

【Review】大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展

2021-12-30 46



用于惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)研究的高功率固体激光装置是当今规模最大、结构最复杂且系统性极强的光学系统工程，需要上万件大口径强激光光学元件，包括磷酸盐钕玻璃放大片和平面反射镜、非球面聚焦透镜、衍射元件，以及大口径非线性激光晶体等。

为保证激光装置获得理想的激光光束质量，并实现高通量条件下稳定运行，该类光学元件要求实现极为严苛的全频段精度控制指标，以及满足极致的低缺陷控制要求。同时高功率固体激光装置研制的成组化、模块化和紧凑化研制目标，对大口径强激光光学元件提出了高效率、批量化、工程化的制造要求。

中国工程物理研究院激光聚变研究中心许乔研究员团队主要针对大口径强激光光学元件超精密制造技术与装备的发展进行综述回顾：围绕“超精密、确定性”强激光光学元件全流程制造方法，总结了中物院激光聚变研究中心近几年大口径强激光光学元件超精密制造技术取得的重要进展，重点介绍了单点金刚石超精密切削技术、非球面超精密数控磨削技术、确定性抛光技术等一系列关键技术，以及相关工艺及装备在强激光光学元件批量制造流程线中的应用情况。

单点金刚石超精密切削技术与装备

KDP(Potassium dihydrogen phosphate, 磷酸二氢钾)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，而单点金刚石超精密飞切是KDP晶体最理想的加工方法。

许乔研究员团队建立了KDP晶体超精密飞切机床动态特性的测量与评价平台(如图1所示)，并提出了基于频域误差分配的超精密飞切机床设计方法，实现了机床关键部件在中频误差敏感频段响应的有效抑制[1]。

围绕KDP晶体超光滑表面创成，许乔研究员团队建立了KDP晶体的本构模型，并给出了最优的切削方向(如(001)晶面内的45°方向)及对应的脆-塑转变深度(约150 nm) (如图1所示)。在此基础上，提出了脆-塑混合切削模式下的光滑表面形成条件，即在满足脆性切削区的裂纹不扩展到最终加工表面的前提下，选取尽可能大的进给量，以最大效率地获得光滑的塑性表面[2-3]。基于该研究结果，对现有KDP晶体飞切加工工艺参数进行优化，稳定获得了表面粗糙度优于1 nm的超光滑表面。

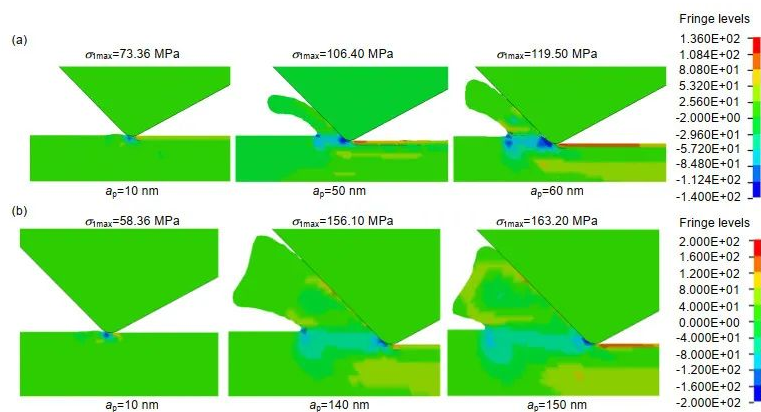


图1. KDP晶体脆-塑转变深度仿真结果。(a) 0°方向仿真结果；(b) 45°方向仿真结果

非球面超精密数控磨削技术与装备

高功率激光装置所需非球面聚焦透镜通常为高次曲面、类自由曲面，且呈非旋转对称性设计，在系统中起到精密成像、谐波分离、精确聚焦等功能。

许乔研究员团队提出采用超精密平行磨削技术(如图2所示)，即基于“XYZ三正交直线轴+卧式主轴”的超精密数控磨削机床，通过元件轮廓与砂轮控制点三维坐标精确计算，以光栅包络方式磨削加工，实现异形非旋转对称非球面的快速精密成形[4]。

