

基于田口法的石英玻璃剪切增稠抛光 工艺参数优化

邵琦, 邵蓝樱, 吕冰海, 赵萍, 王金虎, 袁巨龙

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

摘 要: **目的** 研究石英玻璃剪切增稠抛光 (STP) 过程中, 不同抛光参数对材料去除率及表面粗糙度的影响, 提高石英玻璃表面质量, 并优化工艺参数。**方法** 基于田口法设计实验, 以材料去除率、表面粗糙度为评价指标, 分析抛光速度、磨粒浓度和抛光液 pH 值三个关键参数对石英玻璃 STP 抛光效果的影响。通过信噪比评估实验结果, 采用方差分析 (ANOVA) 法计算各因素的权重, 并得出最优工艺参数组合。**结果** 抛光液 pH 值对 Sa 的影响最大 (41.85%), 其次是磨粒浓度 (39.06%) 和抛光速度 (19.09%)。磨粒浓度对材料去除率 (MRR) 的影响最显著 (63.78%), 其次是抛光速度 (28.81%) 和抛光液 pH 值 (7.41%)。在优选的抛光参数组合 (抛光速度 100 r/min, 磨粒质量分数 12%, 抛光液 pH=8) 下, 石英玻璃在抛光 8 min 后, 表面粗糙度 Sa 从 (110 ± 10) nm 降低到 (1.2 ± 0.3) nm, MRR 达到 165.2 nm/min。**结论** 在优化工艺参数下进行剪切增稠抛光, 可有效去除石英玻璃表面划痕, 提高石英玻璃表面质量。剪切增稠抛光可应用于石英玻璃平面及曲面抛光。

关键词: 石英玻璃; 剪切增稠抛光; 材料去除率; 表面粗糙度; 田口法

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0085-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.008

Parameter Optimization by Taguchi Method for Shear Thickening Polishing Process of Quartz Glass

SHAO Qi, SHAO Lan-ying, LYU Bing-hai, ZHAO Ping, WANG Jin-hu, YUAN Ju-long

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: To improve the quartz glass surface quality and optimize the process parameters, the influence of different polishing parameters on the material removal rate (MRR) and surface roughness in the process of quartz glass shear thickening polishing (STP) was studied. Experiments were designed based on the Taguchi method, and the MRR and surface roughness were used as evaluation conditions to analyze the effects of three key parameters, including polishing speed, abrasive concentration, and the slurry pH value on the STP process of quartz glass. The experimental results were evaluated by the signal-to-

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-11-03

Received: 2021-09-02; Revised: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51775508, 51805484); 浙江省自然科学基金 (LR17E050002)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775508, 51805484), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LR17E050002)

作者简介: 邵琦 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超精密加工技术。

Biography: SHAO Qi (1992—), Male, Doctoral student, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 赵萍 (1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为超精密加工技术。

Corresponding author: ZHAO Ping (1978—), Female, Doctor, Professor, Research focus: ultra-precision machining technology.

引文格式: 邵琦, 邵蓝樱, 吕冰海, 等. 基于田口法的石英玻璃剪切增稠抛光工艺参数优化[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 85-93.

SHAO Qi, SHAO Lan-ying, LYU Bing-hai, et al. Parameter optimization by Taguchi method for shear thickening polishing process of quartz glass[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 85-93.

noise ratio, and the weight of each factor was calculated by the analysis of variance (ANOVA) method, and the optimal process parameter combination was obtained. As a result, the slurry pH value (41.85%) had the greatest impact on Sa , followed by the abrasive concentration (39.06%) and the polishing speed (19.09%). The abrasive concentration (63.78%) had the most significant effect on MRR, followed by polishing speed (28.81%) and the slurry pH value (7.41%). Under the optimal combination of polishing parameters, the polishing speed 100 r/min, the abrasive concentration 12%, the slurry pH value=8, the surface roughness Sa of the quartz glass decreased from (110 ± 10) nm to (1.2 ± 0.3) nm in 8 minutes' polishing and the MRR reached 165.2 nm/min. Processing under optimized process parameters, STP can effectively remove scratches on the quartz glass surface and improve the surface quality of quartz glass. The STP method can be applied to the polishing of quartz glass plane and curved surface.

KEY WORDS: quartz glass; shear thickening polishing; material removal rate; surface roughness; taguchi method

石英玻璃硬度高、断裂韧性低,是一种典型的脆性材料,可制成透镜、反射镜、半球谐振子等精密光学曲面零件^[1-5]。此外,由于其抗激光损伤能力强、热膨胀系数低、光谱特性和抗热震性好等特点,在航空航天、大功率激光器、探测系统、光通信和激光聚变装置等方面得到了广泛的应用^[6]。随着石英玻璃曲面元件使用量的日益增加,高效、高表面质量的石英玻璃曲面零件抛光方法显得尤为重要。

近年来,化学机械抛光(CMP)、磁流变抛光(MRF)、离子束成形(IBF)、激光抛光(LP)等多种抛光方法已成功应用于光学零件的抛光。Wang等^[7]通过CMP加工石英玻璃表面,结果显示, $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 采样区域的表面粗糙度 RMS 值为 0.47 nm, MRR 达到 675 nm/min。王仲杰等^[8]采用CMP方法使石英玻璃表面的粗糙度 Ra 从 2.95 nm 降低至 0.126 nm。CMP 通过抛光液的化学和物理的协同作用,大幅度提高了抛光效率,但其局限于平面抛光。Yin等^[9]使用MRF加工K9玻璃,并在优化的加工参数下获得粗糙度为 40 nm 的表面。Zhao等^[10]采用MRF加工得到表面粗糙度 Rq 为 0.653 nm 的石英晶体表面,加工后表面采用IBF三次迭代,表面形状精度PV值从 222.691 nm 下降到 51.784 nm, RMS 值从 35.598 nm 下降到 5.060 nm。MRF 可成功应用于光学元件的高质量加工,但高成本的磁流变液限制了其广泛应用。Hildebrand等^[11-12]基于激光加工过程中的温度模拟,对石英玻璃工件进行抛光,抛光后表面粗糙度 RMS 值为 0.5 nm。LP 可获得较高表面质量,但加工过程中形成的高温易对工件表面造成二次损伤。Peng等^[13-14]采用流体动压效应抛光方法获得了表面粗糙度 Ra 为 0.145 nm 的超光滑石英玻璃表面,结合离子束加工,进一步提高了工件表面质量,石英玻璃表面粗糙度 Ra 达到了 0.103 nm。虽然以上抛光方法可以获得良好的表面粗糙度,但仍希望进一步提高石英玻璃曲面的抛光效率。

