

# 虚拟砂轮磨削有限元仿真以及试验对比分析

王建军<sup>1</sup>, 黄景山<sup>2</sup>

(1.中国一拖集团有限公司, 河南 洛阳 471003 2.厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005)

**摘要** 磨削加工是众多磨粒参与共同作用的结果。基于金刚石砂轮表面形貌和磨粒分布情况, 利用虚拟仿真技术建立虚拟砂轮模型。实现对磨削机理更加深入的研究是很有必要的。通过仿真磨削与试验给出了对比分析, 提出了机床工艺交互作用下磨削机理研究的意义。

**关键词** 金刚石砂轮; 磨粒; 表面形貌; 仿真; 磨削

中图分类号: TG580.61

文献标识码: A

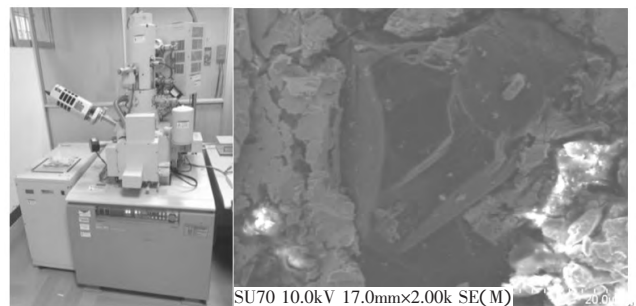
文章编号: 1672-545X(2018)09-0090-04

目前利用金刚石砂轮精密磨削硬质合金等难加工材料仍然是主要手段。在磨削加工过程中, 由于机床结构与工艺过程之间存在着磨削力、磨削热、结构变形等物理量的交互作用, 会导致工件在批量生产过程中出现尺寸精度和表面质量不稳定的现象。磨削过程的建模与仿真成为了国内外学者的研究热点, 从微观的单颗磨粒磨削研究再到宏观的虚拟砂轮磨削力预测, 都可以用仿真技术手段来实现。基于有限元仿真技术的磨削加工建模方法是磨削仿真的主要手段, Feng 等<sup>[1]</sup>基于砂轮磨削表面磨粒随机分布和磨屑未变形厚度分析, 建立了陶瓷材料的磨削有限元模型。Philip Koshy<sup>[2]</sup>等构建了金刚石虚拟砂轮模型, 并利用该模型对磨削加工的表面形成过程进行了有限元仿真。宿崇等<sup>[3]</sup>利用 APDL 语言建立了虚拟砂轮模型, 基于该模型进行了表面形貌仿真。本文通过仿真磨削与试验给出了对比分析, 提出了有必要对机床工艺交互作用下磨削机理研究的意义, 对金刚石砂轮精密磨削硬质合金具有指导意义。

## 1 砂轮形貌分析

砂轮是由大量形状不规则的磨粒和结合剂压制而成, 不同于一般刀具, 砂轮磨削表面形貌是随机的、不确定的。砂轮表面形貌表征的是磨粒在砂轮表面的分布情况和磨粒形状, 直接影响着磨削过程中的磨削力、磨削温度以及磨削工件表面质量。因此, 建立准确描述砂轮表面形貌的虚拟砂轮模型是实现磨削过程仿真的关键。本文针对郑州三磨所生产的

12A2T 型金刚石碗型砂轮进行研究, 利用热场发射扫描电镜 SU-70, 测量砂轮局部磨削表面形貌如图 1 所示。可以看出砂轮表面磨粒近似于不规则多面体, 但在后续建模仿真过程中磨粒的面越多仿真的困难越大, 因此本文在虚拟砂轮建模过程中将磨粒形状简化为不规则的六面体。



(a)SU-70 扫描电镜

(b)砂轮磨粒形貌

图 1 砂轮表面磨粒形貌测量

### (1)虚拟砂轮建模方法<sup>[4]</sup>

相比于多面体磨粒, 球形磨粒建模所需的参数变量少, 比较容易设定振动位移量和进行磨粒空间位置的干涉判断。因此, 在虚拟砂轮建模前期, 先将砂轮磨粒形状简化为球形, 当砂轮模型确定后再用多面体形状来替换球形磨粒。表征砂轮的主要特征参数为磨粒粒度和组织代号, 即磨粒的大小和浓度, 磨粒的平均直径  $d_g$  和磨粒的体积分数  $V_g$  可以近似的表示为:

$$d_g = 15.2M^{-1} \quad (1)$$

$$V_g = 2(32 - S)/100 \quad (2)$$

一般磨粒粒度的确定需要经过多次筛选, 其直

收稿日期: 2018-06-01

基金项目: 2016 年工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2016- 213)

