

# HIPSN 陶瓷干/湿磨情况下表面磨削质量研究

李颂华<sup>1,2</sup>, 韩 涛<sup>1</sup>, 孙 健<sup>1</sup>, 吴玉厚<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 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)

**摘 要** 目的 探索在干/湿磨情况下, 金刚石砂轮磨削 HIPSN 陶瓷时各磨削参数对表面磨削质量的影响规律, 以及有无磨削液对 HIPSN 陶瓷材料去除方式的影响. 方法 设计三因素四水平正交实验, 在干/湿磨情况下分析砂轮线速度、磨削深度及工件进给速度等磨削参数对表面磨削质量及表面形貌的影响规律. 结果 表面粗糙度值随着砂轮线速度的提高而降低, 随着磨削深度的增大而减小, 提高工件进给速度, 表面粗糙度先减小后增大; 干磨时的表面粗糙度值低于湿磨时的表面粗糙度值; 干磨时塑性去除的比例高于湿磨时塑性去除的比例. 结论 磨削质量与磨削温度密切相关, 提高砂轮线速度、增大磨削深度以及适当的工件进给速度, 有助于增加塑性去除, 改善磨削质量; 干磨时的磨削温度高, 塑性去除比例大, 磨削质量高, 稳定性好. 小去除量磨削 HIPSN 陶瓷时, 干磨时的表面磨削质量优于湿磨时的表面磨削质量.

**关键词** HIPSN 陶瓷; 表面粗糙度; 磨削参数; 表面磨削质量

中图分类号 TH16; TB35

文献标志码 A

## Research on Surface Grinding Quality of HIPSN Ceramics under Dry/Wet Grinding Conditions

LI Songhua<sup>1,2</sup>, HAN Tao<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, WU Yuhou<sup>2</sup>

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

**Abstract:** This paper is proposed to explore the influence rule of grinding parameters on the surface quality using diamond wheel grinding HIPSN ceramics under dry/wet grinding conditions, and the effect of grinding fluid on the removal of HIPSN ceramic materials. By designing a three-factor and four-level orthogonal experiments, the influence of grinding parameters such as wheel speed, grinding depth, and workpiece feed rate on surface grinding quality and surface topography

收稿日期: 2018-06-21

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); 沈阳市科技计划项目(F16-205-1-15)

作者简介: 李颂华(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程陶瓷精密加工工艺与数控机床电主轴系统方面研究.

were analyzed under dry/wet grinding conditions. The results showed that the surface roughness decreased with the increase of the linear speed of the grinding wheel and decreased with the increase of the grinding depth. The workpiece feed rate was increased, and the surface roughness first decreased and then increased. The surface roughness value during dry grinding is lower than that in wet grinding. The proportion of plastic removal during dry grinding is higher than that during wet grinding. The conclusion is grinding quality is closely related to the grinding temperature, and increasing the speed of the grinding wheel, the depth of grinding and the appropriate feed rate of the workpiece help increase plastic removal and improve grinding quality. Dry grinding gets high grinding temperature, large plastic removal ratio, high grinding quality, and well stability. When the HIPSIN ceramics are ground with a small amount of removal, the surface grinding quality during dry grinding is better than wet grinding.

**Key words:** HIPSIN ceramics; surface roughness; grinding parameters; surface grinding quality

随着科学技术的进步,应用在军工领域、核领域、航空航天、石油化工等特殊领域的机械产品面临新的挑战<sup>[1-4]</sup>. 工程陶瓷材料有着诸多优异的性能,被广泛应用于尖端领域. HIPSIN 陶瓷因其晶体结构以及具有方向性的化学键,使其展现出典型的硬脆特性,因此加工难度大、成本高<sup>[5-8]</sup>.

