

HIPSN 陶瓷高效精密磨削工艺优化试验研究

李颂华^{a,b}, 韩涛^a, 孙健^a, 吴玉厚^b, 王维东^a

(沈阳建筑大学 a.机械工程学院, b.高档石材数控加工装备与
技术国家地方联合工程实验室, 沈阳 110168)

摘要: **目的** 针对 HIPSN (热等静压氮化硅) 陶瓷精密加工效率低、成本高、难度大的问题, 对 HIPSN 陶瓷高效精密磨削加工工艺进行优化。**方法** 利用高精度成形磨床对 HIPSN 陶瓷进行试验, 分析砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度等工艺参数对磨削后表面质量的影响规律。**结果** 磨削深度由 0.005 mm 增加到 0.050 mm, 表面粗糙度值由 0.2773 μm 减小到 0.2198 μm , 并趋于稳定; 工件进给速度由 1000 mm/min 增加到 15 000 mm/min, 表面粗糙度值由 0.2454 μm 减小到 0.2256 μm , 之后增大到 0.2560 μm , 并趋于稳定; 砂轮线速度由 20 m/s 增加到 50 m/s, 表面粗糙度值由 0.2593 μm 减小到 0.2296 μm 。随着工件进给速度的增大, 表面波纹度平均间距 S_w 由 0 mm 直线增加到 5.90 mm; 随着砂轮线速度的提高, 平均间距 S_w 由 2.33 mm 直线减小到 0.68 mm。优化工艺参数组合: 砂轮线速度 50 m/s, 磨削深度 0.030 mm, 工件进给速度 3000 mm/min。**结论** 表面粗糙度值与磨削深度和砂轮线速度呈负相关, 随着工件进给速度的增大, 表面粗糙度值先减小后增大, 之后趋于稳定。减小工件进给速度、提高砂轮线速度有助于改善表面波纹度。

关键词: HIPSN 陶瓷; 磨削; 表面粗糙度; 表面波纹度; 工艺参数

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0287-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.038

Optimization Experiment on HIPSN Ceramic High Efficient and Precision Grinding Process

LI Song-hua^{a,b}, HAN Tao^a, SUN Jian^a, WU Yu-hou^b, WANG Wei-dong^a

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

ABSTRACT: The work aims to optimize the HIPSN ceramic highly efficient and precision grinding process in order to solve low efficiency, high cost and high difficulty of HIPSN ceramic precision machining. High-precision ORBIT36CNC forming grinder was used to test HIPSN ceramics, and analyze the influence of process parameters such as grinding wheel speed, grinding depth and workpiece feed rate on the surface quality of workpiece. The grinding depth increased from 0.005 mm to 0.050 mm and the surface roughness decreased from 0.2773 μm to 0.2198 μm and then tended to be stable. The workpiece feed rate increased from 1000 mm/min to 15 000 mm/min. The surface roughness decreased from 0.2454 μm to 0.2256 μm , then increased to 0.2560 μm , and finally tended to be stable. The linear velocity of grinding wheel increased from 20 m/s to 50 m/s, and

收稿日期: 2018-03-27; 修订日期: 2018-07-04

Received: 2018-03-27; **Revised:** 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675353); 辽宁省自然科学基金 (2015020149); 沈阳市科技计划项目 (F16-205-1-15)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51675353), Liaoning Provincial Natural Science Foundation (2015020149), Shenyang Science and Technology Project (F16-205-1-15)

作者简介: 李颂华 (1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工程陶瓷精密加工技术、数控机床电主轴系统。

Biography: LI Song-hua (1977—), Male, Doctor, Professor, Doctoral candidate tutor, Research focus: precision machining engineering ceramics technology and numerical control machine tool spindle system.

the surface roughness decreased from 0.2593 μm to 0.2296 μm . As the workpiece feed rate increased, the average gap S_w of surface waviness increased to 5.90 mm from 0 mm, while with the increase of linear velocity of grinding wheel, the average gap S_w decreased to 0.68 mm from 2.33 mm. Optimized process parameters included wheel speed of 50 m/s, grinding depth of 0.030 mm and workpiece feed rate of 3000 mm/min. The surface roughness negatively correlates to the grinding depth and the linear velocity of grinding wheel and decreases firstly and then increases as the workpiece feed rate increases and finally tends to be stable. Decreasing the workpiece feed rate and increasing the linear velocity of grinding wheel can improve the surface waviness.

KEY WORDS: HIPSN ceramics; grinding; surface roughness; surface waviness; process parameter

工程陶瓷材料由于其耐磨损、耐腐蚀、耐高温、高硬度、高强度、低密度、低膨胀系数等优良特性,在机械、电子、化工、军事、航空航天、生物工程等领域具有十分广阔的应用前景,被公认为 21 世纪最有活力的新型材料之一^[1-4]。HIPSN (热等静压氮化硅) 陶瓷为共价化合物,以 Si_3N_4 为主要成分, Si_3N_4 为主晶相,具有很高的共价键能,化学性质稳定^[5-6]。其密度为轴承钢的 41%,弹性模量为轴承钢的 150%,硬度为轴承钢的 200%,热膨胀系数为轴承钢的 25%,是理性的轴承制作材料。目前制约陶瓷材料广泛应用的主要原因是加工成本高,其中磨削加工的成本占总加工成本的 80%以上,甚至达 90%。另一方面,由于陶瓷的硬脆特性,使其成为典型的难加工材料,所以对其加工机理以及加工技术的研究远不如金属材料普遍和深入^[7-10]。表面粗糙度是评价陶瓷零件加工表面质量的一个重要指标^[11]。为获得高效高精度的 HIPSN 陶瓷成形磨削工艺,本文通过改变砂轮线速

度、磨削深度、工件进给速度等工艺参数^[12-14],开展了大量的磨削工艺试验,分析了以上工艺参数对表面质量的影响规律,为合理选择磨削加工参数提供一定的参考价值。

