

超精密切削及磨削技术研究现状综述

何芊霓, 赵国瑜, 曹和宁, 郭 雪

红塔集团玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年1月11日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

随着我国大型光学项目如激光核聚变、大型天文望远镜和各类光机电产品的需求不断增长, 对高精度、高表面质量、多结构型的光学元件的需求越来越高, 因而需要更高的工艺水平。本文对过去十多年来超精密车削、磨削等光学超精密加工技术的研究进展进行了回顾, 介绍了目前超精密制造技术的最新发展, 其中包括了传统工艺的不断更新和新工艺的研发, 并对未来的发展方向进行了展望。

关键词

光学, 超精密车削, 超精密磨削

A Review of the Current Research on Ultra-Precision Cutting and Grinding Technology

Qianni He, Guoyu Zhao, Hening Cao, Xue Guo

Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi Cigarette Factory, Yuxi Yunnan

Received: January 11, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

With the growing demand for large-scale optical projects in China, such as laser nuclear fusion, large astronomical telescopes, and various optomechanical products, there is an increasing need for high-precision, high-surface-quality, and multi-structured optical components, which requires higher levels of processing technology. This paper reviews the research progress of ultra-precision machining technologies, such as ultra-precision turning and grinding, over the past decade, introduces the latest developments in ultra-precision manufacturing technologies—including the continuous updating of traditional processes and the development of new processes—and looks forward to future

development directions.

Keywords

Optics, Ultra-Precision Turning, Ultra-Precision Grinding

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近几年，随着激光聚变重大科学工程、高分辨率地球观测重大专项和各类光机电产品的需求不断增加，使得光学部件的高精度、高效率和低成本成为了必然趋势。晶体 KDP、CaF₂、FCD100 等光学材料在光学成像、大功率激光系统、激光核聚变、太阳能电池、空间观测、传感器、探测器等领域有着广阔的应用前景。光学部件的面形精度和表面质量一直是人们所关心的两个重要因素，其中一个因素直接影响着光学部件的功能，另一个因素则影响着光学部件的性能。尽管加工手段多种多样，但是很少有能同时保持高曲面形状和高表面质量的工艺。另外，对于已加工的光学元件，必须尽量减少表面和亚表面的损伤，这是当前超精密加工技术中普遍存在的问题。因此，光学加工是一门非常困难的工艺，也是一个国家的高精度加工技术的一个重要标志。本文综述了近十年光学超精密加工技术的研究情况，主要包括超精密切削、超精密磨削技术。

2. 超精密切削技术

超精密切削是现代光学技术中的一项重要技术。这一部分重点介绍了激光加工中的单点车削、超精密铣削的新进展。

2.1. 单点金刚石车削技术研究现状

单点金刚石车削是在精密机床的基础上，利用金刚石工具对光学部件进行切削的一种超精密加工技术[1]。传统的光学加工技术主要存在着加工精度不高、时间较长、技术人员对工艺技术的依赖性[2][3]。由于单点钻石车削技术具有高效率、高精度和高重复精度等特点，因此在光学部件的超精密加工中得到了广泛的应用[4]。

实验研究方面，众多学者通过实验方法直接探究金刚石单点切削工艺。郭海涛[5]利用正交实验法对 KDP 晶体进行了超精密切割实验，探索了随机过程中存在的数学统计规律，并建立影响因素对单点金刚石切削 KDP 晶体加工表面粗糙度值和质量优劣分布的预测模型。ZHANG 等[6]介绍了一种将高速单点金刚石研磨与精确压缩成型技术相结合的工艺，以制作自由曲面的非连续微透镜阵列。研究发现，与慢刀式伺服金刚石拉削技术相比，单点高速磨削对非连续特征的三维曲面具有更大的弹性。WEI 等[7]以渐变透镜为对象，对光学自由曲面金刚石车削过程中的刀具轨迹进行了优化，实验结果表明该算法是可行的。LEI 等[8]对大直径 KDP 激光透射波前表面的真空吸盘孔位的影响进行了研究。采用新型的吸盘，可以有效地提高吸盘的品质，同时也能抑制 KDP 单点切割时产生的边缘效应。Hatefi 等[9]研制了一种多轴自动混合控制器，该控制器可实现超声波振动系统、激光束系统、冷等离子体系统及在机探测系统，并取得了较好的实验效果。

