

文章编号 1004-924X(2025)24-3864-11

考虑磨粒轨迹和研磨垫磨损均匀性的 研磨盘转速优化

贾珣璠¹, 朱祥龙^{1*}, 陈 杰¹, 蔡引娣¹, 康仁科¹, 高 尚¹, 杨 垒²

(1. 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 重庆科技大学 机械与智能制造学院, 重庆 401331)

摘要: 研磨盘转速是固结磨料研磨技术的关键参数, 对熔融石英工件的表面粗糙度和平面度具有重要的影响。为确定最优研磨盘转速, 分析了转速对磨粒轨迹和研磨垫磨损均匀性影响规律。基于实际研磨块排布方式, 定量描述了研磨垫表面磨粒坐标。根据坐标系转换法, 建立了磨粒运动轨迹方程, 结合网格划分和轨迹离散化处理, 计算了磨粒轨迹均匀性; 同时, 依据磨粒在工件表面有效接触轨迹长度, 评估了研磨垫磨损分布规律, 采用变异系数表征研磨垫磨损均匀性。通过开展熔融石英工件研磨实验, 对比分析了不同研磨盘转速下工件表面粗糙度和平面度。仿真与试验结果表明: 研磨盘转速对磨粒轨迹均匀性和研磨垫磨损均匀性影响规律一致, 随着转速增加, 两者均趋于改善, 但当研磨盘与夹具转速为简单整数比时, 均匀性明显下降。在转速为 46 r/min 时, 磨粒轨迹最为复杂, 轨迹均匀性和研磨垫磨损均匀性最好, 此时熔融石英表面粗糙度 S_a 和平面度 PV 分别为 112.31 nm 和 4.26 μm , 为最优加工效果。本研究为优化固结磨料研磨盘转速、提升研磨垫磨损均匀性提供了理论依据和实践参考。

关键词: 转速优化; 磨粒轨迹; 磨损均匀性; 固结磨料研磨

中图分类号: TH161+.1; TG73 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253324.3864

CSTR: 32169.14.OPE.20253324.3864

Optimizing lapping plate rotational speed based on trajectory and pad wear uniformity

JIA Yufan¹, ZHU Xianglong^{1*}, CHEN Jie¹, CAI Yindi¹, KANG Renke¹, GAO Shang¹, YANG Lei²

(1. State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuxianglong@dlut.edu.cn

Abstract: The rotational speed of the lapping plate is a key parameter in fixed-abrasive lapping, which directly affects the surface roughness and flatness of fused quartz. To determine the optimal speed for fused quartz lapping and to analyze the influence of speed on abrasive trajectories and the wear uniformity of the lapping pad. A quantitative coordinate model of abrasives was established based on the actual arrangement of abrasive blocks. Through coordinate transformation, the abrasive trajectory equation was derived. Us-

收稿日期: 2025-10-13; 修订日期: 2025-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U22A20198); 中央高校基本科研业务费项目资助

ing grid partitioning and trajectory discretization, the trajectory uniformity was evaluated, while the effective contact trajectory length of each abrasive on the workpiece surface was statistically analyzed to assess pad wear distribution. The coefficient of variation was employed to characterize the wear uniformity of the lapping pad. Fused quartz lapping experiments were carried out to compare the surface roughness and flatness under different rotational speeds. Both simulation and experimental results indicate that the effects of lapping plate speed on abrasive trajectory uniformity and pad wear uniformity are consistent, showing improvement with increasing speed; however, when the plate speed and fixture speed form a simple integer ratio, uniformity deteriorates significantly. At 46 r/min, the abrasive trajectories become complex, leading to optimal trajectory and wear uniformity, with the best surface roughness and flatness obtained, $S_a = 112.31 \text{ nm}$ and $PV = 4.26 \text{ }\mu\text{m}$, respectively. This study provides theoretical guidance and practical reference for optimizing the lapping plate speed and improving wear uniformity in fixed-abrasive lapping.

Key words: rotational speed optimization; abrasive trajectory; pad wear uniformity; fixed-abrasive lapping

1 引 言

研磨技术作为一种常见的超精密加工手段,被广泛应用于金属、陶瓷以及熔融石英等多种材料的表面加工^[1-2]。材料科学、半导体及光电信息产业的快速发展,对工件研磨质量提出了越来越严格的要求。固结磨料研磨技术凭借磨粒轨迹可控以及二体磨削为主的去除机制,在实现高平面度和优良表面质量方面展现出独特优势,受到越来越广泛关注^[3]。

研磨盘转速是该工艺中的关键参数,它通过改变磨粒在工件表面的划擦轨迹,从而显著影响熔融石英的平面度与表面粗糙度^[4]。为优化研磨盘转速,国内外学者已采用运动分析方法对磨粒轨迹进行了研究。Hu等^[5]采集了磨粒块表面形貌,提取磨料位置信息并进行轨迹分析发现:研磨盘与工件转速比为1.3时,可获得最优的表面粗糙度和去除一致性,但是该磨料位置提取方法受限于图像采集分辨率,也难以实现多磨粒块、大尺寸研磨垫的磨粒识别。Fang等^[6]研究了研磨垫表面磨粒块数量及排列方式对加工轨迹均匀性影响,发现:磨粒块数量越多,磨粒轨迹越均匀;相对于传统研磨垫,基于人工蜂群算法优化的磨粒块排布方案,使轨迹均匀性提高73%。肖燊婷等^[7]和Liu等^[8]提出了一种具有无理速度比的摆动研磨方法,以提高平面研磨的均匀性。Wang等^[9]研究了转速对轨迹均匀性影响,发现随着下抛光盘转速的增加,工件上/下表面磨粒轨迹均匀性变化趋势一致。Zhang等^[10]建立了双

