

基于不同磨粒的氮化硅陶瓷磨削特性研究

李霞

(包头钢铁职业技术学院数控工程系, 包头 014010)

文 摘 采用多颗磨粒磨削仿真和实验相结合的方式研究磨削过程的磨削力、磨削温度和已加表面形貌。对比分析了多颗磨粒和传统单颗磨粒磨削模型在磨削特性上的差异性,并对多颗磨粒磨削仿真模型进行了验证。结果表明:当磨削速度减小、磨削深度增大时,多颗/单颗磨粒仿真与实验的磨削力均增大;当磨削速度和磨削深度增大,多颗/单颗磨粒仿真与实验的磨削温度均增大;当进给速度增大时,单颗磨粒仿真的磨削力减小、磨削温度先减小后增大,多颗磨粒仿真和实验的磨削力增大、磨削温度减小;多颗磨粒磨削时的磨削力和磨削温度大于单颗磨粒磨削时的力和温度;多颗磨粒仿真后工件表面形貌与实际加工后表面形貌相符。基于多颗磨粒磨削工程陶瓷的有限元仿真模型相比于单颗磨粒模型可更好地模拟实际加工情况。

关键词 单颗/多颗磨粒,工程陶瓷,ABAQUS仿真,磨削力,磨削温度,表面形貌

中图分类号: TG580.61

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.007

Grinding Characteristics of Silicon Nitride Ceramics Using Multiple Abrasive Grains

LI Xia

(Department of Numerical Control Engineering, Baotou Iron and Steel Vocational and Technical College, Baotou 014010)

Abstract The grinding force, temperature and ground surface topography of the grinding process were studied by combination of simulation and grinding experiment with multi-abrasive grains. The differences in grinding characteristics between models of multi-abrasive-grain and traditional single-abrasive-grain were compared and analyzed. The simulation model of multi-abrasive-grain was verified by experiment. The results showed that by reducing grinding speed or increasing grinding depth, the grinding force in simulation and experiment of both models would increase. With increase of grinding speed or grinding depth, the grinding temperature in simulation and experiment of both models would rise. In simulation of the single-abrasive-grain model, the grinding force reduced with acceleration of feed rate, with the grinding temperature falling first before going up again. However, in simulation and experiment of the multi-abrasive-grain model, the grinding force increased with acceleration of feed rate, with grinding temperature going toward the opposite trend. The grinding force and grinding temperature in the multi-abrasive-grain model were higher than those of the single-abrasive-grain. The surface morphology of the workpiece after experiment using multiple abrasive grains was consistent with simulation result. The finite element simulation model using multiple abrasive grains to grind engineering ceramics gave closer to experiment result than using single abrasive grain.

Key words Single/multiple abrasive grains, Engineering ceramics, ABAQUS simulation, Grinding force, Grinding temperature, Surface topography

0 引言

工程陶瓷因具有高硬度、高强度、耐腐蚀、耐磨损、热稳定性好以及绝缘等优良性能而被广泛应用于机械和航空等领域^[1-2]。陶瓷材料的硬脆特性,磨

削为其主要的加工方式,磨削过程时砂轮中单个金刚石磨粒的切削性能对砂轮的磨削性能起重要作用。工件的表面质量与磨粒的形状、突起的高度和作用轨迹密切相关。随着计算机硬件技术和有限元

收稿日期:2021-04-30

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJSY19235)

第一作者简介:李霞,1980年出生,副教授,主要从事难加工材料精密加工理论与技术的研究。E-mail:646134692@qq.com

方法的飞速发展,可将砂轮中磨粒作用过程通过有限元仿真模型进行展现,该方法已成为研究磨削作用机理的重要手段^[3-4]。

近些年,国内研究人员已针对单颗金刚石磨粒磨削工件进行二维或三维的有限元仿真,模拟了单颗金刚石磨粒的磨削过程,分析其去除机理^[5]。吴玉厚等^[6]采用三维与二维温度仿真模型研究了在干磨、湿磨下磨削氮化硅陶瓷的温度分布,并实验验证得出在小切深缓进给下干磨的表面质量比湿磨的好。刘伟等^[7]全面分析了模拟磨削加工过程的方法,其中包括:分子动力学法(MD)、有限元法(FEM)、光滑流体粒子动力学法(SPH),并分析了每种方法在磨削机理、成屑机理、工件表面质量和磨粒磨损方面的应用条件和不足之处。X. G. GUO等^[8]建立了纳米切割单晶钨的单颗磨粒分子动力学模拟模型,在不同的晶体取向以了解晶体结构和位错演变为目的进行了研究,得出位错形核和工件内部运动导致诸如原子团簇、阶梯位错和“V”形位错的缺陷。J. SUN等^[9]建立了高速外圆磨削氮化硅陶瓷的有限元仿真模型,通过对比不同磨粒形状的磨削加工过程得出了三棱柱形状磨粒比圆锥磨粒更符合实际加工情况。Y. G. ZHOU等^[10]建立了单颗磨粒微量磨削单晶高温镍基合金的热力特性仿真模型,通过仿真与实验结合方式得出相同晶面不同晶体方向、磨削参数以及砂轮磨损对磨削区热力特性的影响情况。W. HARRER等^[11]通过单颗金刚石磨粒的滑擦实验研究了磨削过程中单晶硅的脆性去除和延性去除间的临界切削深度。程强等^[12]结合实验研究了单颗磨粒高速磨削实验过程的磨削力、工件材料堆积率及磨粒磨损,指出