理论建模与模拟分析是单点金刚石车削技术研究的重要手段。ZHANG 等[10]利用三维分子动态仿真

技术,对纳米级金刚石工具在单晶硅材料上的反复切割进行了实验,并对其相转变进行了分析。XU 等[4]对单点金刚石切削工艺中工件的表面粗糙度进行了控制,对工件材料特性、刀具参数、切削参数进行了系统的分析,并对 KDP、Si、Ge 等材料的表面粗糙度进行了控制。HE 等[11]提出了一种综合了运动学、塑性侧流、材料回弹、随机等影响的表面粗糙度预测模型。该模型对磨削加工过程中的表面粗糙度尺寸效应进行了研究,并用实验证明了该模型的正确性。HE 等[12]对影响金刚石加工表面形态的因素和相关理论模型进行了总结。ZHANG 等[13]根据裂纹的相对长度,从材料特性、刀具几何结构、切削参数和液体静压力的角度出发,建立了一种新的理论模型。

随着工艺水平的提升,单点切削复合切削技术在光学加工领域的应用日益广泛。另外,MOHAMMADI 等[14][15]将单点金刚石切割技术和微型激光辅助工艺相结合,对激光功率、横向进给速度、刀具前角等工艺参数进行了实验,并对加工后的工件进行了表面粗糙度分析。实验证明,利用这种方法可以得到符合光学性能的表面粗糙度。SHAHINIAN 等[16]还对微量激光对单点金刚石的切割工艺进行了研究,但是所用的材料是易碎的石英玻璃。实验证明,采用这种方法可以达到亚纳米级的表面粗糙度,达到了很好的效果。NAVARE 等[17]通过激光切割金刚石工艺,对金刚石工具材料自身的结晶方向和加工性能的影响进行了实验研究。ZHOU 等[18]将一种切割金刚石的方法和离子束刻蚀方法结合起来。利用所述的方法,在碳化硅和硅材料上制备了微透镜阵列。实验结果表明,这种新的工艺方法是可行的,并对其加工机制进行了说明。LEE 等[19]综述了热辅助微切削技术,着重介绍了热对工件材料性能的影响、热辅助加工模拟、感应加热、激光加热、等离子加热等技术,并对今后的发展前景作了展望。

2.2. 超精密铣削技术研究现状

超精密铣削是一种高效的光刻工艺。超精密金刚石铣削技术由超精密金刚石车削技术发展而来,包括超精密飞切铣削、超精密光栅铣削、超精密球头铣削等[20]。与超精密的金刚石车削不同,超精密的金刚石研磨是一种与主轴一起转动的间断加工工艺。超精密光栅铣削是一种利用多轴光栅铣削实现的高精度自由曲面加工技术,它可以在不进行后续加工的情况下,实现对非旋转对称曲面的加工[21]。

为降低加工误差,众多学者致力于误差模型建立与修正方法研究。ZHANG 等[22]对超精密光栅铣削主轴倾角误差的影响进行了分析,并给出了一种新的基于槽形切削的机床主轴倾斜误差的辨识与补偿方案。实验证明,采用这种方法可以较好地解决光学黄铜加工中的倾斜误差,并能有效地改善光学黄铜的加工尺寸精度。KONG 等[23]利用齐次转换矩阵法,建立了一种基于光栅的加工误差预测模型。曹义[24]提出了一种误差校正方法,并建立了一种工具误差模型。实验结果证明,采用这种方法可以有效地降低自由曲面光学元件的制造误差。

目前,光学元件表面质量改善与表面粗糙度模型研究备受关注。ZHANG 等[25]对材料滑动、尺寸效应、刀具磨损等因素的影响进行了分析,发现材料滑动会引起曲面产生,尺寸效应会使刀具的表面粗糙度增大,刀具磨损则会使刀具的几何形态发生变化,进而影响工件的表面粗糙程度。WANG 等[26]对光栅铣削加工中的光学材料的影响进行了分析,并以此为依据,建立了一种用于测量光栅铣削加工表面粗糙度的新方法。WANG 等[27]通过建立包括切削参数、刀具轨迹、刀具几何参数、工件尺寸和机床性能在内的多个参数的三维表面粗糙度预测模型[27],能够有效地改善零件的加工质量和效率。