面机械抛光的磨粒轨迹方程,认为下抛光盘与太阳轮的速比在1.1~1.2范围内时,轨迹分布最均匀,此时工件表面粗糙度 R_a 最佳为4 nm。Yang等^[11]进一步考虑了晶片自转转速对双面抛光晶片轨迹均匀性影响,发现工件与太阳轮的转速比设定为0.5时,磨粒运动轨迹更均匀。薛等^[12]在此基础上,考虑单个磨粒划擦深度,建立了三维材料去除均匀性模型。由于双面研磨和单面研磨的运动方式不同,其结论难以直接适用于单面固结磨料研磨工艺。Cheng等^[13]认为在磷酸二氢钾(KDP)晶体抛光过程中,材料去除主要依赖于抛光液中水球与工件表面的水解作用,并引入摆动运动,以提升水球在KDP表面的运动轨迹均匀性。Cheng等^[14]对比圆、径向、网格等抛光垫开槽形状下水球轨迹均匀性,并发现网格槽使KDP表面水球轨迹更均匀。

综上所述,现有研究通常假设磨粒在研磨垫表面均匀分布,缺乏针对磨粒块实际排布方式的磨粒坐标建模方法;关于研磨盘转速优化的研究,多侧重于磨粒运动轨迹均匀性的改善,而较少关注转速对研磨垫磨损均匀性的影响。

为此,本文在考虑磨粒块实际排布的基础上,综合分析转速对磨粒轨迹与研磨垫均匀性的影响,提出较优研磨盘转速参数。首先,考虑实际磨粒块的形状与排布方式,并引入随机扰动,生成磨粒坐标。然后,采用坐标转换法建立运动轨迹方程,并对工件表面进行网格化处理,通过统计各网格内轨迹点的变异系数定量评价轨迹均匀性,同时统计各磨粒在工件表面的有效接触

弧长,以表征磨损均匀性。通过仿真确定保证结果稳定的磨粒数量与时间间隔,分析研磨盘转速对轨迹均匀性、研磨垫磨损和轨迹形状的影响规律。开展研磨实验,测量不同转速条件下工件表面粗糙度及平面度,以确定最优研磨盘转速。

2 固结磨料研磨运动原理

2.1 研磨垫表面磨粒坐标分析

固结磨料研磨垫中磨粒块排布方式直接影响工件材料去除均匀性,研磨垫表面磨粒排布如图 1 所示。

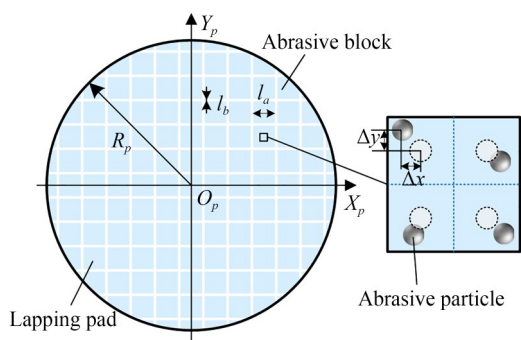


图 1 研磨垫表面磨粒排布

Fig. 1 abrasive particle arrangement on a lapping pad

为更好地描述磨粒中心位置,在研磨垫表面建立坐标系 $O_p-X_pY_p$ 。磨粒块在研磨垫的 X_p 和 Y_p 方向均布,磨粒块边长为 l_a 。为加速研磨液在工件和磨粒之间流动,及时带走研磨过程中产生的热量及材料磨屑,磨粒块之间有间隙,间隙宽度为 l_b 。 X_p, Y_p 方向上磨粒块的数量 N_{block} 可以计算为:

$$N_{\text{block}} = 2 \left\lfloor \frac{R_p - 0.5l_a}{l_b + l_a} \right\rfloor + 1. \quad (1)$$

仅有磨粒块范围内才有磨粒分布,磨粒块中心坐标可以写为:

$$B_{bi'j'} = \begin{bmatrix} x_{bi'j'} \\ y_{bi'j'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(i' - \frac{N_{\text{block}} + 1}{2} \right) \cdot (l_a + l_b) \\ \left(j' - \frac{N_{\text{block}} + 1}{2} \right) \cdot (l_a + l_b) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: i', j' 分别是 X_p, Y_p 方向上磨粒块的序列号,取值范围为 $1, 2, 3, \dots, N_{\text{block}}$ 。磨粒块由树脂和金刚石磨粒充分分散后固化而成,磨粒常被认为在

磨粒块中均匀分布^[15]。假设在磨粒块中的磨粒阵列为 $N_1 \times N_1$,阵列交点坐标可以表示为:

$$P'_{bij} = \begin{bmatrix} x'_{bij} \\ y'_{bij} \end{bmatrix} = B_{bi'j'} + \begin{bmatrix} \frac{(i - 0.5) \cdot l_a}{N_1} - 0.5l_a \\ \frac{(j - 0.5) \cdot l_a}{N_1} - 0.5l_a \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: i, j 分别为单磨粒块上 X_p, Y_p 方向上磨粒序列号,取值范围为 $1, 2, 3, \dots, N_1$ 。考虑到磨粒分布的随机性,使磨粒相对原有位置在 X_p 和 Y_p 方向上加随机偏移量, $\Delta x, \Delta y$ 分别表示在 X_p 和 Y_p 方向上的偏移距离,其遵循 $-l_a/N_1$ 和 l_a/N_1 之间的均匀分布。研磨垫磨粒坐标点可以表示为:

$$P_{bij} = \begin{bmatrix} x_{bij} \\ y_{bij} \end{bmatrix} = P'_{bij} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \quad (4)$$

固结磨料研磨垫的半径为 R_p 的圆形,磨粒坐标服从式(5),研磨垫上磨粒点总数量为 N_a 。

$$(x_{bij}^2 + y_{bij}^2)^{1/2} \leq R_p. \quad (5)$$

2.2 磨粒运动轨迹方程

研磨加工原理如图 2 所示,在该系统中,研磨盘以转速 n_p 绕其中心轴 O_p 转动,研磨垫粘贴于研磨盘表面。与此同时,夹具在主动轮的驱动作用下,以角速度 n_h 绕自身中心轴 O_h 实现自转运动。三个工件均匀固定在夹具表面。整个研磨过程中,研磨液通过定量供给系统持续均匀地滴加在研磨垫工作表面,以确保加工区域的充分润滑和冷却。为简化磨粒在工件表面的运动轨迹分析,本研究作出以下假设:研磨垫与工件的接触面为理想平面且平行;磨料颗粒简化为质点。