国内外学者陆续开展工程陶瓷加工技术的研究<sup>[9]</sup>;鲍家定等<sup>[10]</sup>利用激光加工技术对陶瓷刀具的微结构进行加工,结果表明,激光加工后的陶瓷刀具精度更高,耐磨性更好;伏金娟等<sup>[11]</sup>利用电火花对超高温陶瓷材料进行加工,验证了该方法的可行性,获得了各工艺参数对加工质量的影响规律;刘折等<sup>[12]</sup>以材料去除率为重点研究对象,在超声 ELID 复合磨削环境下建立数学模型,获得了在该环境下较高的材料去除率,同时分析了材料去除率与加工工艺参数之间的规律;Wang Yan 等<sup>[13]</sup>建立与超声振动辅助磨削脆性材料相匹配的磨削力数学模型,探讨磨削力降低和表面磨削质量改善形成的机理,从理论上分析超声振动辅助磨削加工脆性材料的优越性;田欣利等<sup>[14]</sup>在使用引弧微爆炸加工技术,对激光预热的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷进行加工,得出激光参数对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷表面温度的影响规律;吴玉厚等<sup>[15]</sup>用金刚石砂轮磨削氧化锆陶瓷,发现干磨时的磨削质量更好;目前,用超硬砂轮磨削加工依然是工程陶瓷材料最常用

的加工方法<sup>[16-19]</sup>. 磨削加工是砂轮与工件在磨削接触区发生微观相关作用的过程,即精密成型的刀具使工件材料产生局部的剪切、破碎、滑移变形,以实现材料去除,进而达到零件要求的尺寸和加工质量. 在传统的工程陶瓷磨削加工中,都使用冷却液. 不仅需要机床配备一套完善的冷却系统,而且需要定期更换新的冷却液,废弃的冷却液必须进行处理,以减小对环境的副作用. 为响应“绿色制造的浪潮”,笔者在干/湿磨情况下对 HIPSIN 陶瓷开展大量磨削实验,并设计三因素四水平正交实验,在干/湿磨情况下分析砂轮线速度、磨削深度及工件进给速度等磨削参数对表面磨削质量及表面形貌的影响规律. 研究表明:磨削质量与磨削温度密切相关,提高砂轮线速度、增大磨削深度以及适当的工件进给速度,有助于增加塑性去除,改善磨削质量;小去除量磨削 HIPSIN 陶瓷时,干磨时的表面磨削质量较好.

## 1 实验方案

### 1.1 工件与实验条件

以 HIPSIN 陶瓷毛坯为试件,长×宽×高为 20 mm×20 mm×12 mm, HIPSIN 陶瓷试件的机械性能见表 1.

采用 ORBIT36CNC 成型磨床进行磨削实验. 切入式逆磨,刀具为树脂结合剂金刚石砂轮,粒度为 170/200#, 机床使用水基磨削

液,磨削液的流量为 80 L/min. 检测仪器采用泰勒接触式 Surtronic25 型粗糙度仪测量磨削后工件的表面粗糙度,采用日立 S - 4800 扫描电镜观测磨削后陶瓷材料的表面形貌.

表1 HIPSN 陶瓷试件的机械性能

Table 1 The mechanical properties of HIPSN ceramic specimen

密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	硬度/ HRC	泊松比	断裂韧性/ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	抗压强度/Pa	热膨胀系数/ ( $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ )
3.24	320	94	0.26	7.0	420	3.2

1.2 实验方法

以砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度为重要影响因素,在干/湿磨情况下设计三因素四水平  $L_{16}(4^3)$  正交试验. 为使砂轮保持锋利状态,每组实验前需用油石打磨砂轮,以去除磨粒间的磨屑. 测量粗糙度时,以垂直工件进给方向为测针轨迹方向,在工件表面随机选取 5 个测量位置,去除最大值和最小值,其余取平均值作为最终测量结果. 同时参考轮

廓平均算术偏差值  $Ra$ 、微观不平度十点高度  $Rz$ 、轮廓最大高度  $Ry$  的测量结果.

2 实验结果与分析

实验结果如表 2 所示,依据正交实验对称性原理,建立表面粗糙度  $Ra$ 、 $Ry$ 、 $Rz$  回应表,得出各磨削参数对磨削质量的影响情况,如表 3、表 4 所示.

