

干湿磨条件下氧化锆陶瓷表面粗糙度实验

吴玉厚¹, 王维东², 李颂华^{1,2}, 孙健², 刘春光³, 韩涛²

(1. 沈阳建筑大学高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168;
2. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学学报编辑部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究干磨和湿磨两种工作条件下, 金刚石砂轮磨削氧化锆陶瓷时, 各磨削参数对其表面粗糙度的影响. 方法 通过在干/湿磨条件下对氧化锆陶瓷以不同的砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度进行平面磨削, 并观察磨削后工件表面粗糙度数值的变化, 再利用电子扫描显微镜对磨削后的表面形貌进行分析. 结果 在湿磨过程中, 当砂轮线速度为 50 m/s、磨削深度为 0.010 mm、工件进给速度为 500 mm/min 时, 氧化锆陶瓷件表面粗糙度为 0.191 8 μm , 表面质量最好; 在干磨过程中, 当砂轮的线速度为 50 m/s、磨削深度为 0.010 mm、工件进给速度为 500 mm/min 时, 氧化锆陶瓷件表面粗糙度为 0.189 5 μm , 表面质量最好. 结论 干湿磨条件下各磨削参数对氧化锆陶瓷表面粗糙度影响主次顺序分别为砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度. 同时在小磨削量的精密磨削中, 干磨的表面粗糙度要优于湿磨的表面粗糙度.

关键词 平面磨削; 氧化锆; 干/湿磨; 表面粗糙度; 表面形貌

中图分类号 TH16; TB35

文献标志码 A

Experiments of Surface Roughness of Zirconia Ceramics under Wet and Dry Grinding

WU Yuhou¹, WANG Weidong², LI Songhua^{1,2}, SUN Jian², LIU Chunguang³, HAN Tao²

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Editorial Department of Journal, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The effects of grinding parameters on the surface roughness of zirconia ceramics were investigated in this paper under such two working conditions as dry grinding and wet grinding. Under the environment of wet/dry grinding of zirconia ceramics with the different grinding wheel linear velocity, grinding depth and workpiece feed speed to carry on the plane grinding, then to ob-

收稿日期: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675353); 辽宁省自然科学基金项目(2015020149); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015053); 沈阳市科技计划项目(F16-205-1-15); 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室开放基金项目(SJSC-2015-3)

作者简介: 吴玉厚(1955—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事工程陶瓷材料加工方面研究.

serve the change of the workpiece surface roughness and analysis the shape of diamond surface after grinding were analyzed by scanning electron microscope. In the process of wet milling, the quality of surface is better when grinding wheel linear velocity of 50 m/s, the grinding depth of 0.010 mm, workpiece feed speed for 500 mm/min, zirconia ceramic surface roughness is 0.200 0 microns; In dry grinding process when grinding wheel linear velocity of 50 m/s, the grinding depth of 0.010 mm, workpiece feed speed for 500 mm/min. , zirconia ceramic surface roughness is 0.187 3 microns. The influence order of grinding parameters on surface roughness of zirconia ceramics are: grinding wheel speed, grinding depth and workpiece feed speed under the condition of wet grinding; Besides, in a small amount of grinding precision grinding, wet grinding surface roughness is better than dry grinding surface.

Key words: flat surface grinding; zirconia; dry /wet grinding; surface roughness; surface morphology

随着“中国制造 2025”的提出, 高端装备成为我国制造业发展的重点工程. 工程陶瓷是一种新式的工程结构材料, 它具有金属材料无法匹敌的一些优良特性, 例如硬度大、耐磨性能极好、抗高温、耐腐蚀性、重量轻等, 被广泛应用于航空航天, 深海探测, 国防军事, 工业及化工设备领域中^[1-2]. 但是, 因为它的这些特性, 使其成为很难加工的工程材料. 氧化锆陶瓷主要是以 ZrO_2 为主要成分, 它是锆的主要化合物, 它的化学性质不活泼. 由于氧化锆陶瓷材料为难加工材料, 所以对其加工技术的研究没有易加工材料加工技术成熟^[3-5]. 国内外学者针对工程陶瓷表面粗糙度做了许多探究. Lich 等^[6]提出了半延展性磨削模型. CHEN J 等^[7-9]研究在小磨屑厚度下, 采用高速的砂轮线速度, 来实现硬脆材料的高质高效加工. Azarhoushang B 等^[10]在干磨条件下, 改变砂轮结构, 减小磨削热, 提升了其表面质量. 田欣利等^[11]研究工程陶瓷高速干磨时, 发现随着磨削温度升高, 会引起

陶瓷表面发生晶相组织变化.

