

# 超声振动复合研磨 K9 光学玻璃工艺研究

朱子俊, 刘顺, 韩冰, 陈燕

(辽宁科技大学 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** **目的** 探究超声振动复合研磨对光学玻璃研磨可行性, 通过响应面法寻求超声振动研磨最优的工艺参数组合。**方法** 在传统研磨装置基础上, 添加超声振动装置、蠕动泵、旋转工作台构成超声振动复合研磨装置。添加轴向超声高频振动提高研磨效率, 添加旋转工作台提高研磨均匀性, 添加蠕动泵便于循环和更新研磨液。利用响应面法优化超声振动复合研磨加工中的主轴转速、振动频率、加工间隙三个变量参数, 并进行实验研究, 可得出两两变量关联度, 从而得出研磨中影响最大的因素。**结果** 通过响应面优化后得到超声振动复合研磨最佳工艺参数为主轴转速 1000 r/min、加工间隙 0.4 mm、振动频率 12 kHz, 主轴转速和间隙参数对工件表面研磨加工的影响较大。经 25 min 研磨, 无超声振动的传统研磨方法使表面粗糙度值  $R_a$  从 0.3  $\mu\text{m}$  下降到 0.1  $\mu\text{m}$ ; 增加超声振动复合研磨使表面粗糙度值  $R_a$  从 0.3  $\mu\text{m}$  下降到 0.04  $\mu\text{m}$ 。**结论** 经超声振动复合研磨后, 光学玻璃表面存在的凹坑、凸起均得到了有效去除, 表面粗糙度值下降快, 表面形貌均匀、平整。

**关键词:** 超声振动复合研磨; 响应面法; 光学玻璃; 法向压应力; 表面粗糙度值; 表面微观形貌

**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0074-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.009

## Study on Hybrid Technology of Ultrasonic Vibration Assisted Abrasive Lapping K9 Optical Glass

ZHU Zi-jun, LIU Shun, HAN Bing, CHEN Yan

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the feasibility of ultrasonic vibration hybrid lapping for optical glass, and seek the optimal combination of process parameters by ultrasonic vibration lapping through response surface method. Ultrasonic vibration, peristaltic pump and rotating table are added to the traditional lapping device to form an ultrasonic vibration hybrid lapping device. The addition of axial ultrasonic high frequency vibration improves the lapping efficiency; adding a rotating table to improve the lapping uniformity; adding a peristaltic pump facilitates circulation and renewal of the slurry. The response surface method is used to optimize the three variables of spindle speed, vibration frequency and machining gap in the ultrasonic

收稿日期: 2019-10-25; 修订日期: 2020-01-25

Received: 2019-10-25; Revised: 2020-01-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省教育厅重点项目 (2017LNZD02)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775258), Liaoning Provincial Department of Education Key Projects (2017LNZD02)

作者简介: 朱子俊 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: ZHU Zi-jun (1995—), Female, Master, Research focus: precision machining.

通讯作者: 陈燕 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工。邮箱: laochen412@gmail.com

Corresponding author: CHEN Yan (1963—), Female, Doctor, Professor, Research focus: precision machining. E-mail: laochen412@gmail.com

引文格式: 朱子俊, 刘顺, 韩冰, 等. 超声振动复合研磨 K9 光学玻璃工艺研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 74-80.

ZHU Zi-jun, LIU Shun, HAN Bing, et al. Study on hybrid technology of ultrasonic vibration assisted abrasive lapping K9 optical glass[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 74-80.

vibration hybrid lapping process, and the experimental research can be carried out to obtain the correlation degree between the two variables, and the most influential factors in the lapping are obtained. The optimal process parameters of ultrasonic vibration hybrid lapping after response surface optimization are: spindle speed 1000 r/min, machining gap 0.4 mm, vibration frequency 12 kHz, spindle speed and clearance parameters, which have a great influence on the surface lapping process. After 25 min lapping, the conventional lapping method without ultrasonic vibration is used to grind, and the surface roughness  $Ra$  decreases from 0.3  $\mu\text{m}$  to 0.1  $\mu\text{m}$ . After the ultrasonic vibration hybrid lapping, the surface roughness  $Ra$  decreases from 0.3  $\mu\text{m}$  to 0.04  $\mu\text{m}$ . After ultrasonic vibration hybrid lapping, the pits and bulges on the surface of the optical glass are effectively removed, the surface roughness value decreases rapidly, and the surface morphology is uniform and flat.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration compound lapping; response surface method; planar optical glass; normal compressive stress; surface roughness value; surface micromorphology

