

基于多颗磨粒随机分布的虚拟砂轮建模及磨削力预测

张祥雷, 姚斌^{*}, 冯伟, 沈志煌

厦门大学 物理与机电工程学院, 厦门 361005

摘要: 利用 VHX-600E 型超景深显微镜测量了金刚石砂轮表面的磨粒分布情况, 计算得到了砂轮表面的磨粒密度、真实接触弧长以及砂轮总的磨粒数和有效磨粒数。基于磨粒间隔分布假设和虚拟格子方法在虚拟砂轮端面随机分布等磨粒密度的多颗正六面体磨粒, 并随机分配磨粒的位姿以模拟砂轮的真正形貌。将 1/4 虚拟砂轮模型导入 Deform-3D 软件中, 建立三维虚拟磨削仿真模型, 采用 Lagrangian Incremental 算法获得多颗磨粒的仿真磨削力值, 并建立了基于多颗磨粒磨削仿真的磨削力预测模型。通过金刚石砂轮端面磨削硬质合金刀片的实验, 比较了实测磨削力与预测磨削力; 仿真与实验结果具有一致性, 证明了采用本方法建立的多颗磨粒虚拟磨削仿真模型可以用于磨削力预测, 为多颗磨粒共同磨削的磨削力研究提供了新的思路。

关键词: 多颗磨粒; 随机分布; 砂轮; 磨削力; 端面磨削

中图分类号: V261.2⁺5; TG580.1⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2014)12-3489-10

硬质合金刀具在航空航天制造业的切削加工中扮演着重要角色, 硬质合金刀具的使用性能与其磨削制造工艺紧密相关。利用金刚石砂轮进行磨削是加工硬质合金最主要的工艺方法。磨削过程究其本质是大量离散分布在砂轮表面的磨粒完成的滑擦、耕犁、切削作用的综合效果, 物理、力学现象产生机理复杂^[1-2]。对于磨削加工机理的研究, 一方面可以将其复杂的磨削过程简化为单颗磨粒磨削, 这样就可以排除其他磨粒的影响, 研究单颗磨粒的磨削行为, 深入探讨磨削机理; 另一方面是将磨削过程视为磨具表面大量排列参差不齐、分布不规则且形状各异的磨粒共同完成的磨削过程。

由于磨粒数量多、几何形状不规则、磨削速度高、磨削深度小且不一致等原因, 实验观察和分析

磨削过程十分困难。因此, 国内外多数学者从单颗磨粒切削入手, 研究其切削机理^[3-4], 构建了单颗磨粒滑擦实验的有限元模型, 并对单颗磨粒进行有限元仿真分析。宿崇^[5-6]和段念^[7]等结合有限元法(Finite Element Method, FEM)与光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)耦合方法进行了单颗磨粒的微观力学仿真。言兰等^[8]基于 AdvantEdge 软件仿真了不同工艺参数下单颗磨粒的切削过程, 分析了切削速度和切削深度对临界切削深度、切削力(比)、切削温度及材料去除率的影响。程泽等^[9]采用有限元模拟技术对钛合金 TC4 材料的单颗磨粒磨屑成形过程进行了仿真研究。以上研究以单颗磨粒磨削为主, 没有考虑多颗磨粒共同磨削时复杂的相互作用关系。在多颗磨粒磨削的研究中, Chen

收稿日期: 2014-02-26; 退修日期: 2014-03-28; 录用日期: 2014-04-18; 网络出版时间: 2014-04-22 08:19

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20140422.0819.001.html

基金项目: 厦门市科技计划项目(3502Z20131007)

* 通讯作者. Tel.: 0592-2186923 E-mail: yaobin@xmu.edu.cn

引用格式: Zhang X L, Yao B, Feng W, et al. Modeling of virtual grinding wheel based on random distribution of multi abrasive grains and prediction of grinding force[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3489-3498. 张祥雷, 姚斌, 冯伟, 等. 基于多颗磨粒随机分布的虚拟砂轮建模及磨削力预测[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3489-3498.

和 Rowe^[10] 提出用统一直径的圆形磨粒随机分布的方法建立了 2D 砂轮模型, Hegeman^[11] 采用椭圆形磨粒建立了 3D 砂轮模型。Warnecke 和 Barth^[12] 提出可以将砂轮和工件统一到同一有限元模型中进行仿真, 研究砂轮振动对材料去除的影响。宿崇等^[13-14] 采用虚拟现实技术, 建立虚拟砂轮的仿真物理模型以及磨粒与工件接触的数学模型, 以平面磨削为例分析了影响工件表面粗糙度的因素。以上研究构建的多颗磨粒虚拟砂轮未考虑微观的力学现象。

本文在研究单颗磨粒端面磨削力的理论模型和金刚石砂轮表面磨粒分布情况的基础上, 建立了多颗磨粒位置与姿态都随机分布的虚拟砂轮, 并将其 1/4 模型导入 Deform-3D 软件中建立三维磨削仿真模型, 从而建立了基于多颗磨粒仿真的磨削力数学模型以预测磨削力, 并通过金刚石砂轮端面磨削硬质合金刀片的实验验证与仿真结果的一致性。