1 试验

1.1 试件及磨削条件

所用的试件为 HIPSN 陶瓷毛坯,试件的几何尺寸见表 1,试件的机械性能见表 2。试验采用高精度 ORBIT36CNC 成形磨床,刀具选用金刚石砂轮,砂轮的性能指标见表 3。采用水基磨削液,流量为 80 L/min。

表 1 HIPSN 陶瓷试件的几何参数

Tab.1 Geometry parameters of HIPSN ceramic specimen

Length/mm	Width/mm	Height/mm
20.0	20.0	15.0

表 2 HIPSN 陶瓷试件的机械性能

Tab.2 Mechanical properties of HIPSN ceramic specimen

Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Elasticity modulus/GPa	Poisson ratio	Hardness(HRC)	Fracture toughness /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Compressive strength/Pa	Thermal expansivity /($\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)
3.24	320	0.26	94	7.0	420	3.2

表 3 试验用金刚石砂轮性能指标

Tab.3 Performance indicators of diamond grinding wheel

Outer diameter/mm	Inner diameter/mm	Thickness/mm	Grain size	Concentration/%	Bond
300	127	20	170 [#] /200 [#]	100	Resin

1.2 试验方法

影响 HIPSN 陶瓷平面磨削的工艺参数有很多,如砂轮磨料、砂轮粒度、砂轮硬度、结合剂种类、磨削液、砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度等,其中砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度是影响 HIPSN 陶瓷平面磨削表面质量的主要因素。现采用三因素四水平 $L_{16}(4^3)$ 正交试验^[15],正交试验的因素和水平如表 4 所示。为深入研究 HIPSN 陶瓷高效精磨加工工艺及材料去除机理,在正交试验的基础上开展单因素试验。

表 4 正交设计的因素和水平

Tab.4 Factors and levels of orthogonal experimental design

Level	Factor		
	Grinding wheel speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Grinding depth/mm	Workpiece feed rate/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	30	0.005	1000
2	35	0.010	4000
3	40	0.015	7000
4	50	0.020	10 000

采用泰勒接触式 Surtronic25 型粗糙度仪测量表面粗糙度,采用基恩士 VHX-1000 超景深三维显微镜以及日立 S-4800 冷场发射扫描电子显微镜观测表面形貌。考虑金刚石砂轮轴向、径向磨粒的等高性差异,测量时选取垂直工件进给方向为粗糙度仪测针测量方向。测量时,将轮廓平均算术偏差值 R_a 、微观不平度十点高度 R_z 、轮廓最大高度 R_y 均纳入测量范围,分析时以 R_a 为重要评定指标。轮廓算术平均偏差 R_a 是评价表面粗糙度的基本参数,表示在取样范围内,轮廓曲线偏距绝对值的算术平均值;微观不平度十点高度 R_z 表示在取样范围内,轮廓曲线上五个最高点到五个最低点的平均值;轮廓最大高度 R_y 表示在取样范围内,轮廓峰顶线到轮廓谷底线之间的距离。测量时在工件表面选取 5 个测量位置,在 5 个测量结果中去除最大值和最小值,其余取平均值。

2 结果与分析

2.1 各工艺参数对表面质量的影响程度

根据正交试验表的对称性原理,建立表面粗糙度 R_a 回应表,得出各工艺参数对表面粗糙度的影响情况,如表 5 所示。回应表中数值分别对应各工艺参数对表面粗糙度的影响趋势,如图 1 所示。

表 5 表面粗糙度 R_a 回应表
Tab.5 Surface roughness R_a response

Level	Grinding wheel speed (A)	Grinding depth (B)	Workpiece feed rate (C)
1	0.2698	0.2732	0.2686
2	0.2586	0.2691	0.2628
3	0.2571	0.2667	0.2592
4	0.2616	0.2529	0.2712
Range (R)	0.0127	0.0203	0.0120

由图 1 可知,随砂轮线速度、工件进给速度的增加,表面粗糙度值先减小后增大;随磨削深度的增大,表面粗糙度值减小。回应表中极差的大小可以反映各因素对表面粗糙度的影响程度,极差越大说明该因素对表面粗糙度的影响程度越深。各参数对表面粗糙度影响的主次顺序为:磨削深度>砂轮线速度>工件进给速度。

2.2 磨削深度对表面质量的影响

在磨削深度单因素试验中,保持砂轮线速度 40 m/s、工件进给速度 2000 mm/min 不变,通过改变磨削深度得到表面粗糙度的变化规律如图 2 所示。由图 2 可知,表面粗糙度值随磨削深度的增加而减少,之后趋于稳定。