光学玻璃是一种硬脆难加工的材料,具有抗高温性好、硬度高、抗变形能力强、折射率变化范围大等性能,被广泛应用于航空航天、医学、军事等领域<sup>[1-2]</sup>。光学玻璃所制成零部件加工后形成的表面质量对其后续的使用性能及寿命有很大的影响<sup>[3]</sup>。目前对于光学玻璃的光整加工仍停留在采用抛光垫携带氧化铈磨粒加工表面工艺上,但经过这种传统研磨方法加工成形后,光学玻璃的表面光滑度、表面质量以及加工效率等仍然不能满足军工、医学等领域对玻璃表面质量的要求<sup>[4-6]</sup>,在很大程度上降低了光学零部件的使用性能及可靠性,甚至还会影响光学玻璃制成的成品与配套零件的装配精度<sup>[7-8]</sup>。为提高加工精度和加工效率,以  $\phi 47\text{ mm} \times 9\text{ mm}$  的 K9 光学玻璃为研究对象,针对目前传统研磨加工方法不足,设计出一种超声振动复合研磨装置。在主轴上安装超声振动装置,增加单位时间内磨粒对工件表面的冲击频率,提高研磨效率;安装旋转工作台增大超声振动研磨作用面积的同时,也改善磨粒的运动轨迹;采用蠕动泵抽取的方式均匀添加氧化铈研磨液(氧化铈磨粒+研磨液)<sup>[9-10]</sup>。利用 Workbench R17.0 模拟并对比了传统研磨与超声振动复合研磨对光学玻璃表面的法向压应力;利用响应面法分析了主轴转速、聚氨酯与工件之间的加工间隙、超声波振子振动频率的交互作用,并得出了最优的组合方案;分别在传统研磨装置和超声振动复合研磨装置上进行最优组合试验参数的试验,并对研磨

后的表面粗糙度和表面形貌进行对比。

## 1 法向压应力分析

如图 1a 所示,传统研磨加工中,聚氨酯垫粘接固定在研磨头上,外部喷射含有氧化铈磨粒的研磨液。研磨头旋转带动聚氨酯垫裹挟氧化铈研磨液在工件表面摩擦、划刻,完成工件表面加工。超声振动复合研磨加工过程中,超声波发生器产生电信号由超声波振子转化为机械振动,并通过振子末端的变幅杆放大振幅,使得研磨头部的聚氨酯垫裹挟氧化铈研磨液与工件的相对旋转运动中还夹带有轴向高频振动,提高单位时间内研磨磨粒对工件表面的摩擦、刻划频率,快速降低表面粗糙度,提高研磨效率。

为了验证两种加工方法本质上的区别,测量研磨头对工件表面压力以及超声波振子的平均压力。利用 Workbench R17.0 软件,分析对比传统研磨与超声振动复合研磨各自对玻璃表面的法向压应力,如图 2 所示。

由图 2 得知,传统研磨的法向压应力为 15.7 MPa,而超声振动复合研磨法向压应力上升为 18.5 MPa。这是因为添加超声振动装置后,超声振动经过变幅杆的放大,将超声振动冲击作用传递到研磨头上,进而使粘在研磨头上的聚氨酯垫裹挟着磨粒对光学玻璃表面的冲击频率及法向压应力增大。

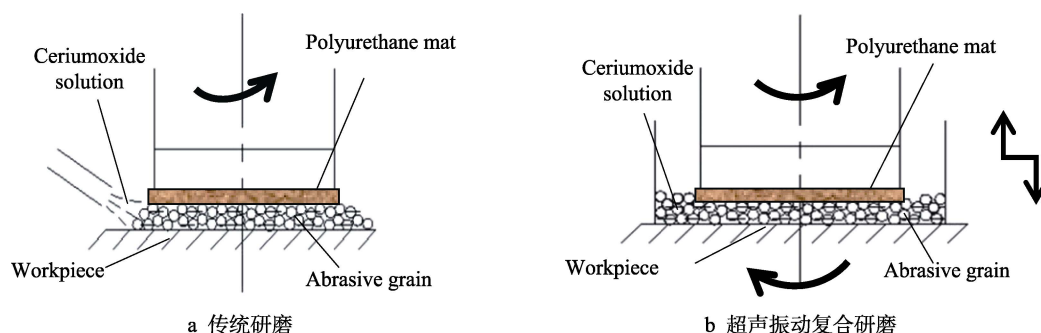


图 1 传统研磨及超声振动复合研磨加工原理图

Fig.1 Principle of traditional lapping and ultrasonic vibration hybrid lapping:  
a) traditional lapping; b) ultrasonic vibration compound lapping

