

氧化锆陶瓷大抛光模磁流变抛光试验研究

郭美键¹, 罗虎¹, 王长兵², 尹韶辉¹, 陈逢军¹, 郭源帆¹

(1. 湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082;

2. 湖南长步道光学科技有限公司, 长沙 410202)

摘要: **目的** 研发一种高效、高质量氧化锆陶瓷超光滑表面加工技术。**方法** 采用大抛光模磁流变抛光方式加工氧化锆陶瓷, 利用自主研发的磁流变平面抛光装置, 配制含有金刚石磨粒的磁流变抛光液, 通过设计单因素实验, 研究抛光时间、工作间隙、工件转速和抛光槽转速等主要工艺参数对氧化锆陶瓷平面磁流变加工性能的影响, 并对材料去除率和表面粗糙度进行分析。**结果** 在工作间隙为 1.4 mm、工件转速为 100 r/min、抛光槽转速为 25 r/min 的工艺条件下, 表面粗糙度在达到饱和之前随时间的增加而降低。抛光 30 min 达到饱和, 表面粗糙度 R_a 达到 0.7 nm。继续延长抛光时间, 表面粗糙度不再改善。氧化锆陶瓷的材料去除率随着工件转速和抛光槽转速的增加而增大, 随着工作间隙的增大而减小。当工件转速为 300 r/min 时, 材料去除率可以达到 1.03 mg/min; 抛光槽转速为 25 r/min 时, 材料去除率可以达到 0.80 mg/min; 工作间隙为 1.0 mm 时, 材料去除率最高可达 0.77 mg/min。**结论** 采用大抛光模磁流变抛光方法可以提高氧化锆陶瓷的材料去除率, 同时获得纳米级表面粗糙度, 实现氧化锆陶瓷的高效超光滑表面加工。

关键词: 氧化锆陶瓷; 大抛光模; 磁流变抛光; 材料去除率; 表面质量; 超光滑表面

中图分类号: TG148; TG580.692 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)07-0028-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.005

Experimental Study on Magnetorheological Finishing Using Large Polishing Tool for Zirconia Ceramic Plane

GUO Mei-jian¹, LUO Hu¹, WANG Chang-bing², YIN Shao-hui¹, CHEN Feng-jun¹, GUO Yuan-fan¹

(1. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Chiopt Optical Technology Co., Ltd, Changsha 410202, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a high efficiency and quality ultra-smooth surface polishing technique for zirconia ceramic. The zirconia ceramic was processed in the method of magnetorheological finishing. A self-developed magnetorheological polishing device was used, and magnetorheological polishing fluids containing diamond abrasives were prepared. A single-factor experiment was designed to study the effects of main process parameters including polishing time, working gap, workpiece speed and polishing trough speed on magnetorheological polishing properties of zirconia ceramics. The material removal rate (MRR) and surface roughness was analyzed using precision electronic balances and white light interferometry pro-

收稿日期: 2018-03-01; 修订日期: 2018-04-25

Received: 2018-03-01; Revised: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675171)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51675171)

作者简介: 郭美键 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超精密研磨、抛光。

Biography: GUO Mei-jian (1993—), Male, Master, Research focus: ultra-precision lapping, polishing.

通讯作者: 尹韶辉 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米制造、超精密加工、超微细加工和超高速加工。

Corresponding author: YIN Shao-hui (1967—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: nano manufacturing, ultra-precision machining, superfine machining and ultra-high speed machining.

ler, respectively. Provided with the process parameters as follows: working gap of 1.4 mm, workpiece speed of 100 r/min and trough speed of 25 r/min, the workpiece surface roughness R_a decreased over time before reaching saturation, and finally reached saturation value 0.7 nm after 30 min polishing. As polishing time advanced, surface roughness was no longer improved anymore. The MRR of zirconia ceramics increased with the increase of workpiece speed and trough speed, and decreased with the increase of working gap. The MRR could be up to 1.03 mg/min at workpiece speed of 300 r/min, 0.80 mg/min at trough speed of 25 r/min, and 0.77 mg/min at working gap of 1.0 mm. Higher MRR of zirconia ceramic and nanoscale surface roughness can be improved in the method of magnetorheological finishing based on large polishing tool, and efficient ultra-smooth surface processing of the zirconia ceramic can be achieved.