在磨削过程中大部分能量均消耗在金刚石砂轮与工件的滑擦和耕犁过程中,而这部分能量几乎全部

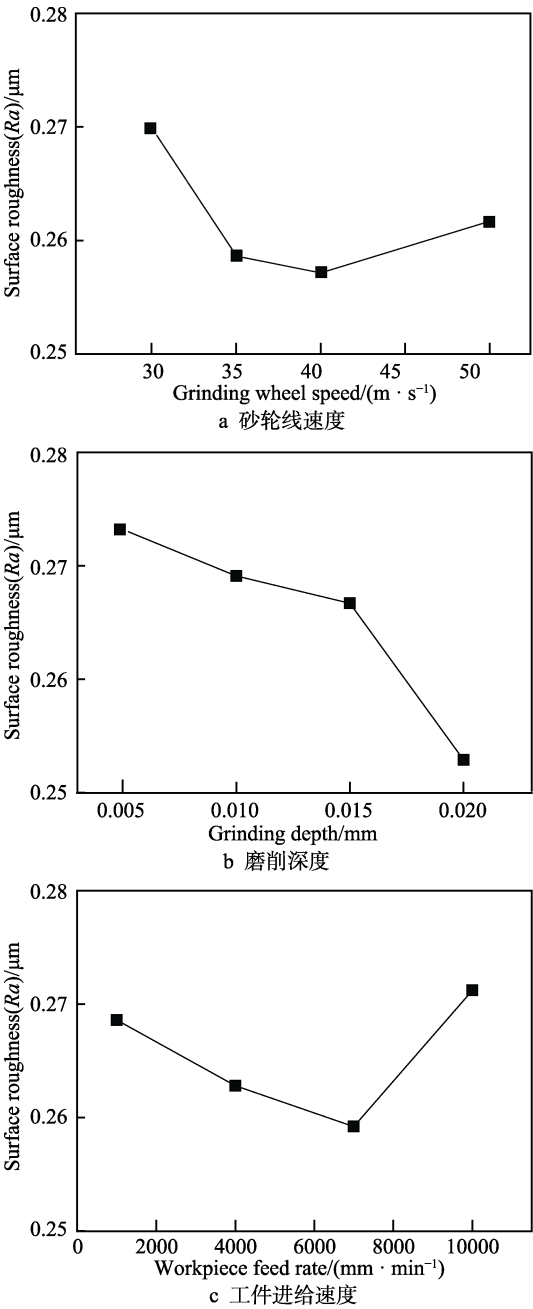


图 1 各工艺参数对表面粗糙度的影响情况
Fig.1 Effect of the process parameters on the surface roughness: (a) Effect of linear velocity of grinding wheel on the surface roughness; (b) Effect of grinding depth on the surface roughness; (c) Effect of workpiece feed rate on the surface roughness

转变为热能并聚集在磨削接触区,使磨削接触区产生高温。工件材料因高温而软化,提高了 HIPS_N 陶瓷材料的断裂韧性,增加了陶瓷材料的塑性去除,有助于改善磨削后的表面质量。

磨削参数可以影响磨削接触区温度最大值及温度场深度。当磨削深度较小时,金刚石砂轮与工件的接触弧长较小,滑擦和耕犁过程中产生的热量较少,磨削接触区的温度较低,陶瓷材料的软化效果不明显,因此磨削后的表面粗糙度值较大。随着磨削深度

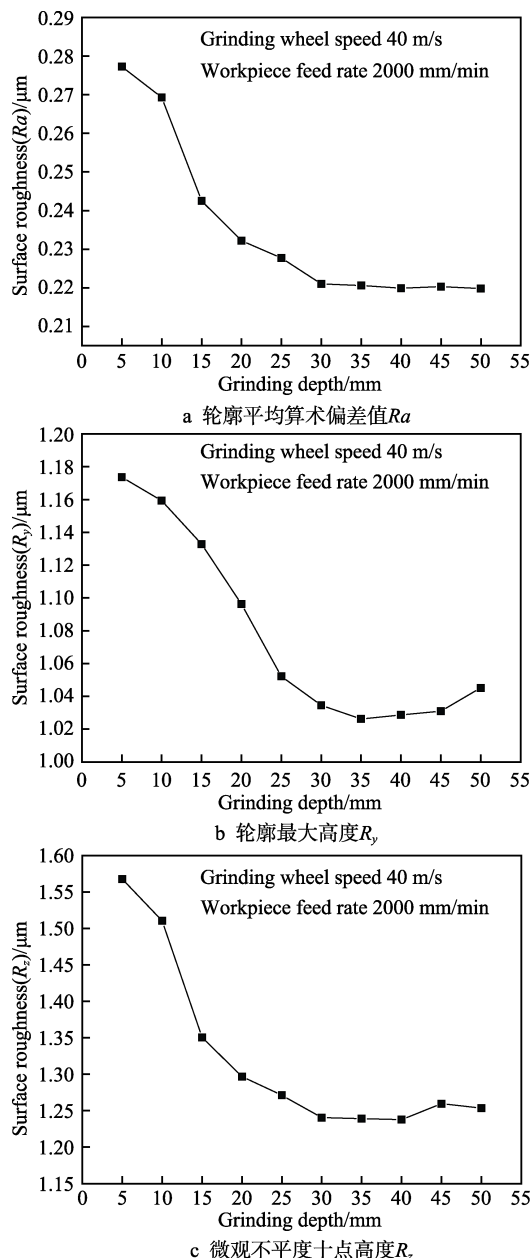


图2 表面粗糙度随磨削深度的变化情况

Fig.2 Change of surface roughness with the grinding depth:

- (a) Arithmetical mean deviation of the profile R_a ;
(b) Maximum height of the profile R_z ; (c) Ten point height of irregularities R_{z10}

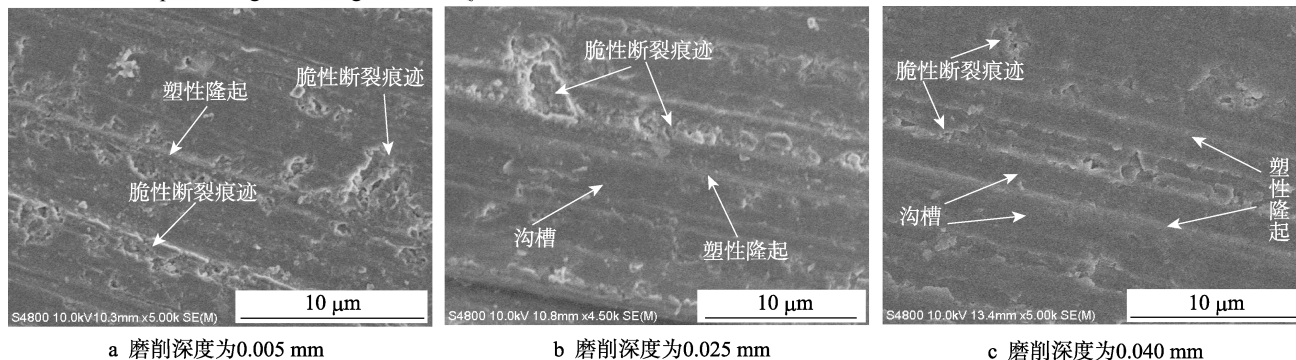


图4 不同磨削深度下的扫描电镜照片

Fig.4 Scanning electron microscope photographs at different grinding depths: (a) grinding depth of 0.005 mm; (b) grinding depth of 0.025 mm; (c) grinding depth of 0.040 mm