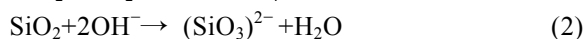
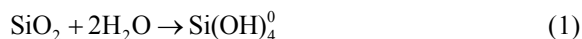
剪切增稠抛光(STP)利用非牛顿幂律流体的剪切增稠效应及磨粒的微切削作用去除工件表面微凸峰,可实现复杂曲面工件的高效、高表面质量柔性抛光^[15-16]。LYU等^[17]采用STP抛光硬质合金刀片复杂

切削刃,抛光 15 min 后,切削刃表面粗糙度 Ra 由 121.8 nm 降至 7.1 nm。Nguyen等^[18]在最佳STP方法加工参数下,得到粗糙度 Ra 为 13 nm 的合金钢 SCM435 齿轮表面。LYU等^[19]利用STP方法加工高温镍基合金涡轮叶片凹面,抛光 9 min 后,涡轮叶片的凹面粗糙度 Ra 从 72.3 nm 迅速降低到 4.2 nm。LYU等^[20]利用STP方法加工钽酸锂基片,抛光 4 min 后,工件表面粗糙度 Ra 从 200.5 nm 降至 4.2 nm。陈士豪等^[21]采用STP加工316L不锈钢滚子,抛光 30 min 后,圆柱曲面粗糙度 Ra 由 121.421 nm 降至 2.589 nm。

本文采用剪切增稠抛光方法,利用非牛顿流体抛光液的剪切增稠效应,形成可贴合不同形状表面的柔性“固着磨具”,实现石英玻璃的高效、高表面质量抛光。为研究石英玻璃的剪切增稠抛光效果,采用田口法分析三个主要抛光工艺参数(磨粒浓度、抛光速度和抛光液 pH 值)对抛光效率和表面粗糙度的影响,并确定优化工艺。

1 石英玻璃剪切增稠抛光原理

石英玻璃表面的 STP 原理如图 1 所示。为便于观测实验的抛光结果,采用平面石英玻璃工件作为实验对象。抛光过程中,抛光液与工件形成相对运动,当抛光液与工件间的剪切应变率超过临界值时,加工区域抛光液黏度急剧上升,并形成贴合工件表面的“柔性固着磨具”。加工区域固相颗粒形成粒子簇,将磨粒包裹在其中,并对其施加作用力,使其对工件表面进行微切削。同时,石英玻璃在水环境中与水反应生成硅醇(反应如式(1)所示^[22])。该反应物通过磨粒的微切削作用去除,从而实现了石英玻璃表面的抛光。石英玻璃在碱性环境下能与氢氧根离子(OH^-)发生化学反应(反应式如式(2)所示),这有利于提高材料去除率。



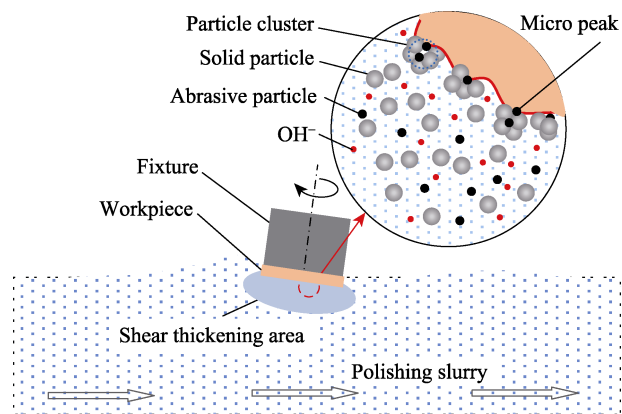


图 1 STP 抛光原理图
Fig.1 Schematic illustration of STP Principle

2 实验

2.1 实验过程及条件

抛光实验在如图 2 所示的实验装置上进行。抛光过程中，抛光槽带动抛光液旋转，石英玻璃固定在夹具上，并浸没在抛光液中自转。为减少抛光过程中的速度损失，保证抛光液对工件表面形成有效的抛光压力和抛光速度，形成抛光液产生剪切增稠效果所需的速度梯度，工件平面与水平方向的倾角为 13° ^[20]。石英玻璃的性能见表 1，工件直径为 20 mm。实验条件如表 2 所示，根据前期基础研究，抛光速度和磨粒浓度限制在一定变化范围内，抛光槽转速计为抛光速度。采用柠檬酸和氢氧化钾调节抛光液 pH 值。

表 1 石英玻璃材料特性
Tab.1 Properties of quartz glass

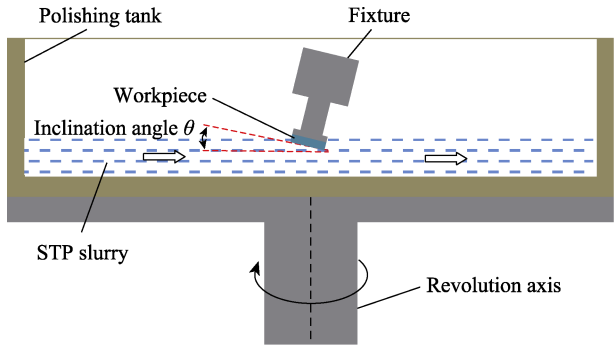
Parameters	Values
Content of SiO ₂ /%	99.95
Density/(g·cm ⁻³)	2.2
Melting point/°C	1150
Mohs hardness	7
Poisson ratio ν	0.17

