

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.03.014

表面抛光对工程陶瓷磨削断裂强度的影响规律^{*}

王健全^{1,2}, 田欣利¹, 张保国¹, 王朋晓¹

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘 要: 断裂强度受到磨削表面微观形貌和残余应力场分布的影响。对 Si_3N_4 、 SiC 和 Al_2O_3 陶瓷材料实施平面磨削后, 用金相显微镜、表面轮廓仪和 X 射线应力测试仪研究陶瓷机械抛光前后表面微观形貌、粗糙度、残余应力与工件磨削断裂强度的关系。结果表明: 经无水乙醇润滑抛光后 SiC 陶瓷具有平滑的表面微观形貌、较低的表面粗糙度和残余应力; 反应烧结的 Si_3N_4 、 SiC 和 Al_2O_3 陶瓷磨削并抛光 20 min 后的断裂强度幅度依次为 6.64%、8.18% 和 6.58%; 适当的抛光时间能降低陶瓷磨削表面应力集中程度及残余拉应力, 使陶瓷的断裂强度得到一定提升。

关键词: 工程陶瓷; 磨削; 表面抛光; 断裂强度; 残余应力

中图分类号: TG580.6; TQ174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)03-0081-05

Influences of Surface Polishing on Fracture Strength for Ground Engineering Ceramics

WANG Jian-quan^{1,2}, TIAN Xin-li¹, ZHANG Bao-guo¹, WANG Peng-xiao¹

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072; 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094)

Abstract: The Fracture strength of engineering ceramics is significantly influenced by the microscopic topography and residual stress field of ground surface. In this research, several testing equipments, such as metallographic microscope, surface profiler and X-ray residual stress tester were adopted to investigate the relationships between microscopic topography, surface roughness, residual stress and fracture strength of ground ceramics, after surface grinding and mechanical polishing. Experimental results show that the smoother machined surface with low roughness and residual stress is obtained by polishing with absolute alcohol for 20 minutes; the fracture strength of Si_3N_4 , SiC , and Al_2O_3 increases by 6.64%, 8.18%, and 6.58%, respectively, compared with the work pieces without polishing, and the surface stress concentration and residual tensile stress of polished ceramics are both reduced after an appropriate polishing time, which causes a certain improvement of the fracture strength.

Key words: engineering ceramics; grinding; surface polishing; fracture strength; residual stress

0 引 言

工程陶瓷材料以其高硬度、高弹性模量、低密度、耐磨损、耐腐蚀及优异的高温性能, 在许多工程应用领域发挥了重要作用^[1-2]。由于独特的硬脆特性, 使用金刚石砂轮的磨削加工仍是目前常用的陶瓷材料加工方法^[3]。磨削断裂强度是陶瓷

工件磨削加工后, 利用标准试验方法测得的材料弯曲断裂强度, 对磨削表面/亚表面缺陷和完整性极为敏感^[4], 与陶瓷零件的可靠性、使用寿命及其应用范围紧密相关。

抛光加工是在较大法向载荷下, 依靠金刚石、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 、 ZrO_2 和 CeO_2 等磨粒的刻划与滚

收稿日期: 2012-12-12; 修回日期: 2013-04-01; 基金项目: * 国家自然科学基金(51105378); 国防十二预研项目(51318020210)

作者简介: 王健全(1985-), 男(汉), 四川乐山人, 博士; 研究方向: 军用陶瓷材料加工理论与技术

网络出版日期: 2013-05-17 10:36; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130517.1036.003.html>

引文格式: 王健全, 田欣利, 张保国, 等. 表面抛光对工程陶瓷磨削断裂强度的影响规律 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 81-85.