的增加,砂轮与工件的接触弧长逐渐增大,且增大幅度逐渐放缓,如图3所示,滑擦和耕犁过程中摩擦产生的热量增加,磨削接触区的温度升高,提高了HIPSIN陶瓷材料的断裂韧性,使塑性去除所占的比例随之增加,提高了磨削后的表面质量,因此表面粗糙度逐渐减小。谢桂芝等^[16]通过试验得出氮化硅、氧化锆、氧化铝三种材料的磨削温度都随着磨削深度的提高而上升。

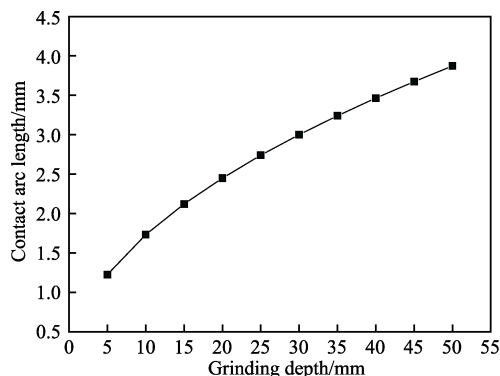


图3 接触弧长随磨削深度的变化情况

Fig.3 Change of contact arc length with grinding depth

在扫描电镜下观察磨削后工件的表面形貌,得知在一定范围内随着磨削深度的增加,陶瓷材料的塑性去除所占的比例明显增大。图4为不同磨削深度时磨削表面扫描电镜照片(放大5000倍)。由图4可知,磨削深度为0.040 mm时的表面质量优于磨削深度为0.005 mm时的表面质量。

当磨削深度大于0.030 mm时,表面粗糙度基本趋于稳定。这是由于HIPSIN陶瓷材料的导热性能较差,同时在冷却液的作用下,磨削接触区前下方陶瓷材料的最高温度及温度层深度基本保持不变,HIPSIN陶瓷材料的去除方式基本稳定,因此表面粗糙度趋于平缓。在超景深三维显微镜下观察磨削后的表面形貌,当磨削深度为0.035 mm时,工件表面出现凹坑,且凹坑的数量随着磨削深度的增加而迅速增多。在磨削加工过程中,陶瓷材料内部裂纹扩展、砂轮和工件的微观相互作用将会形成材料破碎,此时凹坑由陶瓷

材料破碎而形成,严重影响工件表面质量。图 5 为不同磨削深度时超景深三维显微镜下拍摄的照片(放大

500 倍)。在当前试验条件下,优化磨削深度不宜超过 0.030 mm。

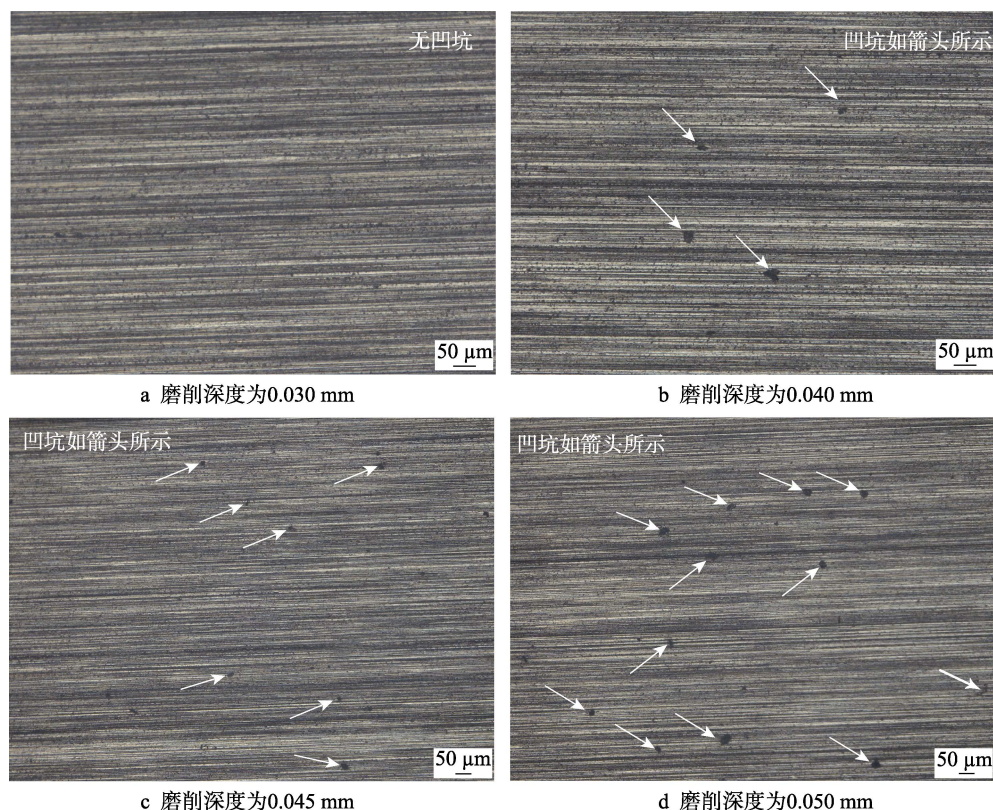


图 5 不同磨削深度下的超景深三维显微镜照片

Fig.5 Digital three-dimensional microscope photo of field at different grinding depths: (a) grinding depth of 0.030 mm; (b) grinding depth of 0.040 mm; (c) grinding depth of 0.045 mm; (d) grinding depth of 0.050 mm

2.3 工件进给速度对表面质量的影响

在工件进给速度单因素试验中,砂轮线速度为 40 m/s、磨削深度为 0.030 mm 时,通过改变工件进给速度得到表面粗糙度的变化规律如图 6 所示。由图 6 可知,随着工件进给速度的提高,表面粗糙度值先减小后增大,之后趋于平缓。