KEY WORDS: zirconia ceramic; large polishing tool; magnetorheological polishing; materials removal rate; surface quality; ultra-smooth surface

氧化锆陶瓷具有硬度高、韧性好、绝缘性强、热传导性好等优良的物理性能, 呈现耐磨损、耐摔、抗腐蚀、耐高温等优良特性, 广泛应用于能源、生物、计算机、机械制造等高新技术领域^[1-4]。特别是由于其具有优秀的耐磨性和力学性能, 作为新型功能陶瓷材料被广泛应用于航空发动机、精密轴承、密封件等零部件。这也对氧化锆陶瓷零件的表面加工质量提出了更高的要求, 需要获得高质量且无表面及亚表面损伤的氧化锆陶瓷表面^[5]。但氧化锆陶瓷材料具有高脆性、高硬度等特点, 给氧化锆陶瓷元件的研抛加工带来了挑战。

开发高效率、高精度、低成本的陶瓷材料加工工具成为近年来陶瓷材料加工的热点。针对氧化锆陶瓷的超精密加工, Fiocchi A A 等^[6]采用盘式 SiC 砂轮对 3Y-TZP 陶瓷表面进行超精密研磨, 获得的最佳表面粗糙度值为 60.63 nm。闫艳燕等^[7]采用二维超声磨削纳米氧化锆陶瓷, 获得了 R_a 0.1 μm 以下的加工表面。纪宏波等^[8]采用游离磨料研磨抛光的方法对氧化锆陶瓷平面零件进行超精密研磨, 获得了 R_a 4.72 nm 的表面粗糙度。采用传统的超精密研磨不能获得纳米级的超光滑表面, 且易造成裂纹^[9]。游离磨料抛光由于需要施加一定的法向载荷, 容易造成表面损伤及亚表面损伤, 且加工效率不稳定^[10]。

磁流变抛光作为一种柔性抛光技术, 法向压力极低, 磨粒压入工件的深度较浅, 主要通过剪切作用去除材料, 在获得高质量表面的同时, 几乎不产生表面和亚表面损伤^[11-12]。此外, 由于受磁场约束, 磁流变液中的磨料稳定地分布于工作表面, 可解决游离磨料抛光中磨料在工作界面无法稳定分布, 从而影响加工效率和精度的问题^[13]。Hong K P 等^[14]采用轮式磁流变方式抛光氧化铝增强的氧化锆陶瓷 60 min 后, 获得了最佳表面粗糙度值 1.960 nm。轮式磁流变抛光虽然能获得纳米级精度的表面, 但是该种方式形成的点接触硬化区抛光效率低, 加工成本高, 无法满足氧化锆陶瓷高效率的加工要求。笔者所在课题组前期开发了一种大抛光模磁流变超光滑平面抛光技术, 可有效实现蓝宝石、玻璃等硬脆材料的高效率超光滑平整加

工^[15-16]。

为实现氧化锆陶瓷材料的高效、高精度、低成本加工, 同时获得亚纳米级的超光滑表面, 本研究采用基于直线气隙永磁轭励磁的磁流变平整加工方法对氧化锆陶瓷进行抛光。首先对大抛光模磁流变抛光的原理进行分析, 然后配制含有金刚石磨粒的磁流变抛光液, 对氧化锆陶瓷的磁流变平面抛光展开试验研究, 研究抛光时间、工作间隙、工件转速以及抛光槽转速对抛光效果的影响。

1 大抛光模磁流变抛光原理及试验装置

采用的大抛光模磁流变抛光方法原理如图 1 所示。其中磁场发生装置为具有直线气隙的永磁轭, 能够在气隙上方产生大面积的矩形梯度磁场。抛光槽为不导磁材料, 内贴有抛光垫, 能够吸附磁流变液, 增大摩擦力, 从而实现磁流变抛光液的更替循环。工件粘附在圆形夹具下表面, 工件和夹具可以做上下移动和旋转运动, 工件下表面和抛光垫上表面之间的间隙定义为工作间隙 δ_w 。此外, 为了提高工件抛光的均匀性, 该方法还增加了沿 x 方向的平动, 研抛槽除了可以做旋转运动外, 还可以沿 x 方向匀速往复平动。抛光时, 调整好工作间隙, 当磁流变液经过磁轭上方时,

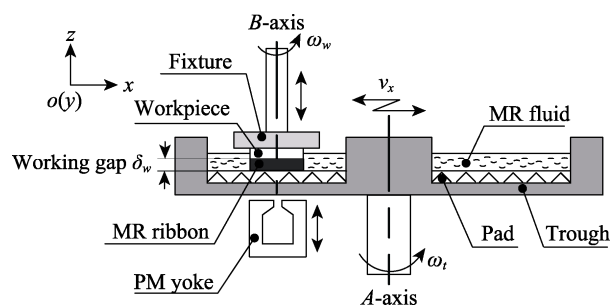


图 1 大抛光模磁流变抛光原理
Fig.1 Schematic diagram of magnetorheological finishing based on large polishing tool

