

文章编号 1004-924X(2026)10-1546-10

## 激光原位辅助切削刀具设计及其应用验证

刘俊龙<sup>1,2</sup>, 朱梦瑶<sup>1,2</sup>, 余莉<sup>1,2</sup>, 周妍希<sup>1,2</sup>, 张寒<sup>1,2</sup>, 陈肖<sup>3</sup>, 林创挺<sup>4\*</sup>

(1. 先进光学石英材料技术湖北省重点实验室(湖北菲利华石英玻璃股份有限公司),

湖北荆州 434000;

2. 特种光学玻璃材料技术创新中心,湖北荆州 434000;

3. 湖北工业大学机械工程学院,湖北武汉 430068;

4. 集美大学海洋装备与机械工程学院,福建厦门 361021)

**摘要:**针对硬脆材料激光原位辅助超精密切削过程中,激光辐照后刀面易引发热累积、加剧刀具磨损、导致加工稳定性和表面质量下降的问题,设计一种激光仅从前刀面出射的新型金刚石刀具,以提升长距离加工过程中的表面质量与刀具耐磨性能。基于光学折射与全反射理论,建立激光在金刚石刀具内的传播模型,分析激光入射角、刀具前角和后角之间的几何约束关系,并通过刀具结构设计实现激光出射位置的精准调控。结合光学仿真与激光功率标定,对新型刀具与传统刀具的光束传递特性进行对比分析。在相同切削参数条件下,开展熔石英端面激光原位辅助切削对比实验,系统研究不同切削距离下的加工表面粗糙度及刀具磨损行为。结果表明,在相同输入激光功率下,新型刀具的出射激光功率整体高于传统刀具,表明其光束传递效率得到改善。在切削距离为 1.0 km 时,两种刀具加工所得表面粗糙度  $S_a$  差异较小,而当切削距离达到 3.0 km 时,新型刀具加工表面粗糙度  $S_a$  为 31.19 nm,传统刀具为 49.91 nm,表面粗糙度降低幅度约为 37.5%。刀具磨损形貌分析显示,两种刀具均以后刀面沟槽磨损为主要形式,但新型刀具对应的后刀面磨损宽度相对较小。通过刀具结构设计实现激光仅从前刀面出射,可有效抑制后刀面热累积,减缓刀具磨损,在一定切削距离范围内显著提升熔石英激光原位辅助切削的加工稳定性和表面质量,为硬脆材料的高质量、长距离超精密加工提供了一种有效的刀具设计思路。

**关键词:**熔石英;激光原位辅助切削;表面质量;刀具磨损

**中图分类号:**TH703;TP27 **文献标识码:**A

**doi:**10.37188/OPE.20263410.1546

**CSTR:**32169.14.OPE.20263410.1546

## Design of tool for in-situ laser assisted diamond cutting and its application verification

LIU Junlong<sup>1,2</sup>, ZHU Mengyao<sup>1,2</sup>, YU Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Yanxi<sup>1,2</sup>, ZHANG Han<sup>1,2</sup>,

CHEN Xiao<sup>3</sup>, LIN Chuangting<sup>4\*</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Optical Quartz Materials Technology

(Hubei Feilihua Quartz Glass Co., Ltd.), Jingzhou 434000, China;

2. Innovation Center for Special Optical Glass Materials Technology, Jingzhou 434000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

4. College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

收稿日期:2026-03-01;修订日期:2026-03-19.

基金项目:2025年荆州市科技计划项目(No. 2025AA01)

\* Corresponding author, E-mail: linct@jmu.edu.cn

**Abstract:** During in-situ laser-assisted diamond cutting of hard and brittle materials, laser irradiation on the tool flank face may induce localized heat accumulation, resulting in aggravated tool wear, reduced machining stability, and degraded surface quality. To address this issue, a novel diamond cutting tool was designed to enable laser emission exclusively from the rake face, aiming to improve surface quality and tool wear resistance during long-distance machining. Based on optical refraction and total internal reflection theory, a laser propagation model within the diamond tool was established to analyze the geometric constraints among the laser incident angle, rake angle, and clearance angle. Precise control of the laser emission position was achieved through tool structural design. Optical simulations combined with laser power calibration were performed to compare the beam transmission characteristics of the novel tool with those of a conventional tool. Under identical cutting parameters, comparative in-situ laser-assisted diamond cutting experiments on fused silica were conducted to systematically investigate surface roughness and tool wear behavior at different cutting distances. The results showed that, at the same input laser power, the output laser power of the novel tool was generally higher than that of the conventional tool, indicating improved beam transmission efficiency. When the cutting distance is 1.0 km, the surface roughness  $S_a$  obtained using both tools is comparable. However, when the cutting distance reaches 3.0 km, the surface roughness  $S_a$  achieved by the novel tool is 31.19 nm, compared with 49.91 nm for the conventional tool, corresponding to a reduction of approximately 37.5%. Tool wear morphology analysis indicates that flank groove wear is the dominant wear mode for both tools, while the novel tool exhibits a smaller flank wear width. By enabling laser emission solely from the rake face through tool structural design, heat accumulation on the flank face is effectively suppressed. Tool wear is mitigated, and machining stability and surface quality are significantly improved within a certain cutting distance range. This study provides an effective tool design approach for high-quality, long-distance ultra-precision machining of hard and brittle materials.