此外,光学元件加工系统设计相关研究也取得了一定进展。SUN 等[28]提出一种具有高度弹性的刀具轨迹规划算法功能的自修正金刚石研磨系统[28],能够实现更平滑和均匀的表面品质。STDM 的自动调整功能相对于常规铣削,能够显著地增加平均进料速度,保证平顺性,从而提高了加工效率。

3. 超精密磨削技术

超精密研磨技术是现代光学技术中的一项重要技术。这个部分重点阐述了近年来国内外关于光学部

件超精密磨削技术的研究现状，主要是斜轴磨削、超声振动磨削。

3.1. 斜轴磨削技术研究现状

根据研磨材料的差异，需选择对应的研磨工艺。在常规非球面加工中，依据砂轮与工件转动轴线的相对运动关系，可将磨削工艺分为平行磨削、横向磨削、斜轴线磨削三类。

平行磨削法是由庄司克雄[29]、SAEKI[30]等人所提出的一种超精密磨削技术，目前国内已有不少学者对此进行了研究，例如厦门大学 WANG 等[31]。采用平行研磨方法可以提高砂轮的使用寿命，但必须对球头砂轮进行精加工，而对球头砂轮的精加工则比较困难。此外，对深径比较大的工件进行研磨时，其工件容易发生干扰。侧向研磨是一种常用的研磨工艺，它在大直径非球面透镜、光学模具中得到了广泛的应用。侧向研磨方法适用于凸表面的加工，具有安装方便、刀具轨迹简单、仅需两个轴联动的特点。但对砂轮的直径有很大的限制，尤其是在凹面加工时，砂轮的直径必须比工件的最小曲率半径要小。

3.2. 超声振动磨削技术研究现状

超声振动磨削是一种复杂的研磨工艺，受高频振动影响，其运动特征与切削机理与常规切削方法存在显著差异。超声振动在提高加工效率、降低切削力与切削温度、改善排屑效果及冷却润滑性能等方面具有突出优势[32]。此外，在超声振动辅助磨削过程中，高频振动会改变磨具运动特性，直接影响材料去除时裂纹的产生与扩展，同时改变材料去除方式的临界负荷与临界切削条件，进而提高材料去除率。通过超声波振动诱发的裂缝抑制效应，可有效减少中、横向裂缝的发展，降低常规工艺中单一裂缝导致的脆性断裂，在一定程度上抑制表面微观裂纹的扩散，同时对减小亚表面横向裂缝尺寸及由横向裂缝引起的单扇形片状脆剥落破坏程度具有积极作用。

在原理建模方面，2016 年，ZHOU 等[33]对超声振动参数、磨削参数、工作物料的内在性能等因素进行了分析。通过分析玻璃在韧性和脆性两种情况下的切割能量消耗，给出了一种用于预测超声振动辅助磨削过程中玻璃延性-脆性过渡的临界切削深度的方法。在韧性与脆性模式下，临界切削深度是在比能耗曲线交叉点上进行的。赵培铁[34]于 2017 年根据切削深度和塑性去除模式对切削率的影响，通过对 BK7 光学玻璃脆-塑性过渡临界切削深度的预测，通过实验证，为进一步研究和分析亚表面裂纹破坏提供了理论基础。孙国燕[35]于 2019 年进行了低膨胀玻璃 Zerodur 和 ULE 的微观压痕实验、普通刻划和轴向振动刻划试验，对材料的脆塑性特性进行了数值模拟，并对单磨粒的动力去除和去除方法进行了研究，着重分析了单磨削中轴向超声振动、脆塑性去除模式、材料特性等因素对磨削特性的影响，最后提出了磨削力、Ra 和亚表面裂纹最大深度预测模型。这为圆周研磨过程的优化提供了理论依据，同时也为实现大批量、高质量、短周期、低成本的低膨胀玻璃光学元件制造提供了依据。