1 磨削力的理论模型

磨削力是砂轮端面磨削工件时由于砂轮的磨粒和工件材料接触而产生的物理现象, 它一般存在相互垂直的 3 个分力, 即沿砂轮切向的切向磨削力 F_t , 沿砂轮径向的法向磨削力 F_n , 以及沿砂轮轴向的轴向磨削力 F_a 。由于砂轮表面上的磨粒具有较大的负前角, 使 $F_n > F_t$, 而 F_a 较小, 一般忽略不计^[15]。在磨削研究中, 通常将砂轮表面的磨粒形状理想化, 如 Barge 等^[16] 将磨粒简化为棱形, Gong 等^[17] 将磨粒简化为球形, 而更多的则是将磨粒简化为尖端带有圆球半径的圆锥形^[18-19] 或平顶圆锥形。从磨粒切削刃的锋锐性考虑, 棱锥形和尖端带有圆球半径的圆锥形更接近于实际磨粒形状, 锋锐性较好; 而平顶圆锥形则更接近于磨损后的磨粒形状, 锋锐性差。单颗粒的磨削力模型如图 1 所示, 磨削力公式为^[1]

$$\begin{cases} F_t = kp \frac{v\Delta h}{V} + \mu F_n \\ F_n = kp \frac{\pi v\Delta h}{V} \tan \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为未变形切屑断面面积系数; p 为接触面压力; v 为工件速度; Δ 为砂轮径向切入量; h 为磨削宽度; μ 为摩擦系数; V 为砂轮线速度; α 为磨粒切削刃前端顶角的一半。由式(1)可以看出, 磨削

力与单位时间内的体积磨削量(磨削去除效率)成正比, 与砂轮线速度 V 成反比。

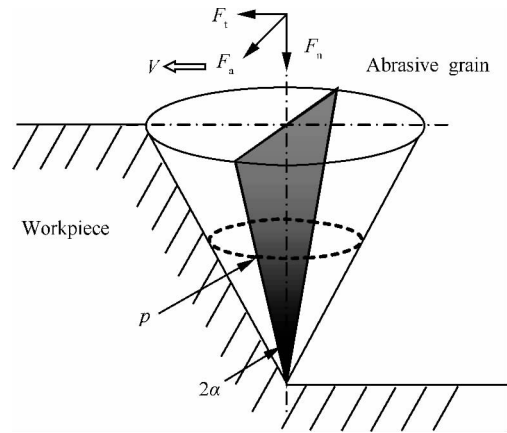


图 1 砂轮磨粒切削刃的磨削模型

Fig. 1 Grinding model of cutting edge of grinding wheel abrasive grain

2 多颗粒随机分布的虚拟砂轮

2.1 磨粒密度的测量

采用 VHX-600E 型超景深显微镜测量了 230# ~ 270# 金刚石砂轮的端面形貌, 取砂轮 4 个不同区域拍摄照片, 如图 2 所示, 每个图片选取 4 个面积为 1 mm^2 的正方形, 以 1、2、3、4 进行编号, 并统计每个区域内 4 个正方形里的磨粒个数, 4 个区域放大 500 倍后的照片如图 3 所示, 统计结果如表 1 所示。