压作用去除表面变质层材料,进而对零件加工质量产生影响^[5]。邓朝晖研究了水基 CeO₂ 抛光液浓度、抛光液流量、抛光轮转速等工艺参数对 Si₃N₄ 陶瓷零件抛光表面质量的影响规律^[6]。张东方利用 X 射线衍射分析了 Si₃N₄ 陶瓷试样的残余应力与强度的关系,认为抛光可在一定程度上降低残余应力,但将使材料抗弯强度降低^[7]。Vora 和 Komanduri 等将化学机械抛光引入 Si₃N₄ 陶瓷球的精整加工,获得了光滑无损伤表面的陶瓷球^[8-9]。Bhagavatula 等研究了 Cr₂O₃ 磨料抛光 Si₃N₄ 陶瓷球过程中材料的去除机理^[10]。李军采用化学机械抛光法加工掺钕钇铝石榴石透明陶瓷,加工后零件表面粗糙度 < 0.2 nm RMS,微观损伤显著减少^[11]。朱从容选用 4 种磨料抛光 Si₃N₄ 陶瓷球,探讨了磨料种类对表面粗糙度的影响,通过试验发现 CeO₂ 是一种有效的 Si₃N₄ 陶瓷球抛光磨料^[12]。张小红对采用 5 种抛光方法处理后的钴铬合金表面质量及物理性能进行测试,试验发现抛光前后工件的断裂强度无统计学差异^[13]。杜诗文等采用断裂力学理论和有限元法研究了 Si/Cu/Ta/low-k 界面在化学机械抛光过程中界面的应力分布和界面裂纹的断裂强度^[14]。目前尚无有关工程陶瓷的抛光加工工艺与其强度特性的研究工作。

文中以无水乙醇为抛光研磨液,使用多种粒度的金刚石微细磨料抛光处理工件磨削表面,按照标准试验方法获取材料强度性能,结合表面形貌观测、表面粗糙度和残余应力对比测试,分析了抛光加工及抛光时间对陶瓷磨削断裂强度的影响规律。

1 试验方法

1.1 试验材料与设备

以商品化的反应烧结 Al₂O₃、反应烧结 Si₃N₄ 和反应烧结 SiC 为试验材料,利用浙江华镭 CHN300 型 CO₂ 激光器将陶瓷工件切割成 45 mm×4 mm×3 mm 的矩形试样,并对 4 条长边均匀倒角,倒角角度为 45°,试验材料的主要性能见表 1 所示。

使用大丰信达机械制造有限公司生产的 XD250AH 卧轴矩台精密平面磨床对陶瓷工件进行磨削加工,工件通过磁吸盘固定于磨床工作台表面。利用 P-2 型金相试样抛光机抛光磨削表

面,抛光设备的抛光盘为软质圆形铝盘。运用 Olympus GX41 型金相显微镜和 Talysurf 5P-120 型接触式表面轮廓仪观测抛光加工对工件表面形貌及微观形貌特征的影响。通过倾侧固定 Ψ 法,使用 X350 型 X 射线残余应力测试仪测定抛光前后陶瓷表面的残余应力。采用 SANS CMT4304 微控式电子万能试验机测试三种陶瓷材料的断裂强度。

表 1 试验陶瓷材料的主要性能

Table 1 Main performance of experimental ceramics

Specimen	Density/ (g · cm ⁻³)	Hardness/ HRA	Elastic modulus/ GPa	Fracture toughness/ (MPa · m ^{1/2})
Al ₂ O ₃	3.55	94	280	2.6
SiC	3.06	93	308	3.5
Si ₃ N ₄	3.18	90	216	5.8

1.2 磨削及抛光试验过程

按砂轮线速度 $V_s = 20$ m/s,工件进给速度 $V_w = 9$ m/min,磨削深度 $a_p = 0.01$ mm 的加工参数对陶瓷工件待抛光表面进行磨削,使用的树脂结合剂平形金刚石砂轮粒度为 180 号,并采用浓度不低于 10% 的专用皂化液进行连续喷射冷却。陶瓷磨削表面的微观形貌粗糙不平,使用粒度为 240、320、400、600、800、1 000、1 500 和 2 000 号的防水砂纸依次预磨陶瓷试样表面,提高表面光洁度并减少机械抛光时间。预磨后分别使用粒度公称尺寸为 0.5~1 μm(粒度号为 W1)和公称尺寸低于 0.5 μm(粒度号为 W0.5)的金刚石研磨膏抛光工件待加工表面,同时以无水乙醇进行润滑,进一步降低表面粗糙度、减少表面与亚表面损伤。抛光时主轴转速为 1 350 r/min,抛光过程中手持工件,保证加工表面与抛光盘平行接触,同时使抛光盘以恒定压力作用于工件。抛光时间设定为 20 min。