表2 正交实验结果

Table 2 The results of orthogonal experiments

序号	砂轮线速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	磨削深度/ mm	工件进给速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	湿磨粗糙度/ $\mu\text{m}$			干磨粗糙度/ $\mu\text{m}$		
				$Ra$	$Ry$	$Rz$	$Ra$	$Ry$	$Rz$
1	30	0.005	1 000	0.284 6	1.309 0	1.838 0	0.283 8	1.244 4	1.665 6
2	30	0.010	4 000	0.276 0	1.236 4	1.555 1	0.269 8	1.144 7	1.510 3
3	30	0.015	7 000	0.257 3	1.061 2	1.434 2	0.252 5	1.100 5	1.544 2
4	30	0.020	10 000	0.261 1	1.207 1	1.414 9	0.255 2	1.166 7	1.376 4
5	35	0.005	4 000	0.258 4	1.162 3	1.554 3	0.250 1	1.045 5	1.514 1
6	35	0.010	7 000	0.253 0	1.193 5	1.530 2	0.252 4	0.978 7	1.390 9
7	35	0.015	10 000	0.277 4	1.283 6	1.600 3	0.268 7	1.096 8	1.494 6
8	35	0.020	1 000	0.245 4	1.001 9	1.376 9	0.240 0	1.098 0	1.464 2
9	40	0.005	7 000	0.255 6	1.158 3	1.484 1	0.253 8	0.965 5	1.438 8
10	40	0.010	10 000	0.262 4	1.188 6	1.496 5	0.253 3	1.045 7	1.404 1
11	40	0.015	1 000	0.259 3	1.165 4	1.568 8	0.246 7	1.082 3	1.501 7
12	40	0.020	4 000	0.250 9	1.078 6	1.400 8	0.241 2	0.967 0	1.387 1
13	45	0.005	10 000	0.263 8	1.177 8	1.605 7	0.258 1	1.053 2	1.477 9
14	45	0.010	1 000	0.265 0	1.168 2	1.528 9	0.260 6	1.109 9	1.581 3
15	45	0.015	4 000	0.259 1	1.129 0	1.469 5	0.249 0	0.943 8	1.323 6
16	45	0.020	7 000	0.238 1	0.951 7	1.300 1	0.225 5	0.910 8	1.253 9

表 3 湿磨时的  $Ra,Ry,Rz$  极差分析表

Table 3 Range analysis of  $Ra,Ry$  and  $Rz$  during wet grinding

$\mu\text{m}$

指标	砂轮线速度			磨削深度			工件进给速度		
	$Ra$	$Ry$	$Rz$	$Ra$	$Ry$	$Rz$	$Ra$	$Ry$	$Rz$
水平 1	0.269 8	1.203 4	1.560 6	0.265 6	1.201 8	1.620 5	0.263 6	1.161 1	1.578 2
水平 2	0.258 6	1.160 2	1.515 4	0.264 1	1.196 7	1.527 7	0.261 1	1.151 6	1.494 9
水平 3	0.257 1	1.147 7	1.487 6	0.263 3	1.159 8	1.518 2	0.251 0	1.091 2	1.437 2
水平 4	0.256 5	1.106 7	1.476 1	0.248 9	1.059 8	1.373 2	0.266 2	1.214 3	1.529 4
极差 $R$	0.013 3	0.096 7	0.084 5	0.016 7	0.142 0	0.247 3	0.015 2	0.123 1	0.141 0

表 4 干磨时的  $Ra,Ry,Rz$  极差分析表

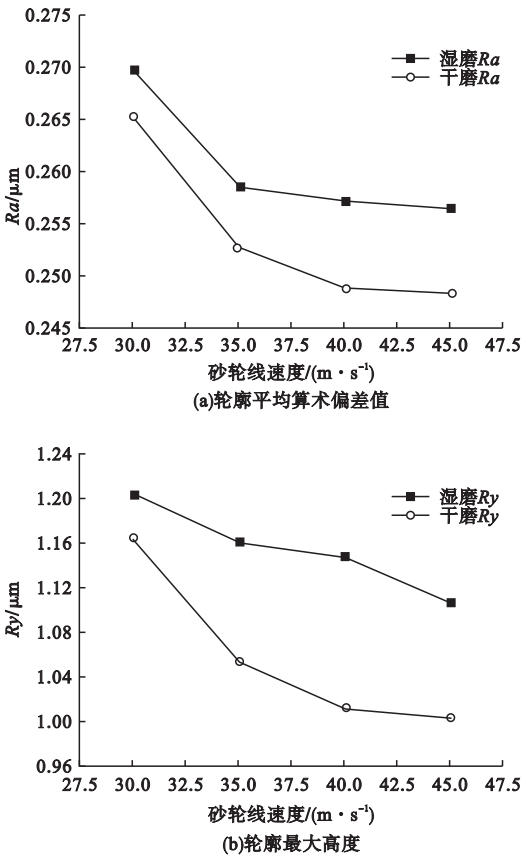
Table 4 Range analysis of  $Ra,Ry$  and  $Rz$  during dry grinding