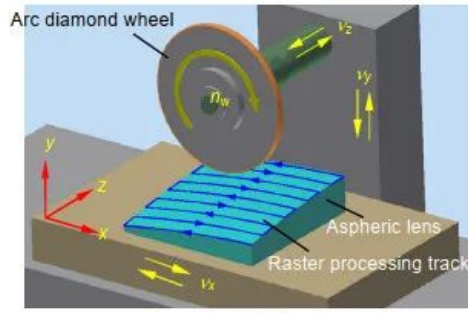


图2. 非球面平行磨削加工原理

采用超精密数控磨削技术实现非球面元件的成形加工，尤其是异形非旋转对称非球面，具有材料去除速率快、面形精度高、便于实现自动化批量制造等优点。加工过程中，元件表面点坐标和砂轮运动控制点坐标具有精确的传递函数关系，非球面的成形精度主要取决于砂轮的圆弧轮廓精度和机床的运动控制精度。

许乔研究员团队采用对滚研磨的方式对圆弧砂轮进行在位/离线修整[5]，采用对滚研磨修整后，金刚石砂轮圆弧轮廓误差小于 $4\ \mu\text{m}$ ，圆度误差小于 $1.5\ \mu\text{m}$ 。

此外，该团队联合厦门大学自主研制了大口径非球面光学元件超精密数控磨削机床，该机床定位精度优于 $2\ \mu\text{m}$ ，重复定位精度优于 $1\ \mu\text{m}$ 。

超精密确定性抛光技术与装备

1) 气囊高效抛光技术与装备

在保持初始磨削成形精度的基础上，如何高效去除磨削加工残余表面/亚表面缺陷层，并使元件达到纳米级表面粗糙度，是非球面批量制造效能提升的关键问题之一。目前，气囊抛光是非球面保形抛光的重要手段之一，对非球面磨削残余亚表面缺陷层快速去除以及低频误差高效收敛具有重要意义。

许乔研究员团队目前开展的气囊高效抛光技术研究工作主要集中在以下3个方面：

- 非球面气囊抛光进动控制。
- 气囊抛光动态去除函数与面形误差预测。
- 气囊表面磨损与修整处理。

基于上述研究，该团队将气囊抛光技术应用于离轴楔形非球面聚焦透镜批量制造流程线中[6]，采用与厦门大学联合研制的7轴5联动数控气囊抛光机床，保形抛光效率较前期工艺提高约3倍[7]。另外，大口径离轴楔形镜高效修形验证实验结果表明， $400\ \text{mm}$ 口径非球面平均经5次气囊修抛，面形精度可由初始的 5λ 快速收敛 0.33λ ，进一步修抛可以达到 0.1λ ，梯度可达到 $3.4\ \text{nm/cm}$ ，如图3所示。

