

氮化硅陶瓷切削仿真与实验

万林林 刘志坚 邓朝晖 刘伟 赵小雨

(湖南科技大学,难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭 411201)

文 摘 针对金刚石砂轮磨粒尺寸、形状的不规则性和空间位置不确定性的特点,采用球坐标中随机点产生的空间平面切分实体和截角多面体相结合的方法,并考虑氮化硅陶瓷工件的磨削亚表面形貌和裂纹损伤,建立了截角多面体磨粒和含有典型裂纹的工件模型。进行单颗磨粒切削氮化硅陶瓷的有限元仿真和实验,结果表明:磨削加工和数值仿真的磨削力值变化趋势相同,差值小于8%,切削力随砂轮转速增大而减小、随工件速度和切削深度增大而增大,而切削深度对切削力的影响程度最大。

关键词 截角多面体磨粒,工程陶瓷,有限元仿真,切削力

中图分类号:TH145

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.008

Simulation and Experimental for Silicon Nitride Cutting

WAN Linlin LIU Zhijian DENG Zhaohui LIU Wei ZHAO Xiaoyu

(Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract Responding to the variability and irregularity of the size and shape, and the uncertainty spatial location of abrasive in diamond wheel, this paper proposes a better virtual model of diamond grain and a workpiece model containing typical cracks, based on the method of random planes to segment the solid and truncated polyhedron in spherical coordinates. The FEM simulation and experiments are carried out on silicon nitride cutting with single diamond grain. The results show that a good agreement trend between simulations and measured results of grinding force. The relative error is less than 8%. The cutting force decreases with the increases of the rotational speed of the grinding wheel, while increasing along with the increases of the workpiece velocity and the cutting depths. The effect of cutting depth on cutting force is maximum.

Key words Polyhedron single grain, Engineering ceramics, Finite element simulation, Cutting force

0 引言

工程陶瓷材料以其高强度、高硬度、耐磨、耐高温、耐化学腐蚀等优良性能,在航空航天、国防军工和现代医学等重要领域得到广泛的应用^[1-2]。目前在工程陶瓷的加工方法中最为成熟、实用且应用最为广泛的仍是采用超硬金刚石磨料磨具进行磨削加工^[3]。且砂轮磨粒的分布随机,其工作表面的形状具有不确定性^[4]。磨削加工比车削复杂得多,磨粒切削刃形状、尺寸、位置的随机多样性以及磨削工艺参数等多种因素相互影响,使得研究磨削加工材料去除机理异常困难^[5-6]。而单颗磨粒切削加工的机理

研究成为认识复杂磨削加工机理的一种重要手段^[7]。针对单颗磨粒几何建模,目前研究大多还是将磨粒的形状假定等效为圆形、球体、圆锥体、球头圆锥体、多棱锥体、简单的不规则多面体等具有某一简单的结构模型,或者将其视为简单的数学模型^[8-13]。这种方法与实际磨粒有较大差距。

本文综合考虑了磨粒形状的多样性、尺寸的变化性、空间位置分布不规律的特征,采用球坐标中随机点产生的空间平面切分实体和截角多面体相结合的方法,建立虚拟磨粒模型,并结合氮化硅陶瓷表面形貌观测和典型裂纹分析,建立含有 I 型(张开型)和

收稿日期:2016-05-17;修回日期:2016-08-19

基金项目:国家自然科学基金(51405152);湖南省自然科学基金(14JJ6025);难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室开放基金(E21433)

作者简介:万林林,1984 年出生,博士,讲师,主要从事工程陶瓷等难加工材料高效精密磨削技术的研究。E-mail: wanlinlin@hust.edu.cn

II型(滑开型)裂纹的氮化硅工件模型。采用ABAQUS软件进行加工仿真分析。在数控平面磨床上进行单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷加工实验,以验证仿真模型的正确性,并对切削参数与切削力之间的关系进行分析。

1 实验

1.1 材料

LD990 金刚石,其密度为 3.5 g/cm^3 ,弹性模量为 960 GPa ;工件以 Si_3N_4 为主要成分,采用气压烧结后切割而成,尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,其密度为 3.2 g/cm^3 ,硬度为 15 GPa ,断裂韧度为 $4.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