表 2 实验条件
Tab.2 Experimental conditions

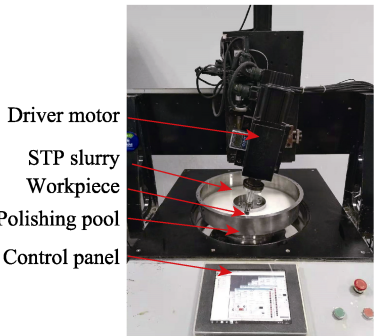
Parameters	Values
The diameter of the polishing tank/mm	400
The diameter of the quartz glass/mm	20
Inclination angle/(°)	13
Abrasive particles	SiO ₂ (80 nm on average)
Polishing speed/(r·min ⁻¹)	80, 90, 100, 110
Concentration/wt%	4, 8, 12, 16
pH value of the slurry	7, 8, 10, 12
Experimental observation interval/min	5

STP 抛光液由多羟基聚合物、去离子水、磨粒和添加剂混合制备得到。图 3 为不同磨粒浓度的 STP 抛光液的流变曲线。采用应力控制流变仪 (MCR 302, Anton Paar, Austria) 测量流变曲线，测量时，转子 (直径 $\phi 25$ mm，锥角 2°) 与测试台的间距为 0.103 mm，在剪切速率 $0.1\sim 1000\text{ s}^{-1}$ 内进行稳态扫描，测试温度由 Peltier 加热夹套控制在 25°C 。每种抛光液重复测量 3 次，以减小误差。由图 3 可见，抛光液流变曲线呈现三个阶段：1) 低剪切速率下，随着剪切速率的提升，抛光液出现剪切稀化现象；2) 当剪切速率超过临界值时，抛光液表现出强烈的剪切增稠现象；3) 随着剪切速率进一步增加，抛光液又呈现出剪切稀化的现象。

抛光过程中，每 5 min 观测一次工件表面。通过白光干涉仪 (Super View W1) 观测加工表面五个不同位置的粗糙度及表面形貌，测量点位置如图 4 所示，白光干涉仪的采样区域大小为 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ ，测量结果取平均值。采用扫描电子显微镜 (SU8010, HITACHI) 和超景深显微镜 (VHX-7000) 观察工件表面形貌。使用精密天平 (MSA225S-CE) 测量抛光前后工件材料的质量变化，精度为 0.01 mg，抛光前后工件质量均重复测量三次，并取平均值。



a 抛光示意图



b STP的实验装置

图 2 STP 抛光示意图及抛光设备图

Fig.2 The polishing schematic diagram and polishing equipment of STP: a) polishing schematic diagram; b) experimental device of STP

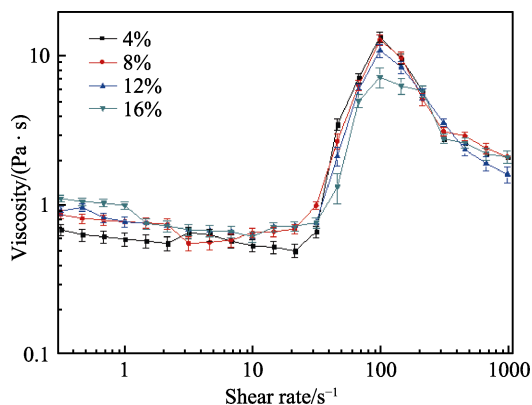


图3 不同磨粒浓度抛光液的流变曲线

Fig.3 Rheological curves of polishing slurry with different concentration

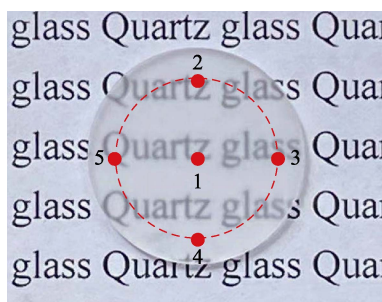


图4 工件表面观测点示意图

Fig.4 Schematic diagram of observation points on the work-piece surface

2.2 实验设计

田口法是由 Genichi Taguchi^[23]设计的基于正交实验和信噪比 (S/N) 的一种局部优化算法。采用正交表设计实验可以合理减少实验次数和盲目性。以信噪比作为衡量质量特性的指标,对实验结果进行统计分析,得出可靠稳定的最佳工艺参数组合,达到高效和低成本综合效果。田口法已经成功应用于研磨和抛光,并具备良好的实验优化效果^[24-27]。

抛光速度、磨粒浓度、抛光液 pH 是影响石英玻璃材料去除率及表面粗糙度的主要工艺参数,本文研究了不同抛光速度、磨粒浓度、抛光液 pH 值对石英玻璃表面加工的影响,每个信号因子等间隔取 4 个水平,使用具有 3 因素的标准 $L_{16}(4^3)$ 表,如表 3 所示。A、B 和 C 分别代表抛光速度、磨粒浓度和抛光液 pH 值。计算每个实验不同因素水平下的平均响应值,用于平均水平分析,通过比较平均响应来判断每个因素的最佳水平。

2.3 信噪比分析

本研究通过信噪比 (S/N) 来评估实验结果,信噪比是平均值与标准差的比值。“信号”代表输出特性的期望值,“噪声”代表不期望的值。在分析信噪比时,通常有三种质量特征,即望大特性、望小特性以及望目特性^[25]。表面粗糙度为望小特性,采用式(3)