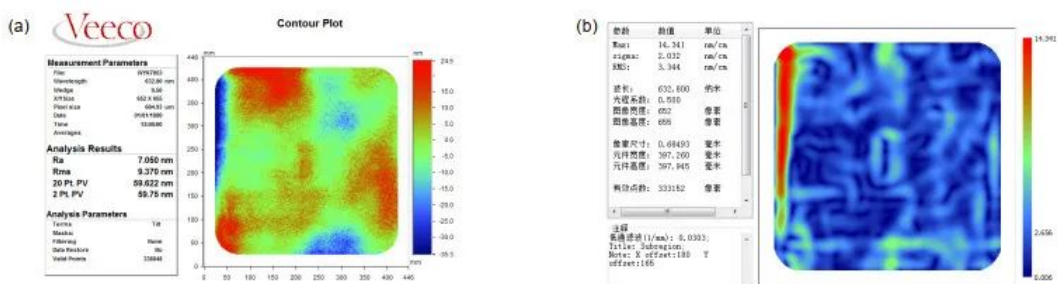


图3. 离轴楔形非球面透镜气囊抛光结果。(a)透过波前误差；(b)透过波前梯度

2) 确定性全口径抛光技术与装备

现阶段，全口径抛光的技术核心是在对大口径光学元件表面材料进行高效抛光去除的同时，进一步提高面形传递的可控性，从而实现全口径抛光面形精度的高效单向收敛。许乔研究员提出了“确定性全口径抛光”的技术概念。如图4所示，该技术采用确定性抛光盘测量与修整技术，严格控制除工件及抛光盘面形误差以外的其它所有非均匀材料去除工艺影响因素，基于复印机制实现抛光盘工件高精度面形精度传递，结合化学机械抛光去除机理，最终实现大口径光学元件高精度的快速收敛抛光。围绕上述目标的实现，重点解决了光学材料化学机械抛光微观材料去除机理、抛光材料非均匀性去除规律及影响因素识别、精密抛光元件材料去除效率优化、低频/中频表面精度确定性控制、全口径抛光元件表面缺陷控制等关键技术问题。

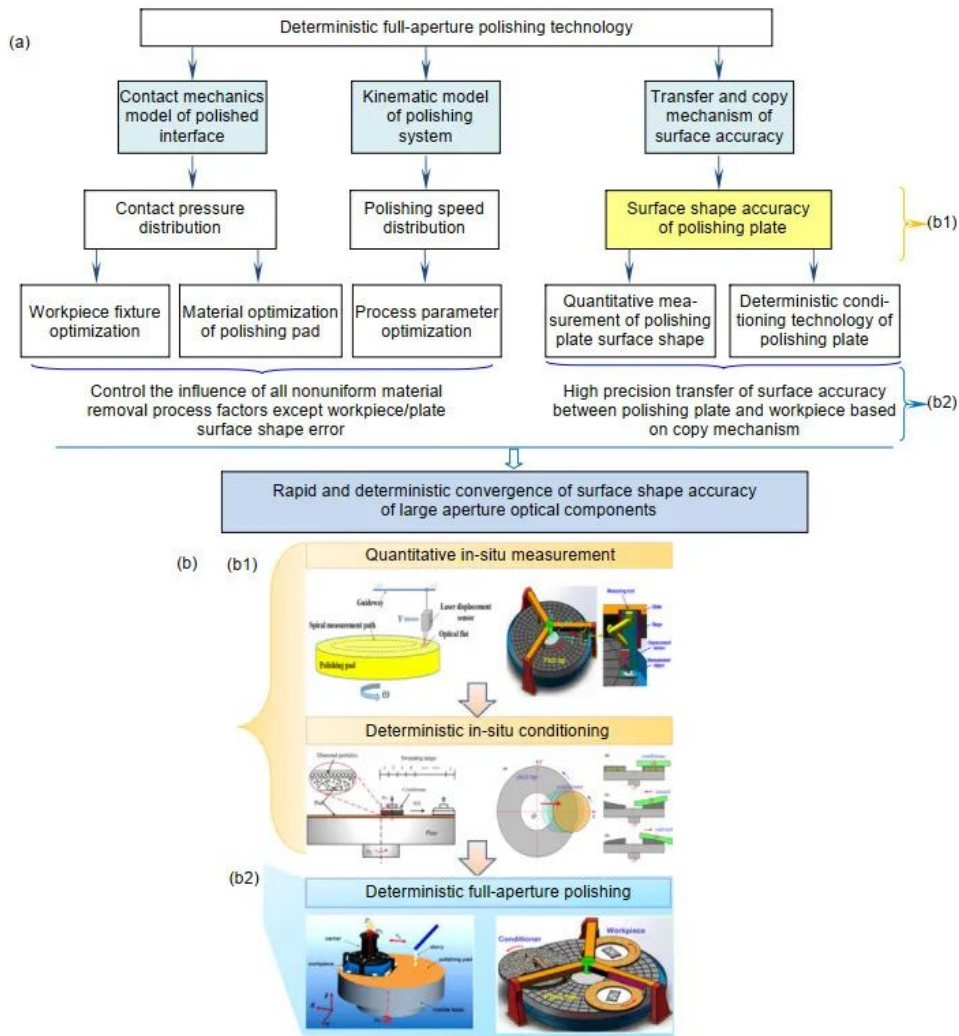


图4. 确定性全口径抛光中元件面形精度控制方法

3) 低调制度小工具数控抛光技术

沥青小工具抛光技术是最早发展的计算机控制光学表面成形技术(computer controlled optical surfacing, CCOS)。目前, 沥青小工具抛光技术在大口径强激光非球面光学元件制造流程中主要承担元件全频段误差收敛达标, 提高表面质量的功能。围绕低频误差高精度确定性修正、中高频误差均匀修正的工艺需求, 许乔研究员团队主要开展了以下两个方面的工作:

- 针对低频误差高精度确定性修正, 主要从实现去除函数稳定性控制方面开展研究。
- 针对中高频误差均匀修正, 建立了基于弹性理论的小工具数控抛光中高频误差参数化均匀修正模型。

通过以上研究成果的应用, 实现了400 mm×400 mm非球面楔形聚焦透镜高效加工, 透过波前误差 $PV \leq 0.1\lambda$ 、中频误差 $PSD1 \leq 1.76 \text{ nm}$, 满足设计指标要求。

4) 非球面磁流变加工技术

磁流变抛光技术(Magnetorheological finishing, MRF)是利用磁流变液在高强度梯度磁场约束作用下的流变性对元件进行抛光, 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, 加工确定性高、收敛效率稳定。为进一步提升非球面加工效果, 许乔研究员团队主要开展了以下工作:

- 非球面去除函数的理论模型。基于流体Reynolds方程及磁场理论建立了磁流变去除函数模型、不同曲率下的抛光斑接触模型, 结合非球面区域化建模方法, 实现了大口径非球面元件的动态去除函数加工能力。
- 非球面动态驻留时间求解。采用脉冲迭代法的求解思想将去除函数理想化为脉冲函数, 计算整个非球面元件加工的驻留时间, 建立动态驻留时间矩阵, 为非球面元件工艺算法提供技术支撑, 提高加工确定性。

在04专项的支持下, 许乔研究员团队联合中科院机械制造工艺研究所开展了磁流变机床国产化研制工作(如图5所示), 解决了近高斯分布强漏磁场的稳定控制、高粘度大比重抛光液有效匀化与精密传送等关键技术问题, 联合工艺研究成果, 对400 mm×400 mm非球面熔石英元件获得了波前 $PV \leq 0.1\lambda$ 、梯度 $GRMS \leq 2.5 \text{ nm/cm}$, 粗糙度 $\leq 0.2 \text{ nm}$ 的加工结果。



图5. 磁流变加工非球面实物图

结论

随着强激光系统综合性能不断提升, 迫切需要高性能、高精度以及高质量的光学元器件, 对强激光光学元件超精密加工典型需求主要呈现为:

- 光学超精密加工技术朝极端化方向发展, 如复杂曲面、纳米级形状精度、亚纳米级超光滑表面等;
- 光学元件表面无损化加工需求迫切, 需突破传统研抛加工机理与技术, 发展非接触能场加工等新原理、新方法与新技术, 实现近无缺陷制造;
- 光学元件批量制造效能亟待提高, 进一步提高装备可靠性与稳定性, 提升制造柔性化、智能化水平, 以建立支撑现代光学系统研制的快速响应能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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: An International Journal*, 2017, **21**(2): 202–222.
- [4] Guo Y B, Chen B K, Zhang Y, et al. Research on parallel grinding method of non-axisymmetric aspheric lens[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **17**(1): 149–151.
- [5] 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.
- [6] 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*, 2016, 10255: 102551C.
- [7] Ke X L, Wang C J, Guo Y B, et al. Modeling of tool influence function for high-efficiency polishing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **84**(9–12): 2479–2489.

综述原文

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.

