

基于研磨氧化锆陶瓷的金刚石/铁磁性磨粒制备研究

吕旂旒, 陈燕, 赵杨, 巫昌海, 康璐

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 为解决氧化锆陶瓷研磨困难这一问题, 制备一种新型磁性磨粒。**方法** 采用粘接法制备金刚石/铁磁性磨粒, 探究制备工艺中不同成分配比对其研磨性能的影响。通过扫描电子显微镜对磁性磨粒进行表面形貌分析, 结合氧化锆陶瓷板件的研磨试验, 采用表面粗糙度测量仪与 3D 超景深显微镜对研磨前后的工件表面质量作对比分析, 以此来评价磁性磨粒的研磨性能, 最终确定较优的磁性磨粒制备工艺参数。**结果** 压制力为 0.3 MPa, 混料与粘合剂质量比为 10:1, 粘合剂中 6101 环氧树脂、有机硅树脂与 651 固化剂质量比为 4:1:5 时, 磁性磨粒的切削刃数、粘合剂自身的粘接强度及耐热性都达到最佳。使用此磁性磨粒研磨 40 min 后, 氧化锆陶瓷板件的表面粗糙度 (R_a) 由原始的 1.493 μm 降至 0.116 μm , 有效去除了原始表面缺陷和加工纹理, 改善了表面质量。**结论** 在粘合剂中加入有机硅树脂可解决研磨相在铁基体上把持力不足的问题, 采用此粘接法所制备的金刚石/铁磁性磨粒能够顺利完成对超硬氧化锆陶瓷材料的加工, 金刚石/铁磁性磨粒可以作为性能优良的磨削介质参与研磨, 并能够满足磁粒研磨光整加工的要求。

关键词: 氧化锆陶瓷; 磁性磨粒; 金刚石微粉; 粘接法; 研磨性能

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0364-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.042

Preparation of Diamond/Iron Magnetic Abrasive Particles Based on Grinding Zirconia Ceramics

LYU Yi-ni, CHEN Yan, ZHAO Yang, WU Chang-hai, KANG Lu

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

ABSTRACT: The work aims to prepare a new type of magnetic abrasive particles to solve the processing difficulty of zirconia ceramics. Diamond/iron magnetic abrasive particles were prepared by bonding method. The effect of different composition ratios on the abrasive properties in the preparation process was investigated. The surface morphology of magnetic abrasive particles was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Combined with the grinding test of zirconia ceramics plate, the surface quality of the workpiece before and after grinding was compared and analyzed by surface roughness measuring instrument and 3D ultra-depth-of-field microscope to evaluate the grinding performance of magnetic abrasive particles and

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2020-07-18

Received: 2019-09-06; Revised: 2020-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目 (20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金 (B201703)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258), Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458), Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Machining (B201703)

作者简介: 吕旂旒 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

Biography: LYU Yi-ni (1994—), Female, Master, Research focus: precision and special processing.

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

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

引文格式: 吕旂旒, 陈燕, 赵杨, 等. 基于研磨氧化锆陶瓷的金刚石/铁磁性磨粒制备研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 364-369.

LYU Yi-ni, CHEN Yan, ZHAO Yang, et al. Preparation of diamond/iron magnetic abrasive particles based on grinding zirconia ceramics[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 364-369.

finally determine the better preparation process parameters of magnetic abrasive particles. When the pressing force was 0.3 MPa, the mass ratio of mixture to binder was 10 : 1, and the mass ratio of 6101 epoxy resin, organosilicon resin and 651 curing agent was 4 : 1 : 5, the cutting edge number of magnetic abrasive particles, and the bonding strength and high-temperature resistance of binder reached the optimum technological parameters. After 40 minutes of grinding with the magnetic abrasive particles, the surface roughness (*Ra*) of zirconia ceramics plate was reduced from 1.493 μm to 0.116 μm . The original surface defects and process texture were removed effectively, and the surface quality was improved. Adding organosilicon resin in binder can solve the problem of insufficient holding force of the abrasive phase on the iron matrix. The Diamond/Iron magnetic abrasive particles prepared by this bonding method can process super hard zirconia ceramics materials successfully and can be used as good grinding medium in grinding, and meet the requirements of magnetic abrasive finishing.