$\mu\text{m}$

指标	砂轮线速度			磨削深度			工件进给速度		
	$Ra$	$Ry$	$Rz$	$Ra$	$Ry$	$Rz$	$Ra$	$Ry$	$Rz$
水平 1	0.265 3	1.164 1	1.524 1	0.261 5	1.074 9	1.524 1	0.257 8	1.133 7	1.553 2
水平 2	0.252 8	1.054 8	1.466 0	0.259 0	1.069 8	1.471 7	0.252 5	1.025 3	1.433 8
水平 3	0.248 8	1.012 9	1.432 9	0.254 2	1.055 9	1.466 0	0.246 1	0.986 7	1.407 0
水平 4	0.248 3	1.004 4	1.423 6	0.240 5	1.035 6	1.370 4	0.258 8	1.090 6	1.438 3
极差 $R$	0.017 0	0.159 7	0.100 5	0.021 0	0.039 3	0.153 7	0.012 7	0.147 0	0.146 2

2.1 砂轮线速度对磨削质量的影响

砂轮线速度对磨削质量的影响情况如图 2 所示. 由图可知: 提高砂轮线速度, 表面粗糙度  $Ra$ 、 $Ry$ 、 $Rz$  均减小, 且减小趋势略微放缓, 同时干磨时的表面粗糙度低于湿磨时的表面粗糙度. 提高砂轮线速度, 减小了单颗磨粒的切削深度; 另一方面, 提高砂轮线速度, 增加了光磨次数, 使磨削接触区的温度提高, 提高了 HIPSN 陶瓷材料的断裂韧性, 增加了陶瓷材料塑性去除的比例, 因此加工后的表面质量随之提高, 表面粗糙度值逐渐减小. 干磨时没有冷却液, 砂轮与工件相互摩擦产生的热量聚集在磨削接触区. 如图 1 所示, 在 HIPSN 陶瓷干磨时伴随有微弱的火花, 磨削接触区的温度更高, 陶瓷材料塑性去除所占的比例更大, 因此干磨时的表面粗糙度值较小. 在实际加工中, 推荐使用较高的砂轮线速度, 以提高加工质量.



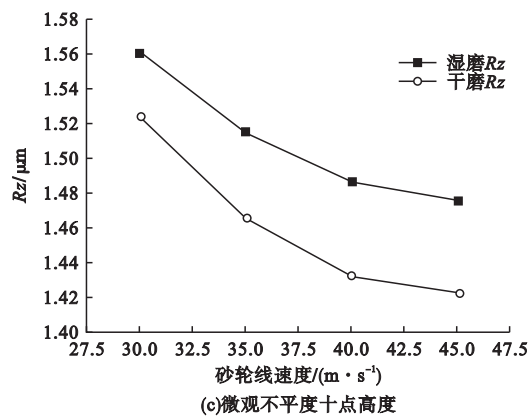


图1 表面粗糙度随砂轮线速度的变化情况

Fig. 1 Relationship between surface roughness and the grinding speed of the wheel

2.2 磨削深度对磨削质量的影响

磨削深度对磨削质量的影响情况如图2所示。由图可知:增大磨削深度,表面粗糙度 $R_a$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 均减小,且下降趋势逐渐增大,同时干磨时的表面粗糙度较小。增加磨削深度,砂轮与工件接触弧长随之增大,磨削接触区的接触面积增加,有助于热量的积累,因此磨削温度随之提高。研究表明:在磨削氧化锆陶瓷时,当磨削深度为5 μm时,磨削温度为274 ℃;当磨削深度为15 μm时,磨削温度为463 ℃,且磨削深度对磨削温度及磨削热分配比的影响最为显著<sup>[16]</sup>。因此,适当增大磨削深度,有助于提高磨削接触区的温度,增加塑性去除的比例,进而获得更好的加工质量,同时增加磨削深度,有利于提高加工效率,降低成本。

