Toward deterministic material removal and surface figure during fused silica pad polishing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 93(5): 1326-1340.
- [16] Pal R K, Garg H, Karar V. Material removal characteristics of full aperture optical polishing process[J]. Machining Science and Technology, 2017, 21(4): 493-525.
- [17] Suratwala T, Steele R, Feit M, et al. Convergent polishing: a simple, rapid, full aperture polishing process of high quality optical Flats & spheres[J]. Journal of Visualized Experiments, 2014(94): 51965.
- [18] Suratwala T I. Materials science and technology of optical fabrication[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- [19] Xie R Q, Zhao S J, Liao D F, et al. Recent advances in rapid polishing process of large aperture optical flats[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10841: 108410V.
- [20] Ban X X, Zhao H Y, Zhu X L, et al. Improvement and application of pad conditioning accuracy in chemical mechanical polishing[J]. Optical Engineering, 2018, 57(9): 095102.
- [21] Deng H, Endo K, Yamamura K. Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 115: 38-46.
- [22] Yu G Y, Walker D, Li H Y. Implementing a grolishing process in Zeeko IRP machines[J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6637-6640.
- [23] Wang C J, Wang Z Z, Wang Q J, et al. Improved semirigid bonnet tool for high-efficiency polishing on large aspheric optics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5): 1607-1617.
- [24] Wang C J, Yang W, Wang Z Z, et al. Highly efficient deterministic polishing using a semirigid bonnet[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 095102.
- [25] Zhong B, Huang H Z, Chen X H, et al. Impact of pad conditioning on the bonnet polishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1): 539-549.
- [26] Pan R, Zhong B, Chen D J, et al. Modification of tool influence function of bonnet polishing based on interfacial friction coefficient[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 43-52.
- [27] Zhong B, Chen X H, Pan R, et al. The effect of tool wear on the removal characteristics in high-efficiency bonnet polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 3653-3662.
- [28] Zhong B, Wang C J, Chen X H, et al. Time-varying



- tool influence function model of bonnet polishing for aspheric surfaces[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 1101-1109.
- [29] Zhong B, Chen X H, Deng W H, et al. Improving material removal determinacy based on the compensation of tool influence function[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10710: 107102P.
- [30] Zhong B, Huang H Z, Chen X H, et al. Modelling and simulation of mid-spatial-frequency error generation in CCOS[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2018, 14(1): 4.
- [31] Zhong B, Deng W H, Chen X H, et al. Frequency division combined machining method to improve polishing efficiency of continuous phase plate by bonnet polishing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1597-1612.
- [32] 钟波, 陈贤华, 王健, 等. 高精度离轴非球面透镜的制造与检测[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0718003. Zhong B, Chen X H, Wang J, et al. Fabrication and test of high-precision off-axis aspheric lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718003.
- [33] Chen X H, Yu H D, Zhong B, et al. Development of key technologies in the fabrication of large aperture off-axis wedge focusing lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10255: 102551C.
- [34] Yellowhair J E. Advanced technologies for fabrication and testing of large flat mirrors[D]. Tucson: The University of Arizona, 2007.
- [35] Ren L L, Zhang F H, Liao D F, et al. Theoretical model and experimental analysis of non-uniform material removal during full-aperture polishing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(1): 137-146.
- [36] Chen G K, Yi K, Yang M H, et al. Factor effect on material removal rate during phosphate laser glass polishing[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29(6): 721-725.
- [37] Liao D F, Xie R Q, Zhao S J, et al. Surface shape development of the pitch lap under the loading of the conditioner in continuous polishing process[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(6): 3129-3140.
- [38] Zhao D W, He Y Y, Wang T Q, et al. Effect of kinematic parameters and their coupling relationships on global uniformity of chemical-mechanical polishing[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2012, 25(3): 502-510.
- [39] Liao D F, Ren L L, Zhang F H, et al. Kinematic model for material removal distribution and surface figure in full-aperture polishing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 588-593.
- [40] Liao D F, Zhang F H, Xie R Q, et al. Effect of interfacial friction force on material removal in full aperture continuous polishing process[J]. *Precision Engineering*, 2020, 63: 214-219.
- [41] Liao D F, Zhang F H, Xie R Q, et al. Deterministic control of material removal distribution to converge surface figure in full-aperture polishing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 144-152.
- [42] Zhang F H, Wang Y R. Method to improve the surface shape of BK7 glass in full-aperture polishing[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(23): 6910-6917.
- [43] Hoon D M. Configuring of lapping and polishing machines: US8123593B2[P]. 2012-02-28.
- [44] 尹进. 环形抛光中抛光盘表面面形的在线检测和控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. Yin J. Research on on-line detection and control technology of surface shape of polishing disc in ring polishing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [45] 安磊, 王伟, 廖德锋. 超精密全口径抛光机气浮转台的静态特性[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1640-1652. An L, Wang W, Liao D F. Static characteristics of air-floating turntable of ultra-precision full-aperture polisher [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(7): 1640-1652.
- [46] 尹进, 朱健强, 焦翔, 等. 基于环形抛光的稳态确定性抛光方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1102001. Yin J, Zhu J Q, Jiao X, et al. Method of steady-state deterministic polishing based on continuous polishing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1102001.
- [47] 孙荣康, 王金栋, 成聪, 等. 小工具修正下抛光盘材料的去除特性[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0403001. Sun R K, Wang J D, Cheng C, et al. Material removal characteristics of polishing pad with small-tool correction [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0403001.
- [48] 侯晶, 王洪祥, 陈贤华, 等. 大口径平面光学元件的磁流变加工[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 3054-3060. Hou J, Wang H X, Chen X H, et al. Magnetorheological processing for large aperture plane optical elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3054-3060.
- [49] 黄文, 张云飞, 郑永成, 等. 基于双磨头的磁流变抛光机床床与工艺研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 494-499. Huang W, Zhang Y F, Zheng Y C, et al. Magnetorheological finishing machine and technique based on two-polishing-head[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 494-499.
- [50] Hou J, Wang H X, Chen X H, et al. Effect of magnetorheological processing parameters on polishing spots[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10847: 108470P.
- [51] Liu S W, Wang H X, Zhang Q H, et al. Regionalized modeling approach of tool influence function in magnetorheological finishing process for aspherical optics [J]. *Optik*, 2020, 206: 164368.
- [52] Wang Y B, Dai Y F, Hu H, et al. Study on rapid convergence strategy of nano-precision optical surface by ion beam figuring[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127614.
- [53] Wang T Y, Huang L, Choi H, et al. RISE: robust iterative surface extension for sub-nanometer X-ray mirror fabrication[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15114-15132.
- [54] Deng W H, Chen X H, Jin H L, et al. Optimization of IBF parameters based on adaptive tool-path algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10710: 107102W.