1.2 实验装置

加工实验装置如图 1 所示,其砂轮盘外径 200 mm ,内径 32 mm ,宽度 24 mm 。磨粒镶块上镶嵌有单颗金刚石磨粒,平衡块主要起平衡作用,避免砂轮转动时因为受力不均匀产生离心力而影响加工质量。

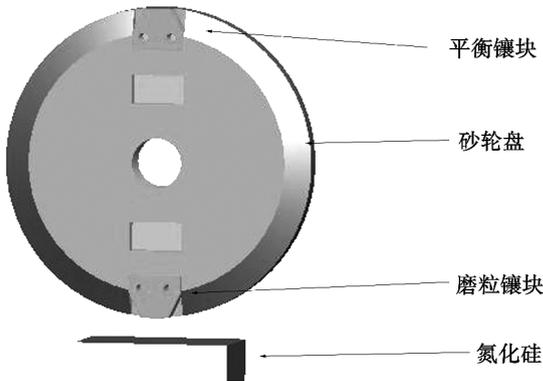


图 1 单颗磨粒切削装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of single grain cutting device

在 MGK7120×6/F 平面磨床上进行切削实验,先将单颗金刚石磨粒和平衡镶块安装到砂轮盘上,用螺钉锁死后进行平衡调试,最后再将砂轮盘安装到机床主轴上。在实验前采用 $100\#$ 和 $400\#$ 的树脂结合剂金刚石砂轮对试件进行预磨削处理,加工后的工件表面粗糙度 $Ra < 5 \mu\text{m}$,实验加工系统见图 2。

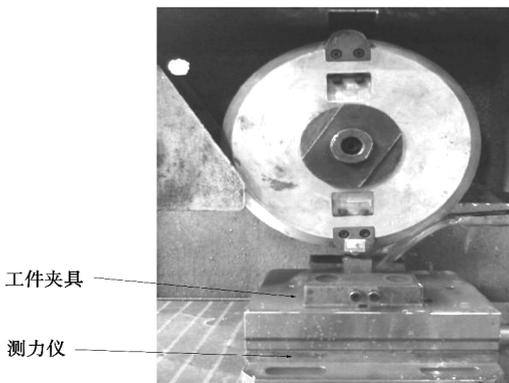


图 2 单颗磨粒切削实验系统

Fig.2 Single grain cutting experiment system

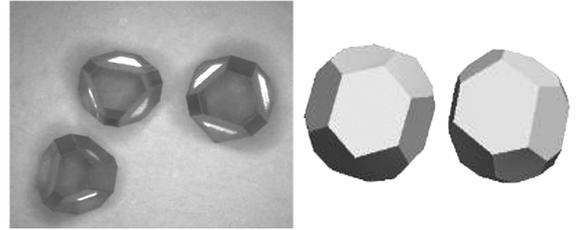
2 单颗磨粒切削氮化硅陶瓷加工仿真

2.1 单颗磨粒建模

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 6 期

由于制备工艺的复杂性,以及修整与加工时的磨损作用,金刚石砂轮磨粒形状是不规则的^[14]。通过对加工砂轮磨粒的观察(图 3)可知,其磨粒尺寸和形状虽然有差异,但总体上每个面都近似于不规则多边形,且磨粒尺寸都在一个范围内,用 D_{\min} 和 D_{\max} 表示磨粒直径尺寸下限和上限。

$40\#$ 金刚石砂轮磨粒尺寸平均为 $462.5 \mu\text{m}$,即在利用球坐标系限定磨粒最大整体尺寸时, D 的取值为 $462.5 \mu\text{m}$ 。得到如图 3 所示的多面体模型,该模型以正四面体(外接圆尺寸为 D ,四面体边长 a 为 $\sqrt{6}D = 377.6 \mu\text{m}$)为基础,进行 15 次截角获得,其形貌与实际磨粒较为接近。