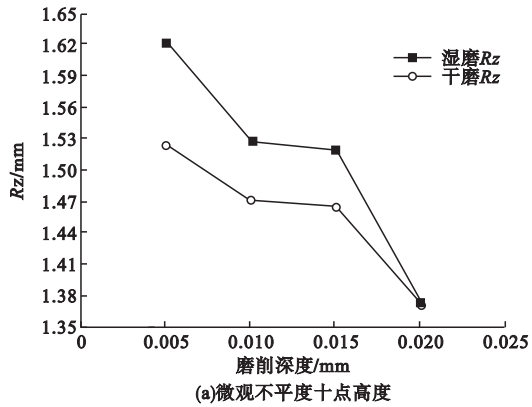
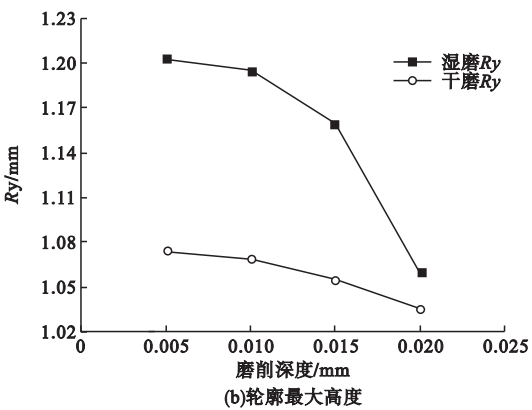
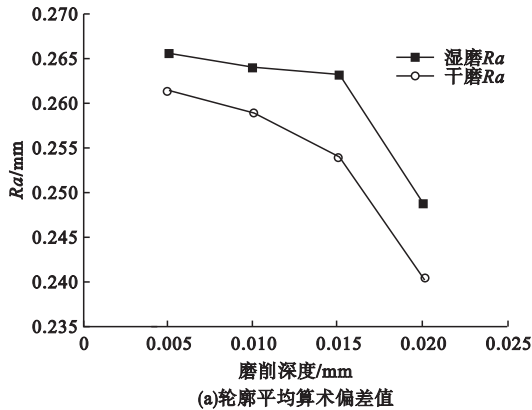


图2 表面粗糙度随磨削深度的变化情况

Fig. 2 Relationship between surface roughness and the grinding depth

2.3 工件进给速度对磨削质量的影响

工件进给速度对磨削质量的影响情况如图3所示。由图可知:提高工件进给速度,表面粗糙度 $R_a$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 先减小后增大,且增大趋势相对明显,同时干磨时的表面粗糙度较小。当工件进给速度较小时,切向磨削力较小,砂轮与工件相互摩擦产生的热量较少,磨削温度较低,增大工件进给速度,使切向磨削力增大,磨削温度随之提高。研究表明:在磨削氧化锆陶瓷时,工件进给速度由1 000 mm/min提高到5 000 mm/min,磨削温度由297 ℃提高到410 ℃<sup>[20]</sup>。当工件进给速度提高到10 000 mm/min时,表面粗糙度值迅速增大,这是由于工件进给速度较高时,砂轮与工件相互作用的时间非常短,磨削接触区的热量积累较少,工件升温较低,温度对陶瓷材料去除方式的影响较小,材料多以脆



性去除为主,因此表面粗糙度测量值较大.在实际加工中,适当提高工件进给速度有助于提高加工效率,同时获得较好的加工质量.

