

# 磁力研磨光整加工 $\text{ZrO}_2$ 陶瓷材料试验研究

梁伟, 张桂香, 张鹏, 姜林志, 秦璞, 梁久平, 滕潇

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** **目的** 利用磁力研磨光整加工技术提高  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面质量, 并探究主要工艺参数对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷表面质量的影响规律, 得到磁力研磨光整加工陶瓷材料的最优工艺参数组合。**方法** 采用开米字槽的研磨磁极头, 利用球形磁性磨料对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料进行磁力光整加工。借助 XK7136C 数控铣床对工件材料进行加工试验, 探究其表面改性能力。借助白光干涉仪和扫描电镜对抛光后的表面形貌进行检测分析, 采用单因素试验法探究主轴转速、加工间隙、磨料填充量和进给速度对表面粗糙度的影响, 并设计合理的交互正交优化试验, 寻求最佳的工艺参数组合。**结果** 在磁力研磨光整加工  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料过程中, 当转速  $S=1000 \text{ r/min}$ , 加工间隙  $\delta=2.5 \text{ mm}$ , 磨料填充量  $m=2.5 \text{ g}$ , 进给速度  $v=15 \text{ mm/min}$  时, 工件平均表面粗糙度可由研磨前的  $1.950 \mu\text{m}$  下降到  $0.493 \mu\text{m}$ 。通过白光干涉仪和扫描电镜等对材料表面的检测分析可知, 加工后工件的表面毛刺大大减少, 表面质量得到了改善。**结论** 采用磁力研磨光整加工技术和最佳参数组合, 可以有效地降低  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面粗糙度, 得到高质量的表面。

**关键词:** 磁力研磨;  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料; 交互正交设计; 表面粗糙度; 表面质量

**中图分类号:** TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0310-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.041

## Experimental Research on Magnetic Abrasive Finishing for $\text{ZrO}_2$ Ceramic Materials

LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, JIANG Lin-zhi, QIN Pu, LIANG Jiu-ping, TENG Xiao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the surface quality of  $\text{ZrO}_2$  ceramics by magnetic abrasive finishing, explore the influence of the main process parameters on the surface quality of  $\text{ZrO}_2$  ceramics, and finally obtain the optimum combination of the process parameters of the magnetic abrasive finishing ceramic material. Magnetic pole manufactured with Mi shape was used. Magnetic abrasive finishing of  $\text{ZrO}_2$  ceramic material was carried out by using spherical magnetic abrasives. With the help of XK7136C CNC milling machine, its surface modification ability was explored. With the aid of white light interferometer and scanning electron microscope, the surface morphology of the polished surface was analyzed. The effect of spindle speed, machining gap, filling amount and feed speed on the surface roughness was investigated by single factor experiment method, and a reasonable interact orthogonal experiment was designed to find the best combination of process parameters. In the process of

收稿日期: 2018-06-12; 修订日期: 2018-09-07

**Received:** 2018-06-12; **Revised:** 2018-09-07

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51675316)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51675316)

**作者简介:** 梁伟 (1991—), 男, 硕士, 主要从事光整加工、磁力研磨表面工程研究。

**Biography:** LIANG Wei (1991—), Male, Master graduate student, Research focus: surface engineering of magnetic abrasive finishing.

**通讯作者:** 张桂香 (1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密超精密加工技术、特种加工工艺与装备、表面工程。

**Corresponding author:** ZHANG Gui-xiang (1964—), Female, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: precision machining, special machining and technology, surface engineering.

ZrO<sub>2</sub> ceramic material processing by magnetic abrasive finishing, when the speed  $S=1000$  r/min, the machining gap=2.5 mm, the filler content  $m=2.5$  g and the feed speed  $v=15$  mm/min, the average surface roughness of the work-piece could be reduced from 1.950  $\mu\text{m}$  before the grinding to 0.493  $\mu\text{m}$ , and the surface roughness decreased obviously. By test of white light interferometer and scanning electron microscope, we could see that the surface burr of the work-piece had been greatly reduced and the surface quality had been improved. The magnetic abrasive finishing technology and the best parameter combination can effectively reduce the surface roughness of ZrO<sub>2</sub> ceramic material and obtain high quality surface.