(a) 实际磨粒 (b) 截角多面体磨粒

图 3 金刚石磨粒

Fig.3 Diamond grain

2.2 氮化硅工件建模

田欣利等^[15]通过研究发现 Si_3N_4 磨削工件表面以下 $22 \mu\text{m}$ 深度范围内最主要的损伤为空隙和裂纹,空隙通过裂纹相连接,而磨削裂纹主要沿晶界扩展,形成曲折的裂纹路径。而中位裂纹和侧向裂纹起源于接近磨削表面的亚表面层,砂轮参数和磨削加工参数影响两类裂纹的尺寸和裂纹距磨削表面的深度。中位裂纹距磨削表面的深度为 $2 \sim 15 \mu\text{m}$,随着磨削深度的增加,中位裂纹距磨削表面的深度增加,中位裂纹的尺寸也增大。侧向裂纹距磨削表面深度为 $2 \sim 4 \mu\text{m}$,受磨削深度的影响不大。林滨等^[16]在氮化硅材料的单行程磨削实验和表面裂纹损伤深度观测实验中,采用斜研剖面法得出了如图 4 所示的工件简图。刘伟等^[17]对氮化硅陶瓷抛光处理后,采用体积比为 $4:1$ 的 32% 盐酸与 65% 硝酸配置的腐蚀液对工件抛光截面进行腐蚀,然后用扫描电镜对亚表面形貌进行观察,得到含有典型裂纹的亚表面形貌见图 5。

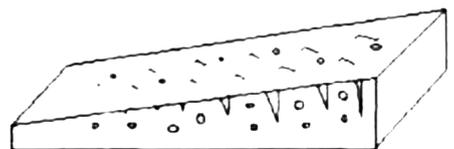


图 4 斜研剖面实验得出的工件简图

Fig.4 Schematic diagram of workpiece after miter grinding and polishing

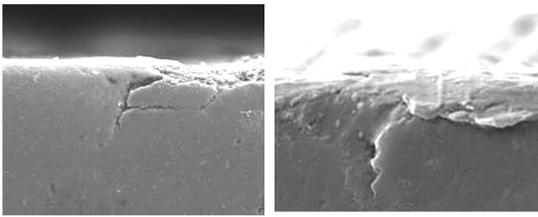


图 5 氮化硅陶瓷工件抛光截面 SEM 图

Fig.5 SEM chart of silicon nitride ceramic workpiece polishing section

基于上述研究,建立了含有典型裂纹的工件模

型。考虑切削深度,将工件实体分割成没有涉及切削的基体部分和参与切削的工作部分,分别进行建模,如图 6(a)、(b)所示。基体部分为没有裂纹的理想实体,直接通过拉伸形成。切削部分含有典型裂纹,建模时先建立多个小实体单元,每个单元含有一个 I 型(张开型)、II 型(滑开型)或者无裂纹,再把这些小单元随机拼接组合形成一个含有典型裂纹的切削部分实体,见图 6(c)。将基体部分实体和切削部分实体进一步组合形成工件实体模型,见图 6(d)。

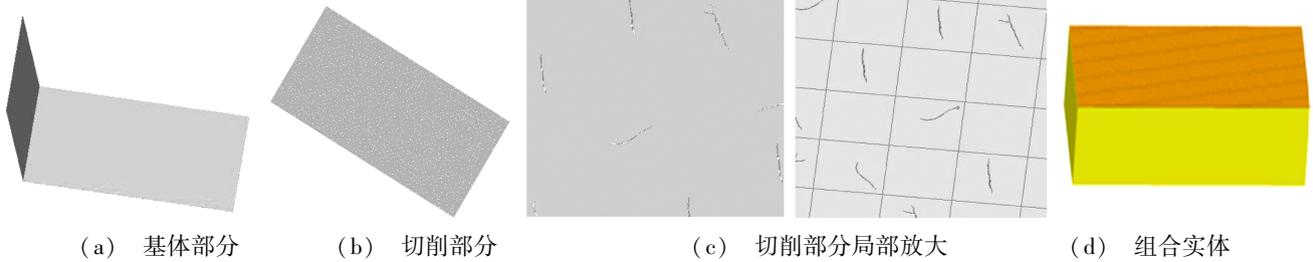


图 6 工件模型

Fig.6 Workpiece model

2.3 切削加工仿真建模

由于金刚石的屈服强度、弯剪强度、弹性模量都远大于氮化硅陶瓷,在磨削过程中金刚石磨粒几乎没有产生变形。为了减少仿真过程中的工作量,忽略单颗磨粒的变形与损伤,将其视为刚体。