KEY WORDS: zirconia ceramics; magnetic abrasive particles; diamond powder; bonding method; abrasive properties

氧化锆具有肌肤亲和性及良好的触摸手感, 广泛用于人造牙齿等需要人体亲密接触的领域^[1]。相比于玻璃, 氧化锆陶瓷具有超强的抗折强度、超常的断裂韧性、良好的刚性及高耐磨性, 对信号无屏蔽性等多方面优点^[2-3], 适用于手机外壳等电子产品中。随着无线充电和 5G 的普及, 对氧化锆陶瓷的表面质量要求与日俱增。

磁粒研磨光整加工技术是将带有切削刃的磁性磨粒置于工件与永磁体或电磁体之间, 磁性磨粒在磁场力作用下互相吸引、排列, 并形成具有一定韧性的磨粒刷, 磁体自转并带动磨粒刷转动, 待加工工件与磨粒刷产生相对移动, 在转动与移动的配合运动中, 磁性磨粒在待加工工件表面形成运动轨迹, 实现对具有划痕、皱褶、麻点等缺陷的工件产生挤压、微小划痕、微量切削的目的, 从而达到理想的研磨加工效果^[4-5]。磁性磨粒作为磁粒研磨技术中的刀具, 其性能的优劣直接决定工件最终的表面质量^[6-7]。陈燕等^[8]将铁磁性粒子和金刚石粒子采用非固结混合的方式, 对陶瓷管内壁进行抛光, 研究显示, 磁体自转会产生离心力, 易出现金刚石粒子飞离加工区域的现象, 致使有效参与研磨的金刚石粒子数减小, 影响加工效率与质量。梁伟等^[9]采用 Al_2O_3 类磁性磨粒加工氧化锆陶瓷, 由于氧化锆陶瓷材料硬度极大, 用 Al_2O_3 类磁性磨粒进行研磨时, 易出现加工效率低、研磨不均匀等问题。

本文以氧化锆陶瓷表面加工质量为研究载体, 采

用成本低、工艺简单的粘接法制备一种性能优良的磁性磨粒, 通过添加有机硅树脂的方式, 提升粘合剂的耐热性, 解决研磨相在铁基体上把持力不足的问题, 使磁性磨粒的有效使用时间得以延长。通过改变成分、配比的方式制备多种磁性磨粒, 使用扫描电子显微镜观察其微观形貌, 并通过研磨氧化锆陶瓷试验探究其研磨性能, 最终确定磁性磨粒最佳制备工艺参数。

1 试验

1.1 磁性磨粒制备工艺

如图 1 所示, 磁性磨粒是由铁基体、粘合剂与研磨相复合而成的一种磨削工具^[10]。粘接法因具有制备方便、成本低廉等优点被广泛应用在磨粒制备工艺中^[11-13]。

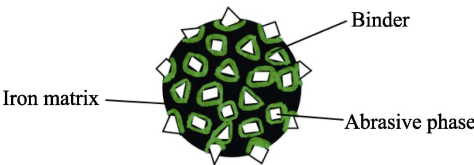


图 1 理想磁性磨粒结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of ideal magnetic abrasive particle structure

粘接法制备磁性磨粒工艺流程如图 2 所示。使用精密电子天平将所需铁基体、研磨相、胶粘剂、固化

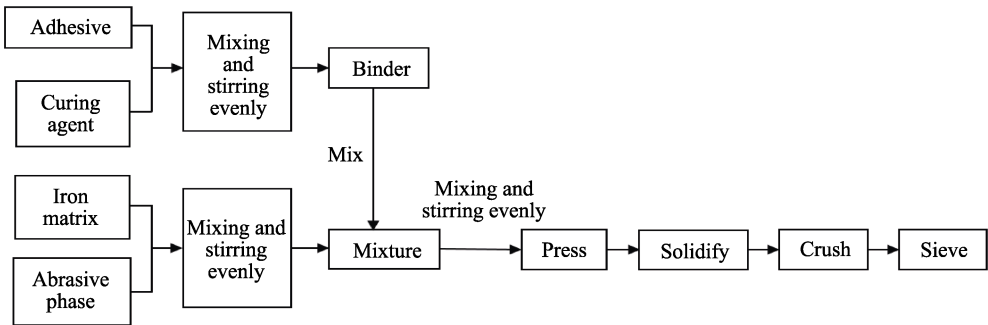


图 2 粘接法制备磁性磨粒工艺流程图
Fig.2 Process flow chart of magnetic abrasive particles prepared by bonding method

剂称量备用。首先将铁基体与研磨相置于混料搅拌机中混合均匀,再将胶粘剂与固化剂混合制得粘合剂,并倒入混料搅拌机中,继续搅拌至均匀,随后将搅拌均匀的混合物加压呈坯,坯体静置至完全固化,最后将其破碎,并筛分试验所需粒径大小的磁性磨粒。