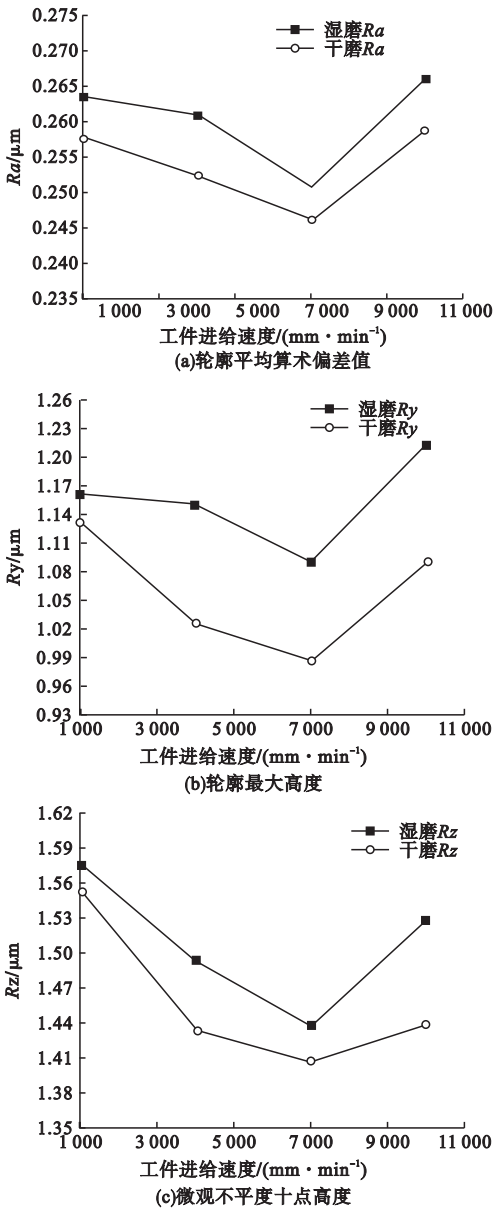


图3 表面粗糙度随工件进给速度的变化情况  
Fig. 3 Relationship between surface roughness and the feed speed of the workpiece

2.4 干/湿磨情况下对磨削质量对比

干/湿磨情况下表面粗糙度的平均值与标准差如图4所示.相比湿磨,干磨时表面粗糙度的平均值与标准差较小.湿磨时砂轮与工件微观相互作用产生的热量很容易被冷却液带走,使磨削接触区工件的温升较低.干磨

时没有冷却液的作用,磨削接触区的工件的温升较高,因此干磨时材料塑性去除的比例高于湿磨时材料塑性去除的比例,加工质量更好.标准差反映数据的离散程度,标准差越大,数据越离散.干磨时的磨削温度普遍较高,且改变磨削工艺参数磨削温度的波动范围较小,因此干磨时表面粗糙度的标准差较小,即干磨时的磨削质量相对稳定.

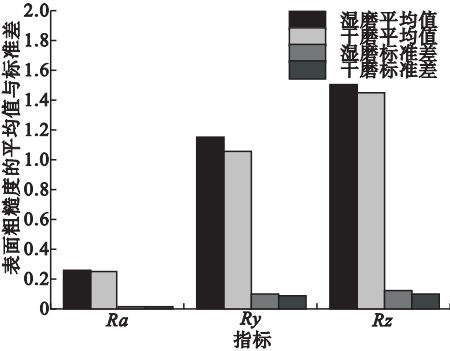


图4 干湿磨情况下表面粗糙度的平均值与标准差  
Fig. 4 Average and standard deviation of surface roughness under dry / wet grinding conditions

在扫描电子显微镜观测干/湿磨情况下相同磨削参数的表面形貌如图5所示.由图可知,干磨时HIPS陶瓷材料的塑性去除所占的比例明显大于湿磨时HIPS陶瓷材料的塑性去除所占的比例.在扫描电镜下未观察到HIPS陶瓷的烧伤及裂纹等情况.

干磨可以获得更好的HIPS陶瓷磨削加工质量,但没有冷却液的冲刷作用,磨屑容易粘在金刚石砂轮上,可能会影响刀具的锋利程度及锋利持久性,同时高温可能会影响刀具的使用寿命,因此HIPS陶瓷材料的干加工问题,还需要继续进行深入研究.

提高磨削接触区的温升有助于HIPS陶瓷材料脆性去除向塑性去除转变,改善HIPS陶瓷材料的可加工性,提高加工质量.可以使用激光辅助加工,在激光加热的作用下,可以提高工件的温度,促进脆塑性转变.在使用激光加热时,需要考虑超高温时工件烧伤的问题.