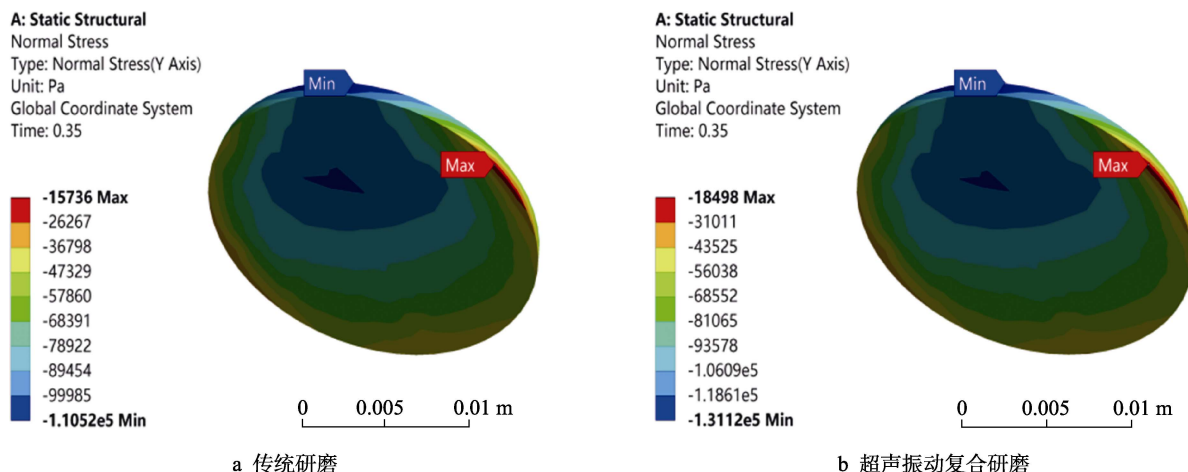


图2 法向压应力对比图

Fig.2 Normal compression stress contrast diagram: a) traditional lapping; b) ultrasonic vibration compound lapping

## 2 实验装置及条件

图3为超声振动复合研磨装置示意图。超声波夹持在钻床主轴上,集电环通电后经过换能器将超声波发生器设置输出的电信号转换成纵向振动信号,并通过变幅杆将振动信号源放大,带动装有研磨装置的研磨头振动,其中研磨头装夹在变幅杆前端的筒夹内<sup>[11-12]</sup>,聚氨酯垫通过强粘性胶固定在研磨头上。将光学玻璃装夹在旋转工作台上,工作台通过调速电机带动旋转。蠕动泵喷射氧化铈研磨液湿润聚氨酯垫,使聚氨酯垫储存大量的氧化铈粒子,随研磨头旋转对工件表面进行研磨。氧化铈研磨液作用于聚氨酯垫与

光学玻璃工件的间隙,还起到润滑和降温的作用。同时,超声波高频振动使氧化铈研磨液形成空化效应,将氧化铈研磨液中的氧化铈粒子作用在工件表面,具有局部瞬间强冲击力。超声波的轴向高频振动使粘在研磨头上的聚氨酯垫裹挟着氧化铈磨粒高频冲击光学玻璃表面,将工件表面凹凸不平的尖点打碎,使玻璃表面莫氏硬度降低,再通过旋转运动推动聚氨酯垫裹挟着氧化铈磨粒参与磨削,从而提高表面质量<sup>[13-14]</sup>。试验时选用K9玻璃作为研究对象,该材料属于硬、脆材料,规格为 $\phi 47\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 。使用JB-8E触针式表面粗糙度测量仪测定表面粗糙度值。使用VHX-500F超景深3D电子显微镜观测表面微观形貌。

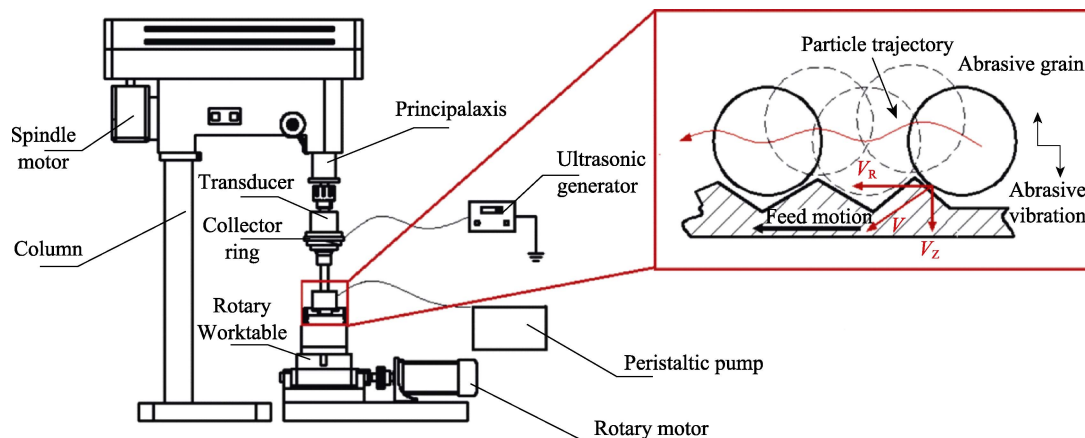


图3 超声振动复合研磨装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic vibration hybrid lapping device