- [55] Wang C J, Wang Z Z, Xu Q. Unicursal random maze tool path for computer-controlled optical surfacing[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10128-10136.
- [56] Dunn C R, Walker D D. Pseudo-random tool paths for CNC sub-aperture polishing and other applications[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18942-18949.
- [57] Wan S L, Wei Y C, Hu C, et al. Magnetorheological finishing ultra-precision polishing mid-spatial-frequency error tool influence function[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 161(2): 103673.
- [58] Wan K P, Wan S L, Jiang C, et al. Sparse bi-step raster path for suppressing the mid-spatial-frequency error by fluid jet polishing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 6603-6616.
- [59] Shu Y, Nie X, Shi F, et al. Smoothing evolution model for computer controlled optical surfacing[J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, 81(3): 164-167.
- [60] Kim D W, Park W H, An H K, et al. Parametric smoothing model for visco-elastic polishing tools[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22515-22526.
- [61] 雷鹏立, 侯晶, 王健, 等. 小工具数控抛光对元件表面中频误差的匀滑研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(11): 11-17.  
Lei P L, Hou J, Wang J, et al. Smoothing of mid-spatial frequency errors by computer controlled surface processing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31(11): 11-17.
- [62] 王强国. KDP 晶体精密切割与磨削工艺的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
Wang Q G. Study on precision slicing and grinding processes of KDP crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [63] Yang X, An C H, Wang Z Z, et al. Research on surface topography in ultra-precision flycutting based on the dynamic performance of machine tool spindle[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5): 1957-1965.
- [64] An C H, Deng C Y, Miao J G, et al. Investigation on the generation of the waviness errors along feed-direction on flycutting surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 1457-1465.
- [65] Wei R C, An C H, Wang Z Z, et al. Dynamic performance analysis and quantitative evaluation for ultraprecision aerostatic spindle[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 234(1/2): 218-228.
- [66] Deng C Y, An C H, Wei B, et al. Investigation on the influence of aerostatic pressure upon surface generation in flycutting[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2018, 233(4): 1136-1143.
- [67] Wang S F, An C H, Zhang F H, et al. Simulation research on the anisotropic cutting mechanism of KDP crystal using a new constitutive model[J]. *Machining Science and Technology*, 2017, 21(2): 202-222.
- [68] 汪圣飞, 安晨辉, 张飞虎, 等. 基于纳米划痕实验和有限元仿真的 KDP 晶体断裂性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(9): 2325-2329, 2337.  
Wang S F, An C H, Zhang F H, et al. Study on the fracture properties of KDP crystal by nanoscratch experiment and finite element simulation[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(9): 2325-2329, 2337.
- [69] Wang S F, An C H, Zhang F H, et al. An experimental and theoretical investigation on the brittle ductile transition and cutting force anisotropy in cutting KDP crystal[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 106: 98-108.
- [70] Zhang F H, Wang S F, An C H, et al. Full-band error control and crack-free surface fabrication techniques for ultra-precision fly cutting of large-aperture KDP crystals [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(2): 193-202.
- [71] Menapace J A, Peterson J, Penetrante B, et al. Combined advanced finishing and UV laser conditioning process for producing damage resistant optics: US6920765[P]. 2005-07-26.
- [72] 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.
- [73] Bude J, Miller P, Baxamusa S, et al. High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5839-5851.
- [74] Bude J, Carr C W, Miller P E, et al. Particle damage sources for fused silica optics and their mitigation on high energy laser systems[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11414-11435.
- [75] 周炼, 谢瑞清, 陈贤华, 等. 熔石英磨削砂轮截面轮廓分析与优化[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(1): 59-64.  
Zhou L, Xie R Q, Chen X H, et al. Analysis and optimization on cross section profile of fused silica grinding wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018, 38(1): 59-64.
- [76] Zhou L, Zheng N, Chen X H, et al. Crack depth uniformity control techniques for large scale fused silica optics in grinding process[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11068: 1106815.
- [77] Zhou L, Wei Q C, Chen X H, et al. *In-situ* detection and evaluation of wear state of micro-powder diamond wheel in optics grinding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11189: 1118904.
- [78] Zhou L, Wei Q C, Li J, et al. The effect of diamond wheel wear on surface and sub-surface quality in fused silica optics grinding[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 677(2): 022091.
- [79] Zhou L, Zheng N, Wang J, et al. Research on the signal de-noising method of acoustic emission in fused silica grinding[C]//*Proceedings of the 2018 International Conference on Signal Processing and Machine Learning-SPML'18*, November 28-30, 2018, Shanghai, China. New York: ACM Press, 2018: 26-32.
- [80] Suratwala T I, Steele W A, Wong L L, et al. Chemistry and formation of the Beilby layer during polishing of