磨削力比和材料堆积率在磨粒初期磨损时会变大,而在磨粒磨损后期又会减小,并且增大磨削深度将加剧磨粒磨损,致使磨粒力比更早地出现拐点。X. Y. CAO等^[13]通过有限元仿真法发现纤维取向对编织陶瓷基复合材料的表面波纹起决定性作用,表明这与机床系统振动引起的传统波纹形成理论不同,并指出根据他获得的结果可预测复合材料的磨削表面波纹度。

目前,多数磨削过程仿真的研究中采用形状为圆锥体、球体、截角八面体的单颗磨粒,而实际砂轮中金刚石磨粒均为不规则形状且随机分布排列,仿真与实验很难量化分析,故提出一种基于多颗磨粒的磨削仿真模型,可用于研究金刚石磨粒磨削氮化硅陶瓷的磨削机理。磨削过程中材料的去除主要靠磨削时的磨削力,力的大小对材料去除、表面/亚表面损伤、热力耦合特性等都存在影响^[14];磨削热对砂轮性能(磨粒磨损、碳化)和工件表面完整性(裂纹、烧伤以及残余应力)同样存在很大影响,而磨削温度是磨削热的重要表征参数。因此,本文采用多颗磨粒磨削仿真和实验结合的方式研究磨削过程的磨削力、磨削温度和已加表面形貌。通过对比单颗磨粒磨削时的磨削力和磨削温度,验证多颗磨粒磨削仿真模型的准确性。本文对工程陶瓷磨削有限元仿真建模提供了新方法,并且对掌握陶瓷去除机理具有一定意义。

1 有限元模型建立

1.1 几何模型和边界条件

采用ABAQUS仿真软件进行单颗和多颗磨粒的模拟仿真,磨粒和工件的几何模型如图1所示。

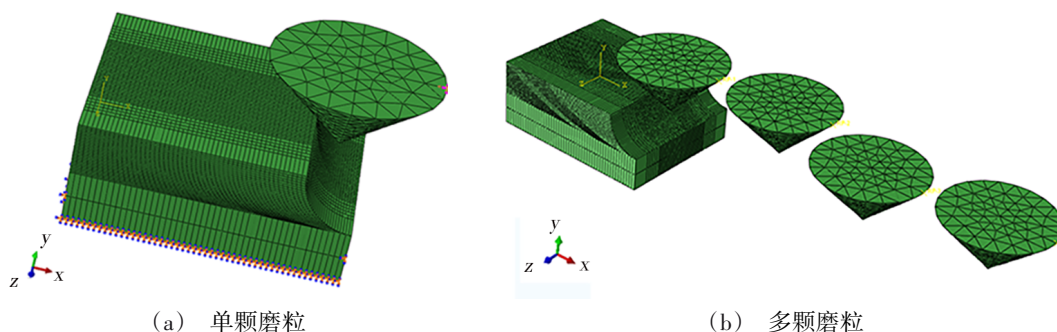


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

在仿真中,设定金刚石磨粒是为绝对刚性,氮化硅陶瓷工件是形变体。实际砂轮中金刚石磨粒的顶角 2θ 在 $-80^\circ \sim -140^\circ$ 变化,这里将圆锥体金刚石磨粒的顶角设置为 90° ;实际磨刀的前角 γ 大多为负前角,其变化范围为 $-15^\circ \sim -60^\circ$,这里将圆锥体金刚石

磨粒的前角设置为 -45° ^[9]。磨粒的网格为CPE3T,三节点热耦合的三角形网格。工件形状为矩形 $80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$,右上角的圆弧半径值为 $12\mu\text{m}$,此设定方式可以防止当金刚石磨粒刚开始与工件接触时由于接触面网格过度缠结而引起的计算错误^[9]。

工件网格划分为C3D8RT,即八节点热耦合的六面体网格。

在有限元仿真模型中,金刚石磨粒与工件之间的相对运动可以简化为水平直线运动,假定环境温度为21℃恒定温度。模拟多晶粒连续磨削工件的有限元模型如图1(b)所示,两个相邻磨粒之间在 z 轴方向上的距离为6 μm ,两个相邻晶粒之间在 x 轴方向上的距离为30 μm ,磨粒数为4,对两种磨粒方式仿真同时进行力和温度的历程输出和场输出。

1.2 材料属性

表1 材料基本属性

Tab. 1 Basic properties of materials

材料	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	硬度/ $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$	压痕强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	冲击强度/ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-2/3}$	线胀系数/ 10^{-6}C^{-1}
Si_3N_4	3150	1700~2700	3500	320	0.26	7	3.2
Diamond	3515	8600~11000	890~2500	105	0.2	—	1.1

1.3 相互作用定义

金刚石切削氮化硅陶瓷是典型的非线性接触问题,从开始的接触到后来的切入、切出,工件网格将发生变形、失效和成屑等物理现象,此时使用Abaqus/Explicit接触对算法中的Contact Pair算法可解决此类接触问题。在仿真模型中选择磨粒的侧面作为主接触面,工件上表面与左右表面为从接触面,主接触面与从接触面的相对滑移设置为有限滑移,采用罚函数接触摩擦模型,摩擦系数取0.4,相互作用包括法向行为、切向行为、传热与导热以及生热^[9]。单颗磨粒和多颗磨粒仿真均使用相同的加工参数,采用单因素实验。