## 3 结果及分析

### 3.1 主要影响因素交互作用

利用响应面法分析加工间隙(gap)、主轴转速( $n$ )、振动频率( $f$ )的交互作用对表面粗糙度值( $Ra$ )的影响规律,试验条件如表1所示。

根据响应面法原理,基于Box-Behnken试验设

计,选取主要影响因素进行试验,选取主轴转速(A)、加工间隙(B)、振动频率(C)为试验因素,进行试验研究,具体试验设计如表2所示。

其中表面粗糙度作为响应值,根据式(1)对响应值进行编码。

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为自变量的编码值; $X_i$ 为自变量的真实

表 1 实验条件  
Tab.1 Experimental condition

Project	Parameter
Equipment	Ultrasonic vibration lapping device
Specimen	K9 (φ47 mm×9 mm)
Abrasive	CeO <sub>2</sub>
Rotary tablespeed (n <sub>1</sub> )/(r·min <sup>-1</sup> )	5
Machining gap (gap)/mm	0.3, 0.4, 0.5
Spindle speed (n)/(r·min <sup>-1</sup> )	800, 1000, 1200
Vibration frequency (f)/kHz	12, 15, 18
Lapping tool	Polyurethane

表 2 Box-Behnken 试验设计  
Tab.2 Box-Behnken test design

No.	A (r·min <sup>-1</sup> )	B (mm)	C (kHz)	Ra (μm)
1	800.00	0.40	18.00	0.10
2	1200.00	0.30	15.00	0.08
3	1000.00	0.40	15.00	0.05
4	1000.00	0.40	15.00	0.05
5	800.00	0.40	12.00	0.09
6	1200.00	0.50	15.00	0.06
7	1000.00	0.40	15.00	0.04
8	1200.00	0.40	18.00	0.04
9	1000.00	0.40	15.00	0.05
10	1000.00	0.40	15.00	0.05
11	1200.00	0.40	12.00	0.04
12	1000.00	0.30	12.00	0.07
13	1000.00	0.50	12.00	0.05
14	1000.00	0.50	18.00	0.05
15	1000.00	0.30	18.00	0.08
16	800.00	0.30	15.00	0.11
17	800.00	0.50	15.00	0.10

值； $X_0$  为中心点处自变量的真实值； $\Delta X$  为自变量变化步长。

其中以 A、B、C 作为自变量，通过响应面法制定一个关于输出响应  $y_u$  和输入过程变量之间的数学相关公式，这个广义的二阶数学响应面模型用来分析输入变量对输出响应的影响，如公式(2)所示。

$$y_u = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_{iu} x_{ju} + e_u \tag{2}$$

式中： $y_u$  代表在编码中第  $u$  个输出响应  $x_{iu}$  对应的第  $i$  个输入变量， $n$  是输入变量的数目， $\beta_i$ 、 $\beta_{ii}$ 、 $\beta_{ij}$  是回归系数， $e_u$  是对应第  $u$  个输出响应的剩余残差。

对处理的数据进行多元耦合，得出回归方程与表面粗糙度拟合曲线为：

$$y_u = 0.048 - 0.023A - 0.01B + 0.0025C - 0.0025AB - 0.0025AC - 0.0025BC + 0.022A^2 + 0.017B^2 - 0.00275C^2 \tag{3}$$

通过图 4 得出，回归方程与表面粗糙度拟合程度很高，模型  $R^2$  值为 0.9626 接近于 1，说明经响应面法拟合得到的数学模型可靠性较好，得到的结果可满足试验要求。

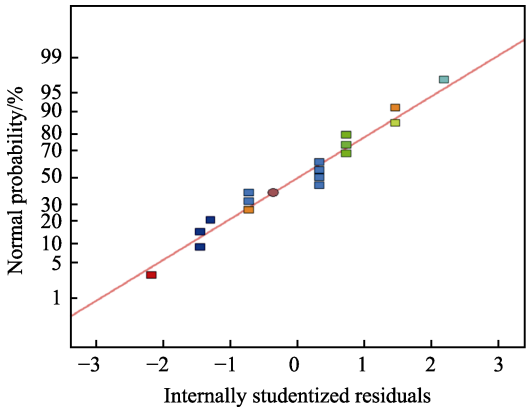


图 4 表面粗糙度数据拟合  
Fig.4 Surface roughness data fitting

通过响应面分析得到如图 5 所示表面粗糙度的方差分析数据，表面粗糙度的模型  $F=20.02>F_{0.01}=6.992$ ，方程的试验设计有一定的可靠性；标准模型的失拟度  $P=0.0003<0.05$ ，模型具有一定的统计学意义；模型的失拟度  $P=0.1008$ ， $F=4.17$ ，试验无失拟度要求；对单因素显著性判别，得到主轴转速及间隙较为显著，对表面粗糙度值  $Ra$  影响较大。