**KEY WORDS:** MAF; spherical magnetic abrasive; ZrO<sub>2</sub> ceramics materials; cross orthogonal design; surface roughness

磁力研磨是近年来新兴的一种光整加工技术,具有加工自适应好,加工区温度低,无须进行刀具补偿等优点,迅速应用到了工业生产的各个领域。作为一种无机非金属材料,ZrO<sub>2</sub>陶瓷通过高温烧结而成,具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损及抗热冲击等优点<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪后,随着精细加工领域的进步及复合陶瓷材料的发展,ZrO<sub>2</sub>陶瓷的应用越来越广泛<sup>[2]</sup>。

传统 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷加工方法中,机械加工方法因其通用性较强,得到了广泛的应用,特别是金刚石砂轮磨削、研磨和抛光较为普遍。ZrO<sub>2</sub> 陶瓷加工方式包括打孔、切割、脆断、整塑等<sup>[3]</sup>。传统的机械加工方法成本高、通用性差、精度低、可靠性不强。其主要原因是 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷具有较高的硬度。另一方面,ZrO<sub>2</sub> 陶瓷因其高的脆硬性,难以承受过大的冲击载荷,不易于实现高效率加工。所以,ZrO<sub>2</sub> 陶瓷的加工成本高于其他材料<sup>[4]</sup>。

针对氧化锆陶瓷材料加工过程中存在的问题,采用磁力研磨的方式对 ZrO<sub>2</sub> 材料进行光整加工,通过数控铣或数控车改造主轴后的加工系统做试验平台,增强通用性,明显改善了传统加工中成本高、通用性差、精度低、不可靠等不足。文中采用开米字槽的磁极头作为研磨工具,将磁力研磨技术应用于氧化锆陶瓷的加工中<sup>[5-8]</sup>,借助白光干涉仪和扫描电镜对加工后的表面形貌进行分析,并采用单因素试验法研究了主轴转速、加工间隙、磨料填充量、进给速度等因素对表面粗糙度的影响,通过设计交互正交优化试验方案得到了磁力研磨光整 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料的最佳工艺参数组合。

# 1 试验加工条件

## 1.1 试验材料

陶瓷材料由于其耐高温和耐腐蚀的特性,被广泛应用于各种高温、腐蚀性强的场合,因此,对陶瓷材料表面质量的要求也越来越高<sup>[9]</sup>。本文选取工程实践中应用较广泛的 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷作为研究对象,探究磁力光整加工对其表面质量的影响作用,为磁力研磨技术在光整加工陶瓷材料方面的应用和发展提供一定的理论依据。

氧化锆陶瓷是由二氧化锆、正硅酸锆、锆硅酸钠

在高温高压下制备的,常用的制备方法有干压成型、热压铸成型及烧结法<sup>[10]</sup>。实际生产过程中一般需要加入添加剂,如 CaO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CeO 等<sup>[11]</sup>。ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料试样的尺寸为 160 mm×120 mm×1mm,其化学成分及力学性能见表 1 和表 2。

表 1 ZrO<sub>2</sub>陶瓷材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZrO<sub>2</sub> ceramic materials

Chemical composition	Zr	O	Si	Ga	Fe	Mg
Content/%	>46	≤53	≤0.3	≤0.15	≤0.05	≤0.015

表 2 ZrO<sub>2</sub>陶瓷材料的机械性能

Tab.2 Mechanical properties of ZrO<sub>2</sub> ceramic materials

Bending strength/MPa	Hardness (HRA)	Compressive strength/MPa	Maximum working temperature/°C
173~450	88~90	2500	1500

## 1.2 试验设备

本试验采用 XK7136C 数控铣床作为磁力光整加工系统(如图 1 所示),主轴部分的磁极头优化为开米字槽的 N45 钕铁硼永磁极。加工间隙为 1.5~2.5 mm 时,开米字槽的永磁极可产生 0.75~0.90 T 的磁感应