通过这些研究可以较好地提高工程陶瓷的表面质量. 同时为了体现绿色制造, 对于小磨削量的情况下, 有无磨削液时, 对表面质量的影响有待探讨. 因此笔者使用金刚石砂轮对氧化锆陶瓷进行磨削加工, 并对磨削后的工件表面进行检测分析, 研究磨削过程中两种加工环境和不同加工参数对工件表面粗糙度的影响, 从而得到氧化锆陶瓷磨削加工的最佳工艺参数, 对磨削加工工艺的优化和提高磨削的加工效率有重要意义.

1 实 验

1.1 实验试件

实验采用氧化锆陶瓷立方块毛坯试件, 长宽高为 20 mm × 20 mm × 10 mm. 材料基本参数见表 1. 从表中可以看出, 氧化锆具有低密度、高硬度、高抗弯强度和较低的热膨胀系数等特点, 是一种理想的陶瓷材料^[12-14].

表 1 材料基本参数

Table 1 Basic parameters of the materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	弹性模量/GPa	泊松比	断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	抗弯强度/MPa	硬度/HRC
氧化锆	5.88	8.75	195	0.30	10.5	750	78
氮化硅	3.25	3.2	310	0.26	6.0	900	80
氧化铝	3.99	8.6	407	0.20	3	300	82
轴承钢	7.85	10.0	208	0.30	25	1 600	63

1.2 实验设备

实验采用由德国柯尔柏斯来福临公司生产的 BLOHM Orbit 36 CNC 精密平面成形磨床,其最大分辨率可以达到 0.001 mm,最大的切削速度可以达到 70 m/s. 同时采用树脂结合剂的金刚石砂轮,半径为 150 mm,粒度为 D91.

1.3 检测仪器

为了得到精确的表面粗糙度,实验采用英国的 Taylor Hobson 公司生产的 Surtronic25 型粗糙度仪进行检测(见图 1),测量精度可以达到 0.001 μm. 通过观察表面形貌来确定是否发生塑性变形,实验采用扫描电子显微镜(SEM)对氧化锆陶瓷工件表面检测分析(见图 2). 扫描电子显微镜是依据电子与物质相互作用工作的,可以精确地反应被检测工件的表面形貌.



图1 Surtronic25 型粗糙度仪
Fig.1 Surtronic25 roughness meter

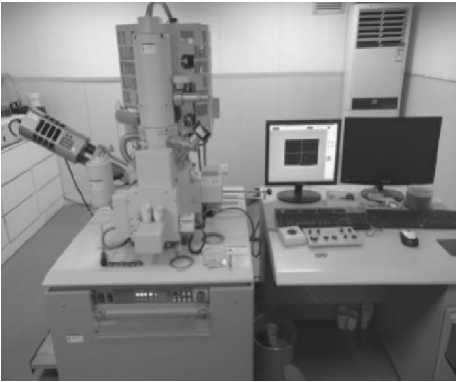


图2 扫描电子显微镜
Fig.2 Scanning electron microscope

2 磨削用量对表面粗糙度影响程度

磨削用量是指磨削加工过程中所采用的砂轮线速度、进给速度和磨削深度等工艺参数^[15-18]. 实验中通过金刚石砂轮对氧化锆陶瓷工件表面进行磨削加工,表面粗糙度是度量工件加工表面质量的主要标准,所以如何确定一系列优异的磨削参数,有效提高磨削表面质量,对加工制造有着重要的指导作用.

实验研究涉及砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度 3 个因素,设定每个因素有 4 个水平,如果不采用正交试验的方式进行实验,而进行全面的实验来选取最优的实验方案,需要进行 64 次试验,为了减小工作量,同时又要保证实验的可靠性,实验采用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验表来进行实验,总共只需要做 16 次实验,这样可以节约时间和成本. 正交试验具有“均匀分散,齐整可比”的性质^[19],依据正交试验所得到各组参数的结果,比较之后可以选出一组最优的磨削参数. 正交试验的各个因素和水平参数见表 2.