磨削接触区温度由热通量和砂轮与工件接触时间共同决定,磨削接触区的热通量 q 可通过公式(1)计算:

$$q = f_t \cdot v_s \quad (1)$$

式中: f_t 为切向磨削力(N); v_s 为砂轮线速度(m/s)。

砂轮线速度 v_s 不变时,热通量 q 随切向磨削力的增大而增大。张东坤等^[17]通过研究表明,随着工件进给速度的提高,切向磨削力不断增大。当工件进给速度较小时,砂轮与工件的接触时间较长,切向磨削力较小,热通量 q 较小,磨削接触区积累的热量较低,材料脆性去除所占的比例较大,因此磨削后的表面粗糙度较大。当工件进给速度大于 10 000 mm/min 时,表面粗糙度较大且波动较小,因为工件进给速度过快时,虽然切向磨削力较大,但砂轮与工件相互作用的时间极短,磨削产生的热量来不及积累就被冷却液带

走,磨削接触区的温升不足以影响当前工况下 HIPS N 陶瓷材料的去除方式,因此磨削后的表面粗糙度较大且波动较小。当工件进给速度为 3000 mm/min 时,在切向磨削力与砂轮工件接触时间的共同作用下,磨削接触区积累的热量最多,HIPS N 陶瓷材料塑性去除所占的比例最大,磨削后的表面质量最好,因此表面粗糙度的测量值最小。在当前试验条件下,优化工件进给速度为 3000 mm/min。

2.4 砂轮线速度对表面质量的影响

在砂轮线速度单因素试验中,磨削深度为 0.030 mm,工件进给速度为 2000、3000 mm/min,通过改变砂轮线速度得到表面粗糙度的变化规律如图 7 所示。由图 7 可知,随着砂轮线速度的提高,表面粗糙度逐渐减小。这是因为随着砂轮线速度的提高,在相同的时间内,砂轮与工件的摩擦次数增加,磨削接触区积累的热量增多,磨削温度升高,使陶瓷材料塑性去除所占的比例增大;另一方面,砂轮线速度的提高使光磨次数增加,从而使磨削后的表面粗糙度进一步减小,因此表面粗糙度呈下降趋势。吴玉厚等^[18]通过对陶瓷轴承套圈内表面磨削试验研究得出:随着砂轮线速度的增大,表面粗糙度呈减少趋势。为提高表面质量,推荐使用较高的砂轮线速度。

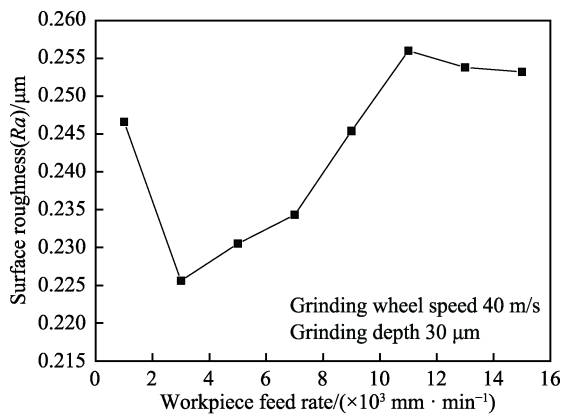
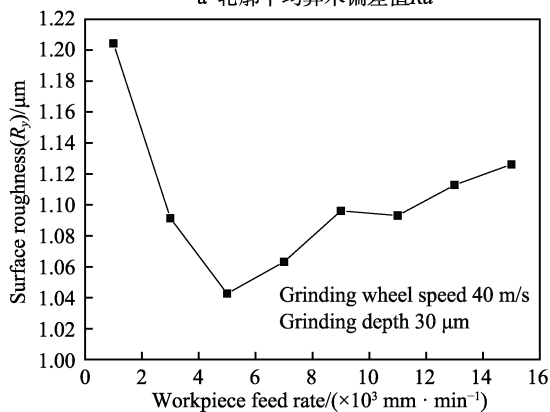
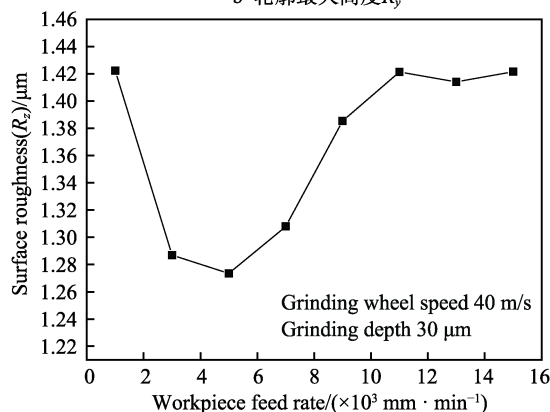
a 轮廓平均算术偏差值 R_a b 轮廓最大高度 R_y c 微观不平度十点高度 R_z

图6 表面粗糙度随工件进给速度的变化情况

Fig.6 Change of the surface roughness with the feed speed of the workpiece: (a) Arithmetical mean deviation of the profile R_a ; (b) Maximum height of the profile R_y ; (c) Ten point height of irregularities R_z

2.5 磨削参数对表面波纹度的影响

表面波纹度是指在磨削加工中,由于机床、工件和砂轮系统的振动,在工件表面形成具有一定周期的高低起伏。表面波纹度直接影响磨削加工后工件的表面质量,是轴承噪声的主要来源之一,因此轴承零件对表面波纹度有非常严格的要求。对于表面波纹度的评定参数有两个指标,分别为高度和间距。现选用波纹度轮廓的平均间距 S_w 来评价磨削后工件的表面波纹度。