2 磨削力的仿真与实验分析

在金刚石磨粒的磨削过程中,磨削力是重要的过程参量,影响磨削效率与材料去除等,最终影响工件表面质量以及金刚石磨粒的磨损。因此需对于不同磨削参数下(磨削速度、磨削深度、进给速度)的单颗/多颗磨粒的磨削力进行分析,探究其影响。而由于磨削过程中主要靠法向磨削力起作用,且法向磨削力要远大于切向磨削力^[16],因此以法向磨削力来表示总磨削力。

2.1 不同磨粒下的磨削力与磨削参数仿真

图2为单颗/多颗磨粒下磨削力与磨削速度的仿真曲线。可知,当磨削深度为12 μm ,进给速度为3.8 m/min时,随着磨削速度由35 m/s增加到55 m/s,单颗磨粒的磨削力由0.48 N减小到0.22 N,多颗磨粒的磨削力由1.96 N减小到0.78 N,单颗/多颗仿真磨削力均呈减小趋势,且多粒磨削力要大于单粒磨削力,最大差值为1.74 N。

图3为单颗/多颗磨粒下磨削力与磨削深度的仿

基于ABAQUS的仿真模型中,磨粒的材料为金刚石,工件的材料为氮化硅陶瓷,在材料属性定义中将表1的基本属性分别赋予磨粒和工件^[15]。

采用适用于硬脆材料的JH-2本构模型进行分析,本构参数的选择与设定参考文献^[15]。在脆性断裂本构模型中,如果一个网格单元的应变值达到破坏应变,则该网格单元将从整个模型中删除。这样可以更好模拟材料去除时的效果,并且单元删除功能可有效地避免材料在拉伸和挤压时出现的大变形问题。

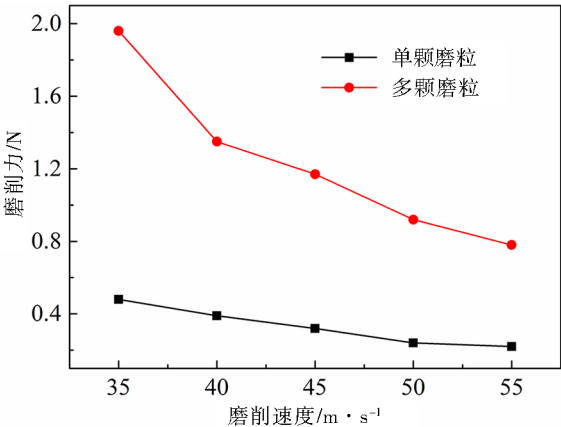


图2 不同磨粒下磨削力与磨削速度关系曲线
Fig. 2 Curves of grinding force and grinding speed under different abrasive grains

真曲线。可知,当磨削速度为42 m/s,进给速度为3.8 m/min时,随着磨削深度由5 μm 增加到25 μm ,单颗磨粒的磨削力由0.19 N增加到0.53 N,多颗磨粒的磨削力由0.74 N增加到2.12 N,单颗/多颗仿真磨削力均呈增大趋势,且多粒磨削力要大于单粒磨削力,最大差值为2.03 N。

图4为单颗/多颗磨粒下磨削力与进给速度的仿真曲线。可知,当磨削速度为42 m/s、磨削深度为12 μm 时,随进给速度由2 m/min增加到6 m/min,单颗磨粒的磨削力由0.44 N减小到0.21 N,多颗磨粒的磨削力由0.75 N增加到1.91 N,两者的磨削力变化趋势有所不同,单粒呈减小趋势,多粒呈增大趋势,但多粒的磨削力仍大于单粒,最大差值为1.70 N。

由仿真结果(图2~图4)可知,单颗/多颗磨粒磨削参数中对磨削力影响程度依次为磨削深度>磨削速度>进给速度。

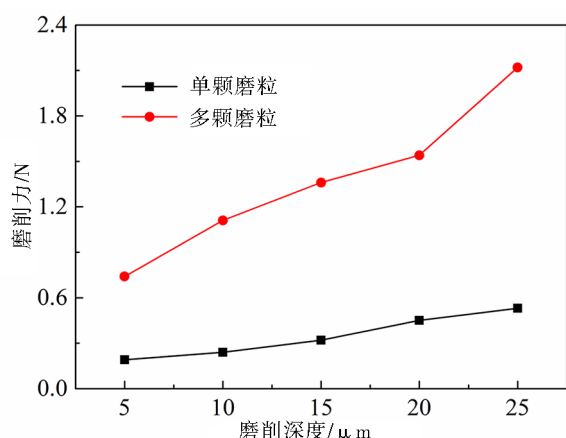


图3 不同磨粒下磨削力与磨削深度关系曲线

Fig. 3 Curves of grinding force and grinding depth under different abrasive grains