在梯度磁场作用下黏度瞬间增强,硬化成具有高剪切屈服应力的大抛光模,工件与抛光模之间的相对运动可以实现材料的大面积去除。

自主研发的氧化锆陶瓷平面磁流变抛光试验装置如图 2 所示,工件和夹具整体安装在 CNC 加工中心的主轴上,加工中心主轴带动工件上下运动和旋转。抛光槽安装在平面研抛机的主轴上,抛光槽转速由调速器控制,抛光垫选用聚氨酯抛光垫,永磁轭安装在研抛机面板上。改装后平面磁流变研抛机整体安装在数控加工中心的工作台导轨上,通过控制加工中心导轨的 x 方向往复移动,可以实现工件与抛光模之间沿 x 方向的运动速度和距离。

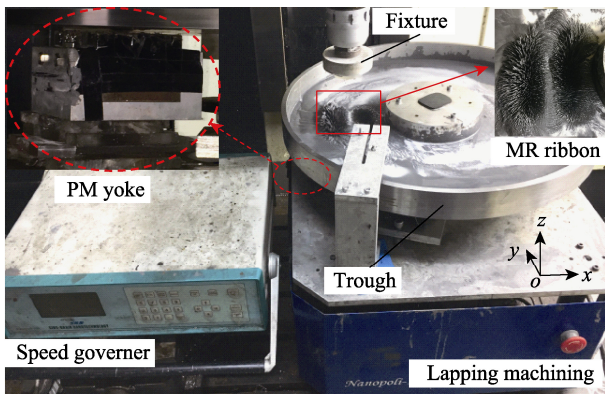


图 2 磁流变抛光试验装置

Fig.2 Experimental setup of magnetorheological polishing

2 试验条件和方法

为了研究影响氧化锆陶瓷磁流变抛光加工性能的因素,采用自制的平面磁流变抛光装置进行了一系列的单因素抛光试验,分析不同工艺参数对氧化锆陶瓷材料去除率和表面粗糙度的影响。

2.1 磁流变抛光液

配制由铁基颗粒强磁性材料、磨粒和活性添加剂等组成的磁性复合流体,其中羰基铁粉的平均粒径为 $6.4\text{ }\mu\text{m}$,磨粒为金刚石,平均粒径为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。活性添加剂的作用是使抛光液中各粒子能够稳定均匀地分散在悬浮液中。用碳酸钠调节磁流变抛光液的 pH 值为 10,以减缓磁流变抛光液中铁粉被氧化的速率,延长其使用寿命。抛光液详细成分见表 1,配制过程中用搅拌装置搅拌 30 min,使磁流变液各组分混合均匀。

2.2 试验条件

为了探究不同工艺参数对工件材料去除率和表面质量的影响,选取抛光时间、工作间隙、工件转速以及抛光槽转速等主要因素进行抛光试验,设置了 4 组单因素工艺试验,每组试验详细条件见表 2。第 1

表 1 磁流变抛光液成分

Tab.1 Composition of magnetorheological polishing fluid

Parameters	Parameter values
Volume of MR fluid	1200 mL
pH	10
Carbonyl iron powders	40 vol.%
Deionized water	50 vol.%
Active agent	2 vol.%
Na_2CO_3	2 vol.%
Diamond abrasives	6 vol.%

表 2 试验条件

Tab.2 Experimental conditions

Test no.	Working gap/mm	Workpiece speed/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Trough speed/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Polishing time/min
1	1.0~1.8	100	25	30
2	1.4	100~300	25	30
3	1.4	100	15~35	30
4	1.4	100	25	10~90

组试验是为了探究工作间隙对氧化锆陶瓷抛光的影响,工作间隙设置为 1.0~1.8 mm,间隔增量为 0.2 mm。第 2 组试验是为了探究工件转速对氧化锆陶瓷抛光的影响,工件转速设置为 100~300 r/min,间隔增量为 50 r/min。第 3 组试验是为了探究抛光槽转速对氧化锆陶瓷抛光的影响,抛光槽转速设置为 15~35 r/min,间隔增量为 5 r/min。第 4 组试验是为了探究抛光时间对氧化锆陶瓷抛光的影响,时间设置为 10~90 min,间隔增量为 10 min。每组试验 x 方向直线摆动的距离为 70 mm,摆动速度 v_x 为 50 mm/s。