1.3 强度测试方法

陶瓷工件磨削断裂强度的测试方式为三点弯曲法^[15],测试中保持横梁加载速率为 0.5 mm/min,试验夹具下跨距为 30 mm,并按照下式计算工件实际强度值。

$$\sigma_f = \frac{45P_{\max}}{4d^2} \quad (1)$$

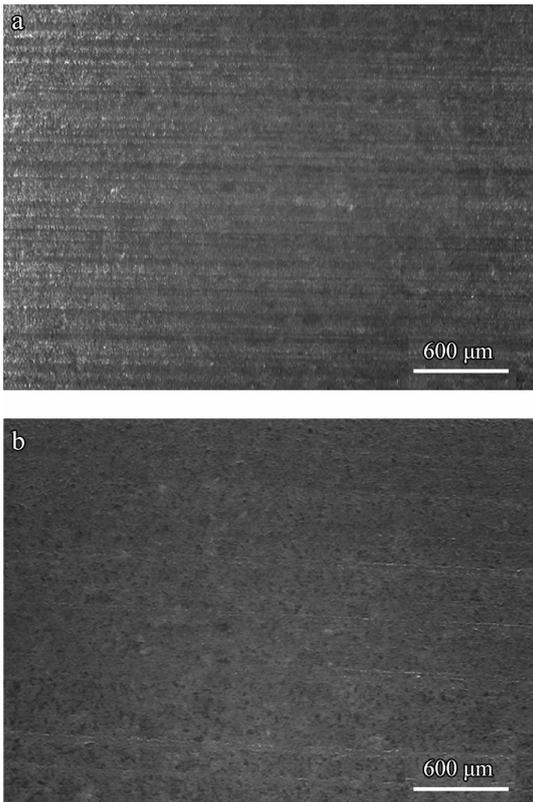
式中, P_{\max} 为测得陶瓷工件的断裂应力; d 为陶瓷工件平行于加载方向的实际厚度。

由于陶瓷工件表面裂纹和内部缺陷的分布具有随机性,不同工件中最危险缺陷的尺寸也各不相同,导致实测材料强度具有一定的分散性。采用三点弯曲法测定陶瓷磨削断裂强度时,按每组方案进行至少3次重复试验,取其均值为该组试验方案的磨削强度值。

2 结果与讨论

2.1 抛光表面形貌及表面粗糙度

以 SiC 陶瓷工件为典型研究对象,将两组试验材料抛光 20 min,置于 GX41 型金相显微镜下观察抛光区域表面形貌,如图 1 所示。



(a) Before polishing (b) After polishing

图 1 SiC 陶瓷磨削前后抛光区域的表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of ground SiC specimen before and after polishing

并利用 Talysurf 5P-120 型接触式表面轮廓仪测量 SiC 磨削表面抛光 20 min 后微观形貌特征参数的变化情况。设置探头测量取样长度为 0.25 mm,总评定长度 $L=1.25$ mm。在工件表面垂直加工方向随机测量 5 个数据点,取各点粗