**Key words:** fused silica; in-situ laser assisted diamond cutting; surface quality; tool wear

## 1 引 言

熔石英等硬脆材料由于具有优异的光学均匀性、低热膨胀系数以及良好的化学稳定性,被广泛应用于高能激光系统、精密光学仪器和先进光电装备等领域<sup>[1-2]</sup>。随着高端光学系统向高功率、高精度和复杂功能集成方向发展,熔石英等硬脆材料光学元件的结构形态日益复杂,对其表面质量、形貌精度提出了更高要求<sup>[3-5]</sup>。单点金刚石切削技术因其在加工效率、复杂面形一体化成形方面具有显著优势,被认为是复杂光学元件超精密加工的重要手段<sup>[6-7]</sup>。然而,硬脆材料室温下塑性变形能力有限,在常规切削条件下易发生脆性断裂,导致表面裂纹及亚表面损伤<sup>[8]</sup>。

激光原位辅助切削技术是近年来面向难加

工材料超精密切削而兴起的重要加工方式,激光光束穿过金刚石刀具并聚焦于工件切削区域,进而对工件材料进行加热,使得切削区域的材料局部软化和改性,从而改善表面质量,并有效延长刀具寿命<sup>[9-10]</sup>。该技术已在单晶硅、碳化钨、微晶玻璃等难加工材料的超精密加工中展现出显著优势<sup>[11-13]</sup>。Du 等人<sup>[14]</sup>基于有限元方法建立切削仿真模型,研究激光软化作用对高熵合金材料去除机理的影响,与传统切削工艺相比,激光原位辅助加工工艺显著降低了切削过程 Von-Mises 等效应力,从而提高了表面质量。激光原位辅助作用下,高熵合金加工表面质量优于 2 nm,比传统切削方式降低了 33.3%,刀具磨损长度从 255  $\mu\text{m}$  降低至 161  $\mu\text{m}$ 。Xu 等人<sup>[15-16]</sup>采用分子动力学仿真和实验相结合的方式研究了切削温度升高时单晶硅微纳尺度切削机理和亚表面损伤演化

规律,随着切削温度的升高,非晶层的剪切抗力大大降低,润滑作用更加明显,亚表面损伤降低,在激光原位辅助作用下,单晶硅临界塑脆转变深度显著提高,由小于 100 nm 提升至 395 nm。Lin 等人<sup>[17-19]</sup>开展了熔石英激光原位切削工艺研究,验证了激光原位诱导下材料的可加工性得到了有效提升,在 20 W 激光辅助下,熔石英临界塑脆转变深度从无激光辅助时的 82.06 nm 增大至 324.03 nm,提高了 294.9%。通过工艺优化,在最优工艺条件下,激光原位辅助切削可实现熔石英加工表面粗糙度  $S_a$  约 10 nm 的高质量加工,但随着切削距离增大,由于切削区域温度较高,刀具磨损仍较为严重。

在激光原位辅助切削中,激光经金刚石刀具内部传递并在刃口附近出射,在改善材料切削性能的同时也不可避免地引入热效应。现有刀具结构下,激光可能同时作用于前、后刀面,使后刀面局部热量积聚,从而加速刀具磨损并影响加工稳定性。随着切削过程的持续,刀具磨损逐渐累积,材料去除状态发生变化,最终导致加工质量难以保持稳定。因此,仅通过调节激光功率或工艺参数难以从根本上解决刀具磨损问题,从刀具结构层面对激光出射行为进行优化是减缓切削过程后刀面磨损的有效方法。

光学仿真是激光原位辅助切削专用刀具设计的重要方式,可以实现光束在刀具内部传播路径的可视化。美国 Microlam 公司 Shahinian 等人<sup>[20]</sup>采用 Zemax 光学分析软件建立了可预测光斑形状的光束模型,通过所构建的模型得到距离刀具刃口 5 mm 位置处的光斑形状为月牙形,激光功率利用率约为 50%。Zhang 等人<sup>[21]</sup>通过光学几何分析、光学模拟和实验验证,探讨了激光原位辅助金刚石刀具内激光光束的传播特性,激光束从刀具前刀面出射受到刀具结构的限制,光束在刀具中会发生耗散,约有 53.8% 的激光能量可以被利用。Ke 等人<sup>[22]</sup>采用理论分析与仿真验证相结合的方法,系统分析了金刚石刀具的折射率、全反射临界条件及尺寸参数对激光传输路径的影响规律,并基于光学仿真模型,对不同前角刀具的光路进行光线追迹,量化评估激光总功率、峰值功率密度及能量分布特性。

综上所述,本文提出一种控制激光仅从前刀面出射的金刚石刀具结构方案,避免热量在刀具后刀面累积。基于光学折射与全反射特性,分析激光在金刚石刀具内的传播行为,建立激光入射角度与刀具前角、后角之间的几何约束关系,并据此实现激光出射位置的结构化调控。在此基础上,为验证刀具设计在硬脆材料加工中的性能,选用熔石英作为代表材料进行实验研究。结合光学仿真、激光功率标定及熔石英激光原位辅助切削实验,对不同刀具结构下光束传递特性、切削距离对加工表面质量和刀具磨损演化的影响进行系统研究,以探讨刀具结构对激光原位辅助切削过程稳定性的作用规律。