2.3 样品

试样材料为氧化锆陶瓷(3Y-TZP)基板,其材料性能参数见表 3。该材料是通过氧化锆微晶粉末烧结而成的,试样尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 。实验前,测得其初始表面的粗糙度大约为 50~70 nm,且表面缺陷较多。抛光实验结束后,分别用丙酮、无水乙醇清洗,除去粘接剂和残留的抛光液,再用超声波清洗机清洗 20 min(清洗剂为去离子水),然后在恒温箱中进行烘干处理,最后称取质量和测量表面粗糙度。

表 3 氧化锆陶瓷性能参数

Tab.3 Performance parameters of (3Y-TZP) zirconia ceramic

Properties	Typical values
Density	6.0 g/cm^3
Vickers Hardness	11.5 GPa
Fracture toughness	8.0 MPa/m^2
Flexural strength	1200 MPa
Thermal expansion	$10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

2.4 测量方法

利用精密电子天平 (0.1 mg) 称取工件加工前质量 m_1 和加工后质量 m_2 , 其差值为去除质量, 去除质量除以抛光时间 t 即为材料去除率, 计算公式为:

$$\text{MRR} = \frac{m_2 - m_1}{t}$$

采用 Zygo New View 7100 白光干涉仪测量工件抛光后的表面粗糙度, 测量点如图 3 所示。在工件表面沿周向等分地选取 8 个测量点, 表面粗糙度值 Ra 取各测量点的平均值。

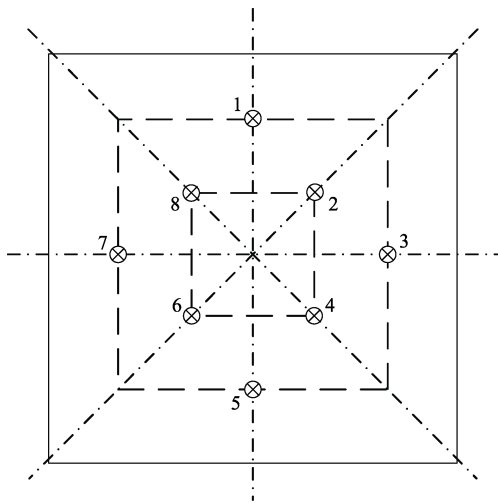


图 3 工件表面粗糙度测量方法

Fig.3 Schematic diagram of workpiece surface roughness measuring method

3 结果及分析

3.1 抛光时间对表面粗糙度的影响

工件抛光 90 min, 表面粗糙度随抛光时间的变化曲线如图 4 所示。可以发现, 工件表面粗糙度值随着抛光时间的延长, 先急剧下降, 然后缓慢下降, 最后趋于稳定。工件抛光前期, 由于表面比较粗糙, 磨粒的去除作用较强, 工件表面残留的波峰类粗糙结构更容易被去除, 所以工件表面粗糙度急剧下降。抛光 10 min 后, 表面粗糙度 Ra 由 65.2 nm 下降为 7.8 nm。再继续抛光 10 min 后, Ra 缓慢下降至 2.8 nm。经过前 10 min 的抛光, 工件表面残留的较大波峰粗糙结构被磨粒快速去除。此时工件表面相对光滑, 磨粒与工件表面之间的机械摩擦减弱, 去除作用减缓, 表面粗糙度下降变缓。抛光 30 min 后, 工件表面粗糙度值达到亚纳米级, 如图 5 所示。至此, 工件表面粗糙度值随着抛光时间进一步的增加而基本保持不变, 其表面粗糙度值 Ra 一直保持在 1.0 nm 以下。