表2 正交设计的因素和水平

Table 2 Factors and levels of the orthogonal design

水平	砂轮线速度/ 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度/mm	工件进给速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	30	0.005	500
2	35	0.010	3 000
3	40	0.015	6 000
4	50	0.020	10 000

为了避免实验数据出现错误,同时减小数据之间误差,对每组数据进行了多次重复实验,取平均值作为最后的测试结果,正交试验设计和结果见表 3. 从表 3 中能够得到,在 16 组参数中,湿磨条件下,当砂轮线速度达到 50 m/s、磨削深度为 0.010 mm、工件进给速度为 500 mm/min 时,氧化锆陶瓷毛坯件的表面粗糙度值最小(0.191 8 μm);干磨条件下,当砂轮线速度达到50 m/s、磨削深度

表3 正交试验的设计和结果

Table 3 Design and results of the orthogonal experiments					
试验次数	砂轮线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度/mm	工件进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	表面粗糙度(湿磨)/ μm	表面粗糙度(干磨)/ μm
1	30	0.005	500	0.208 5	0.190 2
2	30	0.010	3 000	0.238 2	0.219 5
3	30	0.015	6 000	0.242 1	0.226 2
4	30	0.020	10 000	0.253 6	0.234 7
5	35	0.005	3 000	0.216 0	0.201 7
6	35	0.010	6 000	0.216 6	0.209 8
7	35	0.015	10 000	0.221 1	0.211 4
8	35	0.020	500	0.217 7	0.210 0
9	40	0.005	6 000	0.201 0	0.192 9
10	40	0.010	10 000	0.218 2	0.202 2
11	40	0.015	500	0.211 0	0.199 5
12	40	0.020	3 000	0.217 5	0.201 0
13	50	0.005	10 000	0.204 9	0.193 9
14	50	0.010	500	0.191 8	0.189 5
15	50	0.015	3 000	0.207 7	0.196 9
16	50	0.020	6 000	0.210 6	0.202 2

为 0.010 mm、工件进给速度为 500 mm/min 时,氧化锆毛坯件的表面粗糙度值最小(0.189 5 μm).要判断各个磨削参数对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响程度,还需要依据正交试验原理的对称性来进行分析,这就需要求得所有因素的实验回应值,分别建立湿磨和干磨 R_a 回应表来进行分析.不同条件下回应表见表 4 和表 5.

表4 湿磨条件下 R_a 回应表

Table 4 Wet grinding response table			
水平	砂轮线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度/mm	工件进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	0.235 6	0.207 6	0.207 3
2	0.217 9	0.216 2	0.219 8
3	0.211 9	0.220 4	0.217 5
4	0.203 6	0.224 9	0.224 4
极差	0.032 0	0.017 3	0.017 1

表5 干磨条件下 R_a 回应表

Table 5 Dry grinding response table			
水平	砂轮线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度/mm	工件进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	0.217 7	0.194 7	0.197 3
2	0.208 2	0.205 2	0.204 7
3	0.198 9	0.208 5	0.207 8
4	0.195 7	0.211 9	0.210 5
极差	0.022 0	0.017 2	0.013 2

两个表中各自反应了这 3 个因素的 4 个水平对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响情况,极差分别对应 3 个因素的 4 个水平之间的不同.可以从中得出:

(1)在湿磨条件下,砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度这 3 个磨削参数中,由于砂轮线速度因素在 R_a 回应表中的极差最大,说明砂轮线速度对氧化锆工件表面粗糙度影响最大.此外,砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度三者极差逐渐降低,说明它们对磨削氧化锆陶瓷工件的表面粗糙度的作用逐渐减小.根据以上分析,可以得到不同磨削工艺因素对氧化锆陶瓷表面作用的主次顺序为砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度.

(2)在干磨条件下,砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度这 3 个磨削参数中,砂轮线速度因素的极差最大,说明砂轮线速度的改变对其表面粗糙度值大小的变化影响最大.此外,砂轮线速度、磨削深度和工件进给速度三者极差逐渐降低,说明它们对磨削氧化锆陶瓷表面粗糙度的作用逐渐减小.可以得出不同磨削工艺因素对氧化锆陶瓷表面作用的主次顺序为砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度.