## 2 激光原位辅助切削刀具设计及仿真

### 2.1 刀具结构设计

激光原位辅助切削技术需要将入射到金刚石刀具内部的激光光束引导到刀具刃口位置出射,进而实现材料的软化和改性。激光光束进入金刚石刀具后,由于传播介质的改变,光束将会发生折射和反射等现象,在特定条件下将会发生全反射,光束将无法正常出射。基于这一原理,通过刀具结构设计,通过控制激光入射角度、刀具前角、后角等的关系,即可实现光束从不同位置出射的调控。对此,设计了如图 1 所示的金刚石刀具结构,其中包括光束在金刚石刀具内的传播路径。激光光束由空气(低折射率)传递到金刚石内部(高折射率)时,其折射光线的传播方向可根据折射定律求得,具体如下:

$$n_i \sin \theta_i = n_j \sin \theta_j, \quad (1)$$

其中: $n_i, n_j$ 分别为控制的折射率和金刚石的折射率,空气的折射率( $n_i$ )=1.0; $\theta_i, \theta_j$ 分别为激光光束入射面角度和光束折射角。根据上述,光束折射角( $\theta_j$ )可表示为:

$$\theta_j = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{n_j}\right). \quad (2)$$

根据全反射定律,全反射角可通过式(3)得出:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_i}{n_j}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{n_j}\right). \quad (3)$$

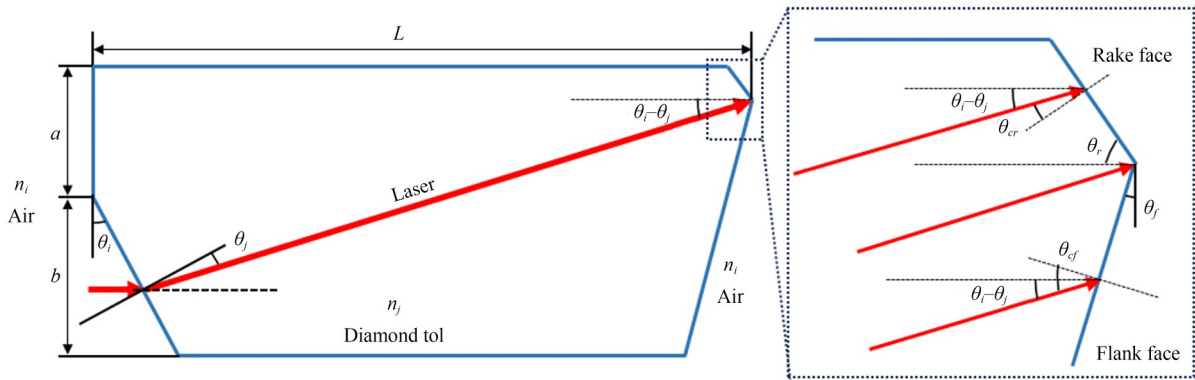


图 1 新型刀具结构及光束传播路径

Fig. 1 Structure and laser beam propagation path of the novel tool

激光原位辅助切削系统常用激光波长为 1 064 nm, 金刚石刀具在此波段下的折射率( $n_j$ )为 2.39, 计算可得全反射角( $\theta_c$ )为 24.5°。

根据全反射条件, 激光光束从前刀面出射需要满足的角度要求如下:

$$\theta_{cr} = 90^\circ - \theta_r - (\theta_i - \theta_j) < \theta_c, \quad (4)$$

其中,  $\theta_r$  为金刚石刀具前角, 联合式(4)可表示为:

$$\theta_i - \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{n_j}\right) > 90^\circ - \theta_r - \theta_c. \quad (5)$$

激光光束从后刀面出射需要满足的角度要求如下:

$$\theta_{cf} = \theta_i - \theta_j + \theta_f < \theta_c, \quad (6)$$

其中,  $\theta_f$  为金刚石刀具后角, 联合式(6)可表示为:

$$\theta_i - \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{n_j}\right) < \theta_c - \theta_f. \quad (7)$$

根据前期工艺研究结果, 熔石英金刚石切削采用的刀具前角( $\theta_r$ )为 65°, 刀具后角( $\theta_f$ )为 10°。对此光束要从前刀面出射激光入射面需要满足的条件为:

$$0.8^\circ < \theta_i < 90^\circ. \quad (8)$$

光束要从后刀面出射激光入射面需要满足的角度条件为:

$$0^\circ < \theta_i < 24.5^\circ. \quad (9)$$

为了避免后刀面出射的激光光束在切削过程中导致热累积加剧刀具磨损, 选定刀具激光入射面角度为 30°, 刀具详细尺寸及角度参数如表 1 所示。

表 1 刀具尺寸及角度参数

Tab. 1 Dimensions and angle parameters of the tool

参数	数值
前角	-65°
后角	10°
激光入射面角度	30°
长度 L	5 mm
上半部分高度 a	1.2 mm
下半部分高度 b	1 mm

## 2.2 刀具光学仿真

为了对前述设计的刀具结构出光性能进行验证, 基于商用光学软件 Zemax Optic Studio 建立了激光光束在金刚石刀具中传播的非序列(NSC)光线追迹模型。激光原位辅助切削中所采用激光光束能量分布为高斯分布, 在的瑞利范围内, 光束表现出极小的发散角, 因此将其视为一个半径约为 40 mm 的平行光束。激光光斑中心位于金刚石刀具刀尖中心位置处, 使其穿过金刚石刀体后, 到达刀具切削刃。在刀尖前端放置一个矩形探测器, 尺寸为 2.0 mm × 2.0 mm, 如图 2(a) 所示。为了保证计算精度和效率, 在仿真模型中, 光线总数为 10<sup>6</sup>。在完成模型设置后, 光线追踪软件开始在光学系统内部对每束光线进行传播和分析。为了与传统激光原位辅助切削刀具光路传递特性进行对比, 同时开展了传统刀具的光学仿真, 刀具结构如图 2(b) 所示, 光路仿真模型如图 2(c) 所示, 除刀具结构外, 其他设置均一致。