表 3 实验设计
Tab.3 Experimental design

No.	Combination	Polishing speed (A) / (r·min ⁻¹)	Abrasive concentration (B)/%	Slurry pH value (C)
1	A1B1C1	110	4	7
2	A1B2C2	110	8	8
3	A1B3C3	110	12	10
4	A1B4C4	110	16	12
5	A2B1C4	100	4	12
6	A2B2C3	100	8	10
7	A2B3C2	100	12	8
8	A2B4C1	100	16	7
9	A3B1C3	90	4	10
10	A3B2C4	90	8	12
11	A3B3C1	90	12	7
12	A3B4C2	90	16	8
13	A4B1C2	80	4	8
14	A4B2C1	80	8	7
15	A4B3C4	80	12	12
16	A4B4C3	80	16	10

计算 S/N 值;材料去除率为望大特性,采用式(4)计算信噪比 S/N 值。

$$S/N_i = -10 \log \text{MSD}_i = -10 \log \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r R_{ij}^2 \quad (3)$$

$$S/N_i = -10 \log \text{MSD}_i = -10 \log \frac{1}{u} \sum_{j=1}^u \frac{1}{H^2} \quad (4)$$

式中: MSD 为评价指标的均方值; i 为测试次数; $r=5$, 为工件上测点数; $u=3$, 为质量重复测量次数; H 为工件的 MRR, 如式(5)所示。

$$H = 10^7 \Delta m / (\rho S t) \quad (5)$$

式中: Δm 为抛光前后质量差 (g), ρ 为密度 (2.2 g/cm^3), S 为加工面积 (3.14 cm^2), t 为加工时间 (min)。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

抛光实验得到的粗糙度、MRR 及 S/N 值计算结果如表 4 所示。 Sa 和 MRR 的 S/N 平均响应的变化曲线如图 5 所示。

3.2 抛光速度的影响

如图 5a 所示, MRR 的 S/N 值随抛光速度的提高而增大, 根据 Preston 方程 ($\text{MRR} = kPV$) 可得, 材料去除率 MRR 与抛光速度 V 和抛光压力 P 呈正相关。当抛光速度较低时, MRR 小。随着抛光速度的增加, 一方面抛光液与工件的相对运动速度增加, 使得 MRR 增加; 另一方面, 抛光速度的提高将增加剪切增稠强度, 增大抛光液对工件表面的剪切力, 从而加快工件表面微凸峰的去速率。

表 4 Sa 和 S/N 值的测试结果
Tab.4 Test results of Sa and S/N values

i	Surface roughness Sa/nm						MRR/ ($nm \cdot min^{-1}$)	$(S/N)/dB$	
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Average mean		Sa	MRR
1	65.1	66.9	52.4	73.6	71.7	65.9	32.2	-36.44	30.16
2	9.3	11.2	10.8	8.8	8.4	9.7	128.4	-19.79	42.17
3	11.3	12.1	15.1	8.1	8.9	11.1	225.9	-21.12	47.08
4	15.2	14.3	11.9	16.8	13.2	14.3	224.6	-23.15	47.03
5	12.1	14.2	7.8	7.5	8.9	10.1	39.1	-20.37	31.84
6	24.3	27.6	20.2	27.8	24.3	24.8	127.5	-27.96	42.11
7	9.2	7.6	7.6	7.8	8.9	8.2	159.5	-18.33	44.06
8	28.8	37.7	36.5	33.4	30.6	33.4	158.98	-30.52	44.03
9	45.8	47.5	46.9	46.8	43.4	46.1	25.3	-33.27	28.06
10	15.2	21.7	20.8	14.9	21.8	18.9	92.2	-25.64	39.29
11	20.7	22.4	18.5	25	23.8	22.1	115	-26.93	41.21
12	9.5	11.2	12.1	9.2	8.7	10.1	105.4	-20.19	40.45
13	35.6	36.5	39.6	45.5	38.1	39.1	19.5	-31.87	25.80
14	26.5	23.1	17.8	19.6	25.6	22.5	62.9	-27.15	35.97
15	25.3	26.3	22.7	26.3	23.6	24.8	95.1	-27.92	39.56
16	13.5	15.6	20.2	16.1	13.2	15.7	90.9	-24.04	39.17