3 干/湿磨条件下磨削参数对表面粗糙度影响规律

3.1 砂轮线速度对表面粗糙度的影响
砂轮线速度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响曲线见图 3.从图中可以看出,干磨和湿

磨条件下,随金刚石砂轮线速度的逐渐增加,氧化锆陶瓷工件表面粗糙度值逐渐减小.因为在一定时间内,随着砂轮线速度的增大,同等磨削厚度和进给速度的情况下,相当于每一颗磨粒所磨削工件的厚度变小,同时每颗金刚石磨粒在与工件的光磨次数变多作用时间变长.由于砂轮线速度的提升,切向磨削力变大,会使砂轮和氧化锆陶瓷工件之间磨削温度急剧上升,这会改变其去除方式,由大量的脆性去除转变为大量的塑性去除,从而能更好地提升表面质量.

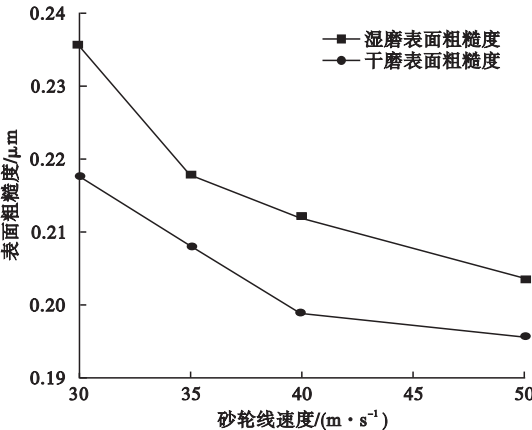


图3 砂轮线速度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响
Fig.3 Wheel linear speed of surface roughness for zirconia ceramics

3.2 磨削深度对表面粗糙度的影响

磨削深度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响曲线见图4.从图中可以看出,干磨和湿磨

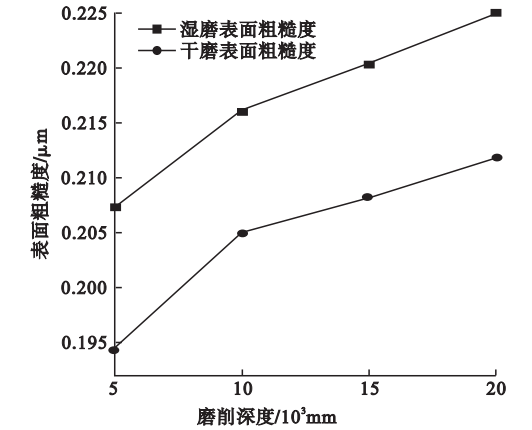


图4 磨削深度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响
Fig.4 Grinding depth of surface roughness for zirconia ceramics

条件下,随磨削深度的逐步增加,氧化锆陶瓷工件表面粗糙度值逐渐变大.因为增加磨削深度会使磨粒对氧化锆陶瓷工件表面划痕加深,同时磨削层厚度增加到实现材料延性和脆性去除转变的临界切深时^[20],氧化锆陶瓷工件的去除机理由大量的塑性去除逐步转变为以脆性去除为主,从而导致氧化锆陶瓷工件表面粗糙度值升高.

3.3 工件进给速度对表面粗糙度的影响

工件进给速度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响曲线见图5.从图中可以看出,干磨条件下,随工件进给速度的逐渐提高,氧化锆陶瓷工件表面粗糙度值渐渐增大;湿磨条件下,在工件进给速度小时,砂轮对工件表面光磨次数增多,导致表面粗糙度值较小,随着工件进给速度的增加,切向磨削力升高,导致磨削温度上升,增加材料塑性去除使表面粗糙度下降,当工件进给速度过快时,温度累积减小,脆性去除增多,从而导致表面粗糙度值上升.由于氧化锆陶瓷工件进给速度快,在一定的时间内,砂轮砂粒对工件表面磨削次数减小,磨削质量不高,从而导致氧化锆陶瓷工件表面质量下降.