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	8.494E-003	9	9.437E-004	20.02	0.0003 significant
A-主轴转速	4.050E-003	1	4.050E-003	85.91	< 0.0001
B-间隙	8.000E-004	1	8.000E-004	16.97	0.0045
C-振动频率	5.000E-005	1	5.000E-005	1.06	0.3373
AB	2.500E-005	1	2.500E-005	0.53	0.4901
AC	2.500E-005	1	2.500E-005	0.53	0.4901
BC	2.500E-005	1	2.500E-005	0.53	0.4901
A <sup>2</sup>	2.084E-003	1	2.084E-003	44.22	0.0003
B <sup>2</sup>	1.253E-003	1	1.253E-003	26.58	0.0013
C <sup>2</sup>	3.184E-005	1	3.184E-005	0.68	0.4383
Residual	3.300E-004	7	4.714E-005		
Lack of Fit	2.500E-004	3	8.333E-005	4.17	0.1008 not significant
Pure Error	8.000E-005	4	2.000E-005		
Cor Total	8.824E-003	16			

图 5 表面粗糙度模型方差分析图  
Fig.5 Variance analysis chart of surface roughness model

上述因素响应面法分析后，使用控制变量法得出两两因素之间在实验中的叠加使用效果，对表面粗糙度值  $Ra$  的影响，结果如图 6 所示。研磨头带动聚氨酯垫在 15 kHz 振动频率下，聚氨酯垫与工件间隙的大小和钻床的主轴转速在不同值时复合作用的影响趋势如图 6a 所示，两者交互作用显著。在振动频率不变时，主轴转速从 800 r/min 增加到 1200 r/min 时，表面粗糙度值先下降后上升。因为主轴转速的增加，



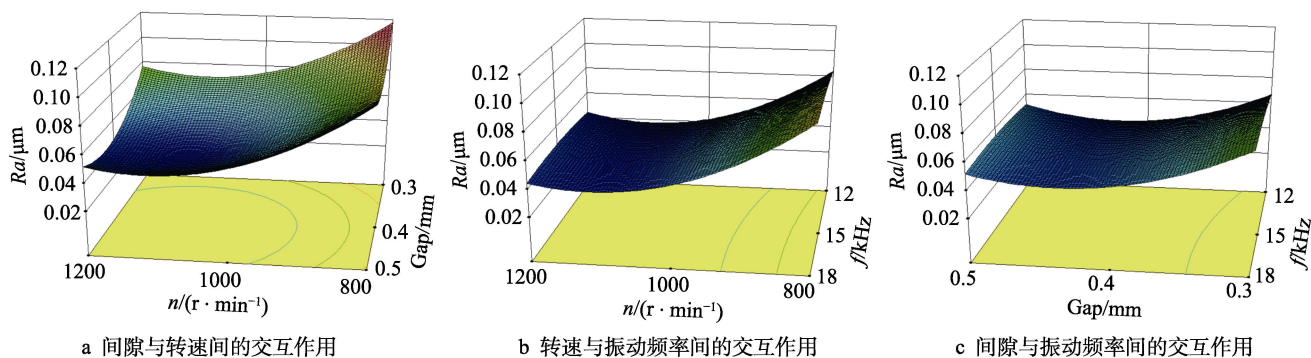


图6 响应面法分析三因素作用影响图

Fig.6 Response surface methodology analysis of three factors: a) interaction between clearance and speed; b) interaction between speed and vibration frequency; c) interaction between clearance and vibration frequency

使单位时间内氧化铈颗粒对工件表面划刻次数增加,因此工件表面粗糙度值降低;当主轴转速过大时,研磨粒子受离心力作用,粒子飞出加工区域,单位面积内粒子数较少,加工区域内主要表现为超声波空化作用产生的冲击力对工件表面材料的微量去除,因此表面粗糙度值虽有上升但仍小于转速 800 r/min 时的表面粗糙度值。