1.2 试验原料

试验中选用的铁基体为粒径 $150\ \mu\text{m}$ 的高纯铁粉,研磨相为粒径 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 的人造金刚石微粉。将铁粉与金刚石微粉连接起来的粘合剂是由胶粘剂与固化剂混合而成,所选胶粘剂为 6101 环氧树脂和有机硅树脂,选用的固化剂为 651 固化剂。6101 环氧树脂为常用的胶粘剂,具有较好的粘接强度,加入有机硅树脂可提升其耐热性能。无需外加条件,651 固化剂在室温下即可完成粘合剂固化^[14-15]。

1.3 试验方案

用精密电子天平称取 $100\ \text{g}$ 混料,其中铁粉 $80\ \text{g}$ 、金刚石微粉 $20\ \text{g}$ 。胶粘剂与固化剂按质量比 $1:1$ 混合,制得粘合剂。采用粘接法制备的磁性磨粒,其混料与粘合剂的质量比要求为 $10:1\sim 10:1.5$ ^[16],本文选取 $10:1$ 和 $10:1.5$ 两种配比进行试验研究。

磁粒研磨光整加工过程中会产生一定的切削热,使固化后的粘合剂软化,从而降低研磨相在铁基体上的把持力,导致磁性磨粒失效。为探究有机硅树脂的有无及粘合剂中有机硅树脂的含量对磁性磨粒研磨性能的影响,拟定三种粘合剂 A、B、C,制备方案见表 1。

表 1 制备粘合剂 A、B、C 的原料配比

Tab.1 The ratio of raw materials for preparing binder A, B and C

Project	Parameter
Binder A	$m(6101\ \text{epoxy resin}) : m(\text{organosilicon resin}) : m(651\ \text{curing agent}) = 4 : 1 : 5$
Binder B	$m(6101\ \text{epoxy resin}) : m(\text{organosilicon resin}) : m(651\ \text{curing agent}) = 3 : 2 : 5$
Binder C	$m(6101\ \text{epoxy resin}) : m(651\ \text{curing agent}) = 1 : 1$

压制力过大易将研磨相压致断裂,也易使研磨相压入粘合剂中并将其完全包裹起来;压制力过小会使铁基体、粘合剂和研磨相三者间的接触面积较小,导致铁基体与研磨相间的结合强度较小。本文压制呈坯的压制力选取 $0.3\ \text{MPa}$ 。坯体固化 $48\ \text{h}$ 后,用锤式破碎机将其破碎。使用振动筛将粒径为 $250\ \mu\text{m}$ 的磁性磨粒筛分出,通过对工件的磨削试验来检验磁性磨粒的研磨性能。试验原理如图 3 所示,磁极的旋转运动与工件的平移运动相配合,使磁性磨粒对工件产生微量切削的作用,从而完成研磨加工。

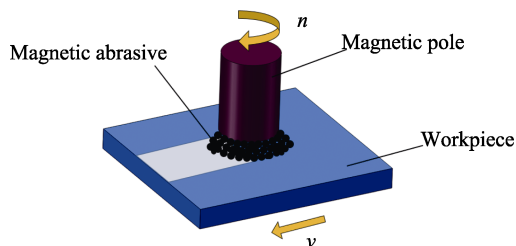


图 3 磁性磨粒研磨加工的原理简图

Fig.3 Principle sketch of magnetic abrasive finishing

本试验选用氧化锆陶瓷板件 ($22\ \text{mm} \times 12\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$) 作为检验磁性磨粒性能的对象,选用的永磁体为 $\phi 15\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ 的钕铁硼 (N35) 永磁体,试验条件见表 2。用扫描电子显微镜观察磁性磨粒的微观结构。利用表面粗糙度仪对研磨前后的工件进行测量,并采用多点测量取平均值的方式,确定最终的表面粗糙度值。通过 3D 超景深显微镜观察加工前后工件的微观形貌,来衡量研磨质量。

表 2 试验条件

Tab.2 Experimental conditions

Experimental factor	Parameter
Magnetic abrasive particles/g	10
Grinding fluid/mL	10
Machining gap/mm	2
Magnetic pole rotation speed/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1000
Workpiece movement speed/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1

2 结果及分析

2.1 磁性磨粒表面形貌

图 4 为混料与粘合剂 A、B、C 的质量比分别为 $10:1$ 和 $10:1.5$ 的六组磁性磨粒扫描电镜图,通过对比六组磁性磨粒的表面微观形貌,判断其磨削性能。如图 4 所示,粘合剂将铁粉与金刚石微粉紧密粘接在一起,图 4a、c、e 中的磁性磨粒的切削刃较明显,裸露在外,并且能产生磨削作用的切削刃也较多,能够满足磁粒研磨光整加工需求。图 4b、d、f 中,由于制备过程中粘合剂的质量增大,在施加相同压制力时,大部分研磨相被粘合剂包裹起来,切削刃无法参与研磨,磁性磨粒失效。因此,混料与粘合剂的质量比应选为 $10:1$ 。将该配比下粘合剂 A、B、C 制得的磁性磨粒标号为 MAP-1、MAP-2、MAP-3。