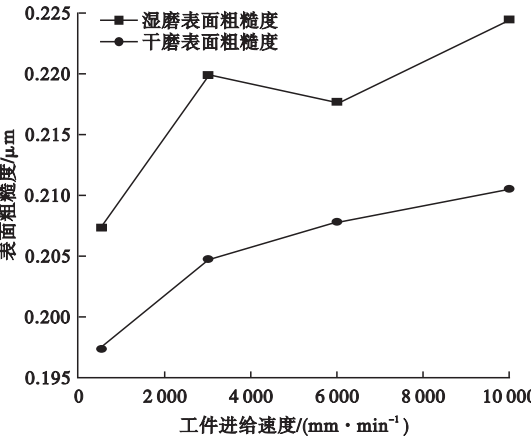


图5 工件进给速度对氧化锆陶瓷表面粗糙度的影响
Fig.5 Workpiece feed speed of surface roughness for zirconia ceramics

从上述分析可知在不同的磨削用量,其干磨条件下的氧化锆陶瓷工件表面质量要优

于其在湿磨条件下的表面质量. 因为在干磨条件下,没有磨削液的冷却会使其磨削期间氧化锆陶瓷工件和砂轮表面温度瞬间提升,这样会提升材料的断裂韧性,增加氧化锆陶瓷工件表面的塑性变形^[21],使其去除方式,由部分塑性去除逐渐转变为大量塑性去除,进而大幅度地提升表面质量,同时也提高磨削效率. 在湿磨条件下,磨削区域存在磨削液的冷却润滑,能很好地控制磨削区域的温度,使温度上升的不是很高,使其塑性去除率要小于干磨时的塑性去除率,从而导致干磨氧化锆的表面质量好于湿磨氧化锆的表面质量.

4 表面质量观察与分析

通过使用电子扫描显微镜对磨削过后的氧化锆陶瓷工件表面进行观察,把被检测工

件放入到清洗液中对其进行清洗,清洗干净后再对其被检测表面进行喷金处理. 选择在干磨条件下表面质量最好的一组参数和湿磨条件下表面质量最好的一组参数进行对比观察,图6为干磨条件下表面质量最优的表面形貌,其金刚石砂轮线速度达到50 m/s、磨削深度0.010 mm、工件进给速度500 mm/min. 图7为湿磨条件下表面质量最优的表面形貌,其金刚石砂轮线速度达到50 m/s、磨削深度0.010 mm、工件进给速度500 mm/min. 观察图像可以很显然地发现在磨削表面上存在着峰峦起伏的波峰和波谷. 这种凹凸不平的峰和谷之间的高低间接地反应出氧化锆陶瓷表面粗糙度的好坏,从而对实验过程中不同参数的选取具有重要意义.

通过图像可以看出,图6中的谷峰和谷底的高度差要小于图7中的谷峰和谷底的高

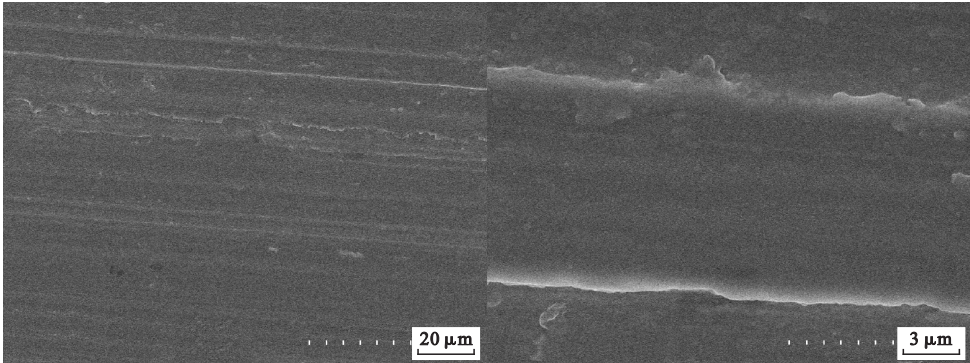


图6 干磨表面粗糙度参数下氧化锆陶瓷表面形貌 SEM 图像

Fig. 6 SEM micrographs of dry grinding roughness parameters of zirconia ceramic surface