在单颗磨粒加工实验中,工件速度远小于砂轮速度(两者相差 3 个数量级左右),所以在仿真时,将工件视为不动,而磨粒以恒定速度切削加工氮化硅工件。采用 ABAQUS 对切削加工过程进行仿真。网格划分时将工件模型分为两层,上层为网格细密的加工部分,底层为网格相对稀疏的基体部分。磨粒以 18.8 m/s 的线速度切过工件,切削深度为 10 μm ,工件底面完全约束。仿真加工模型见图 7。

图 8 所示,磨粒从初始接触到完全离开工件各阶段的示意图如图 9 所示。

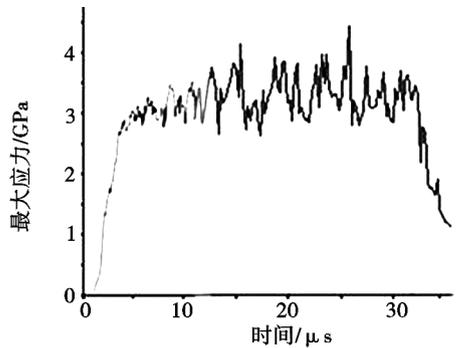


图 8 仿真最大第一主应力曲线

Fig.8 Maximum first principal stress curve

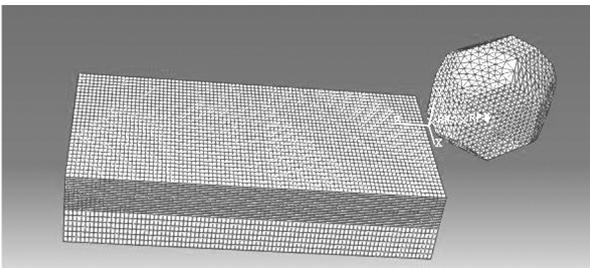
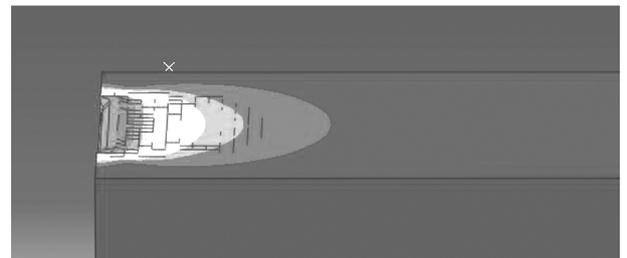


图 7 单颗磨粒切削有限元仿真模型

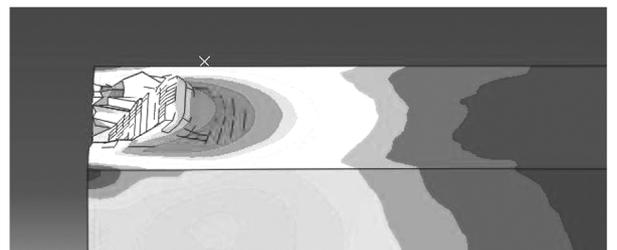
Fig.7 Finite element cutting model

2.4 仿真结果分析

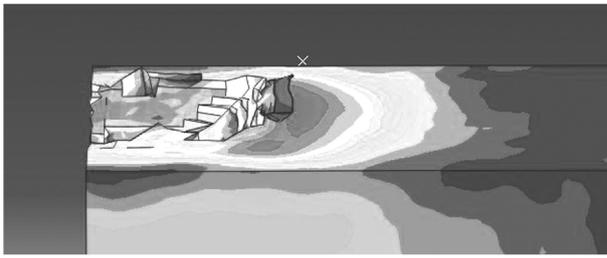
根据材料力学最大拉应力理论(第一强度理论),导致材料脆性断裂破坏最主要因素是最大拉应力,无论什么应力状态,只要构件内一点处的最大拉应力达到单向应力状态下的极限应力,材料就要发生脆性断裂。单颗磨粒切削氮化硅陶瓷仿真最大第一主应力如



(a) 初始接触



(b) 材料堆叠



(c) 磨粒切入

图9 磨粒切入工件过程示意图

Fig.9 Process of grain cutting into the workpiece

加工开始时,磨粒和工件处于刚接触状态,工件所受的应力处于最小值,此时两者之间只有挤压作用。随着磨粒逐渐切入,工件开始凸起堆叠,此时工件处于耕犁阶段。随着刀具的持续切入,工件所受的应力迅速增大到第一个极大值,但是磨屑还没有产生。当磨粒继续切入时,磨粒前方堆叠凸起的材料首先脱离工件,工件此时的应力幅值短暂减小,开始出现应力波动迹象,但由于磨粒刃前角起了一定的挡板作用,此时脱离工件的材料漂浮在工件上,充当了磨粒的磨削刃涂层,随磨粒一起向前切削工件,磨屑产生不明显。