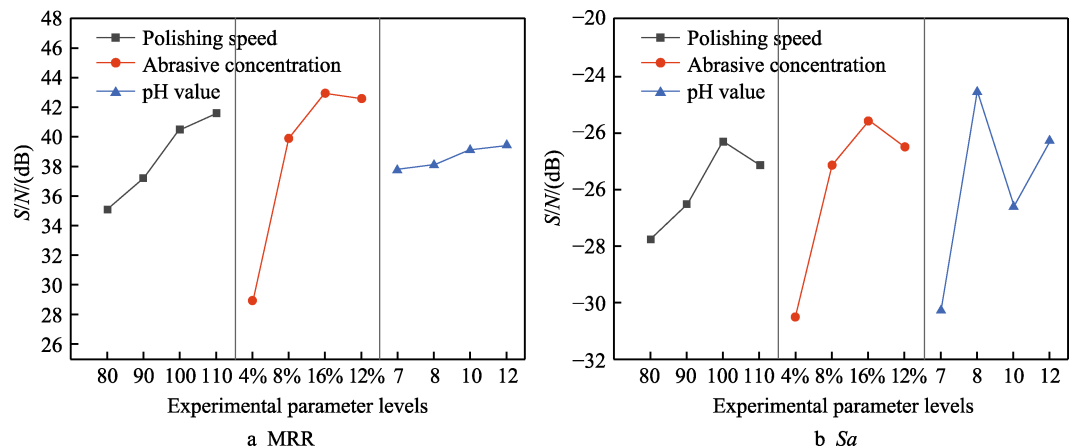


图 5 实验参数水平的 S/N 值
Fig.5 The S/N value of experimental parameter levels

如图 5b 所示,当抛光速度小于 100 r/min 时, Sa 的 S/N 值随抛光速度的提高而增大,当抛光速度为 100 r/min 时, Sa 的 S/N 值达到最高值-24.29 dB,随着抛光速度的进一步提高,平均粗糙度响应值降低。原始表面和不同抛光速度下的抛光表面如图 6 所示。低速抛光后,工件表面材料去除效率较低,初始划痕未被去除,导致表面粗糙度高。随着抛光速度增大,工件表面初始划痕被去除,使得表面粗糙度降低。当抛光速度达到 110 r/min 时,虽然初始划痕被快速去除,但同时形成了凹坑。剪切速率的进一步提高,使抛光液流变性能增强,粒子簇对工件表面的冲击力超过石英玻璃的脆性断裂值,导致工件脆性损伤,并形成表面凹坑,因此表面粗糙度又提高。

3.3 磨粒浓度的影响分析

当磨粒质量分数从 4% 提高到 12% 时, Sa 和 MRR 的 S/N 值增大,在质量分数为 12% 时达到峰值-23.57 dB 和 42.98 dB;当磨粒质量分数提高到 16% 时, Sa 和 MRR 的 S/N 值降低。随着磨粒浓度的增加,单位面积参与加工的磨粒数量增加,使得 MRR 增加,抛光效率提高, Sa 和 MRR 的 S/N 值升高。当磨粒质量分数提高到 16% 时,抛光液初始黏度升高,但峰值黏度降低(流变曲线如图 3 所示),抛光液流动性能减弱,且对磨粒的把持力降低,导致抛光效率降低,因此 Sa 和 MRR 的 S/N 值又降低。

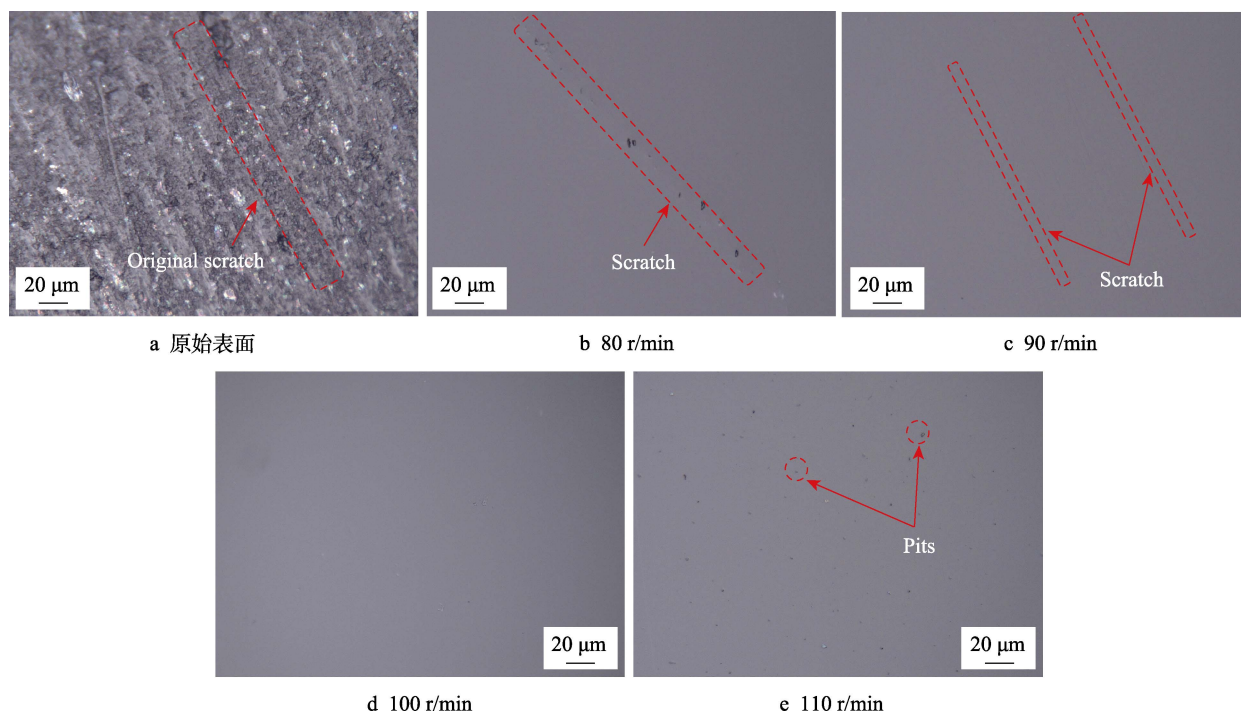


图6 不同抛光速度下的工件表面形貌
Fig.6 The morphology of the workpiece surface under different polishing speed: a) original surface

3.4 pH 值的影响分析

MRR 的 S/N 值随着 pH 值的增大而增大。 OH^- 浓度随着抛光液 pH 值增大而增加,有利于促进抛光液与石英玻璃表面反应(化学方程式如式(2)所示),提高材料去除率,因此 MRR 的 S/N 值随抛光液 pH 值的增加而增加。 Sa 的 S/N 值在 $\text{pH}=8$ 时达到峰值

-22.54 dB。抛光前工件表面及不同抛光液 pH 值下加工得到的工件 3D 形貌如图 7 所示。碱性条件下,抛光液与工件表面微凸峰发生反应,加快微凸峰的去除,因此碱性条件下 Sa 的 S/N 值高于 $\text{pH}=7$ 时的 S/N 值。当抛光液 pH 值为 10 和 12 时,抛光液对局部工件表面造成了过腐蚀,导致工件材料被非均匀去除而形成凹坑,表面粗糙度 Sa 上升。