2.2 研磨效果分析

氧化锆陶瓷板件的表面粗糙度与材料去除量随时间的变化如图 5 所示。前 $10\ \text{min}$,三种磁性磨粒研磨效果相差不大,表面粗糙度 (R_a) 由原始的 $1.493\ \mu\text{m}$ 降至 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右。因为此时加工时间较短,产生热量较少,三种磁性磨粒仍具有较好的切削性能。随着研磨时间的增加,三种磁性磨粒的研磨性能逐渐显露差异。图 6 为研磨 $40\ \text{min}$ 后三种磁性磨粒的微观形

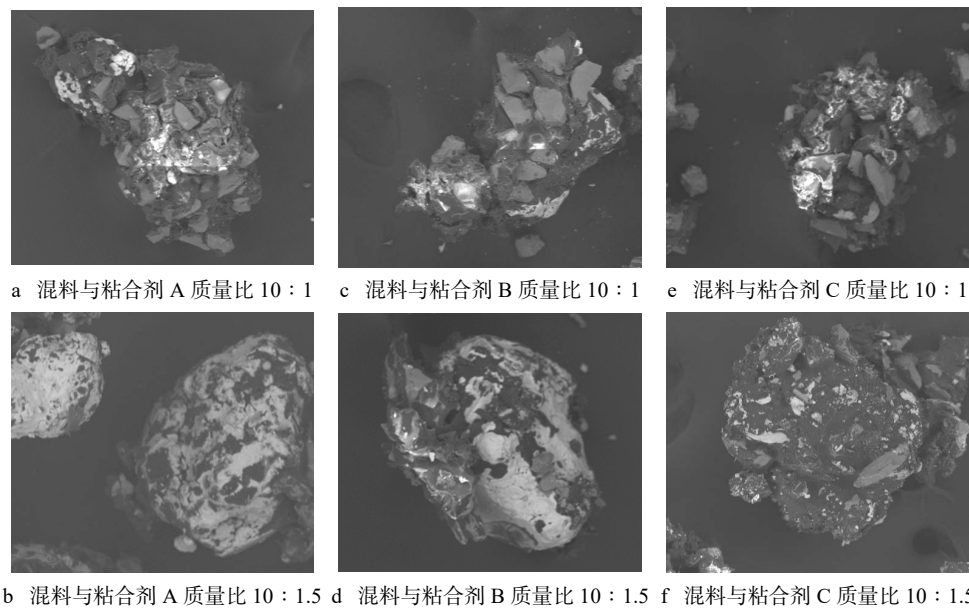


图 4 磁性磨粒扫描电镜形貌图

Fig.4 SEM of magnetic abrasive particles: a) mass ratio of mixture to binder A is 10 : 1; b) mass ratio of mixture to binder A is 10 : 1.5; c) mass ratio of mixture to binder B is 10 : 1; d) mass ratio of mixture to binder B is 10 : 1.5; e) mass ratio of mixture to binder C is 10 : 1; f) mass ratio of mixture to binder C is 10 : 1.5

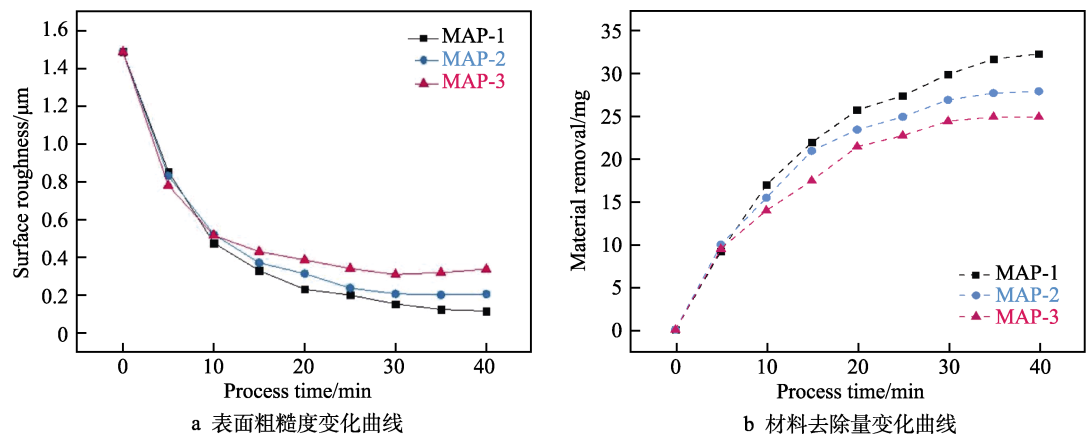


图 5 表面粗糙度与材料去除量随时间的变化曲线

Fig.5 Curve of surface roughness and material removal: a) curve of surface roughness; b) curve of material removal