随着磨粒的持续切入,工件所受应力又开始增大,此时磨粒前方及两侧堆叠的材料已越来越多,当到达第二个应力极值点后,工件材料开始飞离磨粒-工件所组成的切削空间,形成磨屑,工件应力又出现一定幅度减小。当磨粒移动到完全切入工件时,工件应力值达到第三个极值点。此后,磨屑持续飞离工件,在工件表面逐渐形成加工表层。随着磨粒切出工件,当磨粒最终到达其与工件边缘(即磨粒将要开始脱离工件)的中间某一点时,由于磨粒的切削,工件亚表层也已积累产生了很大应力,在磨粒即将脱离工件时,工件末端边缘出现大量裂纹,裂纹向垂直于切削方向扩展,使得边缘材料发生大尺寸的破碎,此时工件应力出现第四个极值点。从此刻直到磨粒将最后的整块材料完全切出并离开工件,工件应力逐渐减小到某一值后保持恒定,这是由于工件表层存在残余应力所致。整个过程中,切削力变化和切向力、法向力变化如图10所示。

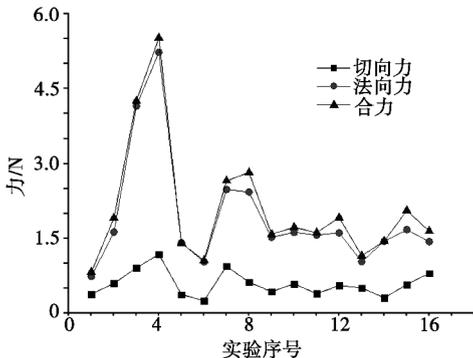


图10 单颗磨粒切削仿真切削力变化曲线

Fig.10 Change curve of cutting force in single grain cutting simulation
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第6期

3 切削加工实验与讨论

3.1 切削加工实验方案设计

基于5因素4水平的标准正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行实验设计,设计 $L_{16}(4^5)$ 正交表如表1所示。

表1 单颗磨粒切削加工 $L_{16}(4^5)$ 正交实验方案设计

Tab.1 Design of $L_{16}(4^5)$ orthogonal experiment scheme for single grain cutting

编号	砂轮转速/ $r \cdot s^{-1}$	工件速度/ $mm \cdot s^{-1}$	切削深度/ μm
1	15	15	4
2	15	20	6
3	15	25	8
4	15	30	10
5	20	15	6
6	20	20	4
7	20	25	10
8	20	30	8
9	25	15	8
10	25	20	10
11	25	25	4
12	25	30	6
13	30	15	10
14	30	20	8
15	30	25	6
16	30	30	4

3.2 切削力实验结果分析

正交实验切削力测量结果如图11所示。切削力仿真值和实验值对比图见图12。

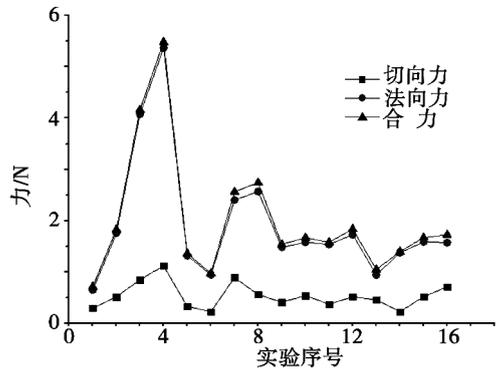
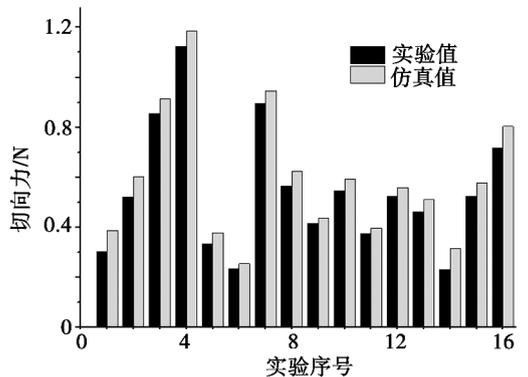
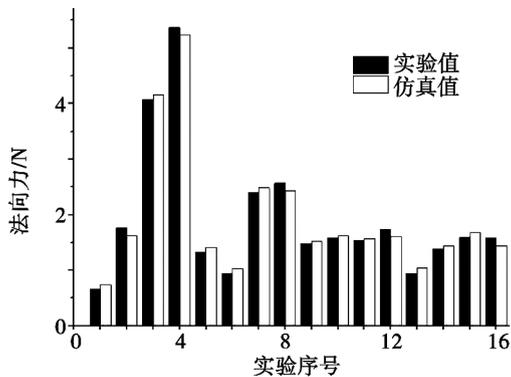