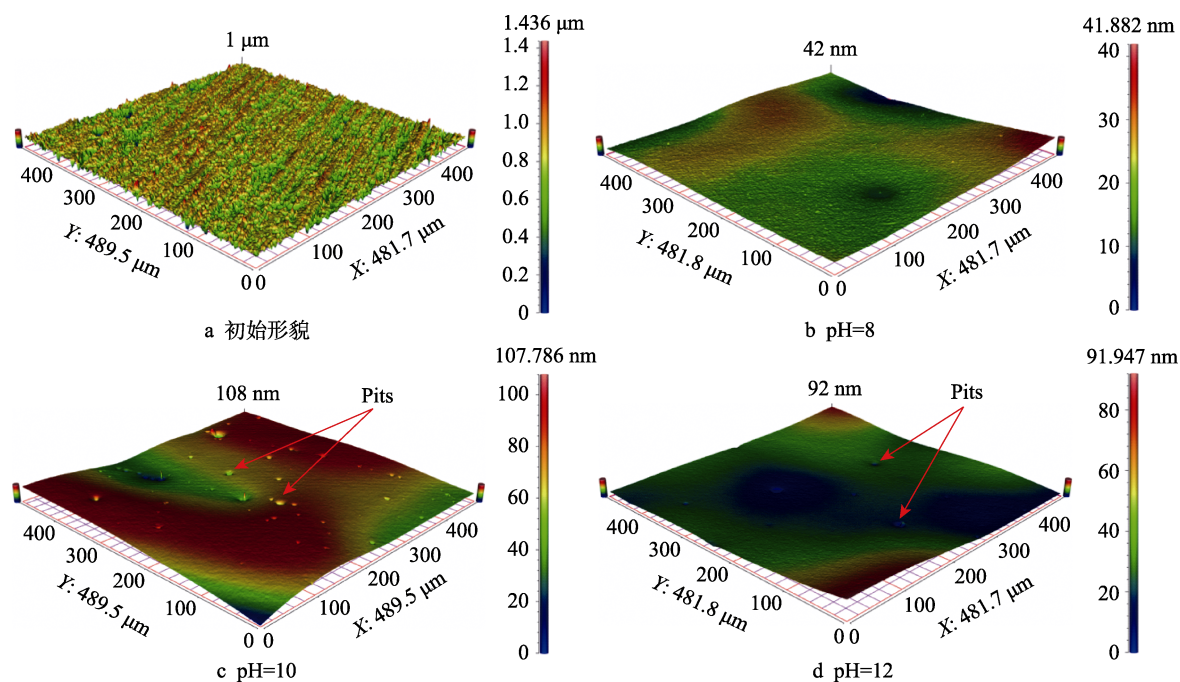


图7 不同 pH 值的抛光液加工得到的三维表面形貌
Fig.7 Three-dimensional topography of the workpiece under different slurry pH value: a) original surface

3.5 方差分析

方差分析（ANOVA）用于评估不同实验参数对工件表面粗糙度的影响^[25]。表面粗糙度 Sa 的方差分析结果如图 8a 所示。抛光液 pH 值对表面粗糙度 Sa 的影响最显著（41.85%），其次是磨粒浓度（39.06%）和抛光速度（19.09%）。MRR 方差分析的结果如图 8b 所示。磨粒浓度对 MRR 的影响最显著（63.78%），其次是抛光速度（28.81%）和抛光液 pH 值（7.41%）。

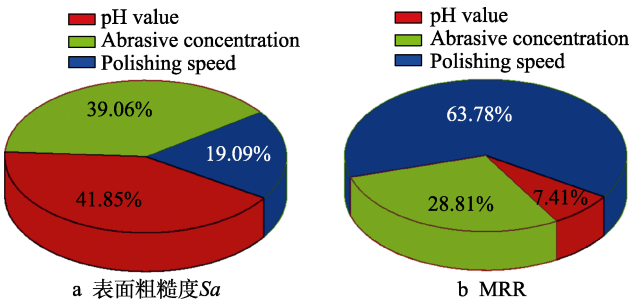


图 8 方差分析结果
Fig.8 ANOVA results: a) surface roughness Sa ; b) MRR

3.6 优化条件下的 STP 实验

根据田口法 S/N 水平响应分析得到优选的抛光参数组合：抛光速度为 100 r/min，抛光液 pH 值为 8，磨粒质量分数为 12%。在优选的工艺参数下加工 8 min 后，工件表面粗糙度 Sa 从 (110 ± 10) nm 降至 (1.2 ± 0.3) nm，MRR 达到 165.2 nm/min。表面粗糙度 Sa 随抛光时间的变化如图 9 所示。抛光前后的工件表面扫描电子显微镜（SEM）形貌如图 10 所示。抛光前后石英玻璃宏观形貌如图 11 所示。在优选的抛光参数下对直径为 10 mm 的光学石英玻璃球面进行抛光，加工 8 min 后，球面粗糙度 Sa 从 (110 ± 10) nm 降至 (1.5 ± 0.3) nm。抛光前后的石英玻璃球表面如图 12 所示，得到了光滑、无划痕的工件表面，验证了剪切增稠抛光石英玻璃曲面的可行性。