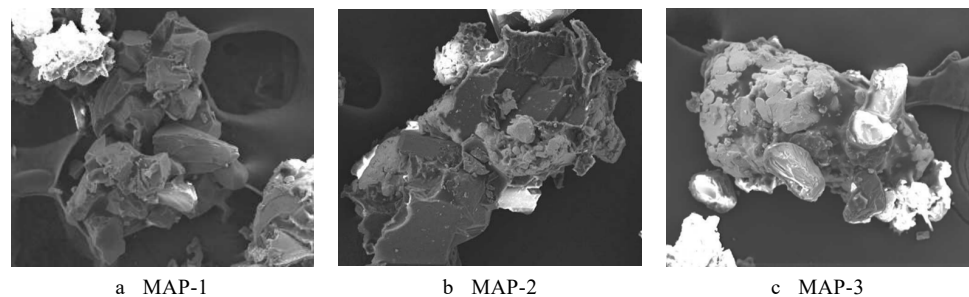


图 6 研磨 40 min 后磁性磨粒扫描电镜形貌图

Fig.6 SEM of magnetic abrasive particles after 40 min grinding

貌图。通过图 6a 可观察到，MAP-1 形貌完整，研磨相与铁基体结合紧密，这是由于粘合剂 A 兼具较好的粘接性能与耐热性。经过 40 min 研磨后，陶瓷工件表面粗糙度达到 0.116 μm 的最佳效果，材料去除

量为 32.4 mg，MAP-1 研磨性能最好。MAP-2 加工 30 min 后，工件表面粗糙度基本趋于平稳状态，且在 35 min 时表面粗糙度降至 0.203 μm ，材料去除量为 27.8 mg，但 40 min 时，陶瓷工件表面粗糙度与材料

去除量都略微升高。MAP-2 的研磨效果相比于 MAP-1 较差,原因是粘合剂 B 中 6101 环氧树脂所占比例降低,导致粘接强度降低。由图 6b 可知,MAP-2 中部分研磨相已从铁基体上脱离,加工时脱落的研磨相会在离心力的作用下飞离出加工区域或产生不规则运动,划伤工件表面。MAP-3 在 30 min 时的研磨效果最佳,表面粗糙度由原始的 1.493 μm 降低到 0.311 μm ,材料去除量为 24.5 mg,在 30 min 后,表面粗糙度与材料去除量呈上升趋势。由于粘合剂 C 仅由 6101 环氧树脂与 651 固化剂组成,虽然具有较强的粘接性能,但其耐热性能较差。由图 6c 可见,MAP-3 的研

磨相与铁基体结合程度较差,随着研磨时间的提升,大量的切削热使切削区域温度升高,导致粘合剂 C 软化,铁基体、粘结剂和研磨相三者间失去紧密接触的状态。加工过程中,粘合剂 C 无法为研磨相提供在铁基体上足够的把持力,研磨相在铁基体的带动下对工件表面产生无规律挤压,使工件表面粗糙度上升。

使用 3D 超景深显微镜放大 300 倍观察陶瓷表面质量,MAP-1、MAP-2、MAP-3 加工前后工件表面的微观形貌如图 7 所示,可清晰观测到工件本身存在材料缺陷。陶瓷属于硬脆材料的烧结体,研磨前后表面存在凹坑、孔洞。图 7a 原始工件的表面有较大的