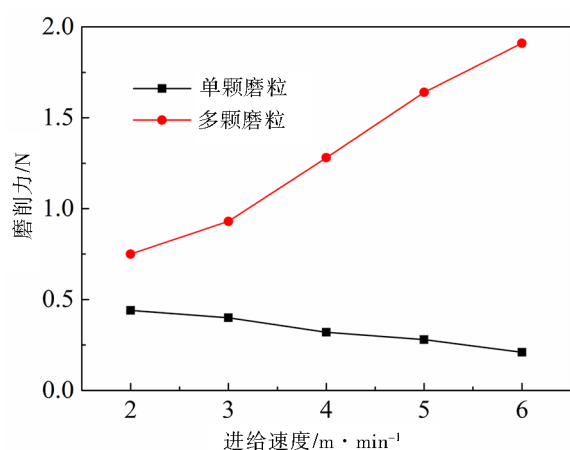


图4 不同磨粒下磨削力与进给速度关系曲线

Fig. 4 Curves of grinding force and feed speed under different abrasive grains

2.2 磨削力与磨削参数实验

磨削实验在德国斯来福临生产的BLOHM Orbit 36精密成型平面磨床上进行,砂轮为树脂结合剂金刚石砂轮(D91),试件选用热等静压氮化硅陶瓷块,磨削力由瑞士Kistler 9257B三向平面测力仪测得,实验设备及安装如图5所示,实验加工参数与仿真参数一致,依旧选用法向磨削力代替总的磨削力。

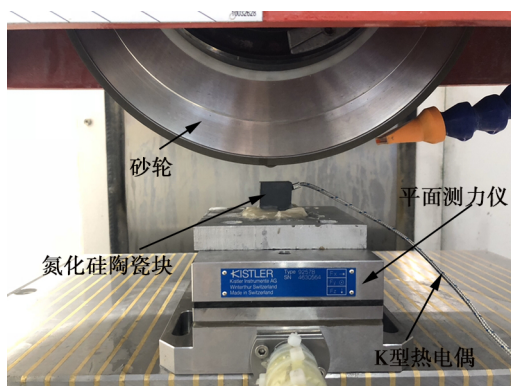
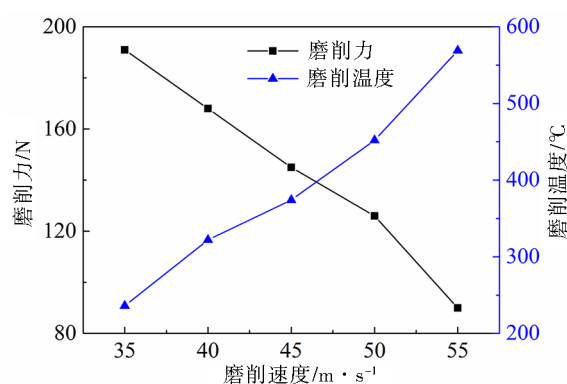


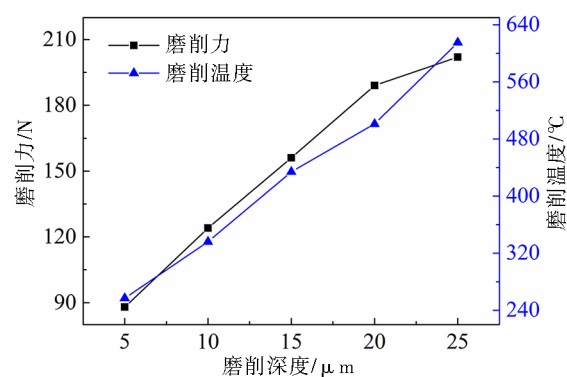
图5 磨削实验装置

Fig. 5 Experimental device for grinding

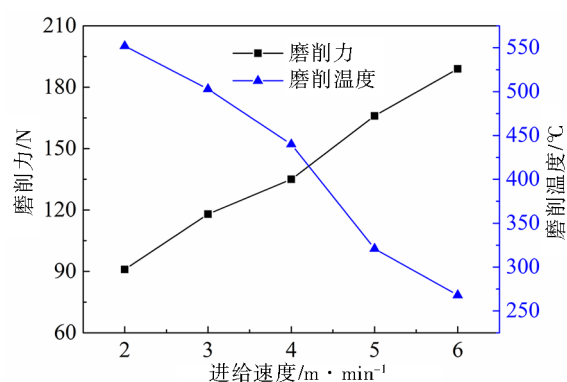
图6为不同磨削参数下的磨削力和磨削温度实验曲线,由图6(a)可知,随着磨削速度由35 m/s增加到55 m/s,磨削力由191 N减小到90 N;由6(b)可知,磨削深度由5 μm增加到25 μm,磨削力由88 N增加到202 N;由图6(c)可知,随着进给速度由2 m/min增加到6 m/min,磨削力由91 N增加到189 N。通过实验发现,磨削参数对磨削力的影响程度依次为磨削深度>磨削速度>进给速度。



(a) 不同磨削速度



(b) 不同磨削深度



(c) 不同进给速度

图6 不同磨削参数下的力和温度实验曲线

Fig. 6 Experimental curves of force and temperature under different grinding parameters

2.3 力的仿真与实验对比

由不同磨削速度下的单颗/多颗磨粒仿真(图2)和磨削实验[图6(a)]对比分析可知,随着磨削速度

的增加,磨削力均呈下降趋势。这是因为随着磨削速度的增加,参与磨削的磨粒实际切削厚度减小,降低了砂轮上每个磨粒的切削力,因此整体磨削力减小。此外,随着磨削速度的增加,磨削温度随之升高,在一定的高温下可增加氮化硅陶瓷材料的断裂韧性,增加了材料的延脆性转变的临界深度,使其塑性区比例增加,磨削力降低^[6]。