在技术研究进展方面，郭兵[36]于 2012 年开发了一套适合于超硬微结构光学菜单面的超声波振动研磨系统，并对其进行了超声振动研磨，并对其在微结构表面上的研磨特性进行了研究。通过对超声振动参数、磨削工艺参数和表面结构参数等因素的分析，提出了一种基于超声振动磨削工艺的新工艺方案。并对具有代表性的超硬微结构的光学菜单表面进行了超声波振动研磨。采用非粘结剂碳化钨、碳化硅、氮化硅等超硬型模具，其微观组织面由微弧槽、闪耀光栅、金字塔矩阵、阶梯形光栅构成。许陆昕[37]在 2019 年为解决碳化硅陶瓷研磨过程中遇到的问题，开展了一项以超声波振动研磨为基础的超声波振动研磨工艺，并对其表面创制机制进行了研究。利用超声波振动研磨技术可以很好地解决小直径砂轮对碳化硅的研磨问题，从而改善其表面质量，提高其研磨效率。

最后，是超声波振动研磨有关的工艺系统的设计。2018 年，周莲[38]对碳化硅材料的超声波振动研磨体系的组成和功能需求进行了研究，并对其进行了结构设计；利用全波长超声波传感器的原理，对其

进行了结构计算；根据电磁感应理论，研制了一种新的无接触电信号，它能有效地克服传统的摩擦大、发热严重、振动大和转速低等缺点。

4. 相关支撑技术

4.1. 确定性抛光技术

确定性抛光技术是光学元件超精密加工的关键后续工序，其核心优势在于能够精准控制材料去除量，实现对磨削或切削后工件表面误差的修正与表面质量的提升。该技术基于预设的去除函数，通过数值计算规划抛光路径与工艺参数，可针对性地消除前道工序残留的表面粗糙度、面形误差及亚表面损伤。

目前主流的确定性抛光技术包括离子束抛光、磁流变抛光、气囊抛光等。离子束抛光利用高能离子轰击工件表面，通过物理溅射实现原子级别的材料去除，具有加工精度高(面形误差可修正至 $\lambda/50$ 以上， $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)、无机械应力、亚表面损伤极小等特点，适用于大口径高精度光学元件的最终精修，如激光核聚变系统中的关键透镜加工。磁流变抛光则借助磁流变液在磁场作用下形成的柔性研磨刷，实现对复杂曲面的自适应抛光，其材料去除率适中，表面粗糙度可降至 $\text{Ra} \leq 0.5 \text{ nm}$ ，广泛应用于非球面镜、自由曲面镜的批量加工。气囊抛光通过柔性气囊与抛光垫的组合，利用气压调节抛光压力，兼具柔性与可控性，能有效改善工件边缘效应，适用于各类光学元件的中高精度抛光工序。

确定性抛光技术与超精密切削、磨削技术形成紧密协同：切削/磨削技术负责快速成形与粗加工，保证加工效率与基本面形；确定性抛光技术则承担精度修正与表面优化，确保最终产品满足光学性能要求，二者共同构成光学元件超精密加工的核心工艺链。

4.2. 超精密测量技术

超精密测量技术是光学超精密加工过程监控、质量评估与工艺优化的基础，其测量精度直接决定了加工技术的上限。该技术需实现对工件面形精度、表面粗糙度、亚表面损伤及几何尺寸的高精度、非接触式检测，为加工工艺参数调整与误差补偿提供数据支撑。

在面形精度测量方面，干涉测量技术是当前的主流方法，如斐索干涉仪、泰曼-格林干涉仪等，可实现纳米级别的面形误差检测(测量精度达 $\lambda/100$)，能够实时监测切削/磨削及抛光过程中工件面形的变化。对于大口径非球面元件，拼接干涉测量与激光跟踪测量技术相结合，可有效解决单次测量范围不足的问题，实现全口径面形的高精度重构。

表面粗糙度与亚表面损伤测量方面，原子力显微镜(AFM)可实现纳米级甚至原子级的表面形貌表征，表面粗糙度测量精度达 0.01 nm ，适用于超光滑表面的质量评估；共聚焦显微镜则能实现表面三维形貌的快速扫描与分析，兼顾测量精度与效率。亚表面损伤检测常用方法包括截面显微观察法、化学蚀刻法及激光超声检测法，其中激光超声检测法为非接触式检测，可实现对工件亚表面损伤层深度的无损评估，检测精度达 $1 \mu\text{m}$ 。

超精密测量技术贯穿于光学元件加工的全流程：加工前用于毛坯件质量检测与基准校准；加工过程中通过在机测量实现工艺参数的实时调整与误差补偿；加工后用于成品质量的全面评估与验收，是保障超精密加工精度与稳定性的关键支撑。