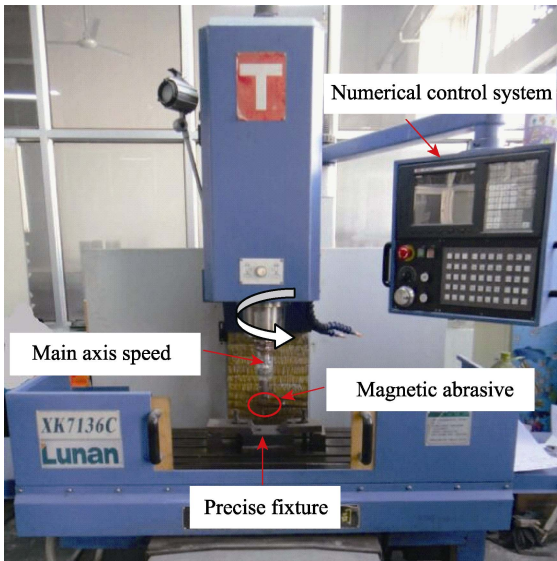


图 1 磁力光整加工系统  
Fig.1 Magnetic abrasive finishing system

强度,满足试验要求。加工介质为具有优良润滑性与导热性的水基类研磨液,磨料为  $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$  磁性磨料。在相同加工情况下,观察不同工艺参数对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷表面质量的影响规律<sup>[12]</sup>。

### 1.3 测试仪器及磁极选用

本试验所需清洗设备为超声波清洗机,磨料的称量使用精密电子天平,精度为 0.1g。检测分析设备包括金相显微镜、SEM 扫描电镜及白光干涉仪。磁极使用自己研制的 Nd-Fe-B 永磁极,磁极装置如图 2 所示。



图 2 磁极装置  
Fig.2 Magnetic pole device

## 2 磁力光整加工 $\text{ZrO}_2$ 陶瓷材料正交试验设计

正交试验法<sup>[14-15]</sup>是研究多因素变量同时影响试验结果的一种科学合理的方法,不仅具有整齐的可比性,还具有均衡的分散性,在多因素试验中有广泛的应用。

因  $\text{ZrO}_2$  材料中含有  $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{ZrSiO}_3$  等多种硬质强化相,使得磁力研磨刷的加工性变差,而且陶瓷材料导热性较差也会使加工区域容易产生热影响区。根据磁力研磨的工艺参数,选择主轴转速  $n$ 、加工间隙  $\delta$ 、磨料填充量  $m$ 、进给速度  $v$  设计交互正交试验,探讨加工  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的最佳工艺参数组合,希望获得高质量的加工表面。表 3 为  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的因素水平表。

表 3  $\text{ZrO}_2$  因素水平表  
Tab.3  $\text{ZrO}_2$  factor level table

Level	Spindle speed $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Abrasive filling $m/\text{g}$	Machining gap $\delta/\text{mm}$	Feed speed $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	800	1.5	1.5	10
2	1000	2.5	2.5	15
3	1200	3.5	3.5	20
Code	A	B	C	D

交互正交试验法是在正交试验的基础上通过添加二元交互因素组,从而实现对所做试验更加科学、系统的规划。二元交互是指任意两个影响因素共同对试验结果造成影响形成的影响参数,在正交试验的设计中具有重要意义。特别是对于  $N$  个因素且存在线性相关性的试验,最大二元交互组的个数  $M$  与其极大线性无关组  $R$  的关系为:

$$M=N-R \quad (1)$$

对于  $N$  个因素不存在线性相关的试验,最大线性无关组  $R$  就等于  $N$ , 此时  $M=0$ 。即对于线性相关性不强的试验,二元交互组个数为 0, 即不存在二元交互作用。因此,通过因素水平表分析出是否存在线性相关性是制定二元交互组的关键。

分析表 3 可得,该试验除上述四个水平因素的影响外,还需考虑交互组个数。由于进给速度与其他三组变量无明显线性相关性,所以交互组为三组。即:主轴转速-磨料填充量 ( $A \times B$ )、主轴转速-加工间隙 ( $A \times C$ )、磨料填充量-加工间隙 ( $B \times C$ )。由此得到该试验的交互正交试验表,见表 4。

光整加工试验中各工艺参数采用交互正交组合。在试验过程中选取表面粗糙度 ( $R_a$ ) 为评价指标,将各参数组合下的试验结果记录下来,数值越小表明工艺参数组合越合理。表 4 的试验结果表明,最小的表面粗糙度值为  $0.493 \mu\text{m}$ , 相对应的研磨工艺参数组合为  $n_2$ 、 $v_2$ 、 $\delta_2$ 、 $m_2$ 。

用极差分析法分析各工艺参数对试验研磨效果影响的大小,如图 3 所示。变化率越大,表示影响越明显,越小表示影响较弱。通过极差  $R$  分析得出各工艺参数对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的研磨效果影响的大小为  $A > B > C > D$ , 即主轴转速 > 磨料填充量 > 加工间隙 > 进给速度。