糙度测量值的算术均值作为工件的表面粗糙度,结果如表 2 所示。

根据常用评定参数定义了轮廓谷形状参数 R_v 和轮廓分布密度参数 R_D 。其中,轮廓谷形状参数 R_v 为评定长度内最尖锐轮廓谷深度与宽度之比,轮廓分布密度参数 R_D 为磨削表面评定长度内轮廓数,二者均为无量纲参数,新参数计算式及其结果如式(2)和表 3 所示。

$$R_v = \frac{S}{R_m}$$

$$R_D = \frac{L}{S_m} \quad (2)$$

式中, L 为每次测量时的有效评定长度,试验中取值 $L=1.25$ mm。

表 2 SiC 陶瓷抛光前后的表面粗糙度

Table 2 Surface roughness of ground SiC before and after polishing

Roughness parameters/ μm	R_a	R_y	R_m	S	S_m
Before polishing	1.304	6.125	3.480	312	520
After polishing	0.307	2.124	1.640	520	781

表 3 SiC 陶瓷抛光前后的 R_v 和 R_D

Table 3 R_v and R_D of ground SiC before and after polishing

Roughness parameters/ μm	R_v	R_D
Before polishing	89.660	4.810
After polishing	317.070	3.200

2.2 表面残余应力

磨削后,磨粒对工件的部分机械挤压作用力受表面塑性变形影响,将以残余应力形式残留在陶瓷工件变质层内。X 射线衍射和俄歇能谱分析证明^[16],多数陶瓷工件表面变质层内存在微晶/碎晶层组织和非晶态玻璃相结构,在基体约束作用下,变质层接近表面的区域将产生较高残余拉应力。使用 X350 型应力测试仪测定抛光前后陶瓷表面的残余应力分布情况,测定结果如表 4 所示。

2.3 断裂强度

对 3 种陶瓷试验材料进行磨削后将工件分为两组,一组进行抛光处理 20 min,另一组不作任

何处理。利用3点弯曲试验法测定两组工件的断裂强度,得到试验材料抛光前后的断裂强度变化情况,如图2所示。

表4 SiC 抛光前后的表面残余应力

Table 4 Residual stress of ground SiC before and after polishing

Machining condition/MPa	Residual stress	Fracture strength
Before polishing	8	182.3
After polishing	-85	194.4

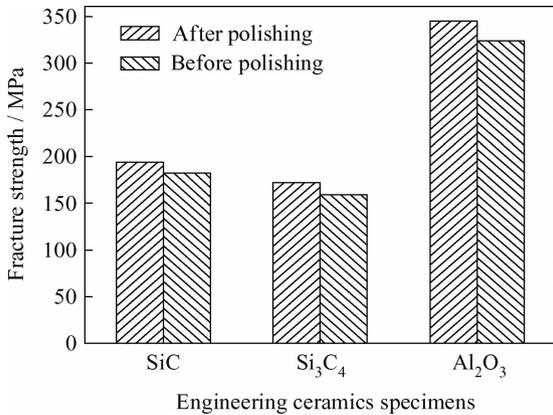


图2 陶瓷磨削表面抛光前后的断裂强度

Fig. 2 Fracture strength of ground ceramics before and after polishing

此外,按照上述加工参数磨削3种陶瓷材料,按照抛光时间不同将工件分为8组。分别测试各组陶瓷工件的断裂强度,得到抛光时间对不同材料断裂强度的影响规律,如图3所示。

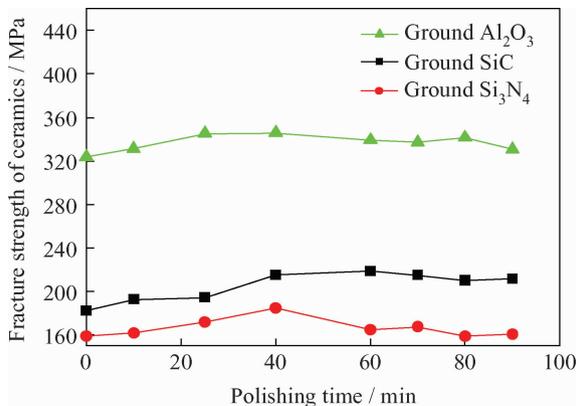


图3 陶瓷断裂强度随抛光时间变化

Fig. 3 Relationships between fracture strength and polishing time of ceramics

3 分析和讨论

3.1 抛光加工对陶瓷磨削断裂强度的影响

机械抛光过程采用的细微金刚石磨料比陶瓷工件材料的硬度更高,因此磨料能消除磨削过程中的缺陷,获得良好表面质量。从图1(b)可见,抛光20 min后SiC陶瓷磨削表面凸峰和凹槽等微观轮廓被金刚石磨料去除,使得工件表面比图1(a)中未抛光试件表面更为平滑细腻,磨粒磨削划痕与抛光前相比数量显著减少,工件呈现良好的加工品质。