- fused silica glass[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(8): 2395-2402.
- [81] Liao D F, Wang J, Zhao S J, et al. Analysis of the optic/impurity-particle/pad interaction for reduction of scratches formed on optics during pad polishing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 391: 96-100.
- [82] Li Y G, Yuan Z G, Wang J, et al. Laser-induced damage characteristics in fused silica surface due to mechanical and chemical defects during manufacturing processes[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 149-158.
- [83] Ye H, Li Y G, Yuan Z G, et al. Laser induced damage characteristics of fused silica optics treated by wet chemical processes[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 498-505.
- [84] Ye H, Li Y G, Yuan Z G, et al. Ultrasonic-assisted wet chemical etching of fused silica for high-power laser systems[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2018, 9(2): 288-295.
- [85] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 146-249.
- [86] Wang S F, Wang J, Lei X Y, et al. Simulation of the nanosecond-pulse laser damage of KDP surface by the smoothed particle hydrodynamics method[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5338-5341.
- [87] Wang S F, Wang J, Lei X Y, et al. Investigation of the laser-induced surface damage of KDP crystal by explosion simulation[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15142-15158.
- [88] Wang S F, Wang J, Xu Q, et al. Influences of surface defects on the laser-induced damage performances of KDP crystal[J]. Applied Optics, 2018, 57(10): 2638-2646.
- [89] 汪圣飞, 许乔, 王健, 等. KDP 晶体飞切加工表面缺陷的抑制方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1116001.
- Wang S F, Xu Q, Wang J, et al. Methods for surface defect suppression in fly-cutting fabrication of KDP crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1116001.

#### 约稿专家简介:



许乔(1972—), 博士, 研究员, 博士生导师, 入选国家有突出贡献中青年专家、国家级青年人才基金、国家科技创新领军人才。1993年7月浙江大学光电与科学仪器工程学系光学技术与光电仪器专业本科毕业获学士学位, 1997年6月浙江大学测试计量技术及仪器专业毕业获博士学位。现任中国工程物理研究院激光聚变研究中心副主任、国防科技工业光学超精密加工技术创新中心主任、中国光学学会理事、中国光学学会光学制造专委会副主任委员。长期从事先进光学制造、精密光学检测科研和工程工作, 主持国家科技重大专项重大项目多项, 获国家科技进步奖二等奖1项, 省部级科技进步一等奖7项。E-mail: xqiao@vip.sina.com。