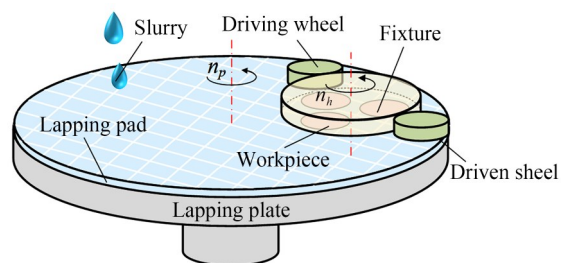


图 2 固结磨料研磨加工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fixed abrasive lapping process

熔融石英固结磨料研磨过程的运动学分析如图 3 所示。为精确表征磨粒与工件之间的相对运动特性,建立三个相互关联的参考坐标系:(1)

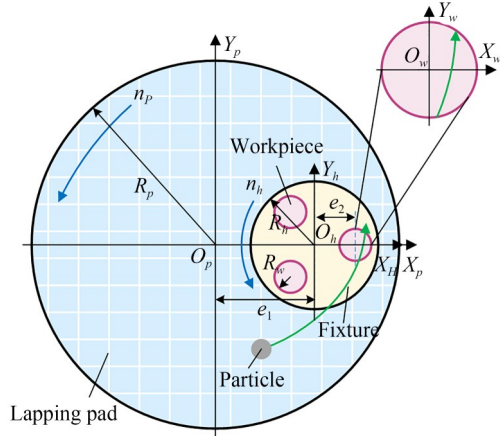


图3 固结磨料研磨运动原理图

Fig. 3 Kinematic principle diagram of fixed abrasive lapping

以研磨盘中心为原点的动坐标系 $O_p-X_pY_p$ ，该坐标系随研磨盘作同步旋转运动；(2)固定于夹具中心的静坐标系 $O_h-X_hY_h$ ；(3)以工件中心为基准的局部坐标系 $O_w-X_wY_w$ 。 e_1 为研磨盘与夹具中心

$$\begin{cases} x_w = x_p \cos(2\pi n_h t - 2\pi n_p t) + y_p \sin(2\pi n_h t - 2\pi n_p t) - e_1 \cos(2\pi n_h t) - e_2 \\ y_w = -x_p \sin(2\pi n_h t - 2\pi n_p t) + y_p \cos(2\pi n_h t - 2\pi n_p t) + e_1 \sin(2\pi n_h t) \end{cases} \quad (9)$$

2.3 磨粒轨迹及研磨垫磨损均匀性表征

2.3.1 磨粒轨迹均匀性表征

为统计轨迹均匀性，将工件表面离散为边长为 ϵ 的网格单元，单元数量为 N_e 。如图4所示，将第 k 个磨粒运动轨迹离散为时间间隔 Δt 的一系列离散点，统计序号为 k 的磨粒在工件表面序号为 i 的网格单元的轨迹点为 n_i^k 。 k 的取值范围为 $[1, N_a]$ ， i 的取值范围为 $[1, N_e]$ 。通过遍历所有磨粒，可实现工件表面各区域内轨迹长度的计算。

参考郭磊等^[16]的研究，为评价轨迹均匀性，采用变异系数 CV 作为轨迹均匀性的评价指标，

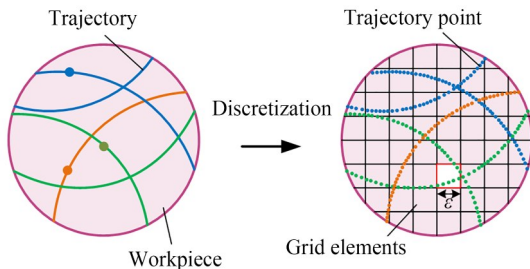


图4 磨粒轨迹离散化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of abrasive particle trajectory discretization

的偏心距 (O_p, O_h 之间的距离)， e_2 为工件与夹具中心的偏心距 (O_h, O_w 之间的距离)。

对于研磨盘上的任意一颗磨粒点，其坐标矩阵为 $I_p = [x_p, y_p, 1]$ 。 t 时刻时，研磨盘转角 θ_p 为 $2\pi n_p t$ ，夹具转角 θ_h 为 $2\pi n_h t$ 。坐标系 $O_p-X_pY_p$ 和参考坐标系 $O_h-X_hY_h$ 之间的转换矩阵 T_p 为：

$$T_p = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p & -e_1 \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

坐标系 $O_h-X_hY_h$ 和 $O_w-X_wY_w$ 之间的转换矩阵 T_w 为：

$$T_w = \begin{bmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h & e_2 \cos \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h & e_2 \sin \theta_h \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

磨粒相对于工件的坐标矩阵可以表示为：

$$I_w = T_w^{-1} I_p I_p \quad (8)$$

将式(6)，式(7)代入到式(8)中，可以获得磨粒相对于工件的运动轨迹方程为：

其计算方法如下：

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{n}} \quad (10)$$

其中， σ 和 $\bar{n}$ 分别为网格单元轨迹点的标准差和均值，分别表示为：

$$\bar{n} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{k=1}^{N_a} n_i^k \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \left(\sum_{k=1}^{N_a} n_i^k - \bar{n} \right)^2} \quad (12)$$

2.3.2 研磨垫磨损均匀性表征

除此之外，研磨垫磨损均匀性直接影响工件研磨质量，因此有必要对其进行表征。磨粒磨损程度与其在工件表面的接触弧长呈正相关，接触弧长越长，磨粒磨损量越大。称位于工件表面上的轨迹离散点为有效轨迹点，如图5所示。