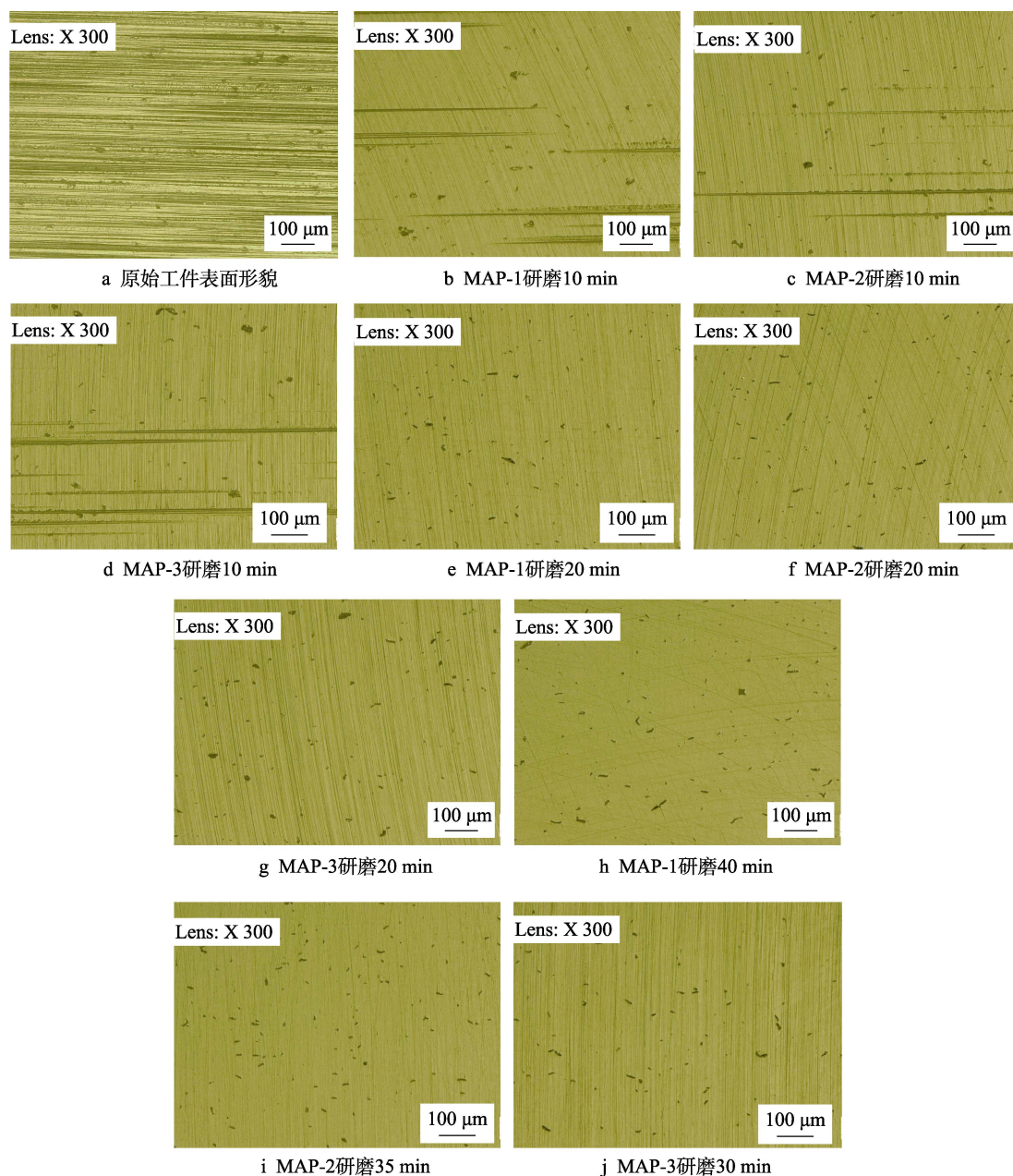


图 7 氧化锆陶瓷的微观形貌

Fig.7 Micromorphology of zirconia ceramics: a) original workpiece surface; b) after grinding for 10 min with MAP-1; c) after grinding for 10 min with MAP-2; d) after grinding for 10 min with MAP-3; e) after grinding for 20 min with MAP-1; f) after grinding for 20 min with MAP-2; g) after grinding for 20 min with MAP-3; h) after grinding for 40 min with MAP-1; i) after grinding for 35 min with MAP-2; j) after grinding for 30 min with MAP-3

凹坑及较多明显的沟状纹理等缺陷。图 7b—d 为研磨 10 min 后工件表面的微观形貌, MAP-1、MAP-2、MAP-3 三者研磨效果差异不明显, 工件表面原始纹理已基本去除。由于研磨时间较短, 材料去除量较少, 一些较深的沟槽仍存在于工件表面。图 7e—g 为研磨 20 min 后工件表面的微观形貌, 原始的沟槽纹理已完全去除, MAP-1 相比于 MAP-2、MAP-3 的研磨效果更均匀, 加工纹理更致密。图 7h—j 为 MAP-1、MAP-2、MAP-3 研磨效果最佳时工件的微观形貌。MAP-1 加工氧化锆陶瓷的表面质量最好, 加工 40 min 时, 研