5. 核心加工技术系统对比及应用选择

超精密切削(以金刚石车削为典型代表)与超精密磨削作为光学元件制造的核心加工技术，在工艺原理、性能表现及应用场景上存在本质差异。本节从加工效率、成本控制、精度水平、材料普适性及亚表面损伤(SSD)五个关键维度进行系统对比，结合大口径非球面反射镜等典型光学元件的加工需求，分析技

术选择的核心逻辑。

5.1. 核心性能维度对比

5.1.1. 加工效率与材料去除率

超精密切削(如金刚石车削)采用单点切削的连续材料去除模式,具备显著的效率优势。对于金属基光学元件(如铝合金、无氧铜反射镜),其材料去除率可达 $10^{-3}\sim10^{-2}\text{ mm}^3/(\text{s}\cdot\mu\text{m})$,加工直径1 m 级的非球面反射镜时,粗加工至半精加工阶段仅需数十小时。超精密磨削(含弹性磨削、ELID 磨削等)采用磨粒离散切削机制,即便优化磨削路径间距,材料去除率仍普遍低于 $10^{-4}\text{ mm}^3/(\text{s}\cdot\mu\text{m})$,相同尺寸的玻璃基非球面元件磨削加工周期通常是切削加工的3~5倍。但需注意,对于硬度超过68HRC 的硬化材料或脆性陶瓷,磨削通过延性域加工模式可实现稳定去除,而切削易导致刀具崩损,此时磨削反而成为效率更优的选择。

5.1.2. 成本构成与经济性

成本差异主要源于设备投入、工具消耗及设置时间三方面。

设备与工具成本:金刚石车削依赖天然金刚石刀具(单刃刀具成本约数万元),但机床设置简单,标准CNC 车床经精度升级即可适配,初始投入较低;超精密磨削需专用磨床(如OAGM2500型光学磨床)及弹性磨削工具、砂轮等耗材,砂轮单次更换成本达数千元且寿命有限,设备初始投入通常是车削机床的2~3倍。

生产效率成本:小批量生产(≤ 5 件)时,金刚石车削的短设置时间(通常 < 2 小时)使其单位成本比磨削低30%~50%;大批量生产时,磨削的高一致性可抵消初始设置成本(磨削设置时间通常 > 8 小时),但整体成本仍高于车削约15%~20%。

5.1.3. 加工精度与表面质量

两种技术的精度表现呈现差异化优势。

形状精度:金刚石车削可实现亚微米级形状精度($P\text{-}V$ 值 $\leq 0.5\text{ }\mu\text{m}$),对于旋转对称的大口径非球面反射镜,面形误差可控制在 $\lambda/20$ ($\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)以内,尤其适合金属基元件的高精度成形;超精密磨削通过Preston 模型与表面轮廓预测模型优化,形状精度可达 $0.5\sim1\text{ }\mu\text{m}$ ($P\text{-}V$ 值),当前超精密磨削已能加工出圆度 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 、尺寸精度 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的圆柱形零件,其中ELID 磨削结合数控抛光后,玻璃基元件面形误差可收敛至 0.26λ ,但需多工序配合才能达到切削的单工序精度。

表面粗糙度:磨削的多磨粒微切削特性使其更易获得低粗糙度表面,弹性磨削工具加工后表面粗糙度 $R_a\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$,经抛光后可降至 $R_a\leq 1\text{ nm}$,部分先进磨削工艺甚至能实现 $R_a 0.005\mu\text{m}$ 的表面质量;金刚石车削表面粗糙度通常为 $R_a 0.05\sim0.2\text{ }\mu\text{m}$,虽能满足一般光学需求,但难以达到磨削的超光滑表面质量。

5.1.4. 材料普适性

超精密切削:主要适用于硬度 $\leq 68\text{HRC}$ 的金属材料(如铝、铜、硬化钢)及部分软质晶体,对硬度 $> 68\text{HRC}$ 的陶瓷、硬质合金等难加工材料适应性差,刀具磨损率极高。近年来通过镀膜技术改善金刚石刀具性能,其在加工硬化钢材时的磨耗问题得到一定缓解,但对BK7、K9 等脆性光学玻璃仍难以适配,易产生崩边缺陷。