由不同磨削深度下的单颗/多颗磨粒仿真(图3)和磨削实验[图6(b)]对比分析可知,随着磨削深度的增加,磨削力均呈增大趋势。这是因为当磨削深度较小时,去除材料时的最大未变形切削厚度小于材料发生延脆性转变的临界切深,材料以塑性变形的方式去除,此时磨削力较小。当磨削深度增大时,最大未变形切屑厚度大于延脆性转变的临界切深,材料以脆性断裂的方式去除,同时随磨削深度增加,磨削接触弧长也随之增加,因此磨削力随着磨削深度的增加而增加。

由不同进给速度下的单颗/多颗磨粒仿真(图4)和磨削实验[图6(c)]对比分析可知,随着进给速度的增大,单颗磨粒的仿真磨削力呈减小趋势,而多颗磨粒仿真和实验均呈增大趋势,多颗磨粒仿真与实验的结果相符合。这是因为随着进给速度的增加,单位面积上参与磨削的有效磨粒数增多,去除方式由以塑性变形为主的去除方式向由脆性断裂的去除方式转变,因此磨削力增大。

而多颗磨粒比单颗磨粒在进给速度上更接近于实际情况是因为氮化硅陶瓷是一种典型的硬脆材料,当单个金刚石磨粒的进给速度增大时,磨削工件的时间相对缩短,在工件表面上产生裂纹扩展和脆性剥落的时间变短,单位时间内由破碎工件释放的能量减少,增强了材料塑性去除的比例,因此磨削力的值减小。当工件用多颗磨粒连续磨削时,随着进给速度的增加,通过工件表面的颗粒数在单位时间内变大,下一个磨粒的切削作用会促进工件裂纹扩展和脆性剥落,从而增加每个磨粒的平均作用力,因此砂轮的磨削力增大。

3 磨削温度的仿真与实验分析

在磨削加工中,磨削功率大且多数都以热的形式进行转化,导致磨削区极易产生高温,高的磨削区温度会对工件表面质量、加工精度产生影响,进而影响工件的使用寿命^[17]。因此对于不同磨削参数下(磨削速度、磨削深度、进给速度)的单颗/多颗磨粒的磨削温度进行分析。

3.1 不同磨粒下的磨削温度与磨削参数仿真

图7为单颗/多颗磨粒下磨削温度与磨削速度的仿真曲线。可知,当磨削深度为12 μm 、进给速度为3.8 m/min时,随着磨削速度由35 m/s增加到55 m/s,单颗磨粒仿真的磨削温度由23.5 $^{\circ}\text{C}$ 增加到28.4 $^{\circ}\text{C}$ 。多颗磨粒仿真的磨削温度由30.8 $^{\circ}\text{C}$ 增加到46.2 $^{\circ}\text{C}$,均随磨削速度增大呈增大趋势。多颗磨粒的磨削温度仿真值大于单颗磨粒的数值,最大差值为22.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

图8为单颗/多颗磨粒下磨削温度与磨削深度的仿真曲线。可知,当磨削速度为42 m/s,进给速度为3.8 m/min时,随着磨削深度由5 μm 增加到25 μm ,单颗磨粒的磨削温度由22.8 $^{\circ}\text{C}$ 增加到29.3 $^{\circ}\text{C}$ 。多颗磨粒的磨削温度由29.1 $^{\circ}\text{C}$ 增加到52.1 $^{\circ}\text{C}$,单粒与多粒仿真磨削温度均呈增大趋势,且多粒磨削温度要大于单粒磨削温度,最大差值为29.3 $^{\circ}\text{C}$ 。

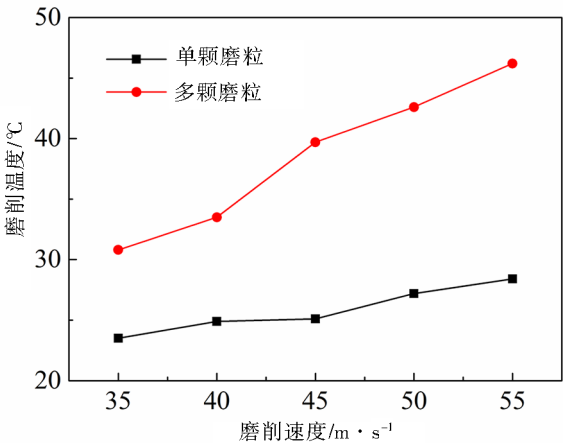


图7 不同磨粒下磨削温度与磨削速度关系曲线

Fig. 7 Curves of grinding temperature and grinding speed under different abrasive grains

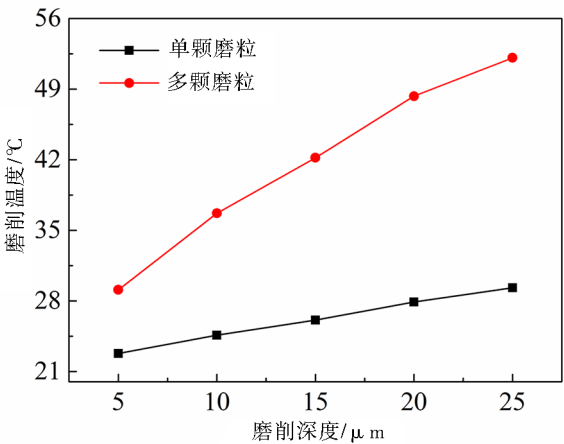


图8 不同磨粒下磨削温度与磨削深度关系曲线

Fig. 8 Curves of grinding temperature and grinding depth under different abrasive grains