光整加工试验中各工艺参数采用交互正交组合。在试验过程中选取表面粗糙度 ( $R_a$ ) 为评价指标,将各参数组合下的试验结果记录下来,数值越小表明工艺参数组合越合理。表 4 的试验结果表明,最小的表面粗糙度值为  $0.493 \mu\text{m}$ , 相对应的研磨工艺参数组合为  $n_2$ 、 $v_2$ 、 $\delta_2$ 、 $m_2$ 。

用极差分析法分析各工艺参数对试验研磨效果影响的大小,如图 3 所示。变化率越大,表示影响越明显,越小表示影响较弱。通过极差  $R$  分析得出各工艺参数对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的研磨效果影响的大小为  $A > B > C > D$ , 即主轴转速 > 磨料填充量 > 加工间隙 > 进给速度。

分析二元交互作用对试验结果的影响,主轴转速-磨料流量的极差为 0.06, 而主轴转速-加工间隙、磨料填充量-加工间隙的极差均为 0.02。因此从各二元交互组的试验数值进行分析,同样可以得出主轴转速-磨料填充量的二元交互作用对试验结果的影响程度最大。

表 4 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料交互正交试验方案和试验结果  
Tab.4 ZrO<sub>2</sub> ceramics materials cross orthogonal test scheme and test result

Test number	A	B	A×B		C	A×C		B×C		D	Ra/μm
1	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.844
2	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.759
3	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.732
4	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.699
5	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.690
6	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.675
7	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.660
8	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.653
9	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.622
10	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.606
11	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.580
12	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.565
13	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.552
14	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.493
15	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.498
16	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.508
17	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.523
18	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.546
19	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.568
20	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.577
21	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.581
22	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.595
23	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.607
24	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.630
25	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>v</i> <sub>1</sub>	0.642
26	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>v</i> <sub>2</sub>	0.653
27	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>1</sub>	δ <sub>3</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	δ <sub>1</sub>	<i>v</i> <sub>3</sub>	0.678
K1	6.33	5.81	5.73	5.86	5.66	5.64	5.70	5.52	5.67	5.65	
K2	4.87	5.44	5.79	5.36	5.55	5.62	5.51	5.61	5.51	5.58	
K3	5.53	5.48	5.21	5.52	5.52	5.45	5.52	5.48	5.55	5.53	
<i>k</i> <sub>1</sub>	0.70	0.65	0.64	0.65	0.63	0.63	0.63	0.61	0.63	0.63	
<i>k</i> <sub>2</sub>	0.54	0.60	0.64	0.59	0.61	0.62	0.61	0.62	0.61	0.62	
<i>k</i> <sub>3</sub>	0.61	0.61	0.57	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.62	0.62	
Range	0.16	0.04	0.07	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	

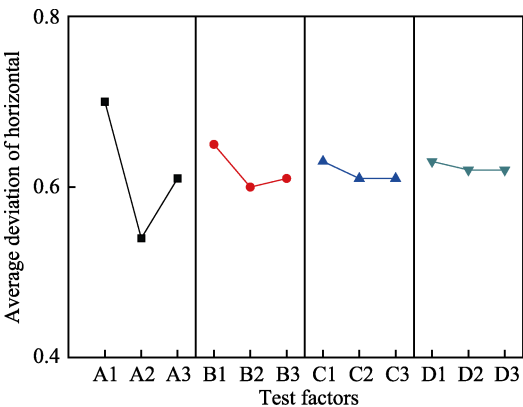


图 3 各水平因素对加工 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料研磨效果的影响  
Fig.3 Effect of different level factors on the size of ZrO<sub>2</sub> ceramics

### 3 磁力光整加工工艺参数对 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷表面质量的影响

磁力光整加工主要的工艺参数包括主轴转速 *n*、

进给速度 *v*、加工间隙 *δ* 和磨料填充量 *m*，以下从单因素<sup>[13]</sup>角度分析各工艺参数对 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料的影响规律。