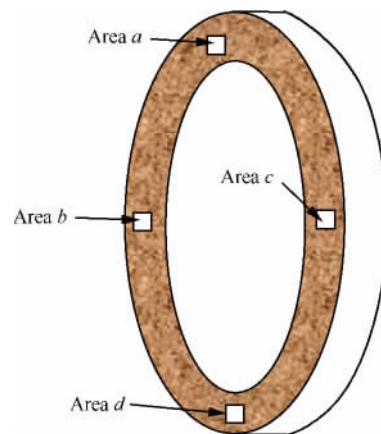


图 2 金刚石砂轮端面的 4 个测量区域

Fig. 2 Four measurement sketch areas of diamond grinding wheel face

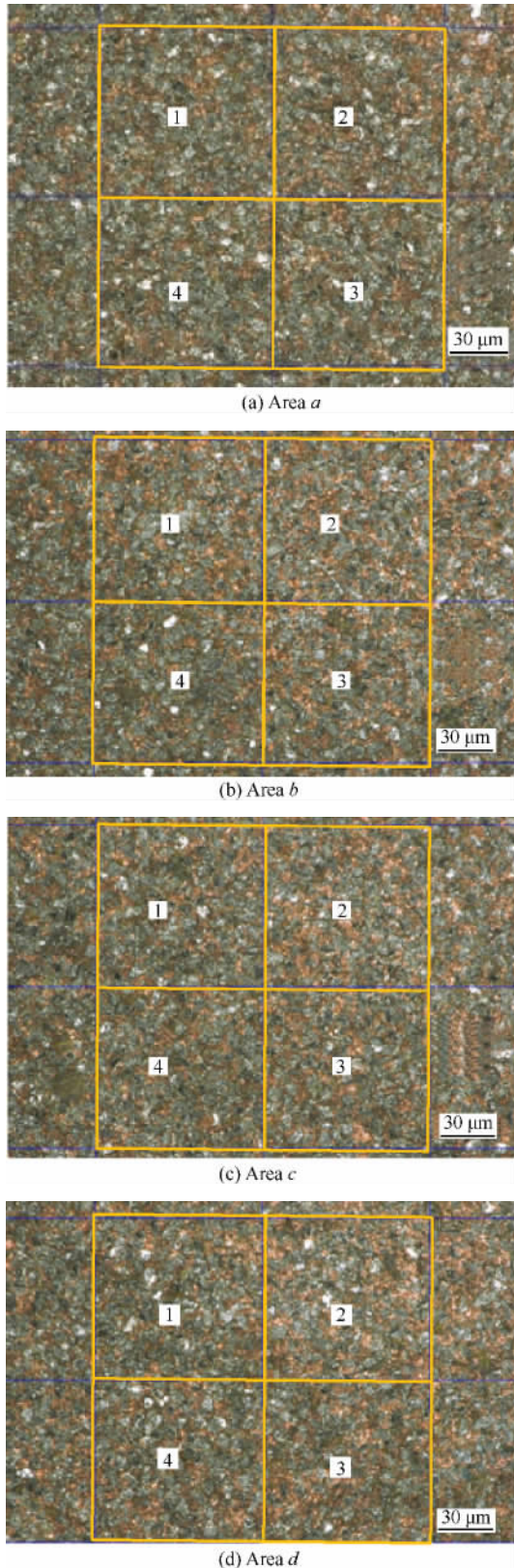


图3 金刚石砂轮显微放大图像
Fig. 3 Microscopic magnification image of diamond grinding wheel

表1 金刚石砂轮表面磨粒个数

Table 1 Abrasive grains number in diamond grinding wheel surface

Image area	Abrasive grains number				Average value
	1	2	3	4	
<i>a</i>	140	120	136	128	131
<i>b</i>	123	110	138	125	124
<i>c</i>	135	117	121	129	125.5
<i>d</i>	137	112	123	134	126.5

表1记录了图3金刚石砂轮显微放大图像各图片中每平方毫米砂轮磨粒的个数。取其平均数,计算得磨粒密度为 127 mm^{-2} 。

2.2 磨粒的平均间距

根据磨粒密度可以估算出磨粒平均间距。假设9颗磨粒在一个正方形面上均匀分布,如图4所示,正方形边长为 l ,则在 $l \times l$ 面积上的等效磨粒数为4,根据磨粒密度就可以计算出磨粒的平均间距。对于230#~270#的金刚石砂轮,其表面磨粒平均间距为0.089 mm。

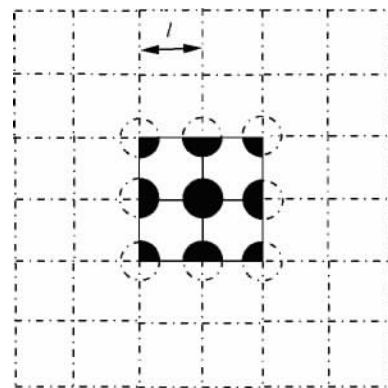


图4 磨粒平均间隔示意图

Fig. 4 Sketch diagram of abrasive grain average interval

2.3 虚拟砂轮的建立

2.3.1 虚拟砂轮磨粒的随机分布

在实际砂轮表面上,磨粒的分布是随机的,突出高度也各不相同。因此,在建立虚拟砂轮模型时必须考虑到磨粒随机分布的特性。从宏观上

看,金刚石砂轮磨粒形状近似于不规则的多面体,但采用多面体磨粒结构在后续仿真中存在较大的困难,而多面体是由正六面体做多次切割后形成的。故本文采用正六面体结构作为磨粒的基本形态,磨粒的位置用其中心坐标表示,通过调节磨粒的中心坐标值控制磨粒在结合剂中的分布,并通过磨粒绕其中心随机旋转来改变其姿态,实现位姿的随机。

在砂轮建模时为避免磨粒之间发生重叠,采用了虚拟格子方法,即将每一个磨粒约束在一个假想存在的格子中,每个磨粒在格子中的位置都通过随机变换坐标来控制。这样既避免了磨粒之间发生重叠,又符合磨粒随机分布的特性。

磨粒随机位置分布示意图如图 5 所示,虚拟格子的尺寸 A 由砂轮的磨粒密度来决定, D 值为磨粒粒径的大小,磨粒的位置坐标在每格 $l \times l$ 的小正方形内随机分布。