磨粒接触弧长和有效轨迹点总数 $n_{wear,k}$ 正相关，采用变异系数 CV_{wear} 作为研磨垫表面所有磨粒的磨损均匀性的衡量指标：

$$CV_{wear} = \frac{\sigma_{wear}}{\bar{n}_{wear}} \quad (13)$$

其中， σ_{wear} 和 $\bar{n}_{wear}$ 分别为各磨粒点在工件表面的有效轨迹点总数的标准差和均值，分别表示为：

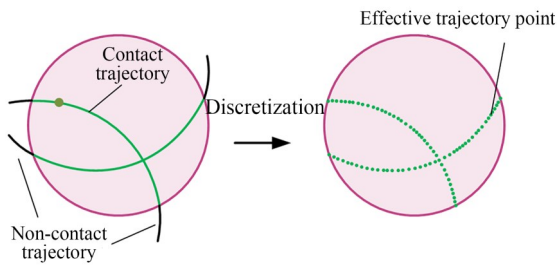


图 5 磨粒有效轨迹点示意图

Fig. 5 Schematic of the effective trajectory points for an abrasive particle

$$\bar{n}_{\text{wear}} = \frac{1}{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} n_{\text{wear},k}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{wear}} = \sqrt{\frac{1}{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} (n_{\text{wear},k} - \bar{n}_{\text{wear}})^2}. \quad (15)$$

3 运动轨迹及均匀性仿真

3.1 仿真参数确定

从仿真原理上看,磨粒数量越多,求解结果的精度越高。但会导致计算的时间成本大幅增加,而且当磨粒数量达到一定值后,计算精度的提高并不明显,因此需要确定合理的磨粒数量,保证仿真精度和运算效率。为分析磨粒数量对 CV 和 CV_{wear} 值的影响规律,设计单磨粒块表面 5 种不同密度的磨粒阵列方案:1×1,2×2,3×3,4×4 和 5×5,其对应的研磨垫表面磨粒总数分别为 31 417,125 668,282 753,502 672 和 785 425。

设定研磨盘转速 $n_p=48 \text{ r/min}$,时间间隔为 0.000 1 s,其余仿真参数如表 1 所示。通过数值仿真获得的 CV 和 CV_{wear} 值随磨粒数量的变化规律如图 6 所示。

仿真结果表明:随着磨粒数量增加,CV 值呈现快速降低后逐渐收敛的变化趋势。这表明:磨粒数量过小会导致材料去除均匀性分析结果失真,当磨粒数量超过临界值时,继续增加磨粒数量对改善仿真精度的作用有限。磨粒数量对 CV_{wear} 值影响较小,其波动幅度均小于 0.003%。基于上述分析,最终确定磨粒阵列为 4×4,磨粒数量为 502 672,该参数既可确保分析可靠性,又能避免不必要的计算资源消耗。

为进一步分析时间间隔对仿真结果的影响,设置时间间隔分别为 0.1 s,0.01 s,0.001 s,

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

Performance parameters	Value
Fixture rotation speed $n_h/(\text{r}\cdot\text{mm}^{-1})$	40
Lapping plate radius R_p/mm	450
Fixture radius R_h/mm	320
Workpiece radius R_w/mm	50
Eccentricity between lapping plate and holder e_1/mm	250
Eccentricity between holder and workpiece e_2/mm	100
Abrasive block edge length l_a/mm	3
Gap between abrasive blocks l_b/mm	1.5
Number of abrasive blocks	31 417
Workpiece mesh size ϵ/mm	2×2
Simulation time/s	30

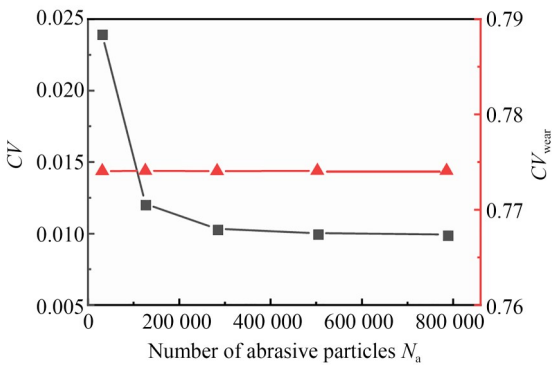


图 6 磨粒数量对 CV 与 CV_{wear} 值的影响规律

Fig. 6 Influence of the number of abrasive particles on CV and CV_{wear} values

0.000 1 s 和 0.000 01 s,仿真结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出:随着时间间隔的减小,仿真分辨率显著提升,计算结果呈现收敛趋势。当时间间隔减小至 0.000 1 s 时,磨粒轨迹的关键评

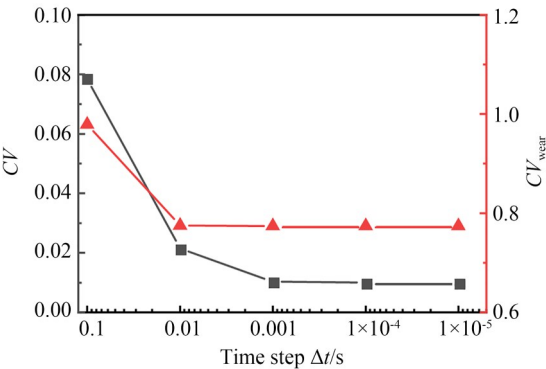


图 7 时间间隔对 CV 与 CV_{wear} 值的影响规律

Fig. 7 Influence of the time step on CV and CV_{wear} values

评价指标 CV 值和 CV_{wear} 值均达到稳定状态,其波动幅度均小于 0.5% ,因此仿真时间间隔设定为 0.0001 s 。

3.2 磨粒轨迹均匀性分析

为探究研磨盘转速对熔融石英表面轨迹均匀性的影响规律,设定仿真参数见表1。分析研磨盘转速在 $20\sim 60\text{ r/min}$ 范围内熔融石英表面轨迹均匀性系数 CV ,如图8所示。

如图8所示,在 $20\sim 60\text{ r/min}$ 范围内,随着转速的增加,均匀性系数 CV 值的整体呈下降趋势,但由图可以看出,存在多个临界转速点 (30 r/min , 40 r/min , 50 r/min , 60 r/min),在这些转速下, CV 值均出现异常升高。在 20 r/min 时轨迹均匀性系数 CV 值达到最大值(为 0.0313)。在 46 r/min 时,两项指标均降至较低水平(为 0.0078)。