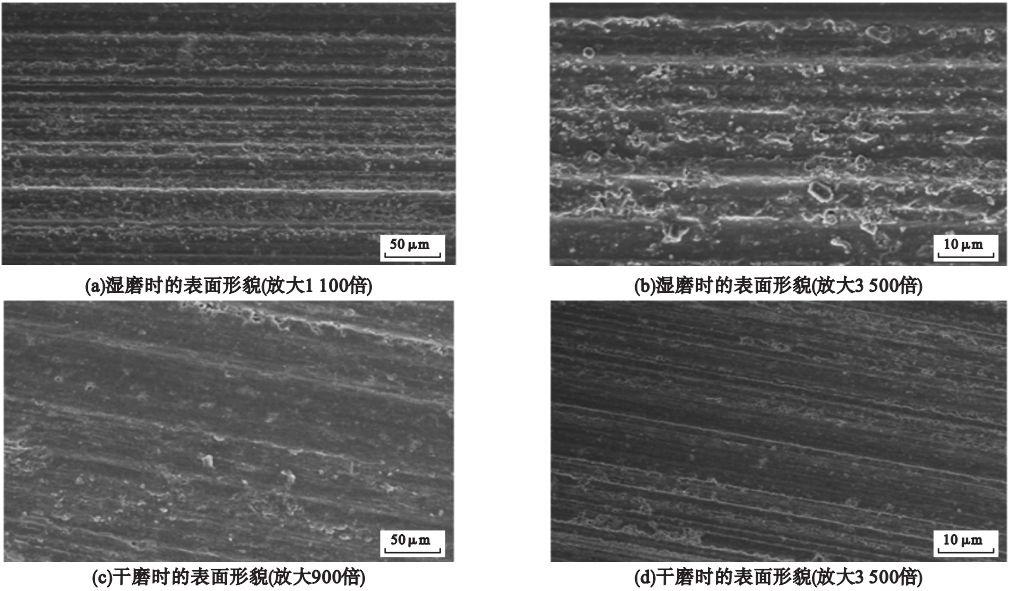


图5 干/湿磨情况下的扫描电镜照片

Fig. 5 Scanning electron microscope photographs under dry/wet grinding conditions

2.5 各磨削参数对磨削质量的影响程度

回应表中的极差  $R$  能够反映各磨削参数对磨削质量的影响程度. 以轮廓平均算术偏差值  $Ra$  为重要参考指标, 在 HIPSN 陶瓷湿磨时, 磨削深度对磨削质量的影响程度最显著, 其次为工件进给速度, 最后为砂轮线速度. 研究表明, 磨削深度对磨削温度、磨削热分配比的影响最大, 工件进给速度与砂轮线速度次之, 因此各磨削参数对磨削质量、磨削温度的影响程度相一致, 即磨削质量与磨削温度密切相关. 在 HIPSN 陶瓷干磨加工时, 各磨削参数对磨削质量的影响程度大小依次为: 磨削深度、砂轮线速度、工件进给速度.

3 结 论

- (1) 用金刚石砂轮磨削 HIPSN 陶瓷时, 磨削质量与磨削接触区温度密切相关, 提高砂轮线速度、适当增大磨削深度以及选择适当的工件进给速度, 可以提高磨削加工效率, 同时有助于促性 HIPSN 陶瓷材料脆塑性转变, 改善磨削质量.
- (2) 磨削质量与磨削接触区的温度密切相关, 干磨时的磨削温度高, 塑性去除比例

大, 磨削质量高, 稳定性好. 在小去除量磨削 HIPSN 陶瓷时, 干磨时的表面磨削质量优于湿磨时的表面磨削质量.

- (3) 磨削深度对表面磨削质量的影响最为显著.

参考文献

- [1] 马廉洁, 巩亚东, 于爱兵, 等. 可加工陶瓷加工技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (MA Lianjie, GONG Yadong, YU Aibing, et al. Processing technology and application of machinable ceramic [M]. Beijing: Science Press, 2017.)
- [2] 张伟儒, 李伶, 王坤. 先进陶瓷材料研究现状及发展趋势[J]. 新材料产业, 2016(1): 2-8. (ZHANG Weiru, LI Ling, WANG Kun. Research status and development trend of advanced ceramic materials[J]. New material industry, 2016(1): 2-8.)
- [3] 刘伟, 邓朝晖, 商圆圆, 等. 氮化硅陶瓷的单颗金刚石磨粒磨削试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(6): 1-5. (LIU Wei, DENG Zhaozhui, SHANG Yuanyuan, et al. Single diamond grain grinding for silicon nitride [J]. Ordnance material science and engineering, 2016, 39(6): 1-5.)
- [4] SERGUEI P M, BAILYAKIN V B. Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings[J]. Optics & laser technology, 2017, 88: 96-98.
- [5] 万林林, 赵小雨, 邓朝晖, 等. 金刚石砂轮磨削