采用白光干涉仪观察氧化锆陶瓷表面显微形貌随抛光时间的变化, 如图 6 所示。抛光前氧化锆陶瓷

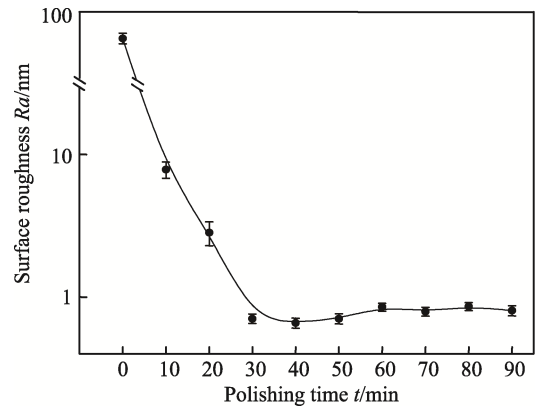


图 4 表面粗糙度随抛光时间的变化

Fig.4 Variation of surface roughness over polishing time

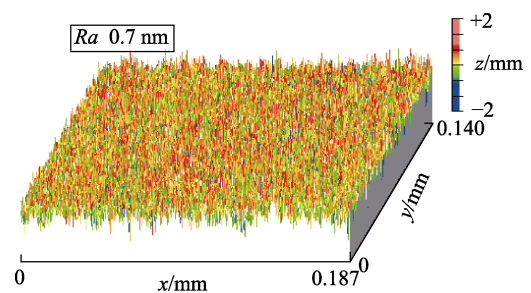


图 5 抛光 30 min 后的表面粗糙度

Fig.5 Surface roughness after polishing for 30 min

表面有大量的凹凸不平、划痕等损伤, 抛光 10 min 后, 这些损伤被明显去除, 表面质量变得更好。抛光 20 min 后, 表面仍然残留有极少凹坑、划痕。这是因为氧化锆陶瓷受金刚石磨粒的作用, 材料去除机理主要为脆性剥落和塑性变形两种方式。继续抛光到 30、60、90 min 后, 工件表面的划痕、凹坑基本消除, 表面粗糙度值达到 Ra 1.0 nm 以下, 但是仍然可以看到微小孔隙。这是由于氧化锆陶瓷是采用微晶粉末烧结方式制备的, 材料本身存在气孔无法避免^[17], 因此随着抛光时间的增加, 表面粗糙度达到饱和后不再继续改善。

3.2 工作间隙对平面磁流变抛光的影响

图 7 反映了工作间隙对氧化锆陶瓷抛光效果的影响。由实验结果可知, 氧化锆陶瓷材料去除率的变化趋势随着工作间隙的增大而减小。这是因为在励磁装置固定不变的情况下, 工作间隙越大的位置磁场强度越小, 在梯度磁场作用下形成的抛光模的屈服强度越小, 抛光模对工件的剪切去除作用减弱, 材料去除率随之下降^[18]。在工作间隙为 1.0 mm 时的材料去除率最高, 达到 0.77 mg/min。从抛光后工件表面粗糙度值随工作间隙的变化曲线来看, 当工作间隙低于 1.8 mm 时, 随着工作间隙的增大, 表面粗糙度值变化不大。这说明在合适的工作间隙内, 采用大抛光模磁流变抛光的方法, 可以获得亚纳米级的表面粗糙度。当工作间隙增大到 1.8 mm 时, 工作间隙最大,