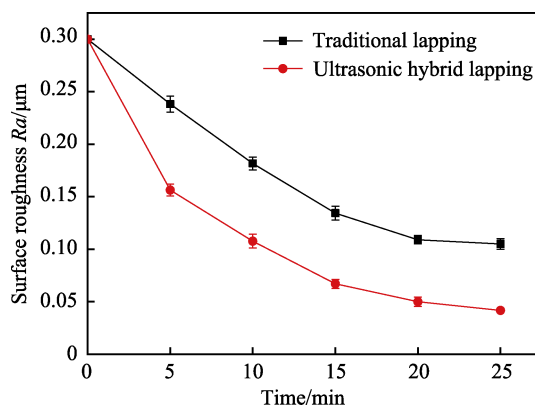
加工间隙保持 0.4 mm 时,主轴转速与振动频率在不同值时复合作用的影响趋势如图 6b 所示。钻床的主轴转速从 1000 r/min 增加到 1200 r/min 的过程中,表面粗糙度值趋于稳定。振动频率从 12 kHz 增加至 18 kHz,工件表面粗糙度值变化比较稳定。因为加工头与工件间隙确定为合适值时,超声波装置末端的变幅杆放大经换能器转换的轴向机械振动,带动聚氨酯垫裹挟氧化铈颗粒冲击工件表面,使得工件表面的尖点优先被去除。因此随着变幅杆频率的增加,单位时间内研磨粒子作用在玻璃表面上的冲击力增强,加快了氧化铈颗粒对毛刺的去除。但是,随着超声频率增加到 18 kHz,研磨颗粒对工件表面的冲击作用过于强烈,在较大冲击力的作用下,研磨粒子被压入工件表面,随着研磨头的旋转,研磨粒子在工件表面产生划痕,使表面粗糙度值微量上升。

主轴转速保持 1000 r/min 时,加工间隙与振动频率在不同值时复合作用的影响趋势如图 6c 所示。加工间隙为 0.4 mm、振动频率为 12 kHz 时,表面粗糙度值达到最低。随着加工间隙的增加,表面粗糙度值呈现先下降后上升的趋势。加工间隙的增大,使更多的氧化铈颗粒填充到加工间隙中,加大了对玻璃表面的刻划作用;加工间隙的增大,受到振动作用的氧化铈颗粒的惯性增大,撞击到玻璃表面的作用力增大,从而加大了对表面的刻划作用,使表面粗糙度降低。但是加工间隙过大,受到振动的氧化铈颗粒无法将作用力全部作用到玻璃表面上,使表面受到的刻划作用减弱,从而使表面粗糙度增大。

综上所述,得出优化后的工艺组合为:主轴转速 1000 r/min,加工间隙 0.4 mm,振动频率 12 kHz。

### 3.2 表面粗糙度分析

选取最优工艺参数组合:主轴转速 1000 r/min,加工间隙 0.4 mm,振动频率 12 kHz,保证其他研磨条件相同。试验采用记录研磨过程中相关数据的方式,进行超声复合振动与传统研磨工艺的加工效果对比,如图 7 所示。

图7 不同研磨工艺表面粗糙度值对比图  
Fig.7 Comparison diagram of surface roughness values of different lapping processes

由图 7 可知,在开始研磨前 5 min 内,表面粗糙度值下降较快,其中超声振动复合研磨下降最快,表面形貌粗糙度测量值下降了  $0.15 \mu\text{m}$ ,而传统研磨表面形貌粗糙度测量值下降了  $0.07 \mu\text{m}$ 。随后其测量值下降减缓,25 min 后,超声振动复合研磨粗糙度值下降到  $0.04 \mu\text{m}$ ,传统研磨粗糙度值下降到  $0.1 \mu\text{m}$ 。因为超声振动经变幅杆放大将氧化铈颗粒挤压到工件表面,压力增大的同时高频冲击工件表面,从而在单位时间内对光学玻璃表面的刻划次数增多;超声振动经变幅杆放大能将工件表面的毛刺和凸点振碎,氧化铈研磨液在高频振动下出现空化效应,激发冲击工件表面,提高研磨效率。旋转工作台按一定周期自动旋转,结合研磨头的旋转主运动及超声波的轴向高频振动,优化了传统研磨中磨粒单一角度及单一轨迹的旋

转运动,使粒子在旋转时受到超声波空化作用,改变其旋转直径及加工角度形成多轨迹加工,使玻璃表面的各个位置均匀承受研磨压力,从而提高了工件表面不同位置表面粗糙度值的均匀程度。利用蠕动泵滴加研磨液,既不会对玻璃表面造成腐蚀,又可循环利用研磨液,使超声振动复合研磨的表面粗糙度值较低,