磨纹理较浅, 微观形貌纹理细密; MAP-2 在 35 min 时研磨质量最好, 由于粘合剂 B 的粘接强度相对较差, 研磨相从铁基体上脱落, 导致工件表面存在一些不规则的划痕; MAP-3 在 30 min 时达到其最佳研磨效果, 因为随着加工时间的增长使研磨区域温度升高, 粘合剂 C 软化, 导致研磨相失去在铁基体上的把持力, 陶瓷表面出现研磨纹理不均、轨迹深浅不一致的情况。MAP-1 研磨加工前后氧化锆陶瓷镜面反射对比如图 8 所示, 研磨过后的工件表面质量明显提高, 并达到很清晰的镜面反射文字效果。

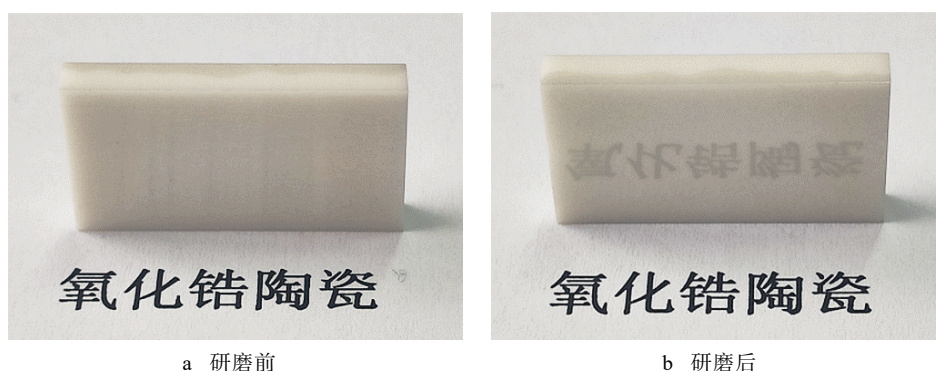


图 8 研磨前后工件表征形貌

Fig.8 Characterized morphology of workpiece before (a) and after (b) grinding

3 结论

1) 粘接法制备金刚石/铁磁性磨粒能够有效解决氧化锆陶瓷表面质量问题, 并达到较好的研磨效果。

2) 粘接法制备金刚石/铁磁性磨粒时, 混料与粘合剂的配比及胶粘剂与固化剂的配比决定了磁性磨粒的微观形貌、粘接强度和耐热性。在粘合剂中加入有机硅树脂可有效提高金刚石微粉在铁粉上的把持力, 进而提升力磁性磨粒的研磨性能。

3) 混料与粘合剂的质量比为 10 : 1, 环氧树脂 6101、有机硅树脂和 651 固化剂的质量比为 4 : 1 : 5 时, 磁性磨粒参与研磨的切削刃较多, 粘合剂的粘接强度及耐热性较优, 研磨性能相对稳定。研磨 40 min, 氧化锆陶瓷工件的表面粗糙度由原始的 $1.493\ \mu\text{m}$ 降至 $0.116\ \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 周珊羽, 王琳琳, 胡琛, 等. 齿科氧化锆陶瓷的研究进展[J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2012, 6(19): 5789-5791.
ZHOU Shan-yu, WANG Lin-lin, HU Chen, et al. Progress in dental zirconia ceramics[J]. Chinese journal of clinicians (electronic edition), 2012, 6(19): 5789-5791.
- [2] ZHONG Y S, SHI L P, LI M W, et al. Isothermal oxidation property of the $\text{Al}_2\text{TiO}_5/\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ composite coating on TC4 alloy prepared by micro-arc oxidation[J].

Materials research innovations, 2015, 19(1): 126-129.

- [3] SHEN Yi-nan, XING Yi, JIANG Peng, et al. Corrosion resistance evaluation of highly dispersed $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$ composite and analysis of its corrosion mechanism: A chromium-free refractory for RH refining kilns[J]. International journal of minerals metallurgy and materials, 2019, 26(8): 1038-1046.
- [4] KIM S O, KWAK J S. Magnetic force improvement and parameter optimization for magnetic abrasive polishing of AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(S1): 369-373.
- [5] 陈燕, 赵杨, 陈松, 等. 基于旋转磁场的 6061 铝合金弯管内表面光整加工[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 73-81.
CHEN Yan, ZHAO Yang, CHEN Song, et al. Finishing internal surface of 6061 aluminum alloy bend pipe based on rotating magnetic field[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 73-81.
- [6] WU Y, SHIMADA K, WONG Y C, et al. Effective of particles blend ratio on surface quality in surface polishing using magnetic polishing liquid (MPL)[J]. Advances in abrasive technology, 2005, 291-292: 337-342.
- [7] 牛凤丽, 陈燕, 张旭, 等. 铁基白刚玉磁性磨料的制备工艺与磨削性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(6): 35-40.
NIU Feng-li, CHEN Yan, ZHANG Xu, et al. Preparation process and grinding performance of iron-based white alumina magnetic abrasive particles[J]. Ordnance material science and engineering, 2015, 38(6): 35-40.