#### 3.1 主轴转速

图 4 为不同主轴转速下磁力研磨 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料

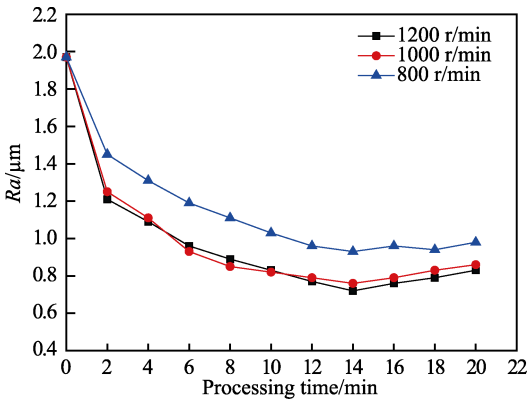


图 4 主轴转速对表面粗糙度的影响  
Fig.4 Effect of spindle speed on surface roughness



的表面粗糙度变化曲线。结果表明,在磨料填充量为 2.5 g、加工间隙为 2.5 mm、进给速度为 15 mm/min 的条件下,当主轴转速为 1200 r/min 时,加工质量最好。较高的主轴转速对磁性磨料的带动性强,接触到材料本身时产生较大的磁研压力,使工件材料的去除量增大,表面粗糙度下降趋势较快。主轴转速过大时,磁性磨料会克服磁力产生的向心力而甩出加工区域,使加工效率降低。同时在加工过程中要保证最佳加工时间,超过最佳加工时间,材料的表面粗糙度也会上升。

### 3.2 磨料填充量

图 5 为不同磨料填充量下磁力研磨  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面粗糙度变化曲线。结果表明,在主轴转速为 1200 r/min、加工间隙为 2.5 mm、进给速度为 15 mm/min 的情况下,当磨料填充量为 2.5 mg 时,材料的表面粗糙度均匀下降达到最小值。较大的磨料填充量会使加工区域内磁性研磨刷厚度增大,刚性增强,柔性变差,加工质量较差。小的磨料填充量会导致加工过程中切削力不足,对工件表面的去除量小,不能达到理想的加工效果。因此选用合适的磨料填充量,可以在相同的加工时间内提高研磨效率。

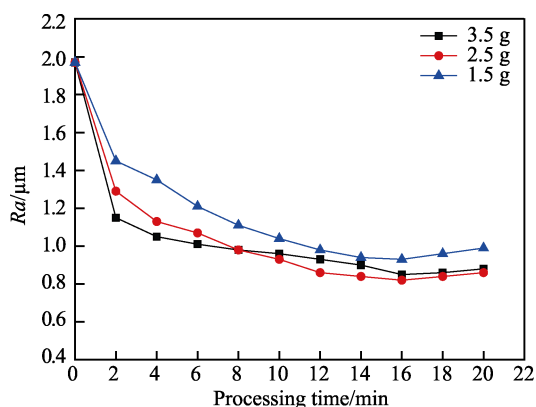


图 5 磨料填充量对表面粗糙度的影响  
Fig.5 Effect of the amount of abrasive filling on the surface roughness

### 3.3 加工间隙

图 6 为不同加工间隙下磁力研磨  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面粗糙度变化曲线。结果表明,在主轴转速为 1200 r/min、磨料填充量为 2.5 mg、进给速度为 15 mm/min 的条件下,当加工间隙为 2.5 mm 时,材料的表面粗糙度最小。当加工间隙过小时,会使磨粒聚集在加工区域,对加工表面产生较大的磨削力,增加工件表面的材料去除量,使工件表面研磨不均匀,表面粗糙度较大。间隙过大时,不能保证磁性磨料与加工表面充分接触,对工件表面研磨效果不明显,表面粗糙度较大。

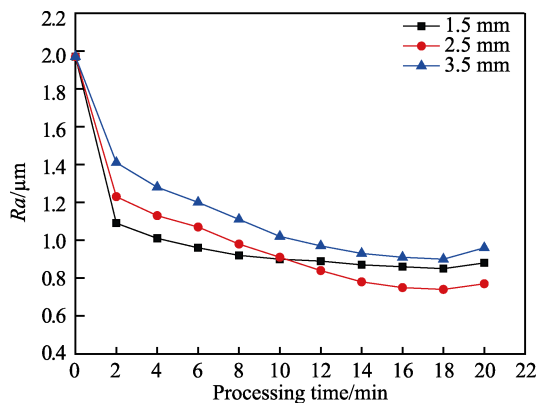


图 6 加工间隙对表面粗糙度的影响  
Fig.6 Effect of machining gap on surface roughness

### 3.4 进给速度

图 7 为不同进给速度下磁力研磨  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面粗糙度变化曲线。结果表明,在主轴转速为 1200 r/min、加工间隙为 2.5 mm、磨料填充量为 2.5 mg 的情况下,当进给速度为 10 mm/min 时,材料的表面粗糙度下降明显,且表面粗糙度值最小。较小的进给速度能使磁性研磨刷保持好的自锐性及自适应性,提高工件材料的加工质量。较大的进给速度会增加磁性研磨刷的刚性,磁性磨料在工件表面作用时间短,对工件表面的去除不够充分。但进给速度不能过小,当进给速度小于 10 mm/min 时,磁性磨料对单位面积内工件材料的冲击次数会增加,进而破坏已加工好的工件材料表面而造成粗糙度增大。