由表2可见,抛光后SiC工件表面微观不平度高度特性评定参数值较抛光前显著减小,表明抛光加工可有效降低表面轮廓峰最大高度。磨削或抛光表面凹凸起伏的轮廓峰谷附近存在明显应力集中,而尖锐的轮廓谷底硬脆陶瓷材料微裂纹萌生、发展以致破坏最为活跃的区域^[4]。结合表3的试验数据可知,抛光后陶瓷工件的轮廓谷形状参数 R_v 大幅度增加,轮廓分布密度参数 R_D 有所减小,表明工件表面评定长度内尖锐轮廓谷宽深比加大,单位长度轮廓曲线的波峰和波谷数量减少,表面轮廓形貌趋于均匀和平坦化,同时表面轮廓谷尖端曲率半径及应力集中程度减小,承受外加拉伸载荷能力增强,从而降低磨削表面微观形貌对断裂强度的不利影响。另外,从表4可看出,抛光处理后陶瓷表层的压应力高于抛光前的表面残余应力值。由于抛光加工实现了表面塑性变质层的微量去除,受磨削热应力影响的工件浅表层厚度减小,残余拉应力降低或完全消除,更深表层中残余压应力得到部分释放,使测量结果表现为较高压应力。从图2可知,3种陶瓷材料在抛光处理后断裂强度比试验前有所提高,反应烧结SiC、Si₃N₄和Al₂O₃陶瓷磨削并抛光后断裂强度增加幅度依次为6.64%、8.18%和6.58%,表明抛光加工对各种陶瓷材料的磨削强度性能具有一定改善作用。

3.2 抛光时间对陶瓷磨削断裂强度的影响

材料抛光去除是大量微细金刚石磨粒在抛光盘带动下,与工件表面发生微量划擦的累积效应。硬脆陶瓷材料的抛光效率极低,可采取延长抛光时间的方法增加磨削表面变质层去除量。根据图3,几种陶瓷工件的断裂强度均随表面抛光时间延长有所变化。当抛光时间 $t \geq 10$ min时,Si₃N₄陶瓷

与 Al_2O_3 陶瓷的断裂强度逐渐增大,在抛光时间 $t=40$ min 时,比未抛光的工件断裂强度值提高了 13.3% 和 6.8%, SiC 陶瓷在抛光处理 $t=20$ min 后断裂强度开始增长,到 $t=60$ min 时达到峰值,强度提升幅度达到 12.4%。结合图 4 的试验数据可知,陶瓷工件表面压应力随抛光时间呈递增趋势,磨削表面原始的残余拉应力得到部分释放。根据材料表面残余压应力的强度改善机理^[4,16],表明抛光加工通过改变磨削表面残余应力分布。通过适当时间的抛光处理,还可使陶瓷表层塑性变质层逐步减小和去除,变质层内破坏材料强度性能的中位裂纹密度降低,磨削表面轮廓粗糙度及应力集中系数减小,从而使陶瓷工件的磨削断裂强度得到恢复。