图9为单颗/多颗磨粒下磨削温度与进给速度的仿真曲线。可知,当磨削速度为42 m/s,磨削深度为12 μm 时,随着进给速度由2 m/min增加到6 m/min,

单颗磨粒的磨削温度先由 24.3 °C 减小到 22.9 °C,后又增加到 27.2 °C;多颗磨粒的磨削温度由 45.5 °C 减小到 31.6 °C。两者的磨削温度变化趋势有所不同,单粒呈先减小后增大的趋势,而多粒呈减小趋势,但多粒的磨削温度仍大于单粒,最大差值为 22.6 °C。

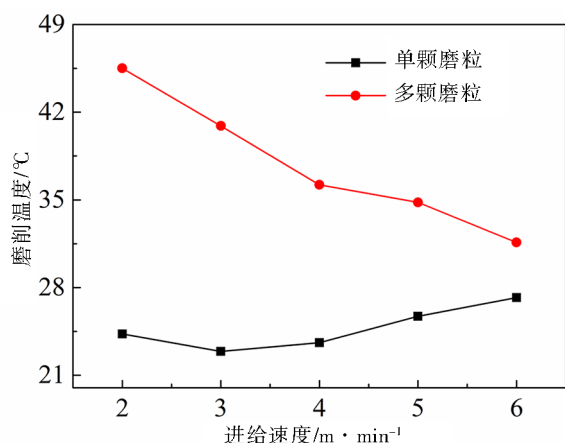


图9 不同磨粒下磨削温度与进给速度关系曲线

Fig. 9 Curves of grinding temperature and feed rate under different abrasive grains

由图7~图9仿真结果可知,单颗/多颗磨粒磨削参数对磨削温度影响程度依次为磨削深度>磨削速度>进给速度,这与磨削力与磨削参数影响关系一致。

3.2 磨削温度与磨削参数实验

磨削温度是通过接触式K型热电偶进行测量,将两个尺寸为 20 μm×20 μm×10 μm 的陶瓷块的 20 μm×20 μm 面精磨抛光后在中间放入已成节点的镍基-镍铜热电偶薄片(厚度 0.8 mm),通过导热性好和耐高温的云石胶固定 24 h 后进行装夹(图 5)。实验加工参数与仿真参数一致。

由图6不同磨削参数下的磨削力和磨削温度实验曲线可知,随着磨削速度由 35 m/s 增加到 55 m/s,磨削温度由 236 °C 增加到 569 °C[图 6(a)];磨削深度由 5 μm 增加到 25 μm,磨削温度由 257 °C 增加到 615 °C[图 6(b)];随着进给速度由 2 m/min 增加到 6 m/min,磨削温度由 552 °C 减小到 268 °C[图 6(c)]。通过实验发现,磨削参数中,对磨削温度的影响程度依次为磨削深度>磨削速度>进给速度。

3.3 温度的仿真与实验对比

由不同磨削速度下的单颗/多颗磨粒仿真(图7)和磨削实验[图 6(a)]对比分析可知,随着磨削速度的增加,磨削温度均呈上升趋势。这是因为随磨削速度增加,单位时间内参与磨削的有效磨粒数增多,磨削热流密度增大,使得磨削温度升高。另外,磨削速度的增加会在砂轮周围形成一层空气气障,阻碍磨削区与外界进行对流换热,因此磨削温度升高^[18]。

由不同磨削深度下的单颗/多颗磨粒仿真(图8)和磨削实验[图 6(b)]对比分析可知,随着磨削深度的增加,磨削温度均呈增大趋势。这是因为当磨削深度增加,磨削区砂轮与工件的接触弧长增大,进而作用路径增长,导致磨削区热流密度增加,因此磨削温度上升。

由不同进给速度下的单颗/多颗磨粒仿真(图9)和磨削实验[图 6(c)]对比分析可知,随着进给速度的增大,单颗磨粒的仿真磨削温度为先减小后增大,而多颗磨粒仿真和实验均呈减小趋势,多颗磨粒仿真与实验的结果相符合。出现此现象的原因是随着进给速度的增加,单位面积上参与磨削的有效磨粒数增加,并且金刚石砂轮的导热性要优于陶瓷,在较短的热源作用时间里大部分热被传入砂轮中,因此磨削温度降低^[18]。

单颗/多颗磨粒相比在进给速度出现差异的原因是当进给速度增大,单位面积上参与磨削的有效磨粒数增多,较短的作用时间内热量被传入磨粒中,因此温度降低。单颗磨粒热量传入显然没多颗磨粒的多,但也传入一部分,因此其仿真时温度先减小后随着进给速度继续增大,使得磨削能和热量分配比增加明显^[16],大量的热量只通过一颗磨粒传入,很大部分热量聚集在磨削表面,导致磨削温度升高,因此单颗磨粒仿真时磨削温度先减小后增大。本研究为了实验现象明显在多颗磨粒仿真时使用4颗磨粒,而通过试验发现,取二、三颗磨粒时的结果与4颗磨粒在趋势上相同,只不过数值大小有所不同。