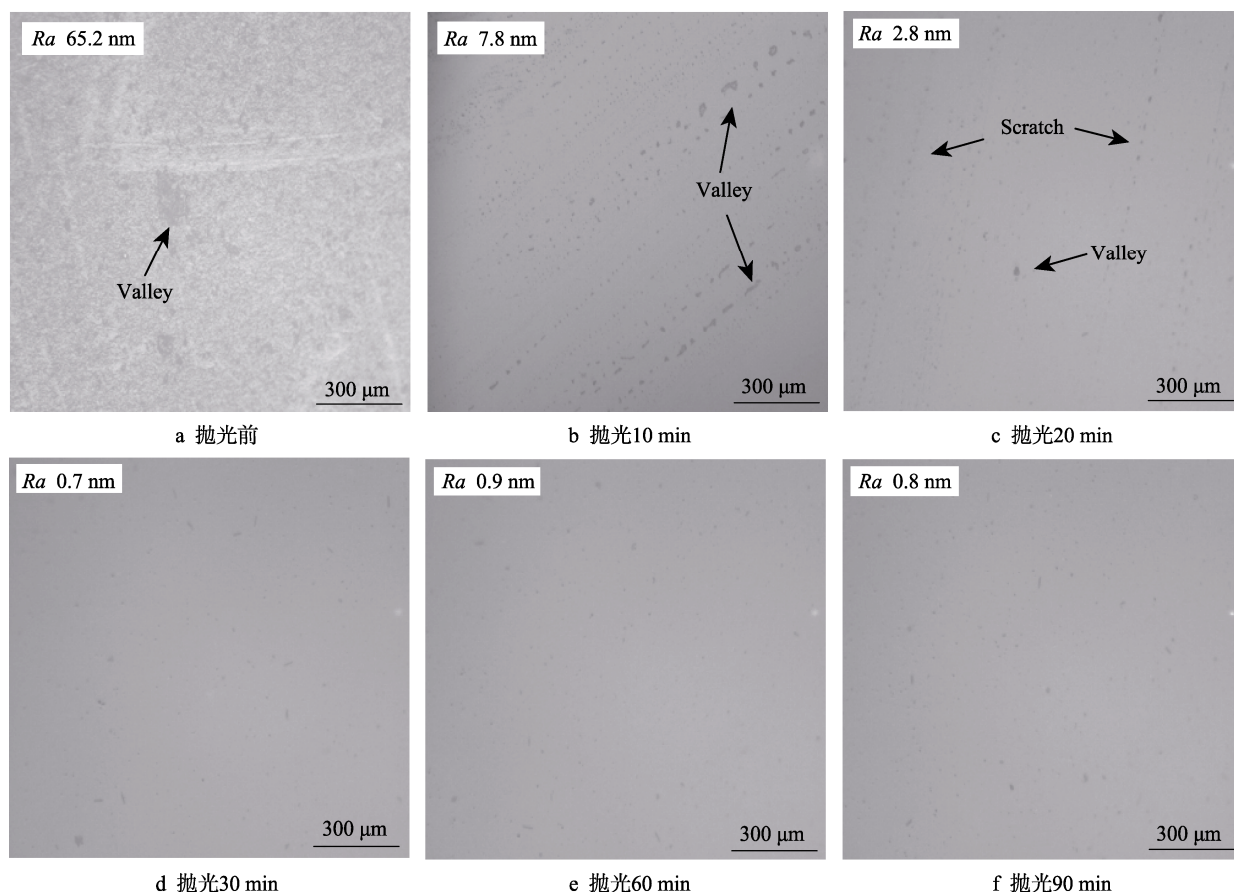


图6 不同抛光时间的表面显微图像

Fig.6 Microscopic images of surface at different polishing time:

a) before polishing; b) polishing for 10 min; c) polishing for 20 min; d) polishing for 30 min; e) polishing for 60 min; f) polishing for 90 min

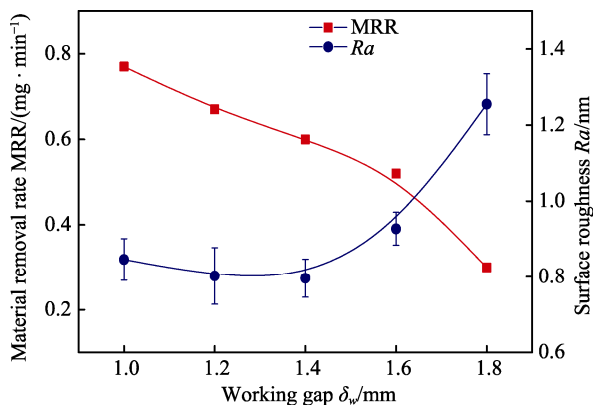


图7 工作间隙对材料去除率及表面粗糙度的影响

Fig.7 Effects of working gap on MRR and Ra

加工区域磁场强度最弱,去除作用也弱,抛光后达到的表面粗糙度值较高。

3.3 工件转速对平面磁流变抛光的影响

如图8所示,由实验结果可知,材料去除率随着工件转速的增加而增大。当工件转速为100~200 r/min时,材料去除率随着工件转速的增加而明显提高。这是因为随着工件转速的增加,抛光模中磨粒与工件表面相对运动的加工轨迹显著提高,磨粒对工件表面的

去除作用加强。在工件转速为200 r/min时,氧化锆陶瓷的材料去除率达到0.93 mg/min。随着工件转速进一步增大,高速运动的工件对硬化区的扰动作用增强,使得抛光模均匀性发生变化,影响材料去除的稳定性,材料去除率的增长趋势有所减缓,所以材料去除率在工件转速为300 r/min时仅增加到1.03 mg/min。从表面粗糙度随工件转速的变化曲线来看,随着工件转速的增加,抛光后工件表面粗糙度值基本都低于Ra 1.0 nm,这说明工件转速在100~300 r/min内,采