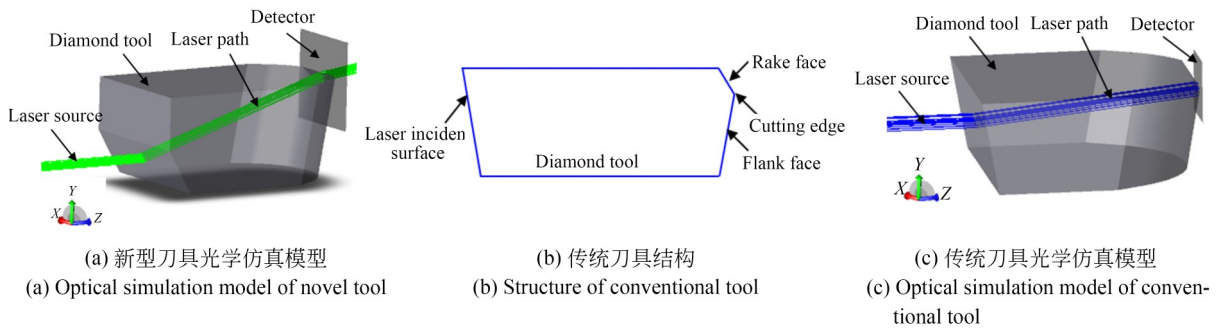
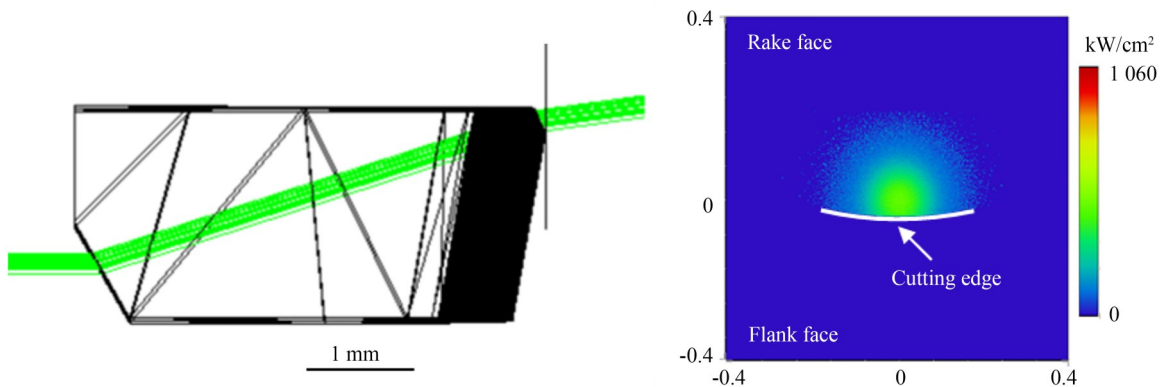


图 2 刀具光学仿真

Fig. 2 Optical simulation of cutting tools

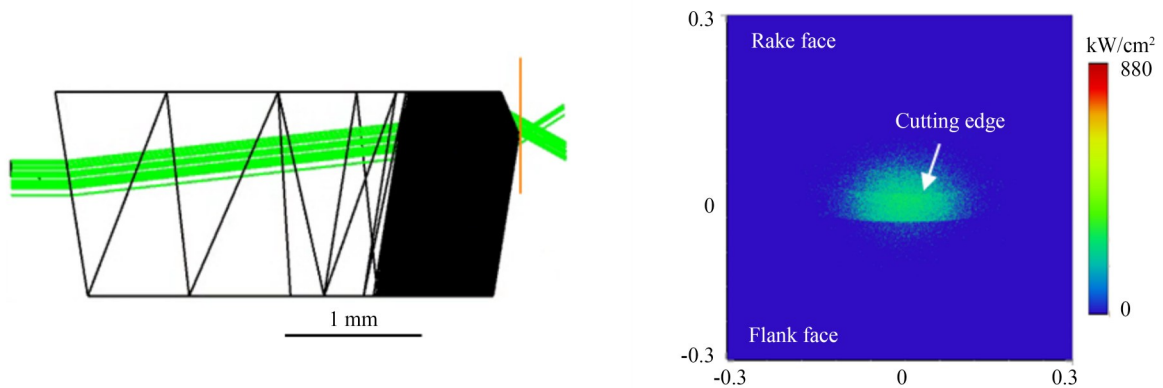
在仿真模型中,通过改变刀具结构模拟不同条件下的光束传播路径和出射激光形态。在完成非序列光线追迹计算后,对不同刀具结构下的激光出射位置及能量分布特征进行了对比分析,仿真结果如图 3 所示。对于所设计的新型刀具结