在磨削深度单因素试验中,波纹度轮廓的平均间

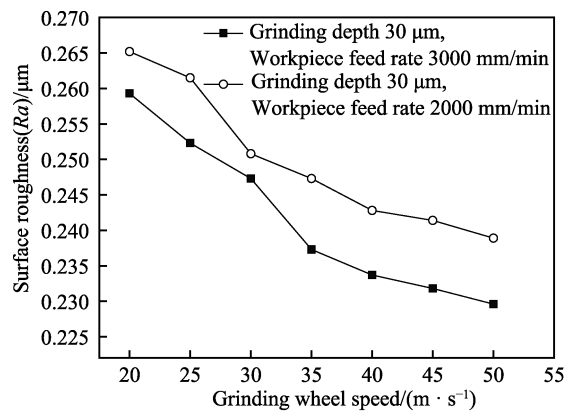
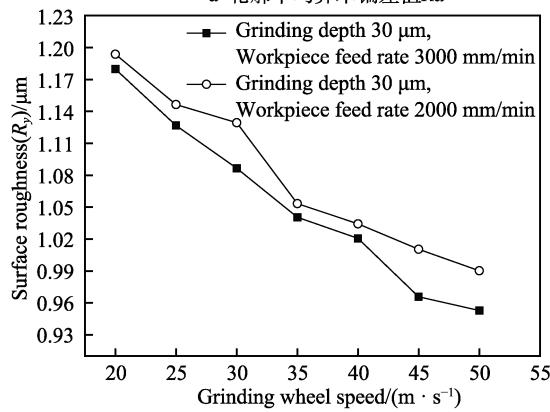
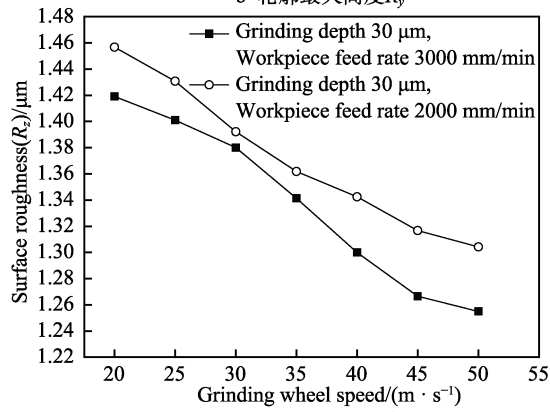
a 轮廓平均算术偏差值 R_a b 轮廓最大高度 R_y c 微观不平度十点高度 R_z

图7 表面粗糙度随砂轮线速度的变化情况

Fig.7 Change of surface roughness with the speed of the grinding wheel: (a) Arithmetical mean deviation of the profile R_a ; (b) Maximum height of the profile R_y ; (c) Ten point height of irregularities R_z

距波动较小且几乎为零。在砂轮线速度、工件进给速度单因素试验中,平均间距 S_w 的变化情况如图8所示,可知改变工件进给速度和砂轮线速度,平均间距 S_w 与之呈线性变化,且工件进给速度的影响程度远大于砂轮线速度的影响程度。在机床刚度完全满足当前试验条件的背景下,表面波纹度主要因砂轮圆度较差引起。在磨削过程中,砂轮半径较大的圆周面的切削深度大于砂轮半径较小的圆周面的切削深度,在工件匀速进给过程中,使磨削后的表面产生周期性的波峰波谷(如图9所示)。为提高磨削后表面质量、控制表面波纹度,可以选用较小的工件进给速度和较大的

砂轮线速度。磨削参数对表面波纹度的影响主次顺序为: 工件进给速度>砂轮线速度>磨削深度。

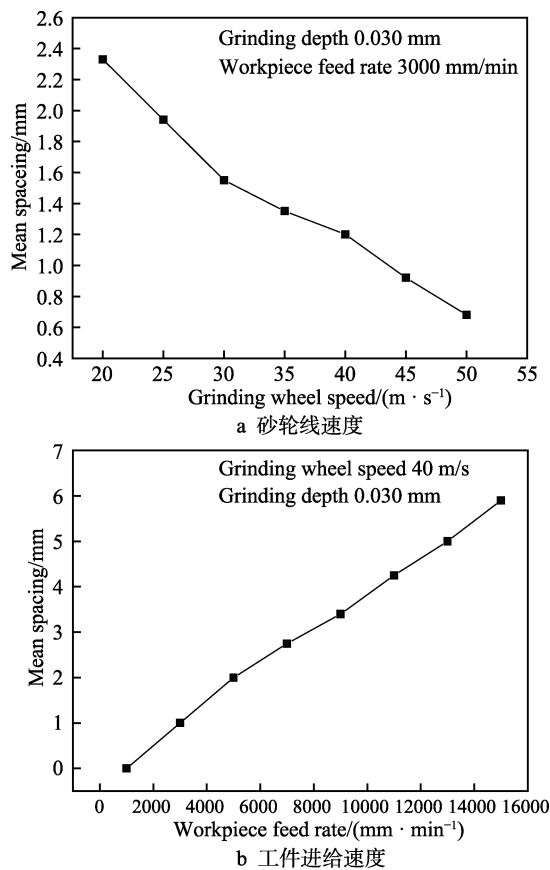


图 8 波纹度轮廓平均间距随工件进给速度、砂轮线速度的变化情况

Fig.8 Change of the average spacing of the waviness contour with the linear speed (a) and the feed speed (b) of the grinding wheel

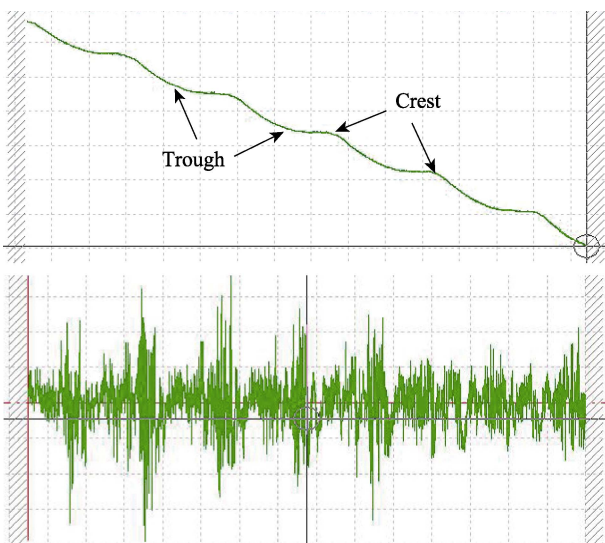


图 9 表面粗糙度测量时的波峰波谷 (平行工件进给方向测量)