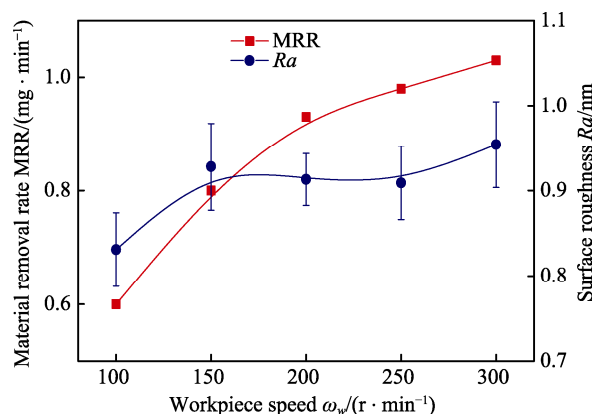


图8 工件转速对材料去除率及表面粗糙度的影响

Fig.8 Effects of workpiece speed on MRR and Ra

用大抛光模磁流变抛光的方法抛光氧化锆陶瓷, 可以获得亚纳米级的表面粗糙度。

3.4 抛光槽转速对平面磁流变抛光的影响

如图 9 所示, 材料去除率随抛光槽转速的增加而增大, 但是随着抛光槽转速的继续增大, 材料去除率的增速有所减缓。当抛光槽转速为 15~30 r/min 时, 材料去除率随转速的增长而明显增加。这是因为抛光槽转速的增加不仅提高了磁流变液的循环速率, 有利于新的磁流变液体进入到硬化区域, 而且一定程度上增大了磨粒与工件之间的相对运动速度, 所以材料去除率也越大, 在 30 r/min 时达到 0.77 mg/min。随着抛光槽转速的进一步增加, 抛光槽内液体的离心力变得越来越大^[19], 磁流变液体向抛光槽边缘富集, 硬化区形成的抛光模厚度降低, 磨粒对工件表面去除不均, 影响抛光模的剪切去除作用, 材料去除率增长速率有所减缓, 在抛光槽转速为 35 r/min 达到 0.80 mg/min。同时从表面粗糙度值随抛光槽转速的变化曲线来看, 抛光槽转速低于 25 r/min 时, 工件表面粗糙度值随抛光槽转速的增大而减小。这是因为抛光槽转速越高, 材料去除效果越好, 工件表面粗糙度值越低。在抛光槽转速为 25~35 r/min 时, 抛光后获得的表面粗糙度值都达到亚纳米级。

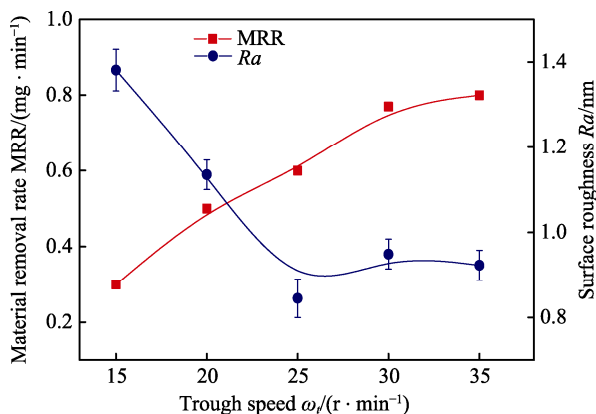


图 9 抛光槽转速对材料去除率及表面粗糙度的影响
Fig.9 Effects of trough speed on MRR and Ra

4 结论

文中提出了将大抛光模磁流变抛光方法用于氧化锆陶瓷高效、高质量的超精密加工, 并展开了抛光时间、工作间隙、工件转速以及抛光槽转速对材料去除率及表面粗糙度影响的试验研究, 得出以下结论:

1) 在氧化锆陶瓷大平面磁流变抛光工艺试验中, 材料去除率整体上是随着工件转速、抛光槽转速的增大而增大, 随着工作间隙的增大而减小。

2) 通过分析各工艺参数对氧化锆陶瓷抛光后表面粗糙度的影响得出, 在工作间隙为 1.4 mm, 工件

转速为 100 r/min, 抛光槽转速为 25 r/min 的工艺条件下, 氧化锆陶瓷抛光 30 min 就能达到表面粗糙度值 Ra 0.7 nm 的超光滑表面。可见, 将大抛光模磁流变抛光技术用于氧化锆陶瓷的超精密加工, 可以实现氧化锆陶瓷高效高质量的超光滑抛光。

参考文献:

- [1] PICONI C, MACCAURO G. Review: Zirconia as a Ceramic Biomaterial[J]. Biomaterials, 1999, 20(1): 1-25.
- [2] 孙静, 黄传真, 刘含莲, 等. 稳定氧化锆陶瓷的研究现状[J]. 机械工程材料, 2005, 29(8): 1-3.
SUN Jing, HUANG Chuan-zhen, LIU Han-lian, et al. A Review on the Stabilized Zirconia Ceramics Doped with Stabilizers[J]. Material for Mechanical Engineering, 2005, 29(8): 1-3.
- [3] 孙亚光, 金昊, 杨文龙, 等. 氧化锆陶瓷的制备与应用[J]. 中国陶瓷工业, 2016, 23(6): 24-29.
SUN Ya-guang, JIN Hao, YANG Wen-long, et al. Preparation and Application of Zirconia Ceramics[J]. China Ceramic Industry, 2016, 23(6): 24-29.
- [4] CHEVALIER J. What Future for Zirconia as a Biomaterial[J]. Biomaterials, 2006, 27(4): 535-543.
- [5] 侯永改, 田久根, 路继红, 等. 氧化锆陶瓷磨削加工的研究现状[J]. 中国陶瓷, 2014(9): 6-9.
HOU Yong-gai, TIAN Jiu-gen, LU Ji-hong, et al. The Current Research Status of Zirconia Ceramics Grinding[J]. China Ceramics, 2014(9): 6-9.
- [6] FIOCCCHI A A, SANCHEZ L E A, FILHO P N, et al. The Ultra-precision U_d -lap Grinding of Flat Advanced Ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 336-356.
- [7] 闫艳燕, 赵波, 刘俊利. 二维超声磨削纳米陶瓷表面微观不平度分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(4): 683-687.
YAN Yan-yan, ZHAO Bo, LIU Jun-li. Micro-analysis of Surface Irregularity of Nano Ceramics under Two Dimensional Ultrasonic Grinding[J]. Journal of Shanghai Jiao-tong University, 2009, 43(4): 683-687.
- [8] 纪宏波, 彭岩, 周芬芬, 等. 氧化锆陶瓷平面零件超精密研磨实验的研究[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1059-1062.
JI Hong-bo, PENG Yan, ZHOU Fen-fen, et al. Experimental Study on Ultra-precision Lapping for Zirconia Ceramic Plane[J]. Journal of Mechanical Electrical Engineering, 2013, 30(9): 1059-1062.
- [9] WEI L, ZHAO H, JING J T, et al. Investigation on Surface Residual Stress Distribution and Evaluation of Engineering Ceramics in Rotary Ultrasonic Grinding Machining[J]. In-

- ternational Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 483-492.
- [10] KANG D H, CHIO H, YOO Y J, et al. Effect of Polishing Method on Surface Roughness and Bacterial Adhesion of Zirconia-porcelain Veneer[J]. Ceramics International, 2017, 43 (7): 5382-5387.
- [11] KORDONSKI W I, GOLINI D, DUMAS P. Magnetorheological-suspension-based Finishing Technology[J]. International Symposium on Smart Structures and Materials, 1998, 9(8): 650-654.
- [12] LUO H, YIN S H, ZHANG G H, et al. Optimized Prethinning Procedures of Ion-beam Thinning for TEM Sample Preparation by Magnetorheological Polishing[J]. Ultramicroscopy, 2017, 181: 165-172.
- [13] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H, et al. Magnetorheological Polishing Using a Permanent Magnetic Yoke with Straight Air Gap for Ultra-smooth Surface Planarization[J]. Precision Engineering, 2015, 40: 309-317.
- [14] HONG K P, CHO Y K, SHIN B C, et al. Magnetorheological (MR) Polishing of Alumina-reinforced Zirconia Ceramics Using Diamond Abrasives for Dental Application[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2012, 27(10): 1135-1138.
- [15] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H. Polishing Characteristic and Mechanism in Magnetorheological Planarization Using a Permanent Magnetic Yoke with Translational Movement[J]. Precision Engineering, 2016, 43: 93-104.
- [16] 尹韶辉, 王永强, 李叶鹏, 等. 蓝宝石基片的磁流变化学抛光试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 80-87.
- YIN Shao-hui, WANG Yong-qiang, LI Ye-peng, et al. Experimental Study on Magnetorheological Chemical Polishing for Sapphire Substrate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 80-87.
- [17] WANG C F, MAO X J, PENG Y P, et al. Preparation and Optical Properties of Infrared Transparent 3Y-TZP Ceramics[J]. Materials, 2017, 10(4): 390.
- [18] 肖阳, 孙友松, 陈光忠. 永磁场磁力研磨 TC11 钛合金的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 229-234.
- XIAO Yang, SUN You-song, CHEN Guang-zhong. Experimental Study of Magnetic Abrasive Finishing of TC11 Titanium Alloy in Permanent Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 229-234.
- [19] 余青, 刘德福, 陈涛. 单晶蓝宝石衬底晶片的化学机械抛光工艺研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 253-261.
- YU Qing, LIU De-fu, CHEN Tao. Chemico-mechanical Polishing Technique of Monocrystal Sapphire Substrate Wafer[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 253-261.