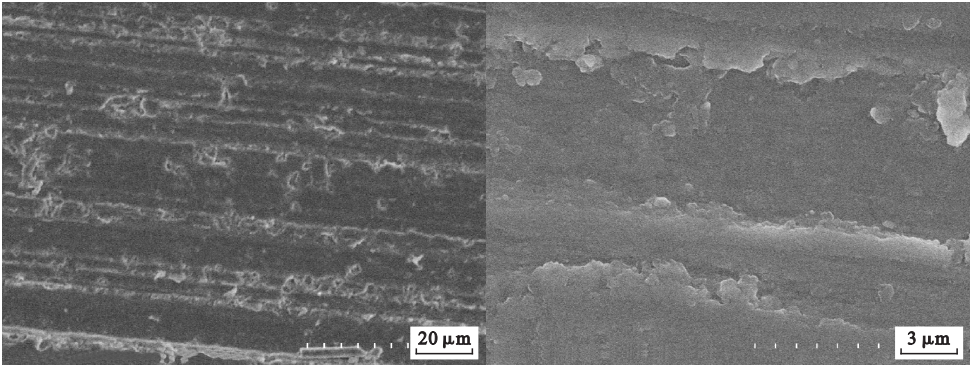


图7 湿磨表面粗糙度参数下氧化锆陶瓷表面形貌 SEM 图像

Fig. 7 SEM micrographs of wet grinding roughness parameters of zirconia ceramic surface

度差,说明图6中的工件表面粗糙度相对较好。这和磨削的环境是紧紧的联系在一起的,当干磨时,温度上升较快,磨削工件表面产生了物理的变化,使磨削去除方式从脆性去除逐步转变为塑性去除,进而降低了氧化锆陶瓷工件表面的粗糙度值,与湿磨相比同时也降低了其切向磨削力,有助于改善其表面质量。但在极端磨削用量的条件下,即砂轮线速度较高,切削深度较大,工件进给速度较慢时,可能对工件表面造成烧伤,影响表面质量。所以在工艺参数一致的情况下,干磨条件下磨削的氧化锆陶瓷表面的粗糙度好于湿磨条件下磨削的表面粗糙度。

5 结 论

(1)氧化锆陶瓷表面粗糙度值随着磨削用量的变化而变化,当砂轮线速度提高时,氧化锆陶瓷工件表面粗糙度值变小;当磨削深度增加时,工件表面粗糙度值变大;当工件进给速度加快时,工件表面粗糙度值变大。

(2)通过正交试验分析,获得了氧化锆陶瓷平面磨削加工的最优组合参数。湿磨条件下,最优参数为砂轮线速度 50 m/s、磨削深度 0.010 mm、工件的进给速度 500 mm/min,磨削参数对氧化锆陶瓷工件表面粗糙度的作用程度主次顺序为砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度;干磨条件下,最优参数为砂轮线速度 50 m/s、磨削深度 0.010 mm、工件的进给速度 500 mm/min,磨削参数对氧化锆陶瓷工件表面粗糙度的作用程度主次顺序为砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度。

(3)在小进给深度的平面磨削氧化锆陶瓷过程中,其他磨削参数一定的条件下,干磨后的工件表面质量要优于湿磨后的工件表面质量。

参考文献

- [1] 吴玉厚,李颂华. 数控机床高速主轴系统[M]. 北京:科学出版社,2011.
(WU Yuhou, LI Songhua. CNC machine high speed spindle system [M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [2] 袁巨龙,张飞虎. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-176.
(YUAN Julong, ZHANG Feihu. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field [J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-176.)
- [3] 王宇,吴玉厚. 车削氧化锆陶瓷轴端面粗糙度的影响因素分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 4(4): 38-40.
(WANG Yu, WU Yuhou. The analysis on influence factors of surface roughness for turning zirconia ceramic axle end face [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2016, 4(4): 38-40.)
- [4] CHEN J B, FANG Q H, WANG C C, et al. Theoretical study on brittle-ductile transition behavior in elliptical ultrasonic assisted grinding of hard brittle materials. [J]. Precision engineering, 2016, 46: 104-117.
- [5] 侯永改,田久根. 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 Yonggai, TIAN Jiugen. The current research status of zirconia ceramics grinding [J]. China ceramic, 2014, 50(9): 6-9.)
- [6] LI C H, LIU Z R, HOU Y L, et al. Critical conditions for brittle-ductile removal transition in nano-ZrO₂ dental ceramic grinding [J]. International journal of machining and machinability of materials, 2012, 11(4): 342-352.
- [7] CHEN J, SHEN J, HUANG H, et al. Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels [J]. Journal of materials processing technology, 2010, 210(6): 899-906.
- [8] AGARWAL S, RAO P V. Modeling and prediction of surface roughness in ceramic grinding [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2010, 50(12): 1065-1076.
- [9] 邵水军,赵波. 工程陶瓷材料磨削加工技术研究[J]. 陶瓷学报, 2012, 33(1): 100-103.
(SHAO Shuijun, ZHAO Bo. Grinding technology for engineering ceramics [J]. Journal of ceramics, 2012, 33(1): 100-103.)
- [10] AZARHOUSHANG B, DANESHI A, LEE D H. Evaluation of thermal damages and residual stresses in dry grinding by structured wheels