(下转第 385 页)

- [17] WANG Z, XIAO Z, TSE Y, et al. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy[J]. Optics & laser technology, 2019, 112: 159-167.
- [18] MISHUROVA T, ARTZT K, HAUBRICH J, et al. New aspects about the search for the most relevant parameters optimizing SLM materials[J]. Additive manufacturing, 2019, 25: 325-334.
- [19] 安超, 张远明, 张金松, 等. 选区激光熔化成型钴铬合金致密度与孔隙缺陷实验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(5): 30-37.
AN Chao, ZHANG Yuan-ming, ZHANG Jin-song, et al. Experimental study on density and pore defects of cobalt-chromium alloy fabricated by selective laser melting[J]. Applied laser, 2018, 38(5): 30-37.
- [20] 宋长辉, 杨永强, 王赞达, 等. CoCrMo 合金激光选区熔化成型工艺及其性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603001.
SONG Chang-hui, YANG Yong-qiang, WANG Yun-da, et al. Research on process and property of CoCrMo alloy directly manufactured by selective laser melting[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(6): 0603001.
- [21] KANG J W, YI J H, WANG T J. Effect of laser power and scanning speed on the microstructure and mechanical properties of SLM fabricated Inconel 718 specimens[J]. Material sci & eng, 2019, 3(3): 72-76.
- [22] LI R, LIU J, SHI Y, et al. 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials engineering and performance, 2010, 19(5): 666-671.
- [23] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2014, 1: 77-86.
- [24] GALY C, LE GUEN E, LACOSTE E, et al. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences[J]. Additive manufacturing, 2018, 22: 165-175.
- [25] GONG H, RAFI K, STARR T, et al. The effects of processing parameters on defect regularity in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting[C]//24th annual international solid freeform fabrication symposium—An additive manufacturing conference. Austin: TITLE, 2013: 12-14.
- [26] GONG H, RAFI K, GU H, et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. Additive manufacturing, 2014, 1: 87-98.
- [27] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.

(上接第 369 页)

- [8] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 131-137.
CHEN Yan, ZHANG Guang-bin, HAN Bing, et al. Experimental investigation of magnetic abrasive finishing for super precision polishing of inner surface of the ceramic tube[J]. Tribology, 2015, 35(2): 131-137.
- [9] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 磁力研磨光整加工 ZrO₂ 陶瓷材料试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 310-316.
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Experimental research on magnetic abrasive finishing for ZrO₂ ceramic materials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 310-316.
- [10] 陈燕, 张旭. 铁基白刚玉磁性磨料的制备工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(3): 12-16.
CHEN Yan, ZHANG Xu. Preparation technology of iron-based white corundum magnetic abrasive grits[J]. Diamond abrasives engineering, 2013, 33(3): 12-16.
- [11] 黄虎. 粘弹性磁性磨料光整加工机理及实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
HUANG Hu. Finishing mechanism and experiments study of viscoelastic magnetic abrasive[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [12] 侯朋坤, 杨胜强, 李文辉, 等. 粘结法制备磁性磨料及其对轴承钢外圆表面的光整加工研究[J]. 现代制造工程, 2015(3): 75-78.
HOU Peng-kun, YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, et al. The bounded magnetic abrasive particles and the research on bearing steel cylindrical surface finishing processing[J]. Manufacturing engineering, 2015(3): 75-78.
- [13] 赵文渊, 李文辉, 白小云, 等. 采用粘结法的磁性磨粒制备工艺及实验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(5): 535-541.
ZHAO Wen-yuan, LI Wen-hui, BAI Xiao-yun, et al. Preparation technology and experimental study of magnetic abrasive particles by bonding method[J]. China mechanical engineering, 2019, 30(5): 535-541.
- [14] 余先纯, 孙德林. 胶黏剂基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
YU Xian-chun, SUN De-lin. Adhesive foundation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [15] 李广宇, 李子东, 吉利, 等. 环氧胶黏剂与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
LI Guang-yu, LI Zi-dong, JI Li, et al. Epoxy adhesives and application technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [16] 陈红玲, 张银喜, 郭燕莹. 粘结磁性磨料的研究[J]. 太原理工大学学报, 2001(5): 533-535.
CHEN Hong-ling, ZHANG Yin-xi, GUO Yan-ying. Research on preparation of magnetic abrasive grains with binding method[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001(5): 533-535.