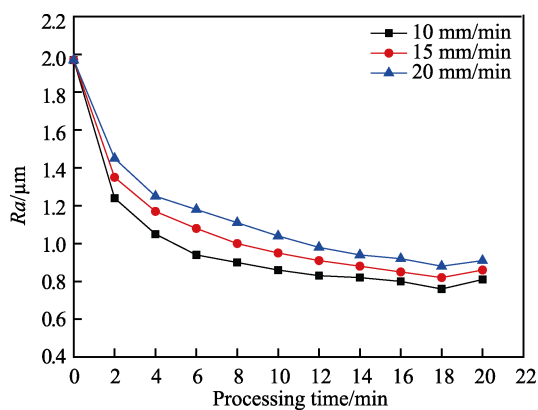


图 7 进给速度对表面粗糙度的影响  
Fig.7 Effect of feed speed on surface roughness

## 4 试验结果验证

为了进一步验证最佳工艺参数组合对磁力研磨  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的影响,采用白光干涉仪以及 SEM 扫描电镜检测加工前后工件的表面特征。

图 8—11 分别为磁力光整加工前后  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料表面粗糙度、表面纹理、表面三维形貌、SEM 表

面形貌对比。结果表明，磁力光整加工后， $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料表面粗糙度下降明显，工件表面的毛刺、划痕被大量去除，表面形貌得到改善，工件的表面质量提高，有利于陶瓷工件寿命的提高。

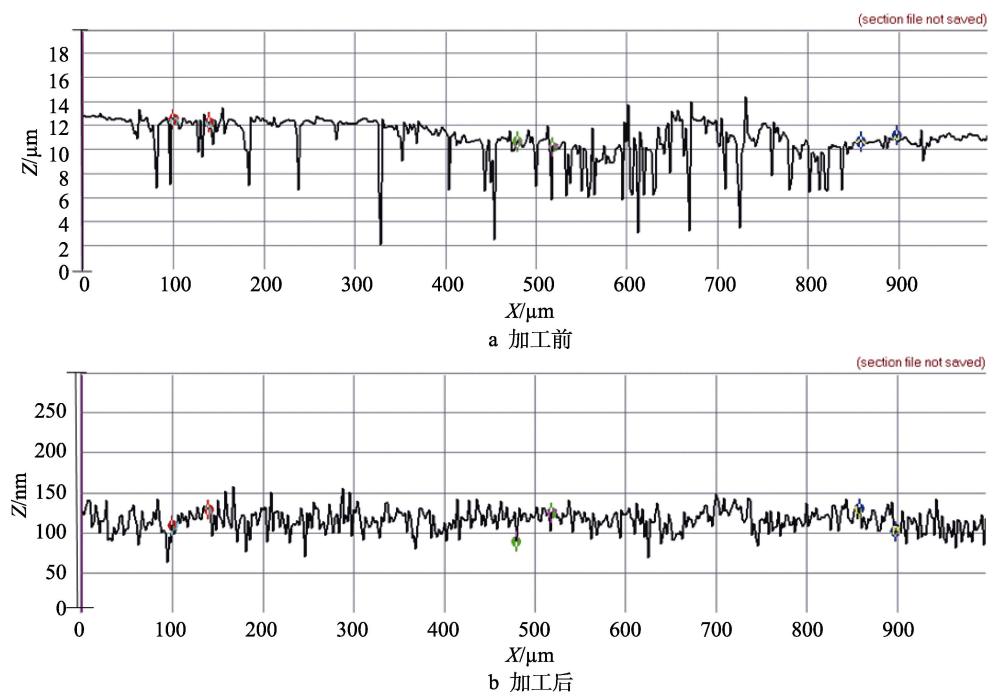


图 8 磁力研磨加工前后  $\text{ZrO}_2$  材料的表面粗糙度  
Fig.8  $\text{ZrO}_2$  surface texture before and after magnetic finishing: a)before magnetic finishing; b) after magnetic finishing