图11 单颗磨粒切削实验切削力变化曲线

Fig.11 Cutting force curves of single grain machining



(a) 切向



(b) 法向

图 12 切削力仿真值和实验值对比

Fig.12 Comparison of simulation value and experimental value of cutting force

对比切削力实验值和仿真值的变化情况可知:切削力仿真值与实验测量值的变化规律一致,且相对误差小于 8%,从而验证了本文所建立的截角多面体单颗磨粒和含有典型裂纹的工件模型的正确性。

3.3 加工参数对切削力的影响分析

通过直观分析法得到正交实验中切削力与加工参数之间的变化关系(表 2), (A 、 B 、 C 分别代表砂轮转速、工件速度、切削深度, $K_i = \sum_{i=1}^{16} Y_i$, k_i 是对应的 K_i 除以其总的水平数所计算得来的平均值, R 为每个因素的 $k_{\max} - k_{\min}$ 计算得出的极差)。采用方差分析法得到各因素对切削力的影响显著性结果见表 3(影响显著性判断 F 值通过查表获得)。

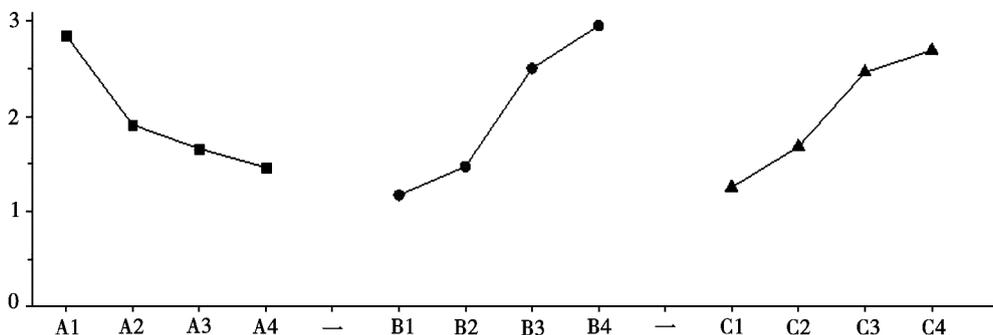


图 13 各因素水平与切削力之间的直观分析图

Fig.13 Visual analysis of the factors and cutting forces

综合表 2、表 3 及图 13 可知。

(1) 根据显著性判断,切削深度对切削力的影响程度最大,砂轮转速次之,工件速度对切削力的影响最小。在加工过程中,切削力随砂轮转速增大而减小,随工件速度和切削深度增大而增大。

(2) 当因素水平组合为 A4B1C1,即砂轮转速为 30 r/s(对应线速度 18.8 m/s)、工件速度为 15 mm/s、磨削深度为 4 μm 时,切削力最小,说明提高砂轮转速、降低工件速度和磨削深度能够有效的降低加工过程中的切削力。

表 2 切削力正交实验结果分析

Tab.2 Analysis table of orthogonal experiment results of cutting force

	A	B	C
K_1	11.4	4.68	5.01
K_2	9.65	5.89	6.71
K_3	6.64	9.99	9.85
K_4	5.86	11.80	10.78
k_1	2.85	1.17	1.25
k_2	2.41	1.47	1.68
k_3	1.66	2.50	2.46
k_4	1.46	2.95	2.69
R	1.39	1.78	1.44

表 3 各因素对切削力影响的显著性

Tab.3 Significant analysis of the influence of different processing factors on the cutting force