构,如图 3(a)所示,激光光束在金刚石刀体内部经折射与反射后,最终仅从前刀面附近的切削刃区域出射,出射光斑在切削刃位置高度集中,能量主要覆盖切削刃前方有效切削区域。后刀面未出现明显能量分布,说明该刀具结构能够有效



(a) 新型刀具光学仿真结果

(a) Optical simulation results of novel tool



(b) 传统刀具光学仿真结果

(b) Optical simulation results of conventional tool

图 3 光学仿真结果

Fig. 3 Optical simulation results

抑制激光从后刀面出射,避免非切削区域的无效能量损耗和潜在的热累积问题,有利于实现激光能量对切削区的精准作用,这与前述理论计算结果相符。相比之下,传统激光原位辅助切削刀具中,如图 3(b)所示,激光在刀体内传播后分别从前刀面和后刀面同时出射,切削刃处的能量分布范围更为分散。仿真结果表明,在相同入射条件和光线数设置下,新型刀具结构能够实现激光能量向切削刃区域的定向汇聚,显著提高激光在有效切削区的能量利用率。

### 3 实验装置及实验方案

为了研究设计的新型激光原位辅助切削专用金刚石刀具在熔石英超精密加工上的可行性,开展不同加工条件下的熔石英端面切削实验。实验装置如图 4 所示,激光原位辅助切削装置搭载于超精密车铣复合机床(Nanoform X, AMETEK Precitech Inc., 美国)上。激光原位辅助系统采用的激光器(IPG YLM-50, 美国)和光束聚集装置位于刀架系统内,并通过三轴位移平台进行激光位置的调节,进而保证激光光束从刀尖位置出射,聚焦后的光斑直径约为  $80\ \mu\text{m}$ 。工件通过专用夹具固定,并利用超精密机床的真空系统吸附在主轴上。机床主轴以一定的转速高速旋

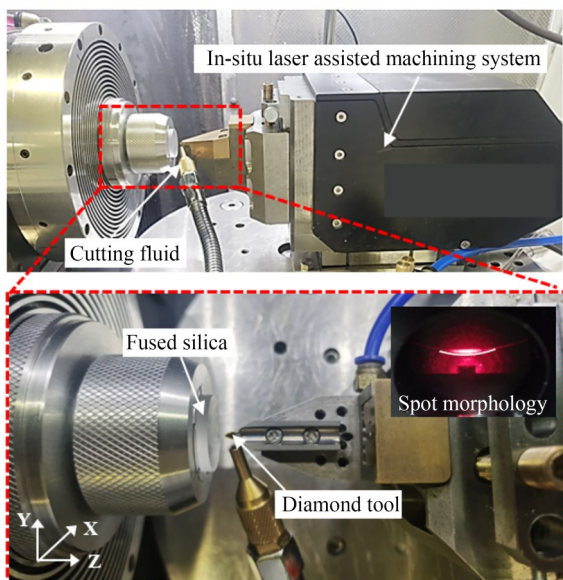


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

转,刀具相对工件沿 X 轴和 Z 轴移动,进而完成端面切削。加工过程中,通过调节切削液喷嘴位置和流量,令冷却液喷入加工区域,实现刀具冷却。激光从刀尖出射后的激光功率使用功率计(Ophir 30(150)A-BB-18, 以色列)测量。

为了对比不同刀具的加工性能,开展了对比实验。在传统使用的金刚石刀具结构下,当刀具前角为  $-65^\circ$  时,光束可同时从刀具前刀面和后刀面出射。而对于前述设计的金刚石刀具结构,光束只从前刀面出射。除刀具结构外,刀具参数均一致,具体为:前角  $-65^\circ$ ,后角  $-10^\circ$ ,圆弧半径  $1.5\ \text{mm}$ 。

在实际使用过程中,光束经过光束聚焦系统和金刚石刀具后会导致输出功率的损伤,对此切削实验开始前进行了出射激光功率的标定,所得结果如图 5 所示。在相同输入激光功率下,采用新型刀具测量得到的输出激光功率均略大于使用传统刀具。上述结果表明,新型刀具优化了光束传递路径,使更多的激光光束从刀具刃口出射,提高了激光利用率。在相同输出激光功率条件下,新型刀具所需输入功率减少,可有效降低刀具内部的热累积。

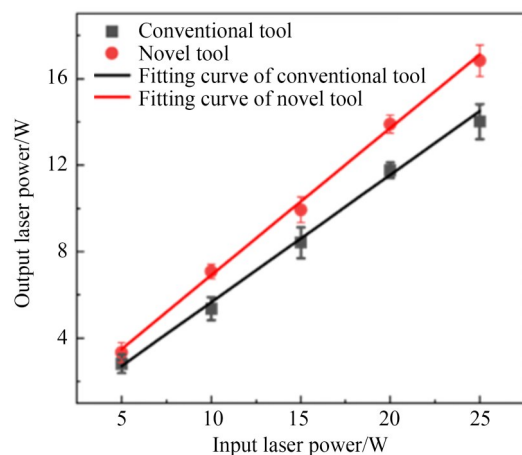


图 5 激光功率测量结果

Fig. 5 Measurement results of laser power

本次实验采用双面抛光的熔石英工件,避免表面缺陷对加工过程的影响,工件尺寸为直径  $25.4\ \text{mm}$ ,厚度  $4\ \text{mm}$ ,初始表面粗糙度  $S_a$  均小于  $1\ \text{nm}$ 。根据前期熔石英激光原位辅助切削实验探索,采用的工艺参数为转速  $2\ 000\ \text{r/min}$ ,进给