在线阅读及免费下载网址:

<https://cn.ojournal.org/article/doi/10.12086/oe.2020.200135> (<https://cn.ojournal.org/article/doi/10.12086/oe.2020.200135>)

文章荐读

[OEE封面 | 大口径强激光光学元件超精密制造技术研究进展](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487188&idx=1&sn=14f6a91001bb34f2bc733afb87aedd59&chksm=f9f76180ce80e8963748ec96774a0504312) (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487188&idx=1&sn=14f6a91001bb34f2bc733afb87aedd59&chksm=f9f76180ce80e8963748ec96774a0504312)

[【中物院激光聚变研究中心】](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487188&idx=1&sn=14f6a91001bb34f2bc733afb87aedd59&chksm=f9f76180ce80e8963748ec96774a0504312) (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487188&idx=1&sn=14f6a91001bb34f2bc733afb87aedd59&chksm=f9f76180ce80e8963748ec96774a0504312)

[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](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487188&idx=1&sn=14f6a91001bb34f2bc733afb87aedd59&chksm=f9f76180ce80e8963748ec96774a0504312) [J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200135.

(<https://cn.ojournal.org/article/doi/10.12086/oe.2020.200135>)

[OEE | 复杂曲面铝反射镜超精密制造现状](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487256&idx=1&sn=e409b3fd833ee99d3b50ba365a812a2a&chksm=f9f7604cce80e95a5e042a659e05986e24) (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487256&idx=1&sn=e409b3fd833ee99d3b50ba365a812a2a&chksm=f9f7604cce80e95a5e042a659e05986e24)

[【国防科大戴一帆教授和彭小强研究员团队】](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487256&idx=1&sn=e409b3fd833ee99d3b50ba365a812a2a&chksm=f9f7604cce80e95a5e042a659e05986e24) (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487256&idx=1&sn=e409b3fd833ee99d3b50ba365a812a2a&chksm=f9f7604cce80e95a5e042a659e05986e24)

[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](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjIzNQ==&mid=2247487256&idx=1&sn=e409b3fd833ee99d3b50ba365a812a2a&chksm=f9f7604cce80e95a5e042a659e05986e24) [J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200135.

徐超, 彭小强, 戴一帆. 复杂曲面铝反射镜超精密制造现状[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200147. (<https://doi.org/10.12086/oe.2020.200147>)

OEE | 【复旦大学徐敏和张祥朝课题组】如何对复杂光学曲面进行高精度在位测量 (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjlzNQ==&mid=2247487237&idx=1&sn=e9ef5451c131a8f8e48cc4d92546e356&chksm=f9f76051ce80e9477d1e2c4f9eb0696b8fd9)

张祥朝, 徐敏. 面向精密制造的光学自由曲面在位偏折测量技术[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 190581. (<https://doi.org/10.12086/oe.2020.190581>)

《光电工程》2020年第8期先进光学制造专题导读 (http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxOTY2NjlzNQ==&mid=2247487135&idx=1&sn=baf039aed202e2e8a3c6e08475cf4da5&chksm=f9f761cbce80e8dd12fb568ebd744578ba0)

期刊

光电进展 (<https://www.ojournal.org/oea>)
光电工程 (<https://cn.ojournal.org/oe>)
光电科学 (<https://www.ojournal.org/oes>)
光电技术 (<https://www.ojournal.org/oet>)
光电研究评论 (<https://www.ojournal.org/oer>)

其他内容

新闻 (/index/list/news_cn)
学术活动 (/index/list/conferences_cn)
视频 (/index/list/video_cn)
联系我们 (/index/contact_us_cn)

作者须知

稿件模板 (/index/manuscript_template_cn)
版权协议 (/index/manuscript_template_cn)
补充材料说明 (/index/supplemental_material_cn)
投稿指南 (/index/submission_guidelines_cn)

条款和政策

使用条款 (/index/termsofuse_cn)
隐私政策 (/index/privacypolicy_cn)
Cookies使用 (/index/use_of_cookies_cn)

地址: 四川省成都市双流350信箱 《光电工程》编辑部 (邮编: 610209)

邮箱: oea@ioe.ac.cn (Opto-Electron. Adv.) (<mailto:oea@ioe.ac.cn>)

oes@ioe.ac.cn (Opto-Electron. Sci.) (<mailto:oes@ioe.ac.cn>)

oe@ioe.ac.cn (Opto-Electron. Eng.) (<mailto:oe@ioe.ac.cn>)

电话: 86-28-85100579

Copyright 2021 © Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences. All rights reserved.

蜀ICP备05022581号 (<https://beian.miit.gov.cn/#>)