4 仿真与实验表面形貌

由仿真与实验对比结果可以看出单颗/多颗磨粒在磨削速度和磨削深度方面变化一致,在进给速度方面变化不同,为了进一步验证多颗磨粒更符合实际加工情况,对在不同进给速度下(磨削速度和磨削深度不变)的仿真与实验后工件表面情况进行研究,多颗磨粒仿真下随工件进给速度增大后的表面形貌见图10,随着进给速度的增大,表面形貌呈变差趋势,表面网格破碎逐渐增多,由表面大面积光滑向表面多数凹坑变化。

通过对工件表面进行扫面电镜(日立 S-4800 冷场发射电子扫描显微镜)观测不同进给速度下磨削加工后工件表面形貌(图11)。可见随着进给速度的增加,实际磨削加工后工件表面由光滑的塑性流动向脆性的剥落转变,即塑性去除向脆性去除转变,表面形貌变差,这与多颗磨粒磨削仿真时的工件表面形貌相符,因此基于多颗磨粒磨削氮化硅陶瓷仿真模型更能接近实际砂轮加工情况。

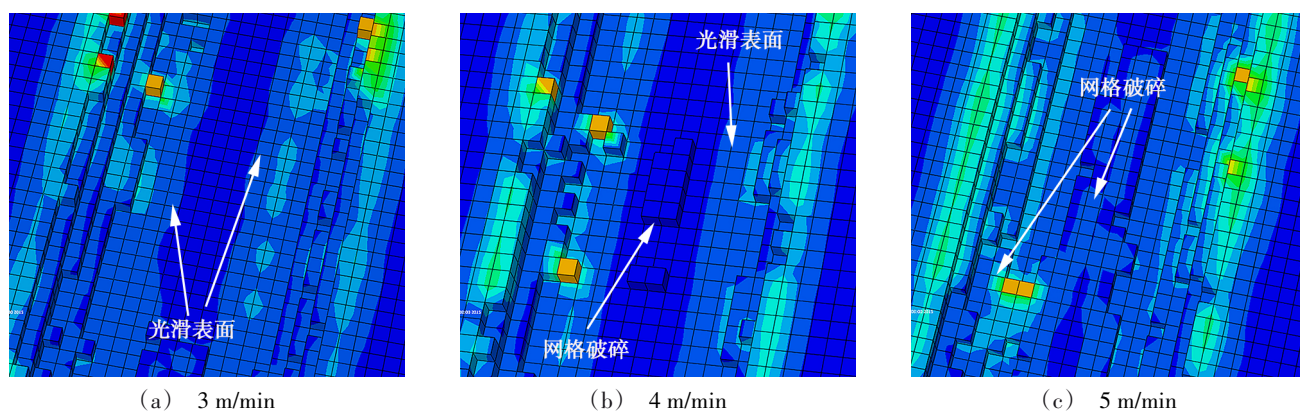


图10 多颗磨粒时不同进给速度下工件仿真形貌

Fig. 10 Simulation of workpiece topography under different feed rates with multiple abrasive particles

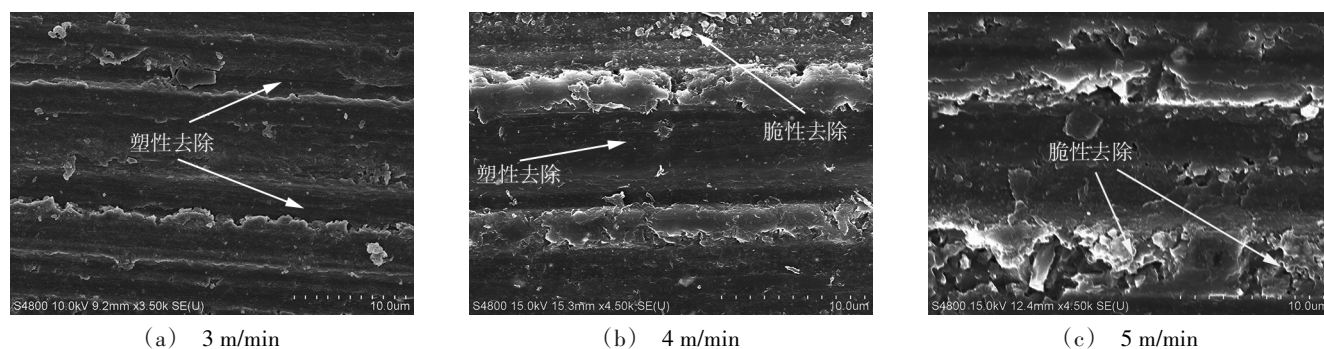


图11 不同进给速度下工件表面形貌

Fig. 11 Surface topography of workpiece at different feed speeds

5 结论

本研究提出一种基于多颗磨粒磨削氮化硅陶瓷工件的有限元模型以模拟实际加工情况,通过对比单颗磨粒磨削仿真模型,取得主要结论如下。

(1) 基于单颗/多颗磨粒的有限元仿真与磨削实验对比:磨削力随磨削速度的增加而减小,随磨削深度的增加而增大;磨削温度随磨削速度和磨削深度的增大而升高。

(2) 基于单颗磨粒的有限元仿真中:磨削力随进给速度的增加而减小;磨削温度随进给速度的增大先减小后增大。基于多颗磨粒的有限元仿真与实验中,随着进给速度增加,磨削力增大、磨削温度减小;表面形貌随进给速度的增加由塑性变形向脆性断裂转变。

(3) 基于多颗磨粒的有限元仿真磨削力和磨削温度大于单颗磨粒有限元仿真的磨削力和磨削温度;基于多颗磨粒模型的磨削力、磨削温度及表面形貌仿真均与实验结果相符,表明该模型相对于单颗磨粒更能符合实际加工情况。

参考文献

[1] 龚琪, 沈景凤, 谢建林. 工程陶瓷材料的加工技术及应用进展研究[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(7): 1898-1905.