- [J]. Journal of cleaner production, 2017, 142: 1922 – 1930.
- [11] 田欣利, 徐西鹏, 袁巨龙, 等. 工程陶瓷先进加工与质量控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
(TIAN Xinli, XU Xipeng, YUAN Julong, et al. Advanced machining and quality control technology for engineering ceramics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.)
- [12] NI J, LI B, PANG J. High-speed cylindrical grinding of SiC: the process characteristics and surface integrity[J]. Journal of ceramic processing research, 2013, 14(1): 70 – 76.
- [13] LIANG Xiaohu, LIN Bin, HAN Xuesong, et al. Fractal analysis of engineering ceramics ground surface[J]. Applied surface science, 2012, 258(17): 6406 – 6415.
- [14] ZHAO Bo, ZHAO M L. Research on surface roughness and micro topography of nano ZrO₂ Plate in two dimension ultrasonic grinding[J]. Advanced materials research, 2008, 53(5): 243 – 247.
- [15] 张宁菊, 赵美林. 磨削强化中磨削用量的优化设计[J]. 机械强度, 2016, 38(3): 526 – 530.
(ZHANG Ningju, ZHAO Meilin. The optimization of grinding dosage on grinding hardening[J]. Journal of mechanical strength, 2016, 38(3): 526 – 530.)
- [16] 刘杰, 曹剑锋. 树脂金刚石砂轮加工氧化铝陶瓷的磨削工艺试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(4): 79 – 83.
(LIU Jie, CAO Jianfeng. Experimental study on process of grinding Al₂O₃ ceramic with resin bond diamond grinding wheel[J]. Diamond & abrasives engineering, 2016, 36(4): 79 – 83.)
- [17] LINKE B, DUSCHA M, KLOCKE F, et al. Combination of speed stroke grinding and high speed grinding with regard to sustainability [EB/OL]. (2011 – 07 – 03) <http://escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv>.
- [18] 宋鹏涛, 刘泓. 磨削参数对陶瓷结合金刚石砂轮磨削硬质合金表面粗糙度的影响[J]. 工具技术, 2012, 46(2): 29 – 31.
(SONG Pengtao, LIU Hong. Influence of grinding parameters on surface grinding with vitrified bond roughness of sintered-carbide in diamond wheel[J]. Tool engineering, 2012, 46(2): 29 – 31.)
- [19] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析[J]. 兰州文理学院学报: (自然科学版), 2016, 30(1): 18 – 22.
(WANG Xuanjing. Application and analysis of the orthogonal test design[J]. Journal of Lanzhou university of arts and sciences, (natural science) 2016, 30(1): 18 – 22.)
- [20] 吴书安, 祝锡晶. 单磨粒对硬脆性材料延性去除的建模分析[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 219 – 223.
(WU Shuan, ZHU Xijing. Modelling analysis on ductile removal of hard-brittle material by single grain[J]. Surface technology, 2016, 45(5): 219 – 223.)
- [21] 张珂, 齐宇飞, 王贺, 等. 氧化锆陶瓷磨削机理有限元仿真与实验[J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2014, 30(3): 523 – 529.
(ZHANG Ke, QI Yufei, WANG He, et al. Simulation and experiment research on ZrO₂ ceramic grinding mechanism[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(3): 523 – 529.)