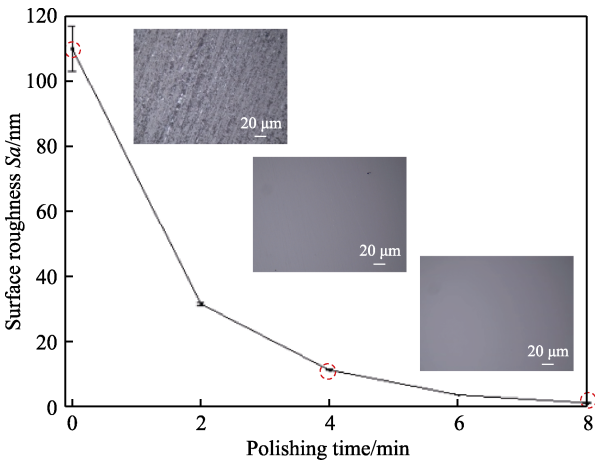


图 9 表面粗糙度随抛光时间的变化
Fig.9 Surface roughness changes with polishing time

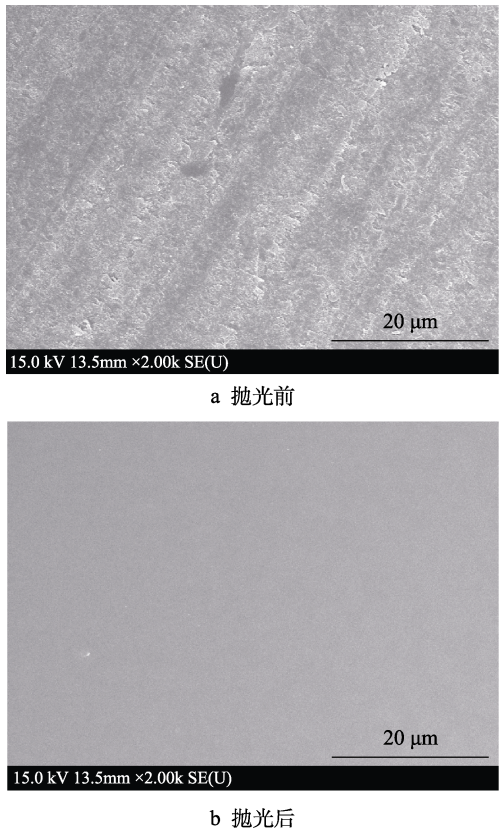


图 10 工件表面 SEM 形貌
Fig.10 SEM topography of workpiece surface: a) before polishing; b) after polishing

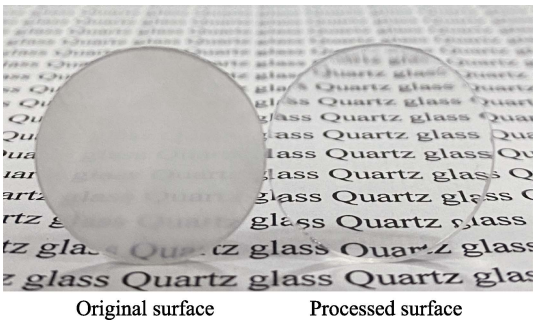


图 11 抛光前后的石英玻璃表面
Fig.11 The surface contrast of the quartz glass before polishing and after polishing

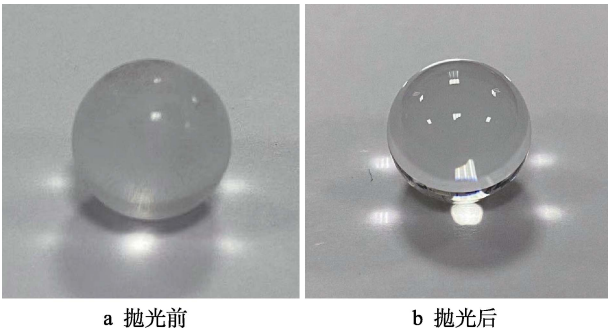


图 12 抛光前后的球面宏观表面
Fig.12 Surface contrast of the ball surface before polishing and after polishing: a) before polishing; b) after polishing

4 结论

运用剪切增稠抛光对石英玻璃材料进行抛光研究, 基于田口法与方差分析, 研究了抛光速度、磨粒浓度、抛光液 pH 值对石英玻璃抛光的影响, 并得到最佳工艺参数组合, 结论如下:

1) 随着抛光速度的提高, MRR 增大且表面粗糙度的降低速率增大, 但是过高的抛光速度使工件表面形成凹坑。同时兼顾工件 MRR 和加工后表面质量, 选择抛光速度 100 r/min 为最优值。在 4%~12% 范围内增加磨粒质量分数, 可提高抛光效率, 但过高的磨粒质量分数将减弱抛光液的流动性能和剪切增稠效果, 导致抛光效率降低。工件 MRR 随抛光液 pH 升高而增大, 在 pH=8 的抛光液下加工可获得较好的工件表面。

2) 根据方差分析, 抛光液 pH 值对表面粗糙度 S_a 的影响最显著 (41.85%), 其次是磨粒浓度 (39.06%) 和抛光速度 (19.09%)。磨粒浓度对 MRR 的影响最显著 (63.78%), 其次是抛光速度 (28.81%) 和抛光液 pH 值 (7.41%)。由 S/N 比平均响应分析可得, 采用 STP 加工石英玻璃的最佳工艺参数组合为: 抛光速度 100 r/min, 磨粒质量分数 12%, 抛光液 pH=8。在优化的抛光参数下抛光 8 min 后, 石英玻璃表面粗糙度 S_a 从 (110±10) nm 下降到 (1.2±0.3) nm, MRR 达到 165.2 nm/min; 对石英玻璃球面抛光 8 min, 球面粗糙度 S_a 从 (110±10) nm 降至 (1.5±0.3) nm。研究结果可为石英玻璃曲面抛光提供良好的抛光基础及参考意义。

参考文献:

- [1] CHEN Shun-tong, JIANG Zong-han. A force controlled grinding-milling technique for quartz-glass micromachining[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 216: 206-215.
- [2] WAKAMATSU K, KUROKAWA S, TOYAMA T, et al. CMP characteristics of quartz glass substrate by aggregated colloidal ceria slurry[J]. Precision engineering, 2019, 60: 458-464.
- [3] SHEN Jian, LIU Shou-hua, YI Kui, et al. Subsurface damage in optical substrates[J]. Optik-international journal for light and electron optics, 2005, 116(6): 288-294.
- [4] MATTHEWS A, RYBAK F J. Comparison of hemispherical resonator gyro and optical gyros[J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 1992, 7(5): 40-46.
- [5] 刘顺, 韩冰, 陈燕, 等. 超声磁粒复合研磨对石英玻璃管内表面的光整研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 265-270.
LIU Shun, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner surface finishing of quartz glass tube by ultrasonic magnetic particle composite grinding[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 265-270.
- [6] SOLINOV V F. Study of defects in quartz glass with the action of high-velocity microparticles on port-holes[J]. Glass and ceramics, 2010, 67(7-8): 234-237.
- [7] WANG Liang-yong, ZHANG Kai-liang, SONG Zhi-tang, et al. Ceria concentration effect on chemical mechanical polishing of optical glass[J]. Applied surface science, 2007, 253(11): 4951-4954.
- [8] 王仲杰, 王胜利, 王辰伟, 等. 超精度石英玻璃的化学机械抛光[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(1): 48-52.
WANG Zhong-jie, WANG Sheng-li, WANG Chen-wei, et al. Chemical mechanical polishing of a ultra precision quartz glass[J]. Micronanoelectronic technology, 2017, 54(1): 48-52.
- [9] YIN Shao-hui, ZHU Ke-jun, FAN Yu-feng, et al. Influences of polishing tool's shape on surface roughness in magneto-rheological finishing[J]. Advanced materials research, 2010, 97-101: 4092-4095.
- [10] ZHAO Feng-xuan, ZHOU Lin, FAN Zhan-bin, et al. Research on surface processing of quartz wafer based on magnetorheological finishing and ion beam figuring[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 496-499.
- [11] HILDEBRAND J, HECHT K, BLIEDTNER J, et al. Laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. Physics procedia, 2011, 12: 452-461.
- [12] HILDEBRAND J, HECHT K, BLIEDTNER J, et al. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. Physics procedia, 2012, 39: 277-285.
- [13] PENG Wen-qiang, GUAN Chao-liang, LI Sheng-yi. Surface evaluation and evolution during hydrodynamic effect polishing for quartz glass[J]. Applied optics, 2014, 53(29): 6913-6919.
- [14] PENG Wen-qiang, GUAN Chao-liang, LI Sheng-yi. Efficient fabrication of ultrasmooth and defect-free quartz glass surface by hydrodynamic effect polishing combined with ion beam figuring[J]. Optics express, 2014, 22(11): 13951-13961.
- [15] LI Min, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear-thickening polishing method[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [16] LI Min, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Evolution and equivalent control law of surface roughness in shear-thickening polishing[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2016, 108: 113-126.
- [17] LYU B H, HE Q K, CHEN S H, et al. Experimental study on shear thickening polishing of cemented carbide insert with complex shape[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 103(1-4): 585-595.
- [18] NGUYEN D N, DAO T P, PRAKASH C, et al. Machining parameter optimization in shear thickening polishing of gear surfaces[J]. Journal of materials research and technology, 2020, 9(3): 5112-5126.

- [19] SHAO Qi, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear thickening polishing of the concave surface of high-temperature nickel-based alloy turbine blade[J]. Journal of materials research and technology, 2021, 11: 72-84.
- [20] LYU B H, SHAO Q, HANG W, et al. Shear thickening polishing of black lithium tantalite substrate[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2020, 21(9): 1663-1675.
- [21] 陈士豪, 吕冰海, 贺乾坤, 等. 圆柱曲面剪切增稠抛光材料去除函数仿真与实验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 355-362.
CHEN Shi-hao, LYU Bing-hai, HE Qian-kun, et al. Simulation and experimental study on material removal function of shear thickening polishing cylindrical surface[J]. Surface technology, 2019, 48(10): 355-362.
- [22] COOK L M. Chemical processes in glass polishing[J]. Journal of non-crystalline solids, 1990, 120(1-3): 152-171.
- [23] TAGUCHI G. Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology[J]. IEEE transactions on reliability, 1995, 44(2): 225-229.
- [24] SHAJI S, RADHAKRISHNAN V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method[J]. Journal of materials processing technology, 2003, 141(1): 51-59.
- [25] YANG W H, TARN Y S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method[J]. Journal of materials processing technology, 1998, 84(1-3): 122-129.
- [26] LYU Bing-hai, KE Ming-feng, FU Lin, et al. Experimental study on the brush tool-assisted shear-thickening polishing of cemented carbide insert[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2021, 115(7-8): 2491-2504.
- [27] 戴伟涛, 吕冰海, 翁海舟, 等. 圆柱表面声波辅助剪切增稠抛光优化实验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 188-193.
DAI Wei-tao, LYU Bing-hai, WENG Hai-zhou, et al. Optimization experiment of acoustic assisted shear thickening polishing of cylindrical surface[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 188-193.

(上接第 61 页)

- [18] 田业冰, 范增华, 石晨, 等. 一种基于并联机构的复杂曲面磁场辅助光整装置及方法: 中国, 108942419B[P]. 2021-04-20.
TIAN Ye-bing, FAN Zeng-hua, SHI Chen, et al. Complex curved surface magnetic field auxiliary finishing device and method based on parallel mechanism: China, 108942419B[P]. 2021-04-20.
- [19] FAN Zeng-hua, TIAN Ye-bing, ZHOU Qiang, et al. A magnetic shear thickening media in magnetic field- assisted surface finishing[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: Journal of engineering manufacture, 2020, 234(6-7): 1069-1072.
- [20] TIAN Ye-bing, SHI Chen, FAN Zeng-hua, et al. Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 106(7-8): 3071-3080.