GONG Qi, SHENG Jingfeng, XIE Jianlin. Research progress on processing technology and application of engineering ceramic materials [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(7): 1898-1905.

[2] 吴玉厚, 王浩, 孙健, 等. 氮化硅陶瓷磨削表面质量的建模与预测[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 281-289.

WU Yuhou, WANG Hao, SUN Jian, et al. Modeling and prediction of surface quality of silicon nitride ceramic grinding [J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 281-289.

[3] LI Xuekun, YAN Lan, RASHID W, et al. Research on microscopic grain-workpiece interaction in grinding through micro-cutting simulation, part 1: mechanism study [J]. Advanced Materials Research, 2009, 76-78: 9-14.

[4] SANTOS S, PARENTE M P L, AGUIAR V A, et al. A simulation study of the effect of some parameters in thermal analysis of creep feed grinding [J]. International Journal of Material Forming, 2010, 1(3): 911-914.

[5] 万林林, 刘志坚, 邓朝晖, 等. 工程陶瓷磨削损伤建模与数值模拟研究进展[J]. 兵器材料科学与工程. 2016, 39(4): 117-124.

WAN Linlin, LIU Zhijian, DENG Zhaohui, et al. Research progress in modeling and numerical simulation for grinding damage of engineering ceramics [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(4): 117-124.

[6] 吴玉厚, 王浩, 孙健, 等. 氮化硅陶瓷干湿磨削温度宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第6期

与表面质量研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 124-128.

WU Yuhou, WANG Hao, SUN Jian, et al. Study on temperature characteristics and surface quality of Si_3N_4 ceramics under dry and wet grinding [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019, 15(4): 124-128.

[7] 刘伟, 刘仁通, 邓朝晖, 等. 单颗磨粒磨削仿真研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 1-8.

LIU Wei, LIU Rentong, DENG Zhaohui, et al. Research progress no single abrasive grain grinding simulation [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 1-8.

[8] GUO Xiaoguang, GOU Youjun, DONG Zhigang, et al. Study on subsurface layer of nano-cutting single crystal tungsten in different crystal orientations [J]. Applied Surface Science, 2020, 526: 1-10.

[9] SUN Jian, WU Yuhou, ZHOU Peng, et al. The effect of grinding parameters on grinding performance and cracks extending mechanism of Si_3N_4 ceramic based on diamond grains [J]. Revista Romana De Materiale-Romanian Journal of Materials, 2018, 48(2): 198-203.

[10] ZHOU Yunguang, MA Lianjie, GONG Yadong, et al. Study on force and temperature characteristics of micro-grinding nickel-based single-crystal superalloy [J]. Journal of the Brazilian of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41: 93-210.

[11] HARRER W, DANZER R, MORRELL R. Influence of surface defects on the biaxial strength of a silicon nitride ceramic-Increase of strength by crack healing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32: 27-35.

[12] 程强, 梁国星, 郝建宇, 等. 高速磨削 Inconel718 单颗 PCBN 磨粒磨损研究[J]. 机电工程, 2020, 37(10): 1225-1230.

CHENG Qiang, LIANG Guoxing, HAO Jianyu, et al. Wear study of single PCBN abrasive in high speed grinding Inconel718

[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(10): 1225-1230.

[13] CAO Xiaoyan, LIN Bin, ZHANG Xiaofeng. A study on grinding surface waviness of woven ceramic matrix composites [J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 503-512.

[14] 吴玉厚, 王浩, 李颂华, 等. 工程陶瓷表面磨削温度研究现状与进展[J]. 兵器材料科学与工程 2019, 42(5): 134-142.

WU Yuhou, WANG Hao, LI Songhua, et al. Research status and progress of surface grinding temperature of engineering ceramics [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(5): 134-142.

[15] 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.

LIU Wei. Simulation and experiment study of the precision grinding of silicon nitride ceramic based on single grain cutting [D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[16] 吴玉厚, 王浩, 李颂华, 等. HIPS陶瓷磨削力与温度的实验研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(8): 1527-1533.

WU Yuhou, WANG Hao, LI Songhua, et al. Experimental study on grinding force and temperature of HIPS ceramic [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(8): 1527-1533.

[17] 王浩. 氮化硅陶瓷磨削热特性与表面质量研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.

WANG Hao. Study on grinding thermal characteristics and surface quality of silicon nitride ceramics [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.

[18] 吴玉厚, 王浩, 李颂华, 等. 氮化硅陶瓷磨削热特性与表面成形机制[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 360-368.

WU Yuhou, WANG Hao, LI Songhua, et al. Grinding thermal characteristics and surface forming mechanism of silicon nitride ceramics [J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 360-368.