为便于直观分析转速对轨迹均匀性的影响规律,将轨迹点密度进行归一化处理,绘制四个

典型转速 (30 r/min , 40 r/min , 46 r/min , 52 r/min) 下轨迹密度分布图,结果如图9所示。

由图9可以看出相比于其他转速下,在 40 r/min 时,轨迹分布密度最不均匀,而在 46 r/min 时,轨迹均匀性最好。

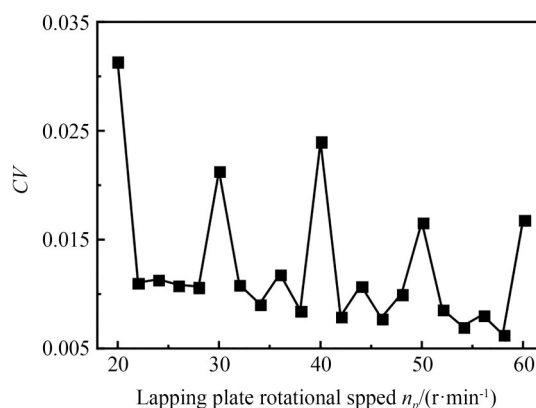


图8 研磨盘转速对轨迹均匀性的影响规律

Fig.8 Influence of the lapping plate rotational speed on trajectory uniformity

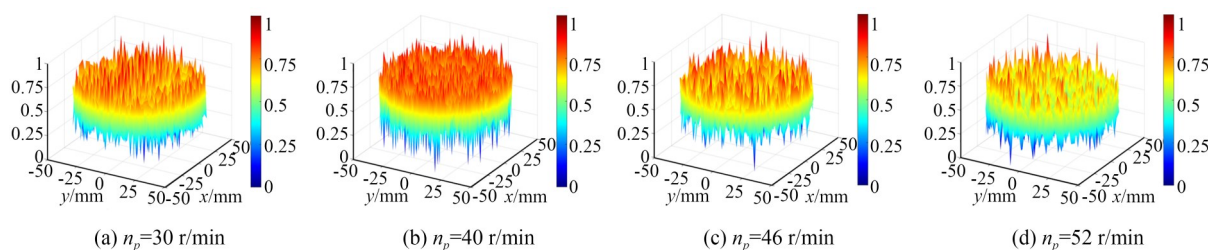


图9 不同研磨盘转速下的磨粒轨迹分布

Fig.9 Trajectory distribution under different lapping plate rotational speeds

3.3 研磨垫磨损均匀性分析

为探究研磨盘转速对研磨垫磨损均匀性影响,基于如表1所示的仿真参数,分析在 $20\sim 60\text{ r/min}$ 范围内,不同的研磨盘转速下研磨垫磨损均匀性系数 CV_{wear} 值,如图10所示。

如图10所示,研磨垫磨损均匀性和熔融石英表面轨迹均匀性呈现相似的波动规律,在 20 r/min 时研磨垫磨损均匀性系数 CV_{wear} 值达到最大值(为 1.894)。在 46 r/min 时,两项指标均降至较低水平(为 0.755)。

绘制四个典型转速 (30 r/min , 40 r/min , 46 r/min , 52 r/min) 下研磨垫磨损分布图,结果如图11所示。在研磨盘转速为 40 r/min 和 30 r/min 时,仅有特定固定区域的磨粒持续参与

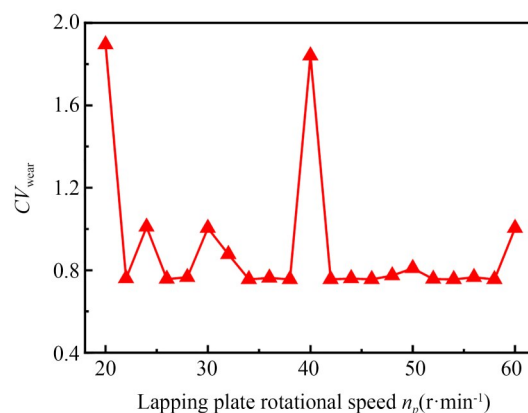


图10 研磨盘转速对研磨垫磨损均匀性的影响

Fig.10 Influence of the lapping plate rotational speed on lapping pad wear uniformity

加工,该区域磨粒的划擦轨迹长度显著大于其他区域。在四种转速下,研磨垫表面参与磨粒数量占比分别为 68.1%,31.9%,78.7% 和 78.6%。在 40 r/min,研磨垫磨损仅为小半径的圆形;30 r/min 转速比时,参与研磨加工的磨粒集中在

四个中心对称区域内。这种不均匀分布导致研磨垫出现局部严重磨损,而其他区域磨粒则利用率不足。在 46 r/min 时,研磨垫磨损较均匀,在研磨垫半径方向上,磨损量呈现:先增大后减小再增大的非单调趋势。

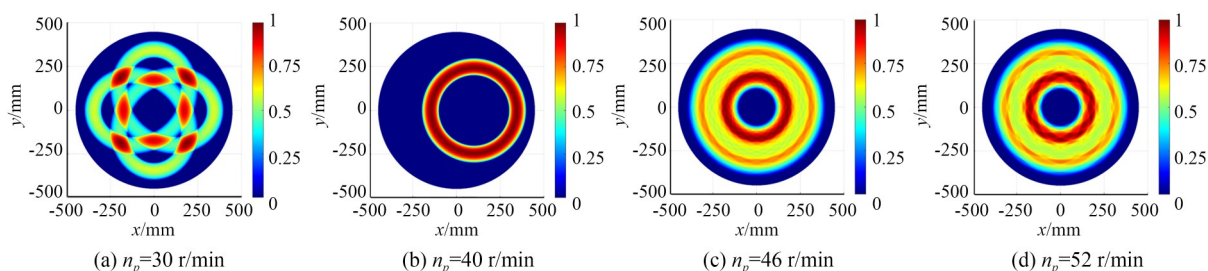


图 11 不同研磨盘转速下研磨垫磨损分布

Fig. 11 Wear distribution of the lapping pad under different lapping plate rotational speeds