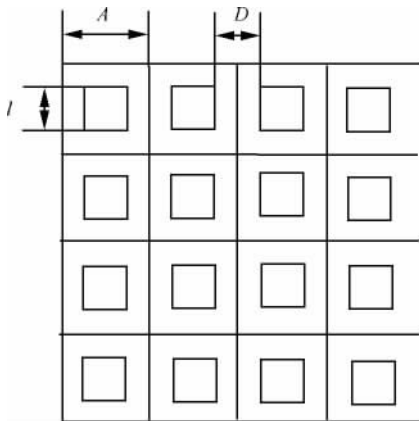


图 5 磨粒随机位置分布示意图

Fig 5 Abrasive grain of random position distribution diagram

2.3.2 建立过程

砂轮表面层地貌主要由结合剂和磨粒 2 部分组成。在磨削过程中,结合剂把持着磨粒,使磨粒磨削工件,却并不与工件表面接触。为了便于磨削仿真研究,在磨削过程的仿真中,只需考虑磨粒与工件的干涉过程。通常在建立虚拟砂轮模型时,将结合剂的形状简化。本文将磨粒随机分布在结构简化了的长方体结合剂上,建立了砂轮结构模型。

取金刚石砂轮表面上的区域作为虚拟砂轮的

原型,其中金刚石砂轮磨粒的粒度为 230 # ~ 270 #,磨粒密度为前面测得的 127 mm^{-2} ,公称尺寸在 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 范围内。建模时取六面体边长为 $50 \mu\text{m}$ 。结合剂选树脂结合剂,其形状被简化为长方体。拟在长方体结合剂内随机分布 $4 \times 4 \times 1$ 的虚拟磨粒来建立虚拟砂轮结构模型。具体的实现步骤如下:

步骤 1 位置和姿态随机数的生成。基于 VB 编程语言中的 Rnd 随机函数,在 $4 \times 4 \times 1$ 的虚拟格子中,分别生成磨粒的随机位置坐标(如图 6 所示)和随机姿态角度。

步骤 2 在 CAD 软件中,基于 AUTOLISP 语言,导入步骤 1 生成的随机位置坐标,生成磨粒并实现位置的随机分布;再导入随机姿态角度,实现磨粒姿态的随机分布。

步骤 3 结合剂与磨粒的结合。首先,建立长方体结合剂模型,然后,将磨粒与结合剂粘结在一起而生成虚拟砂轮整体模型。图 7 所示为虚拟

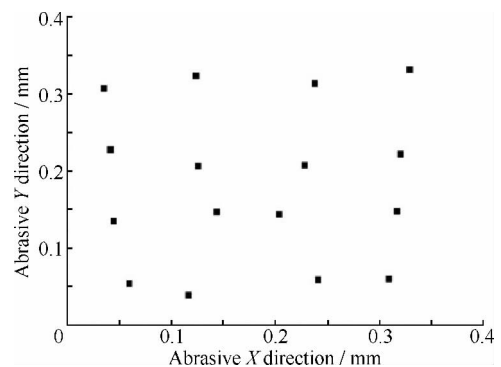


图 6 磨粒坐标的随机分布

Fig 6 Random distribution of abrasive grain coordinates

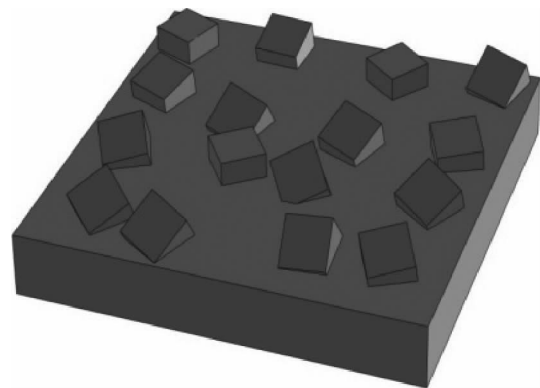


图 7 虚拟砂轮的三维视图

Fig 7 3D view of virtual grinding wheel

砂轮结构模型图,可以看出,位于虚拟砂轮表面的磨粒分布是随机的。因此,所建立的虚拟砂轮模型与实际砂轮具有相似的结构特性。

3 磨削力的预测

3.1 虚拟砂轮与工件的有限元模型

为了便于带有多颗磨粒的虚拟砂轮磨削仿真的有效进行,减少计算量,本研究只选取了虚拟砂轮的 1/4 作为仿真对象。因为砂轮上的磨粒采用随机分布原则,故生成的 1/4 模型同样不改变砂轮的建模本质。将生成的虚拟砂轮的 1/4 模型导入 Deform-3D 软件中,硬质合金工件则在软件的前处理器中直接生成。图 8 为虚拟砂轮与工件的有限元磨削模型。