速度 2 mm/min, 切削深度 2  $\mu\text{m}$ , 激光功率 10 W<sup>[17,19]</sup>。切削完成后利用白光干涉仪(ZYGO Newview9000, 美国)检测工件表面粗糙度, 通过光学显微镜(ZEISS Axiolab 5, 德国)进行刀具磨损情况监测。为了确保实验数据的可靠性, 每组参数下均进行了 3 次重复实验, 每次实验结束后在工件 8 个不同位置的表面粗糙度均进行了测量, 数据采集点均匀分布在加工区域内, 以获得可靠的平均粗糙度值, 实验结果为所有重复实验的平均值。

#### 4 切削实验结果与分析

根据上述实验方案, 开展了不同刀具结构的熔石英激光原位辅助切削实验。切削过程中, 当切削距离达到 0.5 km 时, 对工件表面质量进行检测, 并对测量结果进行统计。如图 6 所示, 在切削距离为 1.0 km 时, 两种刀具结构下所得表面粗糙度  $S_a$  值较为接近, 没有显著区别, 表明在短距离切削阶段, 激光原位辅助作用对两种刀具的热-力调控效果基本一致。在切削距离为 3.0 km 时, 采用本研究设计的刀具所得工件表面粗糙度  $S_a$  为 31.19 nm, 而采用传统刀具所得工件表面粗糙度  $S_a$  为 49.91 nm, 二者差异较大, 表明随着切

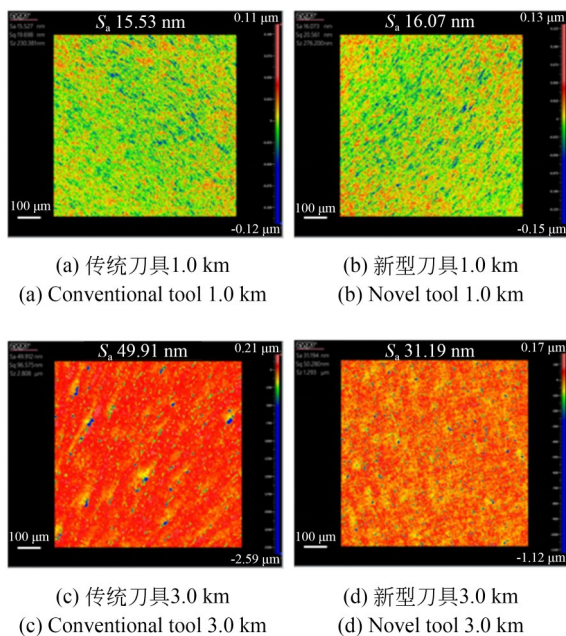


图 6 表面粗糙度检测结果

Fig. 6 Measurement results of surface roughness

削距离增大, 刀具结构对加工表面质量的影响逐渐显现。

两种刀具结构下熔石英切削表面质量随切削距离变化的关系如图 7 所示。随着切削距离的增大, 加工表面粗糙度  $S_a$  均呈现上升趋势。在切削距离小于 3.0 km 时, 两种刀具加工表面质量变化趋势基本一致, 说明此阶段刀具磨损程度较低, 材料去除过程仍以稳定的塑性去除为主。当切削距离达到 3.0 km 时, 采用传统刀具的加工表面质量显著降低, 推测此时由于后刀面的热量累积加剧, 后刀面磨损增大, 材料去除模式由塑性去除向脆性断裂转变。相比之下, 采用本研究设计的新型刀具, 在切削距离达到 3.0 km 时, 切削表面粗糙度  $S_a$  仍表现为缓慢增加, 且明显低于采用传统刀具时所得结果。这表明优化后的刀具结构在一定切削距离范围内能够有效抑制刀具磨损, 实现更稳定的激光原位辅助塑性去除过程。

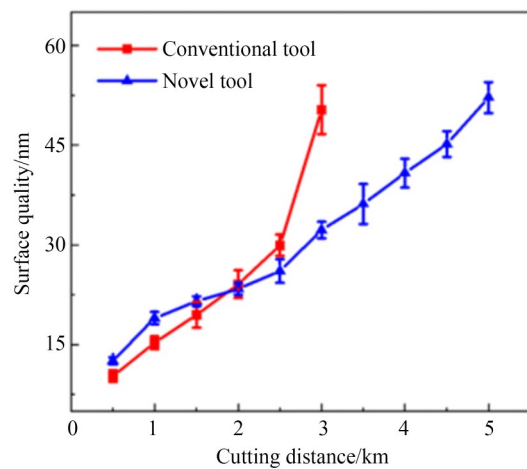


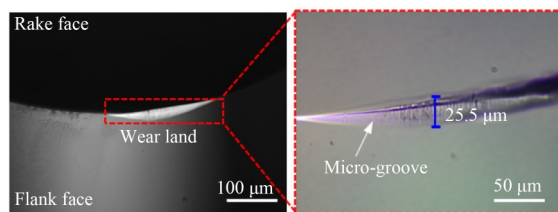
图 7 表面粗糙度与切削距离关系

Fig. 7 Relationship between surface roughness and cutting distance

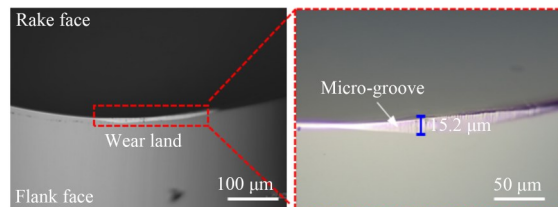
当切削距离进一步增大至超过 3.0 km 时, 新型刀具对应的表面粗糙度增加速率也开始增大。当切削距离为 5.0 km 时, 新型刀具所得表面粗糙度  $S_a$  与传统刀具在 3.0 km 时的结果相似。上述结果表明, 在长距离切削条件下, 刀具磨损不可避免地逐渐累积, 加工稳定性下降, 进而导致表面质量劣化。