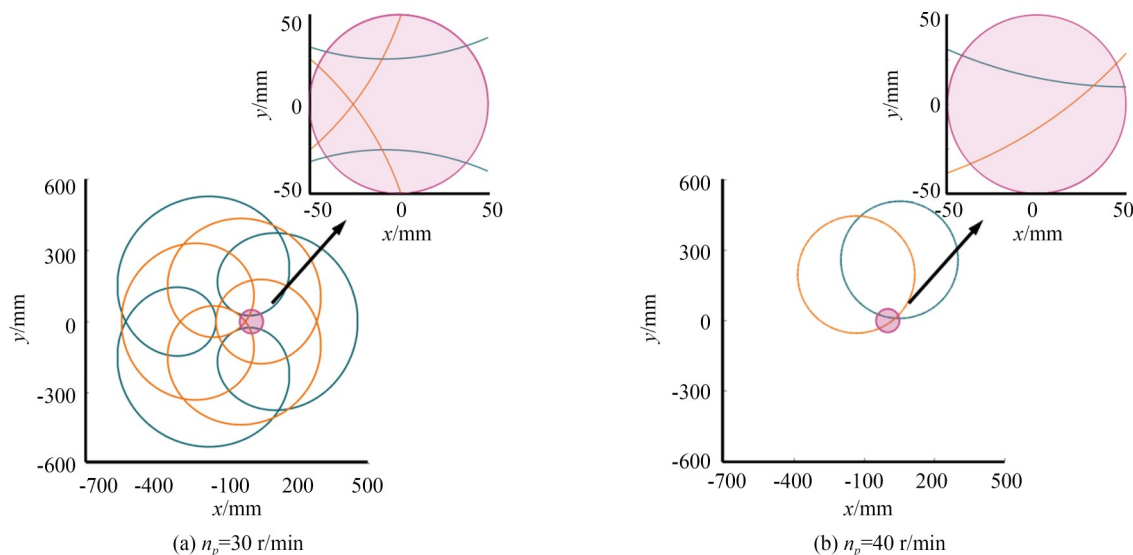
3.4 磨粒轨迹特征分析

为深入分析材料去除和研磨垫磨损均匀性与转速的关系,选取四个典型转速进行单磨粒运动轨迹分析。图 12 展示了不同转速下磨粒相对于工件坐标系的运动轨迹特征。由图可知,研磨垫表面磨粒的运动轨迹呈现明显的周期性特征,这与理论推导的轨迹方程具有良好的一致性。从数学表达式分析,该轨迹方程可以分解为两个简谐运动的叠加:夹具与研磨盘相对转速($n_h - n_p$)决定的周期性分量、夹具自转转速 n_h 决定的周期

性分量。因此,单磨粒的运动周期 T 可由两者最大公约数计算为:

$$T = \frac{1}{\text{GCD}(n_h, |n_h - n_p|)}. \quad (16)$$

由仿真结果可见,磨粒运动轨迹呈现出典型的“花瓣型”特征。花瓣数量分别为 3, 1, 21, 15。花瓣结构的数量 N 可由研磨盘转速 n_p 与夹具转速 n_h 的相对运动关系确定,由于研磨盘半径远大于夹具,其旋转运动对磨粒轨迹起主导作用。在运动周期 T 内,研磨盘的实际转数直接决定了花



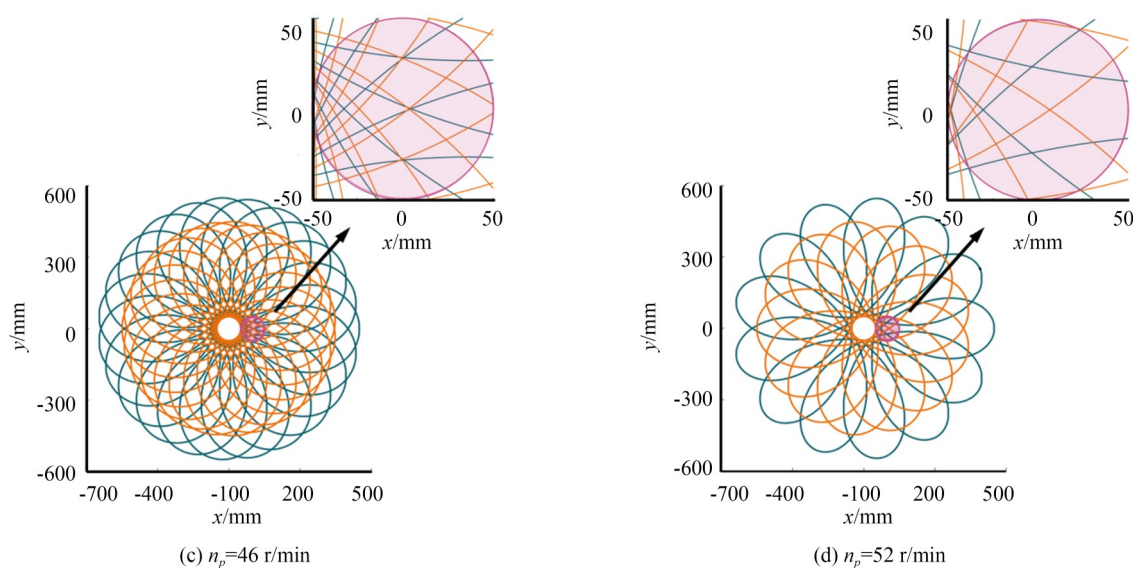


图 12 不同研磨盘转速下工件坐标系内磨粒轨迹

Fig. 12 Abrasive particle trajectories in the workpiece coordinate system under different lapping plate rotational speed

瓣数量,而夹具的旋转仅产生微小调节,花瓣数量可计算为:

$$N = \frac{n_p}{\text{GCD}(n_h, |n_h - n_p|)} \quad (17)$$

根据式(17)可知,磨粒运动轨迹的花瓣特性与转速密切相关:夹具与研磨盘相对转速和研磨盘转速成简单整数比时,磨粒轨迹简单;转速比为非简单整数比时,磨粒轨迹呈现花瓣数量较多的均匀轨迹;夹具与研磨盘转速相同时,磨粒轨迹呈正圆形。