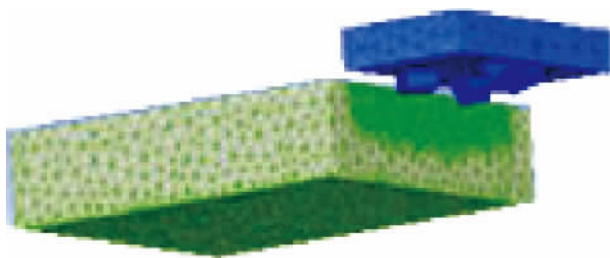


图 8 虚拟砂轮与工件的有限元磨削模型

Fig 8 FEM grinding model of virtual grinding wheel and workpiece

3.2 虚拟砂轮与工件的网格划分

本次仿真选用四节点四面体单元,分别对虚拟砂轮与工件的磨削区域进行局部网格划分,如图 8 所示。切屑分离采用了自适应网格重划分技术,通过 Lagrange 方法来模拟切屑的变形。

3.3 磨削力的预测

磨削力的预测思路是通过计算 1/4 虚拟砂轮磨削工件的有限元模型获得磨削力值,结合砂轮实际的有效磨粒数计算出磨削力的预测值。

3.3.1 砂轮与工件的真实接触面积

真实接触弧长 L_c 是指考虑真实磨削条件下

真实磨削弧的长度。对于树脂结合剂砂轮,真实接触弧长是理论接触弧长 L_g 的 2.5 倍^[20]。磨削时砂轮与工件间的实际接触长度与实际的磨削深度、砂轮的弹性变形和表面形貌有关。此外,与磨削力、磨削温度等参数也有关系。上述因素的影响导致实际接触长度和几何接触长度之间存在较大差异。砂轮与工件的接触面积 S 可以近似地等于砂轮与工件的真实接触长度 L_c 与工件磨削宽度 b_w 的乘积(真实接触长度 L_c 的具体计算可参考文献[21]),即

$$S = L_c b_w \quad (2)$$

3.3.2 实际参与磨削的有效磨粒数计算

磨粒数是接触面积 S 与磨粒密度的乘积。磨粒在砂轮工作表面上的分布是不均匀的,且高低参差不齐。其中,出刃高度相对较小的磨粒不会参与磨削作用,因此实际参与磨削工作的磨粒数将少于砂轮工件磨削接触区域的磨粒数。研究表明,砂轮表面磨粒出刃高度较大的磨粒在磨削过程中会直接脱落,实际参与磨削作用的有效磨粒数占砂轮表面磨粒的 6%~20%^[22-25]。根据文献[23]的研究结果,实际参与磨削的颗粒在 10% 左右,本文计算时取 8%。根据测得的磨粒密度,对不同磨削工艺参数下的磨削区域磨粒数进行计算。

3.3.3 磨削力预测结果

基于建立的多颗磨粒虚拟砂轮磨削仿真模型,进行正交有限元仿真,提取有限元仿真中多颗磨粒的磨削力结果,除以磨削仿真模型中的磨粒数即可获得单颗磨粒的平均磨削力,对照有效磨粒个数,预测出各磨削条件下的磨削力。对应的磨削力预测模型为

$$\begin{cases} F_t = \frac{1}{4} N F_{ft} \\ F_n = \frac{1}{4} N F_{fn} \end{cases} \quad (3)$$

式中: N 为有效磨粒个数; F_{fn} 为仿真获得的法向磨削力; F_{ft} 为仿真获得的切向磨削力。以法向磨削力为例,其预测结果如表 2 所示。

表 2 磨削力模型的预测值

Table 2 Prediction values of grinding force

Test No	Δ/mm	$h/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$V/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	F_{in}/N	N	F_n/N
1	0.02	100	1 500	2.4	45	27
2	0.02	300	2 000	2.9	44	31.9
3	0.02	500	2 500	2.3	44	25.3
4	0.04	300	1 500	3.8	45	42.8
5	0.04	500	2 000	4.3	44	47.3
6	0.04	100	2 500	3.5	44	38.5
7	0.06	500	1 500	5.6	45	63
8	0.06	100	2 000	6.0	44	66
9	0.06	300	2 500	5.3	44	58.3

4 磨削实测与分析

4.1 磨削力测试

磨削力测试在五轴联动可转位刀片周边磨床 2MZK7150 上进行, 砂轮磨粒材料为金刚石, 工件材质为硬质合金。砂轮轴沿机床 X 轴负方向进给, 机床 Y 轴以 1 Hz 频率往复摆动; 磨削力通过 9272 型 KISTLER 测力仪进行测量, 实验中添加冷却液。磨削力实验现场如图 9 所示。