- HIPSN 陶瓷数值仿真及实验研究[J]. 金刚石磨料磨具工程, 2015, 8(4): 26-32.  
(WAN Linlin, ZHAO Xiaoyu, DENG Zhaohui, et al. Simulation and experiment of diamond grinding wheel cutting silicon carbide ceramic [J]. Diamond & abrasives engineering, 2015, 8(4): 26-32. )
- [6] ZHANG Ke, SUN Jian, WANG He, et al. Experimental research on high speed grinding of silicon nitride ceramic spindle [J]. Materials science forum, 2016, 10: 253-258.
- [7] 吴玉厚, 张继鹏, 李颂华, 等. 氮化硅陶瓷套圈内圆磨削表面质量的实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(1): 176-179.  
(WU Yuhou, ZHANG Jipeng, LI Songhua, et al. Experimental research on surface quality of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic internal grinding [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(1): 176-179. )
- [8] 吴玉厚, 朱正杰, 王贺. 影响氮化硅陶瓷内圆磨削加工表面形貌因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(2): 312-317.  
(WU Yuhou, ZHU Zhengjie, WANG He. Analysis on the factors that influences on the internal grinded surface of silicon nitride ceramic [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(2): 312-317. )
- [9] 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 Wanglong, WANG Long, TIAN Xinli, et al. Research status and progresses of special machining technologies for engineering ceramic [J]. Machine tool & hydraulics, 2015, 43(7): 176-180. )
- [10] 鲍家定, 黄宇星, 周嘉, 等. 激光加工陶瓷表面微结构技术研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(3): 114-117.  
(BAO Jiading, HUANG Yuxing, ZHOU Jia, et al. Study on micro-structure of ceramic surface by laser processing [J]. Laser journal, 2018, 39(3): 114-117. )
- [11] 伏金娟, 韩文波, 杨立光, 等. 硼化锆基超高温陶瓷材料电火花加工特性研究[J]. 电加工与模具, 2016(5): 19-23.  
(FU Jinjuan, HAN Wenbo, YANG Liguang, et al. Study on electro-discharge machining characteristics of ZrB<sub>2</sub>-based ultra-high temperature ceramics [J]. Electromachining & mould, 2016(5): 19-23. )
- [12] 刘折, 赵波, 郑友益, 等. 超声 ELID 复合磨削陶瓷材料高效去除机理的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 27-31.  
(LIU Zhe, ZHAO Bo, ZHENG Youyi, et al. Simulation on mechanism of ceramic removal by ultrasonic ELID composite grinding [J]. Ordnance material science and engineering, 2014, 37(5): 27-31. )
- [13] WANG Yan, LIN Bin, WANG Shaolei, et al. Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2014, 77: 66-73.
- [14] 田欣利, 李富强, 王朋晓, 等. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷激光加热辅助引弧微爆炸加工温度场仿真[J]. 中国机械工程, 2013, 24(19): 2557-2561.  
(TIAN Xinli, LI Fuqiang, WANG Pengxiao, et al. Simulation of temperature field for Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics during laser assisted micro-detonation machining with striking arc [J]. China mechanical engineering, 2013, 24(19): 2557-2561. )
- [15] 吴玉厚, 王维东, 李颂华, 等. 干湿磨条件下氧化锆陶瓷表面粗糙度实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 1080-1087.  
(WU Yuhou, WANG Weidong, LI Songhua, et al. Experiments of surface roughness of zirconia ceramics under wet and dry grinding [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(6): 1080-1087. )
- [16] 谢桂芝, 黄含, 徐西鹏, 等. 氮化硅陶瓷高效深磨温度的研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 109-114.  
(XIE Guizhi, HUANG Han, XU Xipeng, et al. Study on the temperature in the high efficiency deep grinding of silicon nitride [J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(3): 109-114. )
- [17] LIU Wei, DENG Zhaohui, SHANG Yuanyuan, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding [J]. Ceramics international, 2017, 1(43): 1571-1577.
- [18] BIERMANN D, WURZ E. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels [J]. Production engineering 2009, 3(4/5): 411-416.
- [19] DONG Guojun, ZHOU Ming, HUANG Shaonan. Study on the surface quality of silicon nitride ceramics in ultrasonic vibration grinding [J]. Key engineering materials, 2013, 9: 144-147.
- [20] 张珂, 赵国欢, 孙健, 等. ZrO<sub>2</sub> 陶瓷平面磨削温度仿真分析与实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 251-258.  
(ZHANG Ke, ZHAO Guohuan, SUN Jian, et al. Simulated analysis and experimental research on grinding temperature of zirconia ceramic plane [J]. Surface technology, 2017, 46(12): 251-258. )

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)