研磨效率提高。

### 3.3 表面形貌分析

使用超景深电子显微镜对不同研磨工艺加工得到的表面形貌,在放大 200 倍下,查看 2D 图的表面痕迹及 3D 图的峰值与低谷处差值,如图 8 所示。

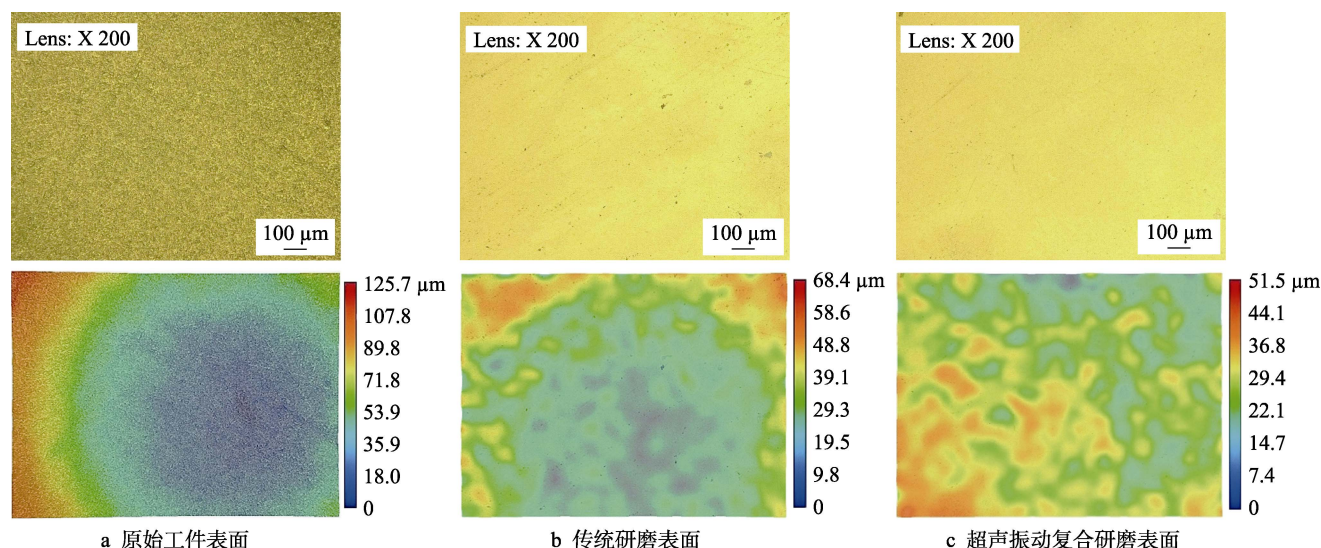


图 8 不同研磨工艺表面显微形貌对比图

Fig.8 Comparison diagram of surface micromorphology of different lapping processes: a) original workpiece surface; b) traditional lapping surface; c) ultrasonic vibration compound lapping surface

对比图 8a—c 的表面形貌可知,工件原始表面上存在很多凸起和尖点,表面粗糙度值为  $0.3 \mu\text{m}$ ,通过传统研磨加工后,工件表面的尖点及凸起得到一定的去除,表面较为平整,玻璃表面质量得到明显提高,但玻璃表面缺陷依然残留,表面凹坑比较严重。而利用超声振动复合研磨加工后,工件表面存在的凹坑及凸起均得到了有效去除,表面形貌均匀、平整,达到使用要求,明显优于传统研磨的表面质量。

图 9 为传统研磨与超声振动复合研磨工件表面质量实物图,图 9a 为使用传统研磨方法加工得到,工件的表面平整度及粗糙度值不佳,且透光性较差,氧化铈粒子未能深入加工。图 9b 为使用添加超声装置及旋转工作台的加工工艺研磨后,工件表面变得比较光滑,可以清晰地透过工件看到工件下的字体。



图 9 不同研磨工艺表面质量对比图

Fig.9 Comparison diagram of surface quality of different lapping processes

加工后表面没有划痕,表面质量较为均匀,加工效果良好。

## 4 结论

1) 在对光学玻璃进行光整加工时,采用超声振动复合研磨加工后,经过 25 min 的研磨,工件表面存在的凹坑及凸起均得到了有效去除,表面形貌均匀、平整。工件表面粗糙度值由原始的  $0.3 \mu\text{m}$  下降到  $0.04 \mu\text{m}$ ,表面质量均匀程度得到显著提高,加工质量明显高于传统研磨。

2) 通过数值模拟分析,超声振动复合研磨的法向压应力在传统研磨基础上得到明显提高。利用响应面法分析了 3 种主要影响因素对表面粗糙度值的影响规律,得出优化后的最优工艺组合:主轴转速 1000 r/min,加工间隙 0.4 mm,振动频率 12 kHz。

### 参考文献:

- [1] 王承遇,李松基,陶瑛,等. 超光滑超精密玻璃抛光新技术[J]. 玻璃, 2009, 36(10): 33-37.  
WANG Cheng-yu, LI Song-ji, TAO Ying, et al. Super smooth ultra precision glass polishing new technology[J]. Glass, 2009, 36(10): 33-37.
- [2] 刘海燕. TFT-LCD 用玻璃基板的性能及检测[J]. 玻璃,