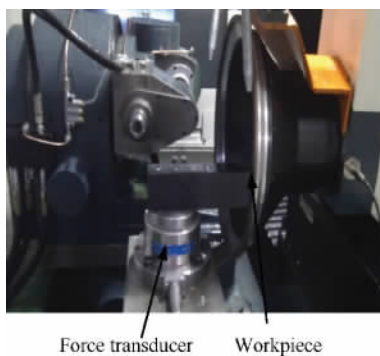


图 9 磨削力测量的现场实验图

Fig. 9 Grinding force measuring field experiment chart

图 10 为砂轮转速为 2 000 r/min、砂轮进给速度为 300 mm/min、磨削深度为 0.02 mm 时的法向磨削力实测数据曲线。

4.2 实验结果的比较

基于多颗磨粒磨削力的研究, 考虑磨削深度

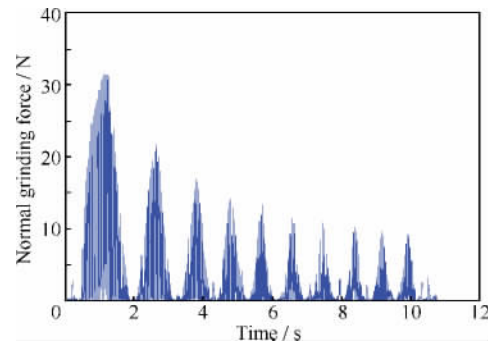


图 10 法向磨削力实测数据

Fig. 10 Measurements data of normal grinding force

(A)、砂轮进给速度(B)和主轴转速(C)3 个因素对磨削力的影响, 每个因素设计 3 个水平, 如表 3 所示, 选用 $L_9(3^3)$ 的正交实验方案, 如表 4 所示。对正交表中的 9 组实验方案进行实验, 实测的磨削力值与理论预测的磨削力进行比较, 结果如图 11 所示。

表 3 因素水平表

Table 3 Table of factor levels

Factor level	Grinding depth/ mm	Grinding wheel feed speed/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	Spindle speed/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
	A	B	C
1	0.02	100	1 500
2	0.04	300	2 000
3	0.06	500	2 500

表 4 $L_9(3^3)$ 正交实验表Table 4 Orthogonal experiment table of $L_9(3^3)$

Test No.	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	2	1
5	2	3	2
6	2	1	3
7	3	3	1
8	3	1	2
9	3	2	3

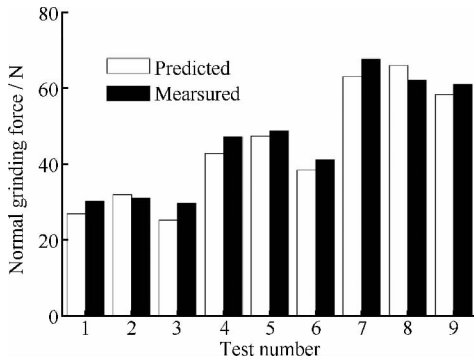


图 11 磨削力预测值与磨削实验值对比

Fig. 11 Contrast of predicted values and experimental values

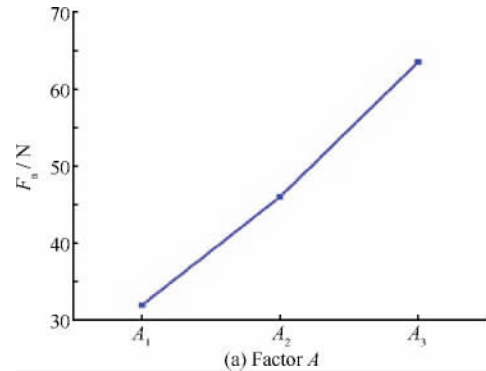
从图 11 中可以看出,基于多颗磨粒磨削研究的磨削力预测方法具有很好的准确性,误差基本控制在 10% 以内。

4.3 正交实验磨削力的测量结果及分析

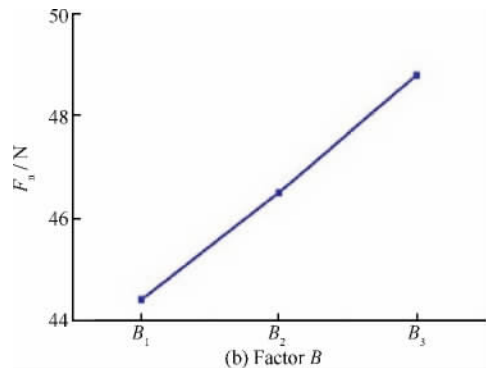
根据正交实验表 4 和图 11 的测试结果,对正交实验采用极差法分析,得到影响磨削力的因素主次顺序为 $A-C-B$,因素 A (磨削深度)影响最大,为主要因素,与文献[2]结论一致。以各因素水平为横坐标,实验指标的平均值为纵坐标,绘制因素与指标的趋势图(见图 12)。由因素与指标趋势图可以更直观地看出实验指标随着因素水平的变化而变化的趋势。

根据图 12 和极差法分析,得出磨削力最小的最优组合为 $A_1B_1C_3$,即选取 0.02 mm 的磨削深度; 100 mm/min 的砂轮进给速度; 2 500 r/min 的主轴

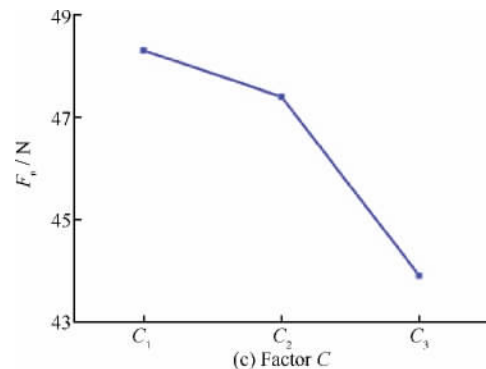
转速为最优组合。在这样的最优组合下,将达到最好的磨削质量,但是在实际加工中,为了提高磨削效率,往往还要增大磨削深度和砂轮进给速度。