超精密磨削:通过磨粒的微量切削与延性域加工机制,可处理从软质金属到硬质陶瓷、玻璃、复合材料等多种材料,尤其适合大口径光学元件中常用的脆性材料(如KDP 晶体、熔石英)。例如,ELID 磨削技术已成功应用于激光核聚变系统中的方形非球面透镜加工,解决了切削技术难以处理的脆性材料成形问题。

5.1.5. 亚表面损伤层深度

亚表面损伤是影响光学元件强度与抗激光损伤阈值的关键因素，两种技术的损伤特性差异显著。

超精密切削：切削过程中材料以塑性变形为主，亚表面损伤层较浅，通常为 $1\sim10\text{ }\mu\text{m}$ ，主要表现为残余应力引起的变形层，无明显微裂纹缺陷，这与单点金刚石切削中微观材料去除的可控性密切相关。

超精密磨削：磨削过程中磨粒对脆性材料的压痕挤压易产生径向裂纹，亚表面损伤层深度可达 $10\sim100\text{ }\mu\text{m}$ ，分为缺陷层($1\sim100\text{ }\mu\text{m}$)与变形层($100\sim200\text{ }\mu\text{m}$)。通过超声振动辅助磨削等优化工艺，可有效降低亚表面损伤程度，使损伤层深度控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内，但仍需后续抛光工序去除损伤层，增加了加工复杂度。

5.2. 典型光学元件的技术选择案例——大口径非球面反射镜

大口径非球面反射镜(直径 $>1\text{ m}$)的加工技术选择需结合材料特性、性能要求与经济性综合判断，具体决策逻辑如下。

5.2.1. 金属基大口径非球面反射镜：优先选择金刚石车削

金属基反射镜(如铝合金、无氧铜材质)具有良好的塑性与可切削性，金刚石车削的优势体现在：① 加工效率高，单工序即可完成从粗加工到半精加工的成形，避免磨削的多工序迭代；② 亚表面损伤层浅($\leq 10\text{ }\mu\text{m}$)，无需复杂的后续损伤去除工序，降低生产成本；③ 设备设置灵活，适合单件或小批量生产的科研型需求。例如，美国 LODTM 金刚石立式车床采用金刚石车削技术加工直径 4 m 的金属非球面反射镜，面形误差控制在 $\lambda/4$ 以内，加工周期仅为磨削方案的 $1/3$ ，这类技术已成功应用于天体望远镜的大型抛物面镜加工。

5.2.2. 玻璃/陶瓷基大口径非球面反射镜：优先选择超精密磨削

玻璃、陶瓷等脆性材料的高硬度($>\text{HRC68}$)与低韧性使其难以通过切削加工成形，超精密磨削成为必然选择：① 采用 ELID 磨削 + 数控抛光的复合工艺，可实现面形误差 $\leq 0.26\lambda$ 、表面粗糙度 $\text{Ra} \leq 1\text{ nm}$ 的高精度要求，满足强激光系统的使用需求；② 弹性磨削工具的自适应能力强，可有效补偿大口径元件的重力变形误差，通过路径间距优化降低边缘效应影响；③ 材料去除过程稳定，避免切削导致的崩边缺陷。例如，我国长春光机所采用超精密磨削与 CCOS 抛光结合技术，加工直径 800 mm 的玻璃非球面反射镜，面形误差小于 30 nm (均方根值)，成功应用于天文望远镜系统。

6. 总结与展望

本文系统综述了近十年光学超精密加工技术的研究进展，重点阐述了超精密切削与超精密磨削技术的核心研究成果，补充了确定性抛光与超精密测量等支撑技术的关键信息，明确了各技术在光学元件加工体系中的定位与协同作用。

在超精密切削技术方面，单点金刚石车削凭借高效率、高精度优势成为金属基光学元件加工的主流技术，通过实验研究、理论建模与复合工艺创新，其加工精度与材料适应性不断提升；超精密铣削技术在非旋转对称曲面加工中表现突出，误差模型建立与修正、表面粗糙度控制及加工系统优化是当前研究的核心方向。

在超精密磨削技术方面，斜轴磨削技术根据工件形状与材料特性展现出差异化应用场景，超声振动磨削技术通过原理建模、工艺优化与系统设计，在脆性材料加工中实现了效率与质量的同步提升，有效降低了亚表面损伤。