因素	离差	自由度	均方差	检验结果(F 值)	影响
A	6.05	3	2.02	4.28	较显著
B	5.42	3	1.82	3.84	较显著
C	8.47	3	2.82	5.99	显著
误差	2.83	6	0.47		
总和	22.77	15			

根据表 2 中给出的计算结果,依次以各因素的水平值为横坐标,各因素的 k_i 值为纵坐标绘制折线图,即可得各加工参数对切削力的影响趋势,见图 13。

4 结论

(1) 基于实际单颗金刚石磨粒的形貌,采用球坐标中随机点产生的空间平面切分实体和截角多面体相结合的方法建立了截角多面体虚拟磨粒(截面以三到六边形为主),其形状更加接近真实磨粒,可进一步用于砂轮形貌建模。

(2) 考虑氮化硅陶瓷工件的磨削亚表面形貌和裂纹损伤,提出了包含 I 型(张开型)和 II 型(滑开型)典型裂纹损伤的工件模型。建立单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真的有限元模型,仿真分析了工

件材料的磨屑形成、应力、切削力等随时间的变化规律。仿真结果表明在整个加工过程中,应力和切削力呈阶段性波动变化,磨屑的形成与应力变化直接相关。磨粒即将脱离工件时,工件末端边缘产生大量裂纹并向着垂直切削方向扩展,导致工件边缘产生大尺寸碎裂。

(3)在数控平面磨床上进行单颗磨粒切削氮化硅陶瓷加工实验,对比分析切削力的变化情况,仿真值与实验值的相对误差小于8%,从而验证了仿真模型的正确性。同时实验结果表明切削力随着砂轮转速的增大而减小、随着工件速度和切削深度的增大而增大,切削深度对切削力的影响程度最大。在工程陶瓷磨削加工中通过提高砂轮转速、降低工件速度和切削深度能够有效的减小磨削力。

参考文献

[1] 任敬心,康仁科,王西彬.难加工材料磨削技术[M].北京:电子工业出版社,2011.

[2] 马里内斯库.先进陶瓷加工导论[M].北京:国防工业出版社,2010.

[3] 佟富强.TN85 金属陶瓷球面偶件 ELID 超精密磨削技术研究[D].哈尔滨工业大学,2010.

[4] 任敬心,华定安.磨削原理[M].西安:西北工业大学出版社,1988.

[5] 李伯民,赵波.现代磨削技术[M].北京:机械工业出版社,2003.

[6] XIE J,WEI F,ZHENG J H,et al.3D laser investigation on micron-scale grain protrusion topography of truncated diamond grinding wheel for precision grinding performance[J].International Journal of Machine Tools & Manufacture,2011,51(5):411-419.

[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.

[8] YAMAGUCHI T,HIGUCHI M,SHIMADA S,et al.Fractal modeling method for 3D structure of vitrified-bonded wheel[J].Precision Engineering,2007,31(1):40-46.

[9] ZHANG P,ZHAO H,SHI C,et al.Influence of double-tip scratch and single-tip scratch on nano-scratching process via molecular dynamics simulation[J].Applied Surface Science,2013,280(9):751-756.

[10] PELLETIER H,GAUTHIER C,SCHIRRER R.Experimental and finite-element analysis of scratches on amorphous polymeric surfaces[J].Mécanique & Industries,2008,9(4):261-271.

[11] 宿崇,许立,刘元伟,等.基于 SPH 法的 CBN 磨粒切削过程数值模拟[J].中国机械工程,2013,24(5):667-671.

[12] 言兰,姜峰,融亦鸣.基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J].机械工程学报,2012,48(11):172-182.

[13] 刘月明,巩亚东,曹振轩.基于数值建模的砂轮形貌仿真与测量[J].机械工程学报,2012,48(23):184-190.

[14] MALKIN S.Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives[M].America Society of Civil Engineers,1989.

[15] 田欣利,徐西鹏,袁巨龙.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.

[16] 张光秀,林滨,吴艳青,等.工程陶瓷磨削表面裂纹损伤深度模型研究[J].组合机床与自动化加工技术,2009(5):10-13.

[17] 刘伟.基于单颗磨粒切削的氮化硅陶瓷精密磨削仿真与实验研究[D].长沙:湖南大学,2014.