- 2009, 36(1): 22-24.
- LIU Hai-yan. Performance and test of glass substrate for TFT-LCD[J]. Glass, 2009, 36(1): 22-24.
- [3] 王军, 方晓明. 在硬脆材料玻璃上超声振动研磨钻孔试验研究[J]. 新技术新工艺, 2009(1): 15-17.
- WANG Jun, FANG Xiao-ming. Test research of lapping and drilling with ultrasonic vibration on hard and brittle glasses[J]. New technology, 2009(1): 15-17.
- [4] 肖强, 王玉荣. 光学玻璃超精密镜面磨削表面质量影响试验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 88-89.
- XIAO Qiang, WANG Yu-rong. Experimental study on the surface quality in electrolytic in-process dressing lapping on optical glass[J]. Lubrication and seal, 2007, 32(12): 88-89.
- [5] 张黎, 李树德, 蔡庆福, 等. 光学玻璃的超声波精密加工[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(b8): 144-146.
- ZHANG Li, LI Shu-de, CAI Qing-fu, et al. On ultrasonic precision machining for optical glass[J]. Geodetic and geodynamics, 2009, 29(b8): 144-146.
- [6] 杨鑫宏, 韩杰才. 脆性光学材料的超声磨削实验研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 65-67.
- YANG Xin-hong, HAN Jie-cai. Experimental study on ultrasonic vibration lapping of brittle optical materials[J]. Optics, 2007, 33(1): 65-67.
- [7] 尹韶辉, 林伟民. 一种光学材料高效超精密加工方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2540-2544.
- YIN Shao-hui, LIN Wei-min. A high efficient ultra-precision synergistic finishing process for optical materials[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(21): 2540-2544.
- [8] 周忆, 米林, 廖强, 等. 基于超声研磨的超精密加工[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(1): 1-4.
- ZHOU Yi, MI Lin, LIAO Qiang, et al. Ultra precision machining technique based on ultrasonic polishing[J]. Aeronautical precision manufacturing technology, 2003, 39(1): 1-4.
- [9] 梁晶晶, 刘永姜, 吴雁, 等. 超声加工技术及其在陶瓷加工中的应用[J]. 机械管理开发, 2008, 23(1): 63-64.
- LIANG Jing-jing, LIU Yong-jiang, WU Yan, et al. Ultrasonic machining technology and application in ceramic manufacturing[J]. Mechanical management development, 2008, 23(1): 63-64.
- [10] 王庆仓, 张晓东, 苏建修, 等. SiC 单晶片化学机械研磨试验研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 137.
- WANG Qing-cang, ZHANG Xiao-dong, SU Jian-xiu, et al. Experimental study on chemical mechanical lapping of sicsingle crystal wafer[J]. Surface technology, 2015, 44(4): 137.
- [11] WU Y, KONDO T, KATO M. A new centerless lapping technique using a surface grinder[J]. Journal of materials processing technology, 2005(162): 709-717.
- [12] ARULMOZHI K T, SHEELARANI R. Prediction of ultrasonic velocities in ternary oxide gasses using microstructural properties of the constituents as predictor variables artificial neural network(ANN) approach[J]. Scientiairanica, 2012, 19(1): 127-131.
- [13] 赵莉, 王时英, 轧刚. 超声加工中变幅杆的动力学分析[J]. 电加工与模具, 2005(2): 35-38.
- ZHAO Li, WANG Shi-ying, ZHA Gang. Dynamic analysis of the horn in ultrasonic machining[J]. Electrical machining and die, 2005(2): 35-38.
- [14] 韩宝军, 何琼, 杨妙. 机械研磨工艺对 AZ91D 镁合金显微结构的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 78-82.
- HAN Bao-jun, HE Qiong, YANG Miao. Effects of surface mechanical attrition treatment technique on microstructure of AZ91D magnesium alloys[J]. Surface technology, 2015, 44(2): 78-82.
- [15] 阎秋生, 李基松, 潘继生. 熔融石英玻璃衬底的平面研磨加工实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(1): 60-65.
- YAN Qiu-sheng, LI Ji-song, PAN Ji-sheng. Experimental study on plane grinding of fused silica glass substrate[J]. Diamond and abrasive tool engineering, 2019, 39(1): 60-65.
- [16] 侯保江, 水涌涛, 孙向春, 等. 碳化硅陶瓷超声波辅助磨削表面完整性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 209-211.
- HOU Bao-jiang, SHUI Yong-tao, SUN Xiang-chun, et al. Study on the surface integrity of SiC ceramic ultrasonic assisted grinding[J]. Journal of weapon equipment engineering, 2019, 40(7): 209-211.
- [17] 张承龙, 冯平法, 吴志军. 旋转超声加工振幅与实际切削深度特性研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(7): 883-888.
- ZHANG Cheng-long, FENG Ping-fa, WU Zhi-jun. Research on the properties of ultrasonic vibration amplitude and actual cutting depth in rotary ultrasonic machining[J]. Acta armamentarii, 2013, 34(7): 883-888.