确定性抛光技术与超精密切削、磨削技术形成互补，实现了光学元件从成形到精度修正的完整工艺链；超精密测量技术贯穿加工全流程，为工艺优化与质量控制提供了关键数据支撑。通过系统对比可知，

超精密切削在金属材料加工效率、成本控制方面具有优势，超精密磨削则在脆性材料适应性、表面质量方面表现突出，技术选择需结合工件材料、性能要求与生产规模综合判断。

参考文献

- [1] Ikawa, N., Donaldson, R.R., Komanduri, R., König, W., Aachen, T.H., McKeown, P.A., *et al.* (1991) Ultraprecision Metal Cutting—The Past, the Present and the Future. *CIRP Annals*, **40**, 587-594. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61134-2](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61134-2)
- [2] 戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008(6): 1131-1135.
- [3] 唐瓦. 离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [4] Xu, H., Zhang, X., Xu, M. and Li, X. (2012) Study on the Control of Surface Roughness in Single Point Diamond Turning. *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*, Xiamen, 26-29 April 2012, 324-330. <https://doi.org/10.1117/12.975196>
- [5] 郭海涛. KDP 晶体单点金刚石切削表面质量分析与工艺参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [6] Zhang, L., Zhou, W., Naples, N.J. and Yi, A.Y. (2018) Fabrication of an Infrared Shack-Hartmann Sensor by Combining High-Speed Single-Point Diamond Milling and Precision Compression Molding Processes. *Applied Optics*, **57**, Article 3598. <https://doi.org/10.1364/ao.57.003598>
- [7] Wei, Y., Zhai, P., Chen, X. and He, L. (2020) Study on Design and Diamond Turning of Optical Freeform Surface for Progressive Addition Lenses. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/2850606>
- [8] Lei, X., Zhang, S., Wang, S., Zhang, J., Su, W., Zhang, L., *et al.* (2020) Influence of the Arrangement of Vacuum Chuck Holes on the Transmittance Wavefront of Large-Aperture KDP in Single-Point Diamond Turning. *Applied Optics*, **59**, 3619-3623. <https://doi.org/10.1364/ao.382447>
- [9] Hatefi, S. and Abou-El-Hossein, K. (2019) Feasibility Study on Design and Development of a Hybrid Controller for Ultra-Precision Single-Point Diamond Turning. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, **13**, 121-128.
- [10] Zhang, L., Zhao, H., Yang, Y., Huang, H., Ma, Z. and Shao, M. (2014) Evaluation of Repeated Single-Point Diamond Turning on the Deformation Behavior of Monocrystalline Silicon via Molecular Dynamic Simulations. *Applied Physics A*, **116**, 141-150. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8243-4>
- [11] He, C.L., Zong, W.J. and Sun, T. (2016) Origins for the Size Effect of Surface Roughness in Diamond Turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **106**, 22-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.004>
- [12] He, C. and Zong, W. (2019) Influencing Factors and Theoretical Models for the Surface Topography in Diamond Turning Process: A Review. *Micromachines*, **10**, Article 288. <https://doi.org/10.3390/mi10050288>
- [13] Zhang, S., Zhang, H. and Zong, W. (2019) Modeling and Simulation on the Effect of Tool Rake Angle in Diamond Turning of KDP Crystal. *Journal of Materials Processing Technology*, **273**, Article 116259. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116259>
- [14] Mohammadi, H., Ravindra, D., Kode, S.K. and Patten, J.A. (2015) Experimental Work on Micro Laser-Assisted Diamond Turning of Silicon (111). *Journal of Manufacturing Processes*, **19**, 125-128. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.007>
- [15] Mohammadi, H., Poyraz, H.B., Ravindra, D. and Patten, J.A. (2014) Single Point Diamond Turning of Silicon by Using Micro-Laser Assisted Machining Technique. *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference*, Detroit, 9-13 June 2014, 8 p. <https://doi.org/10.1115/msec2014-4138>
- [16] Shahinian, H., Navare, J.A., Bodlapati, C., Zaytsev, D., Kang, D. and Ravindra, D. (2020) Micro Laser Assisted Single Point Diamond Turning of Brittle and Hard Materials. *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXV*, San Francisco, 1-6 February 2020, 111-116. <https://doi.org/10.1117/12.2547009>
- [17] Navare, J., Kang, D., Zaytsev, D., Bodlapati, C., Ravindra, D. and Shahinian, H. (2020) Experimental Investigation on the Effect of Crystal Orientation of Diamond Tooling on Micro Laser Assisted Diamond Turning of Zinc Sulfide. *Procedia Manufacturing*, **48**, 606-610. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.088>
- [18] Zhou, T., Xu, R., Ruan, B., He, Y., Liang, Z. and Wang, X. (2020) Study on New Method and Mechanism of Microcutting-Etching of Microlens Array on 6h-Sic Mold by Combining Single Point Diamond Turning with Ion Beam Etching. *Journal of Materials Processing Technology*, **278**, Article 116510. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116510>
- [19] Lee, Y.J., Chaudhari, A., Zhang, J. and Wang, H. (2019) Thermally Assisted Microcutting of Calcium Fluoride Single