进一步对刀具磨损形貌进行对比分析。如

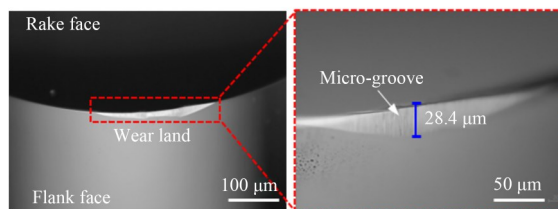
图 8(a)和图 8(b)所示,在切削距离为 3.0 km 时,两种刀具结构下刀具磨损均主要表现为后刀面的沟槽磨损。该磨损形式与激光原位辅助切削过程中形成的高温、高压摩擦环境密切相关。切削过程中的高温和高压条件促使金刚石刀具中的碳原子扩散到加工表面,并与熔石英反应形成硬质颗粒。这些硬质颗粒夹杂在刀具与工件接触界面,在相对运动过程中产生显著的磨粒磨损效应。由于硬质颗粒具有较高硬度和较强刮削能力,其在前刀面上的反复作用类似于“耕犁”过程,逐渐在刀具表面形成沿切削速度方向分布的沟槽。此外,随着切削距离的增加,熔石英材料去除模式由塑性去除逐步向脆性断裂转变,材料脆性去除过程中产生的大量脆性碎屑进一步加剧了后刀面的沟槽磨损。



(a) 传统刀具 3.0 km  
(a) Conventional tool 3.0 km



(b) 新型刀具 3.0 km  
(b) Novel tool 3.0 km



(c) 新型刀具 5.0 km  
(c) Novel tool 5.0 km

图 8 刀具磨损对比

Fig. 8 Comparison of tool wear

对比两种刀具结构下的刀具磨损宽度可以发现,采用新型刀具后刀面磨损明显减小。切削距离为 3.0 km 时,新型刀具磨损宽度约为 15.2

$\mu\text{m}$ ,传统刀具磨损宽度约为  $25.5 \mu\text{m}$ ,降低幅度约为 40.4%。其主要原因在于激光光束仅从前刀面出射,有效避免了激光辐照后刀面所引起的局部热量累积,从而降低了后刀面温度。后刀面热效应的减弱抑制了碳原子的扩散行为,减少了硬质颗粒的生成,进而显著减缓了后刀面磨粒磨损的发展。同时,由于新型刀具磨损程度相对较小,切削过程整体保持较好的稳定性,熔石英材料在较大切削区域内仍以塑性去除为主,脆性颗粒生成数量较少,进一步降低了后刀面沟槽磨损的形成速率。

当切削距离增加至 5.0 km 时,新型刀具的磨损形貌如图 8(c)所示,后刀面磨损宽度随切削距离持续增大。这是由于在长距离切削过程中,尽管新型刀具能够有效抑制激光对后刀面的直接热作用,但切削过程中产生的热量仍不可避免地逐渐累积。刀具磨损导致切削刃钝化,切削力增大,加工过程稳定性下降,熔石英材料逐渐进入以脆性断裂为主的去除阶段,大量脆性颗粒与后刀面的刮擦作用显著增强,从而加速了刀具磨损。另一方面,在长时间高温环境下,熔石英与金刚石刀具中碳原子的界面反应仍持续发生,使得新型刀具在超长切削距离条件下的耐磨优势逐渐减弱。

## 5 结 论

本文围绕激光原位辅助切削过程中刀具后刀面磨损问题,提出了一种激光仅从前刀面出射的新型金刚石刀具结构。基于光学折射与全反射理论,建立了激光在金刚石刀具内的传播模型,明确了激光入射角、前角与后角之间的几何约束关系,并通过结构设计实现了激光出射位置的精准调控。

光学仿真和功率标定结果表明,新型刀具优化了光束传递路径,提高了激光利用率,并能在相同输出功率条件下降低输入功率需求,从而有效减低刀具内部的热累积。切削实验结果表明,在短距离切削阶段,两种刀具的加工表面质量差异不显著;随着切削距离的增加,刀具结构对加工性能的影响逐渐显现。当切削距离达到 3.0 km 时,新型刀具加工所得表面粗糙度  $S_a$  降低幅度约为 37.5%,刀具磨损宽度降

低幅度约为 40.4%。当切削距离达到 5.0 km 时,新型刀具的耐磨优势逐渐减弱,表面质量降低。

研究表明,通过刀具结构设计精确控制激光出射位置,在一定切削距离范围内显著改善了加工稳定性与表面质量,延长刀具的使用寿命。尽管本文主要以熔石英为研究材料,但该技术设计在硬脆材料的激光原位辅助切削中具有广泛的适用性,为高质量、长距离超精密加工提供了全新的技术思路,并具有推广到其他硬脆材