(a) Factor A



(b) Factor B



(c) Factor C

图 12 法向磨削力随各单因素的变化趋势

Fig. 12 Normal grinding force with the change trend of each single factor

5 结 论

1) 基于单颗磨粒的磨削力模型,提出了多颗磨粒虚拟砂轮磨削工件的磨削力有限元模型与磨削力预测模型,结合金刚石砂轮磨削的有效磨粒数预测了实际的磨削力。

2) 针对 230 # ~ 270 # 金刚石砂轮, 采用 VHX-600E 型超景深显微镜测量了砂轮的表面形貌, 取平均数得到磨粒密度, 根据磨粒密度估算出磨粒的平均间距。采用正六面体结构作为磨粒的基本形态, 基于虚拟格子方法使每颗磨粒在格子中的位置都通过随机变换坐标来控制, 并用随机函数改变磨粒的姿态角度, 实现了磨粒突出砂轮基体部分的位置与姿态的随机性特点。

3) 针对金刚石砂轮磨削硬质合金工件, 构建了多颗磨粒随机分布的虚拟砂轮端面磨削的三维动态仿真模型, 并建立了基于多颗磨粒磨削仿真的磨削力预测模型; 更真实地反映了磨削的物理与力学现象以及磨粒间的共同切削作用, 磨削力预测值与磨削力实验值误差在 10% 以内, 说明了模型预测的可行性。

4) 基于多颗磨粒磨削力的研究, 分析了主轴转速、进给速度和磨削深度 3 个因素对磨削力的影响, 进行了正交实验。通过极差分析得到影响磨削力的因素主次顺序为主轴转速、磨削深度和进给速度, 提高主轴转速或者减小磨削深度可以降低磨削力。

参 考 文 献

- [1] Syoji K. Grinding technology[M]. Guo Y B, Wang Z Z, translated. Beijing: China Machine Press, 2007: 96-97. (in Chinese)
庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 郭隐彪, 王振忠, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 96-97.
- [2] Sheng X M. Ultra-high speed grinding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 26-27. (in Chinese)
盛晓敏. 超高速磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 26-27.
- [3] Anderson D, Warkentin A, Bauer R. Experimental and numerical investigations of single abrasive-grain cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(12): 898-910.
- [4] Wang J M, Ye R Z, Tang Y P, et al. 3D dynamic finite element simulation analysis of single abrasive grain during surface grinding[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 173(5): 41-45. (in Chinese)
王君明, 叶人珍, 汤漾平, 等. 单颗磨粒的平面磨削三维动态有限元仿真[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 173(5): 41-45.
- [5] Su C, Xu L, Liu Y W, et al. Numerical simulation of cutting process of CBN grit based on SPH method[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5): 667-671. (in Chinese)
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.
- [6] Su C, Hou J M, Zhu L D, et al. Simulation study of single grain cutting based on fluid-solid-interaction method[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 5250-5253. (in Chinese)
宿崇, 侯俊铭, 朱立达, 等. 基于流固耦合算法的单颗磨粒切削仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 5250-5253.
- [7] Duan N, Wang W S, Xu X P, et al. Dynamic simulation of single grain cutting of glass by coupling FEM and SPH[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(20): 2716-2721. (in Chinese)
段念, 王文珊, 徐西鹏, 等. 基于 FEM 与 SPH 耦合算法的单颗磨粒切削玻璃的动态过程仿真[J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2716-2721.
- [8] Yan L, Jiang F, Rong Y M. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 172-182. (in Chinese)
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.
- [9] Cheng Z, Xu J H, Ding W F, et al. Simulation of chip formation in grinding titanium alloy TC4 with single abrasive grit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(2): 17-21. (in Chinese)
程泽, 徐九华, 丁文锋, 等. 单颗磨粒磨削钛合金 TC4 成屑过程仿真研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(2): 17-21.
- [10] Chen X, Rowe W B. Analysis and simulation of the grinding process. Part I: generation of the grinding wheel surface[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(8): 871-882.
- [11] Hegeman J B J W. Fundamentals of grinding: surface conditions of ground materials[D]. Netherlands: University of Groningen, 2000.
- [12] Warnecke G, Barth C. Optimization of the dynamic behavior of grinding wheels for grinding of hard and brittle materials using the finite element method[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(1): 261-264.
- [13] Su C, Xu L, Li M G, et al. Study on modeling and cutting simulation of abrasive grains[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 2130-2135. (in Chinese)
宿崇, 许立, 李明高, 等. 磨粒建模方法与切削过程仿真研究[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2130-2135.
- [14] Su C, Yang J Y, Zhao H H, et al. Development of virtual grinding wheel and its grinding performance analysis[J].

- Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(5): 560-564. (in Chinese)
- 宿崇, 杨建宇, 赵恒华, 等. 虚拟砂轮的开发及其磨削性能分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(5): 560-564.
- [15] Ming X Z, Yan H Z, Chen S H, et al. 3D models of thermo-mechanical coupling of grinding tooth and numerical analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 17-24. (in Chinese)
- 明兴祖, 严宏志, 陈书涵, 等. 3D 热耦合磨齿模型与数值分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 17-24.
- [16] Barge M, Hamdi H, Rech J, et al. Numerical modelling of orthogonal cutting: influence of numerical parameters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164: 1148-1153.
- [17] Gong Y D, Wang B, Wang W S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1): 123-126.
- [18] Wang Y S, Ding N. The grinding force model of cylindrical traverse grinding[J]. Journal of Changchun University, 2005, 15(6): 1-3. (in Chinese)
- 王颖淑, 丁宁. 外圆纵向磨削加工磨削力模型[J]. 长春大学学报, 2005, 15(6): 1-3.
- [19] Wang L S, Li G F. Modelling and computer simulation for grinding process[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(1): 1-4. (in Chinese)
- 王龙山, 李国发. 磨削过程模型的建立及其计算机仿真[J]. 中国机械工程, 2002, 13(1): 1-4.
- [20] Cao J P, Deng C H, Liu J, et al. Research on the grinding force when machining nanostructured WC/12Co coatings [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2004, 140(2): 5-9. (in Chinese)
- 曹建平, 邓超辉, 刘建, 等. 纳米结构 WC/12Co 涂层精密磨削的磨削力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004, 140(2): 5-9.
- [21] Song Z T, Yang L X. Calculation of the optimal dosage of grinding at the time of end mill[J]. Journal of Xi'an Institute of Mining, 1991(3): 79-84. (in Chinese)
- 宋之桐, 杨来侠. 端磨时最优磨削用量的计算[J]. 西安矿业学院学报, 1991(3): 79-84.
- [22] Hou Z B, Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Part I: stochastic nature of the grinding process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2003, 43(15): 1579-1593.
- [23] Yan L. Research on grinding mechanism of hardened cold-work die steel based on single grain cutting[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)
- 言兰. 基于单颗磨粒切削的淬硬模具钢磨削机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [24] Xu J, Lu W Z, Wang H, et al. Characteristics and wear properties of grinding surface of titanium alloy TC4-DT [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 567-573. (in Chinese)
- 胥军, 卢文壮, 王晗, 等. TC4-DT 钛合金磨削表面特性及其摩擦磨损性能[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 567-573.
- [25] He Q S, Fu Y C, Xu H J, et al. Development of annular heat pipe grinding wheel for high efficiency machining of TC4 titanium alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1740-1747. (in Chinese)
- 赫青山, 傅玉灿, 徐鸿钧, 等. TC4 钛合金高效磨削加工用环形热管砂轮的研制[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1740-1747.

作者简介:

张祥雷 男, 博士研究生。主要研究方向: 先进制造技术。

Tel: 0592-2186923

E-mail: zhxile2008@sina.com

姚斌 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 复杂曲面成形与先进制造技术。

Tel: 0592-2186923

E-mail: yaobin@xmu.edu.cn

Modeling of Virtual Grinding Wheel Based on Random Distribution of Multi Abrasive Grains and Prediction of Grinding Force

ZHANG Xianglei, YAO Bin^{*}, FENG Wei, SHEN Zhihuang

Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: The distribution of abrasive grains existing in diamond grinding wheel surface is firstly measured by a VHX-600E optic microscope. The density of abrasive grains, the actual contact length and the effective number of abrasive grains are then calculated. Based on the assumption of interval distribution of abrasive grains and virtual grid method, the surface of virtual grinding wheel is randomly distributed with multi hexahedron abrasive grains which are equal in density. Besides, the posture of abrasive grains is randomly allocated to simulate the real topography of grinding wheel. The 3D simulated model of virtual grinding is built by importing a 1/4 virtual grinding wheel model into Deform-3D software and the simulated grinding force value of multi grains is obtained by Lagrangian Incremental algorithm. The multi-grain grinding force predictive model is then built with the simulated model. A carbide blade grinding experiment is performed to validate the predictive model by comparing the measured grinding force with the predictive force. The test verifies the accuracy and effectiveness of the proposed model in the paper. This paper provides a new method to investigate the grinding force which is co-grounded by multi-grains.

Key words: multi abrasive grains; random distribution; grinding wheels; grinding force; face grinding

Received: 2014-02-26; Revised: 2014-03-28; Accepted: 2014-04-18; Published online: 2014-04-22 08:19

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20140422.0819.001.html

Foundation item: Science and Technology Plan Projects of Xiamen City (3502Z20131007)

^{*} Corresponding author. Tel.: 0592-2186923 E-mail: yaobin@xmu.edu.cn