- Crystals. In: Zhang, J., Guo, B. and Zhang, J., Eds., *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, Springer, 77-102. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3335-4_4
- [20] Zhang, S., Zhou, Y., Zhang, H., Xiong, Z. and To, S. (2019) Advances in Ultra-Precision Machining of Micro-Structured Functional Surfaces and Their Typical Applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **142**, 16-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.04.009>
- [21] 李荣彬, 孔令豹, 张志辉, 等. 微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 144-155.
- [22] Zhang, G., To, S. and Xiao, G. (2014) A Novel Spindle Inclination Error Identification and Compensation Method in Ultra-Precision Raster Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **78**, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.12.001>
- [23] Kong, L.B. and Cheung, C.F. (2012) Prediction of Surface Generation in Ultra-Precision Raster Milling of Optical Freeform Surfaces Using an Integrated Kinematics Error Model. *Advances in Engineering Software*, **45**, 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.09.011>
- [24] 曹义. 超精密铣削加工自由曲面光学组件误差补偿方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(11): 96-98.
- [25] Zhang, G. and To, S. (2019) Cutting Mechanism and Surface Formation of Ultra-Precision Raster Fly Cutting. In: Zhang, J., Guo, B. and Zhang, J., Eds., *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, Springer, 103-127. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3335-4_5
- [26] Wang, S.J., To, S. and Cheung, C.F. (2013) An Investigation into Material-Induced Surface Roughness in Ultra-Precision Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **68**, 607-616. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4781-8>
- [27] Wang, S., Chen, X., To, S., Chen, X., Liu, Q. and Liu, J. (2016) Modelling and Prediction of the Effect of Cutting Strategy on Surface Generation in Ultra-Precision Raster Milling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **30**, 895-909. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2016.1239029>
- [28] Sun, Z., To, S., Wang, S. and Du, J. (2020) Development of Self-Tuned Diamond Milling System for Fabricating Infrared Micro-Optics Arrays with Enhanced Surface Uniformity and Machining Efficiency. *Optics Express*, **28**, 2221-2237. <https://doi.org/10.1364/oe.382672>
- [29] 庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [30] Saeki, M., Kuriyagawa, T. and Syoji, K. (2002) Machining of Aspherical Molding Dies Utilizing Parallel Grinding Method. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **68**, 1067-1071. <https://doi.org/10.2493/jjspe.68.1067>
- [31] Wang, Z. and Guo, J. (2015) Research on an Optimized Machining Method for Parallel Grinding of F-Θ Optics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **80**, 1411-1419. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7042-1>
- [32] Liu, K., Li, X.P. and Rahman, M. (2008) Characteristics of Ultrasonic Vibration-Assisted Ductile Mode Cutting of Tungsten Carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **35**, 833-841. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0761-6>
- [33] Zhou, M. and Zhao, P. (2016) Prediction of Critical Cutting Depth for Ductile-Brittle Transition in Ultrasonic Vibration Assisted Grinding of Optical Glasses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **86**, 1775-1784. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8274-9>
- [34] 赵培轶. BK7 光学玻璃超声振动磨削脆塑性转变及加工质量研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [35] 孙国燕. 低膨胀光学玻璃的超声振动磨削机理及工艺技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019.
- [36] 郭兵. 超硬微结构光学单面的超声振动磨削加工技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [37] 许陆昕. 碳化硅陶瓷超声振动磨削表面质量研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [38] 周莲. SiC 光学组件超声振动磨削系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.