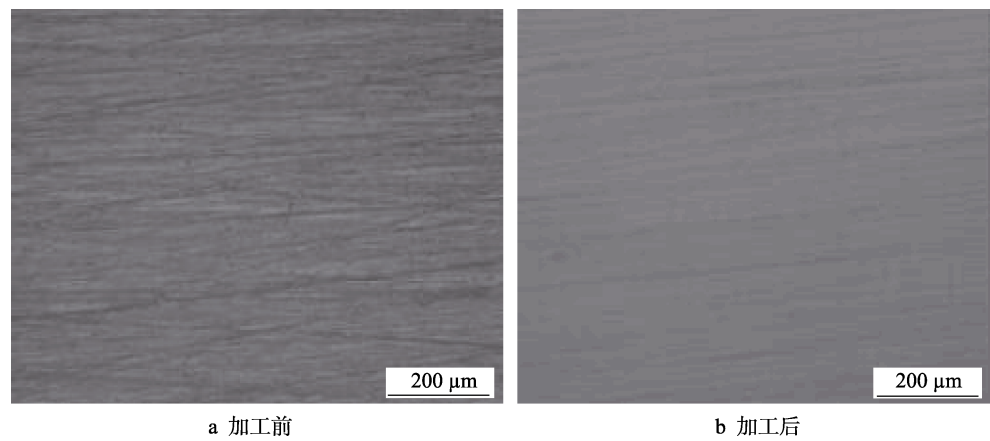


图 9 磁力研磨加工  $\text{ZrO}_2$  材料前后表面纹理  
Fig.9 Surface texture of  $\text{ZrO}_2$  material before and after magnetic grinding: a)before magnetic finishing; b) after magnetic finishing

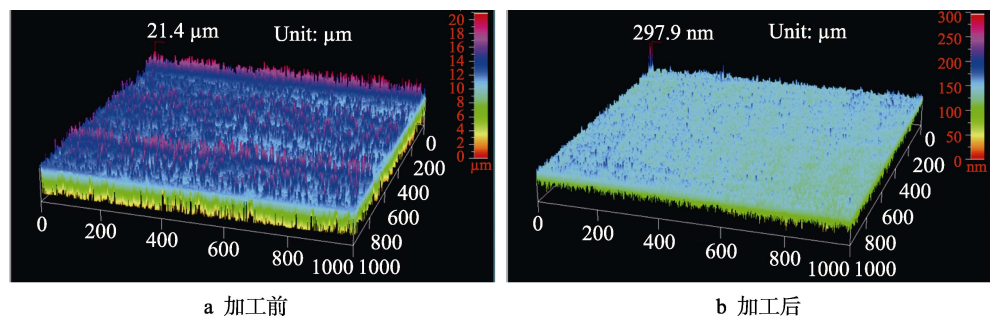


图 10 磁力光整加工前后  $\text{ZrO}_2$  材料表面三维形貌  
Fig.10 3D view of  $\text{ZrO}_2$  before and after magnetic finishing: a)before magnetic finishing; b) after magnetic finishing

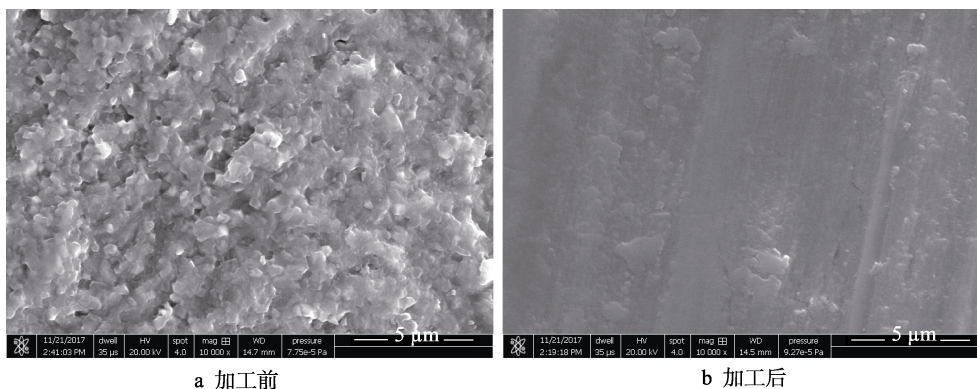


图 11 磁力光整加工前后  $\text{ZrO}_2$  材料 SEM 表面形貌

Fig.11 SEM surface topography of  $\text{ZrO}_2$  before and after magnetic finishing:  
a) before magnetic finishing; b) after magnetic finishing