Fig.9 Wave peak valley in the measurement of surface roughness (measurement of parallel workpiece feed direction)

3 磨削工艺优化分析

3.1 HIPSN 陶瓷材料去除机理

磨削接触区存在磨料与工件、结合剂与工件、磨屑与工件、结合剂与磨屑等多种微观交互作用, HIPSN 陶瓷材料的去除机理与磨削接触区的微观交互作用密切相关, 受磨料特性、磨削工艺参数、磨削加工过程的热载荷等多种因素的影响。

通过试验研究表明, HIPSN 陶瓷材料的去除方式有塑性去除、脆性断裂、破碎去除等, 磨削后表面成形与成屑多为塑性与脆性共存机制。如果最大未变形切屑厚度 h_{\max} (如图 10 所示) 小于产生裂纹的临界切深 d_c , 陶瓷材料将实现延性域加工^[19]。

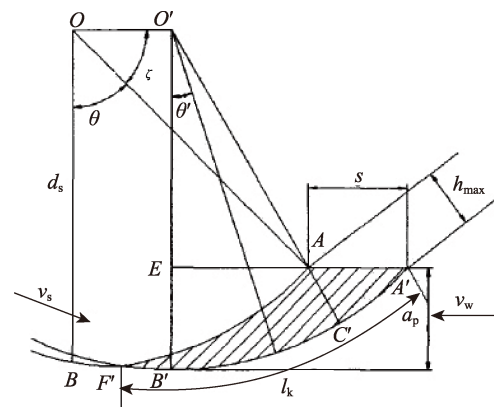


图 10 最大未变形切屑厚度

Fig.10 Maximum unreformed chip thickness

最大未变形切屑厚度 h_{\max} 表达式为:

$$h_{\max} = \left(\frac{3}{N_s \tan \alpha} \right)^{1/2} \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^{1/2} \left(\frac{a_p}{d_s} \right)^{1/4} \quad (2)$$

式中: N_s 为砂轮单位面积有效磨粒数; α 为未变形切屑横断面的半角; v_w 为工件进给速度; v_s 为砂轮线速度; a_p 为磨削深度; d_s 为砂轮直径。

临界切深 d_c 表达式为:

$$d_c = \beta \frac{E}{H} \left(\frac{K_{IC}}{H} \right)^2 \quad (3)$$

式中: β 为与砂轮有关的无量纲常数; E 为材料弹性模量; H 为材料维氏硬度; K_{IC} 为断裂韧性。

由式 (2) 可知, 最大未变形切屑厚度 h_{\max} 与砂轮线速度 v_s 呈负相关, 与工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p 呈正相关。同时可知工件进给速度 v_w 对最大未变形切屑厚度 h_{\max} 的影响程度比磨削深度 a_p 大, 即增大工件进给速度 v_w 比增大磨削深度 a_p 更容易导致最大未变形切屑厚度 h_{\max} 的增大。因此依据式 (2), 可以较大幅度地增加磨削深度 a_p 、较小幅度地增大工件进给速度 v_w 以及最大限度地提高砂轮线速度 v_s , 来调控最大未变形切屑厚度 h_{\max} 。

由式(3)可知,弹性模量大、断裂韧性好的材料更容易实现延性域加工。试验中较大的磨削深度 a_p 、合适的工件进给速度 v_w 以及最高的砂轮线速度 v_s ,使磨削接触区的工件温度得以提高,因此断裂韧性 K_{IC} 随之提高,临界切深 d_c 随之增大。由试验结果与分析可知,优化工艺参数条件下,材料塑性去除所占的比例最大,磨削后表面质量最好,这与HIPS陶瓷材料的去除机理相吻合。

3.2 优化工艺及效率

在当前试验条件下,优化工艺参数组合为:砂轮线速度 50 m/s,磨削深度 0.030 mm,工件进给速度 3000 mm/min。在实际生产中,推荐砂轮线速度为 40~60 m/s、磨削深度为 0.025~0.035 mm、工件进给速度为 2500~3500 mm/min。

优化工艺与传统工艺^[20](磨削深度 0.010 mm、工件进给速度 1000 mm/min)相比,不仅能获得高精度的表面质量,还可以大幅提高加工效率。优化工艺下磨削后的表面粗糙度平均值为 0.2296 μm ,传统工艺下的表面粗糙度平均值为 0.2860 μm ,表面粗糙度改善了 19.7%。以去除 100 mm×100 mm×1 mm 的HIPS陶瓷为基准,优化工艺的总加工时间为 6.8 min,传统工艺的总加工时间为 60 min,加工时间减少 53.2 min,加工效率为传统工艺的 8.8 倍,生产效率大幅提升。为获得更高的工件表面质量,推荐精磨后以较高的砂轮线速度和较低的工件进给速度进行一次光磨。

3.3 粗糙度仪测针路径对测量结果的影响

如图 11 所示,在表面粗糙度测量过程中,工件测量时的摆放偏差将直接影响表面粗糙度的测量结果。由大量测量数据可知,垂直工件进给方向的表面粗糙度测量结果波动较小,平行工件进给方向的表面粗糙度测量结果波动较大。为使表面粗糙度的测量结果更加真实地反映加工表面质量,可以选择垂直工件进给方向的测量结果,同时适当增大测量长度。