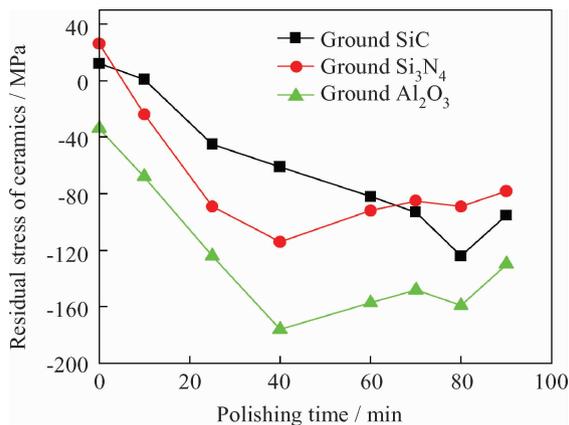


图4 抛光时间与陶瓷表面残余应力的关系

Fig. 4 Relationships between residual stress and polishing time of ceramics

4 结论

(1) 抛光处理后 SiC 磨削表面更为平滑细腻,抛光表面微观不平度高度特性评价参数与轮廓谷形状参数 R_v 增加,轮廓分布密度参数 R_D 减小,表面轮廓形貌趋于均匀和平坦化,表面轮廓谷尖端曲率半径及应力集中程度减小;

(2) 机械抛光的 SiC 陶瓷磨削表面残余应力表现为压应力。抛光处理 20 min 后反应烧结 SiC 、 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷的断裂强度分别提高 6.64%、8.18% 和 6.58%;

(3) 一定时间的抛光处理使工程陶瓷磨削表面残余拉应力得到释放、表面光洁度和残余压应

力逐渐增加、粗糙度与应力集中程度降低,反应烧结 SiC 、 Si_3N_4 和 Al_2O_3 的断裂强度提升幅度达 12.4%、13.3% 和 6.8%。

参考文献

- [1] 卓会丹, 宋宝玉, 古乐. 氮化硅陶瓷表面 DLC 膜的高温摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 47-50.
- [2] 冯建基, 李国卿, 牟宗信, 等. Si_3N_4 陶瓷材料的高温氧化理论及其抗氧化研究现状 [J]. 中国表面工程, 2004, 17(4): 15-19.
- [3] 邓朝晖, 张璧, 周志雄, 等. 陶瓷磨削的表面/亚表面损伤 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(5): 61-71.
- [4] 王健全. 工程陶瓷磨削断裂强度的控制、预测与恢复技术研究 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
- [5] 李伯明, 赵波. 实用磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [6] 邓朝晖, 王超登, 万林林, 等. 氮化硅陶瓷回转头零件化学机械抛光工艺实验研究 [J]. 制造技术与机床, 2011, 61(6): 106-109.
- [7] 张东方. 表面处理对氮化硅陶瓷力学性能的影响 [J]. 佛山陶瓷, 2003, 13(5): 1-12.
- [8] Vora H, Orent T W, Stokes R J. Mechano-chemical polishing of silicon nitride [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1983, 65: 140-141.
- [9] Komanduri R, Lucca D A, Tani Y. Technological advances in fine abrasive processes [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(2): 545-596.
- [10] Bhagavatula S R, Komanduri R. Research on the chemo-mechanical polishing of silicon nitride with chromium oxide abrasive [J]. Philosophical Magazine, 1996, 74: 1003-17.
- [11] 李军, 朱永伟, 左敦稳, 等. $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 透明陶瓷的超精密加工 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(8): 1178-82.
- [12] 朱从容, 吕冰海, 袁巨龙. 氮化硅陶瓷球化学机械抛光机理的研究 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 1245-9.
- [13] 张小红. 不同抛光方法对钴铬合金铸造义齿精度及物理性能的影响 [D]. 青岛: 青岛大学, 2006.
- [14] 杜诗文, 李永堂. 化学机械抛光中 $\text{Si}/\text{Cu}/\text{Ta}/\text{low-k}$ 界面玻璃和断裂特性研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 26-31.
- [15] GB 6569-2006 精细陶瓷弯曲实验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 田欣利, 徐燕申, 彭泽民, 等. 陶瓷磨削表面变质层的产生机理 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(11): 30-32.

作者地址: 四川省西昌市小庙乡

615000

西昌卫星发射中心汽车修理厂

Tel: 130 0280 9530

E-mail: zgywj@126.com