4 熔融石英固结磨料研磨试验

4.1 试验设计与检测方法

在如图 13 所示的单面研磨机上进行熔融石

英固结磨料研磨实验,研磨垫中金刚石磨粒粒径为 $9 \mu\text{m}$,磨粒块呈均匀排布,磨粒块边长为 3 mm ,相邻磨粒块之间的间隙长度为 1.5 mm 。工件为熔融石英,直径为 100 mm ,厚度为 1 mm 。工件的初始表面粗糙度为 $6.028 \mu\text{m}$,平面度为 $22.361 \mu\text{m}$ 。设置研磨盘转速分别为 30 r/min , 40 r/min , 46 r/min , 52 r/min ,研磨压力为 600 N ,调整主动轮转速使夹具自转转速维持 40 r/min ,研磨时间为 15 min ,研磨液为去离子水,设定研磨液流量为 150 ml/min 。

采用光学干涉仪(ZYGO, NV9000)测量工件表面 13 个位置的表面粗糙度。平面度测量采用如图 14 所示的自研平面度测量仪,通过精密位移台驱动共焦位移传感器(Keyence, CL-P015,

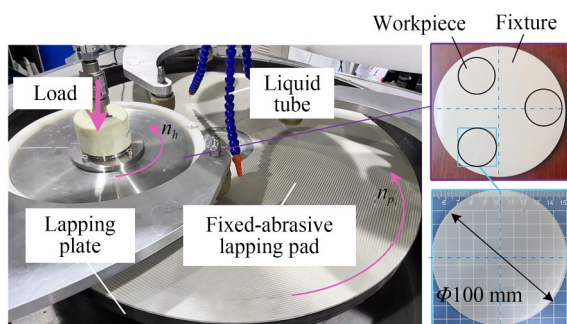


图 13 熔融石英固结磨料研磨实验

Fig. 13 Fixed abrasive lapping process of fused quartz

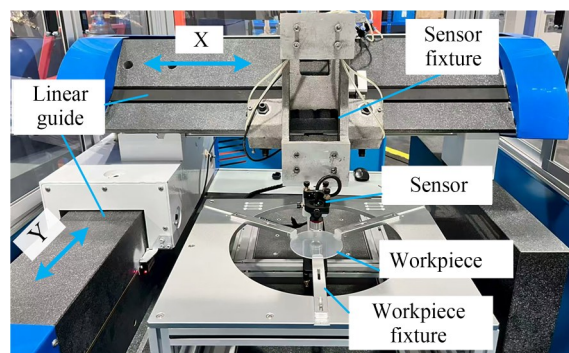


图 14 平面度测量仪

Fig. 14 Flatness measuring instrument

分辨率为 $0.25\ \mu\text{m}$)沿预设的网格路径对工件表面进行扫描,捕获轮廓的起伏数据,并依据最小二乘法对轮廓数据进行处理,计算出工件平面度。

4.2 试验结果

不同转速下熔融石英工件表面粗糙度 S_a 的测量结果,如图 15 所示。当转速为 $40\ \text{r/min}$ 时,工件表面粗糙度 S_a 均值为 $150.49\ \text{nm}$,标准差为 $21.10\ \text{nm}$ 。相比之下,当转速提高至 $46\ \text{r/min}$ 时, S_a 均值下降至 $112.31\ \text{nm}$,标准差为 $10.47\ \text{nm}$ 。这是因为在研磨盘转速为 $46\ \text{r/min}$ 时,研磨垫上磨粒相对于工件表面形成更复杂的运动轨迹,切削方向多样,有效避免了单向纹理的产生,从而提升了表面质量。根据轨迹均匀性分析可知,在该转速下,工件表面轨迹分布更均匀,表面粗糙度的一致性更好。从去除机制来看,由于研磨垫表面磨粒出露高度本身存在差异,较多的磨粒参与加工时,不同高度的磨粒会形成互补的切削效应,从而使整体切削深度分布趋向均匀,能显著降低工件表面粗糙度。

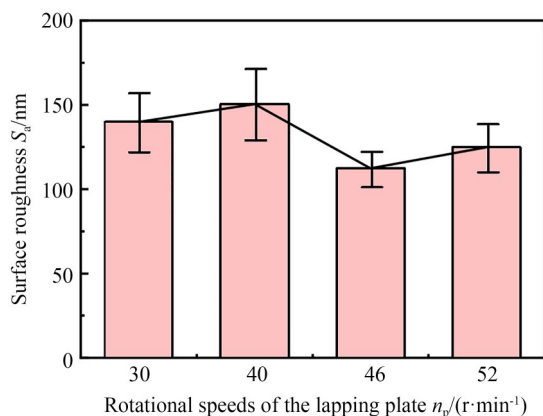


图 15 不同研磨盘转速下表面粗糙度 S_a

Fig. 15 Surface roughness S_a under different rotational speeds

对不同转速下熔融石英工件平面度进行检测,结果如图 16 所示。

由图 16 可知在 $40\ \text{r/min}$,工件平面度最差为 $8.69\ \mu\text{m}$,此时工件表面磨粒轨迹简单重复,轨迹分布均匀性较差,同时研磨垫存在较严重的非均匀磨损,导致研磨过程中工件表面局部材料去除量不一致,从而产生面形恶化。相比之下,在 $46\ \text{r/min}$ 转速下,工件平面度降低至 $4.26\ \mu\text{m}$,此转

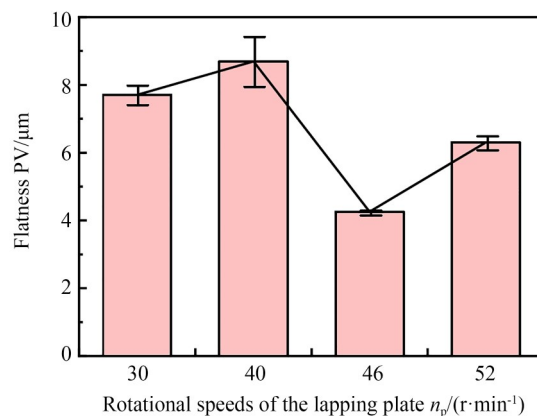


图 16 不同研磨盘转速下平面度 PV

Fig. 16 Flatness PV under different rotational speeds

速下,工件表面磨粒运动轨迹更复杂、工件表面磨粒轨迹和研磨垫磨损也更均匀,最终实现较高的面形精度。

5 结 论

本文在考虑磨粒块实际排布的基础上,建立了磨粒运动学模型,并通过统计磨粒与工件表面的有效接触轨迹长度,对研磨垫磨损均匀性进行了评价,分析了研磨盘转速对磨粒轨迹特征、轨迹均匀性及研磨垫磨损规律的影响,仿真及试验结果表明:

(1) 研磨盘转速对磨粒轨迹均匀性和研磨垫磨损均匀性均具有显著影响,且二者变化规律一致,随转速增加均趋于改善,但当研磨盘与夹具转速为简单整数比时,均匀性明显恶化。

(2) 磨粒轨迹越复杂,轨迹均匀性和研磨垫磨损均匀性越好,在该转速下,不仅可降低工件表面粗糙度,还能改善平面度。

(3) 当研磨盘转速为 $46\ \text{r/min}$ 时,工件表面粗糙度 S_a 和平面度 PV 最佳,分别为 $112.31\ \text{nm}$ 和 $4.26\ \mu\text{m}$ 。

本文为优化固结磨料研磨盘转速、提升工件研磨质量提供了理论指导和实践依据。

作者贡献声明:

贾珣璠:初稿写作、数据整理;

朱祥龙:提供资源、审核与编辑写作;

陈 杰:软件、数据整理和分析;

蔡引娣:数据整理和分析;

康仁科:论文审核和指导;

高 尚:论文构思、指导;

杨 奎:论文构思、指导。

参考文献:

- [1] 郭江, 潘博, 连佳乐, 等. 双面研磨技术研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 266-288.
GUO J, PAN B, LIAN J L, *et al.* Recent development and prospective of double-sided lapping technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(7): 266-288. (in Chinese)
- [2] 王占奎, 杨亚坤, 逢明华, 等. 石英玻璃固结磨料研磨工艺参数响应面模型的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 376-385.
WANG Z K, YANG Y K, PANG M H, *et al.* Response surface model of processing parameters for lapping quartz glass with a fixed abrasive pad [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 376-385. (in Chinese)
- [3] 盛鑫, 朱永伟, 任闯, 等. 固结硅基聚集体金刚石磨料垫的研磨性能[J]. 光学精密工程, 2023, 31(6): 839-848.
SHENG X, ZHU Y W, REN C, *et al.* Lapping performance of fixed silicon-based agglomerated diamond abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(6): 839-848. (in Chinese)
- [4] 盛鑫. K9玻璃的固结磨料高效研磨加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
SHENG X. *Study on High Efficiency Grinding Technology of K9 Glass with Fixed Abrasive* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. (in Chinese)
- [5] HU Z W, FANG C F, DENG W W, *et al.* Speed ratio optimization for ceramic lapping with fixed diamond pellets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 3159-3169.
- [6] FANG C F, YAN Z, HU Z W, *et al.* Pattern design of fixed abrasive pads inspired by the bee colony theory [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5): 2563-2574.
- [7] 肖婧婷, 吴晓峰, 蔡姚杰, 等. 无理偏摆式平面研磨加工均匀性的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 232-241.
XIAO Y T, WU X F, CAI Y J, *et al.* Numerical simulation on uniformity of plane lapping with irrational swinging method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 232-241. (in Chinese)
- [8] LIU N, WU P F, NIU F L, *et al.* Trajectory uniformity in fixed abrasive plane lapping of BK7 glass [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(1): 899-908.
- [9] WANG L J, HU Z W, FANG C F, *et al.* Study on the double-sided grinding of sapphire substrates with the trajectory method [J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 308-318.
- [10] ZHANG P, YANG J F, LI L. Trajectory uniformity of the double-sided mechanical polishing of SiC single crystal substrate [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 107: 104814.
- [11] YANG L, GUO X G, KANG R K, *et al.* Effect of kinematic parameters considering workpiece rotation on surface quality in YAG double-sided planetary lapping with the trajectory method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(7): 2679-2690.
- [12] 薛赛赛, 郭晓光, 贾珣璠, 等. 基于磨粒三维轨迹的钽酸锂双面研磨均匀性[J]. 光学精密工程, 2024, 32(13): 2081-2090.
XUE S S, GUO X G, JIA Y F, *et al.* Double-sided lapping uniformity of LiTaO₃ based on three-dimensional trajectory of particles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(13): 2081-2090. (in Chinese)
- [13] CHENG Z P, GAO H, LIU Z Y, *et al.* Investigation of the trajectory uniformity in water dissolution ultraprecision continuous polishing of large-sized KDP crystal [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, 2(4): 045101.
- [14] CHENG Z P, WANG X P, GAO H, *et al.* Study on the groove geometry of pad in water dissolution polishing of soft brittle materials based on trajectory analysis [J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 290-299.
- [15] 林彬, 李凯隆, 曹中臣, 等. 固结磨料确定性研磨表面生成建模与实验分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(9): 917-931.

LIN B, LI K L, CAO Z C, *et al.* Surface generation modeling and experimental analysis of the fixed abrasive deterministic lapping process[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(9): 917-931. (in Chinese)

[16] 郭磊, 明子航, 靳淇超, 等. 弹性基体磨具的磨抛

轨迹与表面加工质量研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(12): 255-268.

GUO L, MING Z H, JIN Q C, *et al.* Polishing trajectory and surface machining quality of elastic matrix abrasive tool [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(12): 255-268. (in Chinese)

通讯作者:



贾珂璠(1999—),女,河北石家庄人,博士研究生,2016年于大连理工大学获得学士学位,2023年于大连理工大学获得硕士学位,主要研究方向为光学元件精密研磨及抛光技术。E-mail: jyffan@outlook.com

通讯作者:



朱祥龙(1981—),男,辽宁大连人,博士,教授,2004年于吉林大学获得学士学位,2011年于大连理工大学获得博士学位,主要研究方向为硬脆元件研磨及抛光、复杂型腔测量加工一体化技术与装备。E-mail: zhuxianglong@dlut.edu.cn