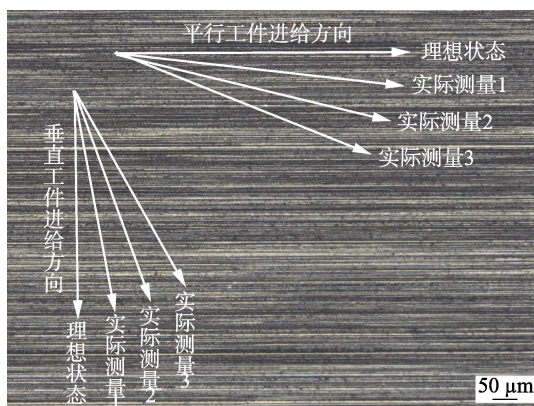


图 11 粗糙度仪测针路径示意图

Fig.11 Diagram of the needle path of theroughness meter

3.4 砂轮精度对表面质量的影响

磨削后工件表面的三维图像如图 12 所示,可以清楚地看到工件表面有两道很深的沟壑,这是由金刚石砂轮磨粒等高性较差引起的。结合表面波纹度的测量结果得知,金刚石砂轮的修整精度和磨削后工件表面质量密切相关,因此提高金刚石砂轮的制造精度及金刚石砂轮精密修整技术还需要进一步研究。

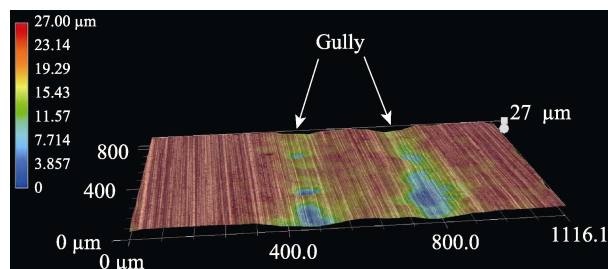


图 12 工件表面的三维图像

Fig.12 Three-dimensional image on the surface of a workpiece

4 结论

1) HIPS陶瓷磨削加工时,增加磨削深度、提高砂轮线速度,有利于促进脆性去除向延性去除转变,进而获得更高的加工表面质量。HIPS陶瓷材料的去除机理与磨削工艺参数、磨削接触区工件温度密切相关。

2) 砂轮线速度和工件进给速度对磨削后工件表面波纹度密切相关,可以适当减小工件进给速度、提高砂轮线速度来控制表面波纹度。

3) 高效精磨工艺可以大幅提高加工效率,改善加工表面质量,降低生产成本。

参考文献:

- [1] 李伟儒,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.
LI Weiru, LI Ling, WANG Kun. Research status and development trend of advanced ceramic materials[J]. Advanced materials industry, 2016(1): 2-8.
- [2] 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.
- [3] 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 Yu-hou, ZHU Zheng-jie, 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.
- [4] 田欣利. 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 Xin-li. Advanced machining and quality control technology for engineering ceramics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [5] ZHANG K, SUN J, WANG H, et al. Experimental research on high speed grinding of silicon nitride ceramic spindle [J]. Materials science forum, 2016, 10: 253-258.
- [6] DONG J, ZHOU M, HUANG S N. Study on the surface quality of silicon nitride ceramics in ultrasonic vibration grinding[J]. Key engineering materials, 2013, 9: 144-147.
- [7] 刘伟, 邓朝晖, 万林林, 等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 191-198.
LIU Wei, DENG Zhao-hui, WAN Lin-lin, et al. Simulation and experiment study for silicon nitride cutting with single diamond grain[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(21): 191-198.
- [8] 万林林, 刘志坚, 邓朝晖, 等. 单颗磨粒切削氮化硅陶瓷表面残留高度研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(2): 1-7.
WAN Lin-lin, LIU Zhi-jian, DENG Zhao-hui, et al. Surface residual height of silicon nitride ceramic cutting with single diamond grain[J]. Ordnance material science and engineering, 2017, 40(2): 1-7.
- [9] 吴玉厚, 吕艳. HIPSIN 陶瓷轴承套圈磨削特性的实验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23(1): 142-146.
WU Yu-hou, LV Yan. Experiment on grinding characteristic of HIPSIN ceramic bearing rings[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural science), 2007, 23(1): 142-146.
- [10] 王宇, 吴玉厚, 李颂华. 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): 37-40.
WANG Yu, WU Yu-hou, LI Song-hua. 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): 37-40.
- [11] 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 Yu-hou, ZHANG Ji-peng, LI Song-hua, et al. Experimental research on surface quality of Si_3N_4 ceramic internal grinding[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural science), 2010, 26(1): 176-179.
- [12] ABREU C W. The influence of cutting speed and cutting initiation location in specimen preparation for the micro-tensile bond strength test [J]. The journal of adhesive dentistry, 2011, 13(3): 36-40.
- [13] HUANG H, YIN L, ZHOU L B. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels [J]. Journal of materials processing technology, 2003, 141: 329-336.
- [14] 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 Zhao-hui, SHANG Yuan-yuan, et al. Single diamond grain grinding for silicon nitride[J]. Ordnance material science and engineering, 2016, 39(6): 1-5.
- [15] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
LIU Wen-qing. Experimental design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [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 Gui-zhi, HUANG Han, XU Xi-peng, 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] 张东坤, 李长河. 工程陶瓷磨削力的影响因素研究[J]. 精密制造与自动化, 2014(1): 10-13.
ZHANG Dong-kun, LI Chang-he. Study on influencing factors of grinding force of engineering[J]. Precise manufacturing & automation, 2014(1): 10-13.
- [18] 吴玉厚, 王贺, 李颂华, 等. 高速电主轴用陶瓷轴承套圈内表面磨削试验研究[J]. 现代制造工程, 2007(10): 14-16.
WU Yu-hou, WANG He, LI Song-hua, et al. High speed motorized spindles ceramics bearing ring inner surface grinding experiment[J]. Modern manufacturing engineering, 2007(10): 14-16.
- [19] 谢桂芝, 黄红武, 黄含, 等. 工程陶瓷材料高效深磨的试验研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 176-184.
XIE Gui-zhi, HUANG Hong-wu, HUANG Han, et al. Experimental investigations of advanced ceramics in high efficiency deep grinding[J]. Journal of mechanical engineering, 2007, 43(1): 176-184.
- [20] 辛志杰. 超硬与难磨削材料加工技术实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
XIN Zhi-jie. Examples of processing technology on super-hard and difficult grinding materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.