料的潜力。

#### 作者贡献声明:

刘俊龙:设计方法的提出,论文构思和撰写;  
朱梦瑶:实验方案设计;  
余莉:光学仿真;  
周妍希:实验开展及数据测量;  
张寒:实验结果分析;  
陈肖:提供实验资源;  
林创挺:论文审核和编辑写作。

#### 参考文献:

- [1] MOORE L A, SMITH C M. Fused silica as an optical material[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(8): 3043.
- [2] LI F K, BAI Y, HU H X, *et al.* Atomic-scale insights into the material removal mechanism of cerium oxide polished fused silica based on ReaxFF-MD [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 132: 339-352.
- [3] 熊玉朋,陈适宇,黄铖,等. 基于自由曲面光学元件的大视场光学成像系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(9): 1261-1272.  
XIONG Y P, CHEN S Y, HUANG C, *et al.* Large field optical imaging system based on freeform surface optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1261-1272. (in Chinese)
- [4] 冯青屹,祖小涛,刘春明,等. ICF 装置靶场关键材料的辐照效应研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(9): 091001.  
FENG Q Y, ZU X T, LIU C M, *et al.* Progress of research on irradiation effects in key materials in ICF facilities [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(9): 091001. (in Chinese)
- [5] TAN C, ZHAO L J, CHEN M J, *et al.* Heat accumulation effect during CO<sub>2</sub> laser processing of fused silica optics [J]. *Results in Physics*, 2022, 34: 105308.
- [6] WU S, WANG J S, CUI H Y, *et al.* Surface error effect on reflectivity and focused spot of an EUV tubular mirror machined by ultra-precision diamond turning [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(25): 6560-6566.
- [7] CHEN J N, YU Y Q, GU P, *et al.* Fabrication of the freeform Fresnel lens by swinging-rotating diamond ruling [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 119: 130-145.
- [8] JIA P, ZHOU M. Tool wear and its effect on surface roughness in diamond cutting of glass soda-lime [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(6): 1224-1230.
- [9] LIU Q M, LIU J, MING Z, *et al.* Research progress on laser-assisted precision machining technology [J]. *Micromachines*, 2025, 16(2): 173.
- [10] ZHANG J G, ZHENG Z D, HUANG K, *et al.* Field-assisted machining of difficult-to-machine materials [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(3): 032002.
- [11] 樊明旭,赵建科,郝伟,等. 基于激光辅助切削技术的微晶玻璃自由曲面加工研究[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(3): 139-146, I0001.  
FAN M X, ZHAO J K, HAO W, *et al.* Research on freeform surface machining of glass-ceramic based on laser-assisted cutting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(3): 139-146, I0001. (in Chinese)
- [12] KONG D S, SHI G F, MENG S W, *et al.* Experiments on surface forming mechanism and optimization of *in-situ* laser-assisted turning of tungsten carbide [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 136(11): 5363-5378.
- [13] WANG M, WU Z P, ZHENG Y X, *et al.* Investigation on the effect of laser energy distribution in *in-situ* laser-assisted diamond cutting single-crystal silicon [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113976.
- [14] DU H H, WANG Y D, LI Y H, *et al.* Improving the machinability of the high-entropy alloy CoCrF-

- eMnNi by *in-situ* laser-assisted diamond turning [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 7110-7118.
- [15] CHEN X, LIU C L, KE J Y, *et al.* Subsurface damage and phase transformation in laser-assisted nanometric cutting of single crystal silicon[J]. *Materials & Design*, 2020, 190: 108524.
- [16] LIU C L, CHEN X, KE J Y, *et al.* Numerical investigation on subsurface damage in nanometric cutting of single-crystal silicon at elevated temperatures [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 1060-1071.
- [17] LIN C T, CHEN X, HE W B, *et al.* Experimental investigation on the ductile machinability of fused silica during *in-situ* laser assisted diamond cutting [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 383-393.
- [18] LIN C T, HE W B, CHEN X, *et al.* Experimental and theoretical investigation on the ductile removal mechanism in *in-situ* laser assisted diamond cutting of fused silica[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 7704-7719.
- [19] LIN C T, FU Y F, HE W B, *et al.* Thermal analysis of *in-situ* laser assisted diamond cutting of fused silica and process optimization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 172: 110539.
- [20] SHAHINIAN H, NAVARE J, ZAYTSEV D. Microlaser assisted diamond turning of precision silicon optics [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58 (9): 1.
- [21] HU W J, LI Z Q, ZHAO X S, *et al.* Precision tailoring of laser beam propagation in a single crystal-line diamond tool for *in situ* laser-assisted diamond turning [J]. *Applied Optics*, 2024, 63 (1) : 93-103.
- [22] KE J Y, FU Y F, LIU C L, *et al.* Investigation on system design methodology and cutting force optimization in laser-assisted diamond machining of single-crystal silicon[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 115: 1-17.

## 作者简介:



刘俊龙(1979—),男,湖北荆州人,高级工程师,主要研究方向为高质量石英玻璃材料制造。E-mail: ljl@feilihua.com

## 通讯作者:



林创挺(1998—),男,广东汕头人,博士,副教授,2020年于武汉理工大学获得学士学位,2025年于华中科技大学获得博士学位,主要从事超精密和智能制造方面的研究。E-mail: linct@jmu.edu.cn