## 5 结语

1) 文中通过  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的磁力研磨试验, 说明了磁力研磨加工陶瓷材料的优点。

2) 采用交互正交试验法得出加工  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的最佳参数组合。磁力光整加工  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料时, 最佳参数组合为: 转速  $S=1000 \text{ r/min}$ , 加工间隙  $\delta=1.5 \text{ mm}$ , 磨料填充量  $m=2.5 \text{ g}$ , 进给速度  $v=15 \text{ mm/mm}$ 。通过试验验证得出, 磁力研磨光整加工后,  $\text{ZrO}_2$  陶瓷材料的表面粗糙度值可由最初的  $1.7 \mu\text{m}$  减小到  $0.493 \mu\text{m}$ 。通过极差得出各试验因素对结果的影响大小为: 主轴转速>磨料填充量>加工间隙>进给速度。

3) 根据交互正交试验, 采用数控研磨机床进行了单因素试验分析, 研究了主轴转速、磨料填充量、加工间隙、进给速度因素对表面粗糙度的影响规律。

## 参考文献:

- [1] 巫兰萍, 费文宗. 氧化锆性质及其应用前景概述[J]. 四川化工, 2013, 16(1): 25-27.  
WU Lan-ping, FEI Wen-zong. Zirconia properties and its application prospects[J]. Sichuan chemical industry, 2013, 16(1): 25-27.
- [2] 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, 50(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, 50(9): 6-9.
- [3] 黄勇, 何锦涛, 马天. 氧化锆陶瓷的制备及其应用[J]. 稀有金属快报, 2004(6): 11-17.  
HUANG Yong, HE Jin-tao, MA Tian. Preparation and application of zirconia ceramics[J]. Rare metals letters, 2004(6): 11-17.
- [4] 王望龙, 王龙, 田欣利, 等. 工程陶瓷特种加工技术的研究现状与进展[J]. 机床与液压, 2015, 43(7): 176-180.  
WANG Wang-long, WANG Long, TIAN Xin-li, et al. Research status and progresses of special machining technologies for engineering ceramic[J]. Machine tool & hydraulics, 2015, 43(7): 176-180.
- [5] KASAI T, HARIO K, KARAKI D T. Improvement conventional polishing conditions for obtain super smooth surface of compound semiconductor wafers[J]. Annals of CIRP, 1990, 39(1): 432-437.
- [6] 高国富, 王岩. 磁力研磨加工技术研究进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 813-817.  
GAO Guo-fu, WANG Yan. Research progress of magnetic abrasive finishing technology[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural science), 2015, 34(6): 813-817.
- [7] ZHANG G X, ZHAO Y G, ZHAO D B. New iron-based SiC spherical composite magnetic abrasive for magnetic abrasive finishing[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2013, 26(2): 377-383.
- [8] GAO W Q, MENG L, YAN Q S. The research of NC magnetic abrasive finishing for mould parting surface[J]. Key engineering materials, 2009, 389-390: 199-204.
- [9] 毛金龙, 郭胜惠, 彭金辉, 等. 二氧化锆的相稳定及其制备方法[J]. 无机盐工业, 2008(1): 5-7.  
MAO Jin-long, GUO Sheng-hui, PENG Jin-hui, et al. Phase stabilization and preparation methods of zirconia[J]. Inorganic chemicals industry, 2008(1): 5-7.
- [10] 尹衍升. 氧化锆陶瓷及其复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
YIN Yan-sheng. Zirconia ceramics and their composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [11] 曾令可, 王慧. 陶瓷表面改性技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
ZENG Ling-ke, WANG Hui. Ceramic surface modification technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [12] JIANG C, FEI H Z, HANG Z, et al. Development of a new ultra-precision magnetic abrasive finishing process[J]. Key engineering materials. 2012, 523-524: 256-261.
- [13] DEBIN W, TAKEO S, HITOMI Y G. Study of magnetic field assisted mechanochemical polishing process for inner surface of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic components[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(14): 1547-1553.
- [14] SHI X X, RUI L, XIN C, et al. The application of orthogonal test method in the parameters optimization of PEMFC under steady working condition[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(26): 11380-11390.
- [15] GAO X S, ZHANG Y D, ZHANG H W, et al. Effects of machine tool configuration on its dynamics based on orthogonal experiment method[J]. Chinese journal of aeronautics, 2012, 25(2): 285-291.