作者简介: 王建军(1963-) 男, 河南洛阳人, 教授/高级工程师, 研究方向: 智能制造装备技术。

径大小分布在所用筛网孔径范围内。根据文献[5]的研究结论,磨粒直径  $d_g$  的分布符合高斯正态分布,函数形式如下式:

$$p(d_g) = \frac{A_1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{8}\left(\frac{d_g - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{6} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad (5)$$

式中  $A_1$  为经验系数  $\mu$  正态分布均值  $\sigma$  正态分布方差  $d_{\min}$  为磨粒底径的最小值  $d_{\max}$  为磨粒底径的最大值。

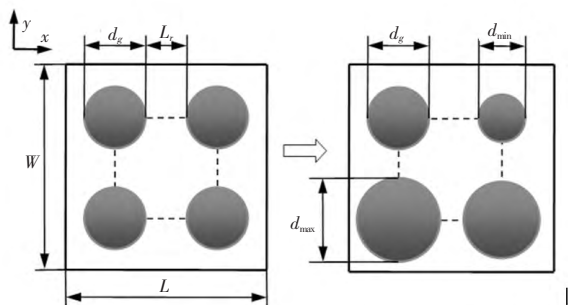
考虑金刚石砂轮磨削表面的单层磨粒,并取  $L \times W$  范围磨削表面进行分析。由下式可求出砂轮表面的磨粒数  $N$ :

$$N = \frac{4LWV_g}{\pi d_g^2} \quad (6)$$

初始条件下,设砂轮  $L \times W$  范围内磨粒均匀分布,依据磨粒平均直径计算该浓度下两磨粒的固定距离<sup>[6]</sup>。

$$L_r = d_g \left( \sqrt{\frac{\pi}{4V_g}} - 1 \right) \quad (7)$$

将磨粒沿长度和宽度方向上以固定间距  $L_r$  完成磨粒初始位置排布。在确定初始位置后,根据磨粒直径满足高斯正态分布的原理,随机生成砂轮表面磨粒的直径大小,如图 2 所示。



初始磨粒分布随机调整磨粒直径

图 2 磨粒空间排布过程

完成磨粒空间位置排布后,为防止空间中任意两磨粒位置发生干涉,假设两个磨粒  $i, j$  之间的空间坐标应该满足以下关系式:

$$\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \geq \frac{d_{gi} + d_{gj}}{2} \quad (8)$$

式中  $x_i, y_i$  表示第  $i$  个点的坐标  $x_j, y_j$  表示第  $j$  个点的坐标  $d_{gi}, d_{gj}$  表示第  $i$  个和第  $j$  个磨粒直径。

(2) 虚拟砂轮模型生成

根据如下仿真参数:金刚石砂轮粒度号  $M = 230$ , 组织号  $S = 9$ , 宽度  $W = 1 \text{ mm}$ , 长度  $L = 1$

mm, 基于 Matlab 与 UG Grip 二次开发工具,按前述虚拟砂轮仿真方法生成不规则磨粒虚拟砂轮模型。具体的实现步骤如下:

(a) 首先生成磨粒离散分布的随机位置坐标。通过 MATLAB 建立磨粒随机振动模型,然后在  $L \times W$  范围内,生成单层磨粒的随机位置坐标和随机球心直径,如图 3 所示。

(b) 然后利用 Grip 语言读取球形磨粒的球心坐标和直径信息,在 UG 软件中生成位置和大小随机分布的球形磨粒模型。建立砂轮基体模型,并将其与球形磨粒粘接在一起形成虚拟砂轮模型,如图 4 所示。

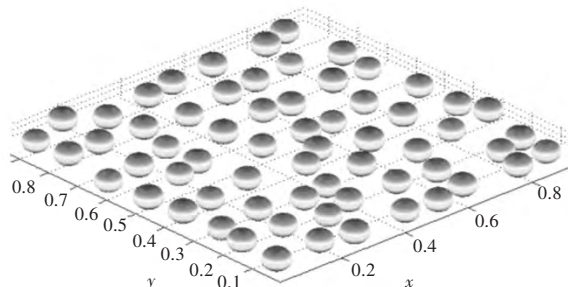


图 3 球形磨粒随机坐标图

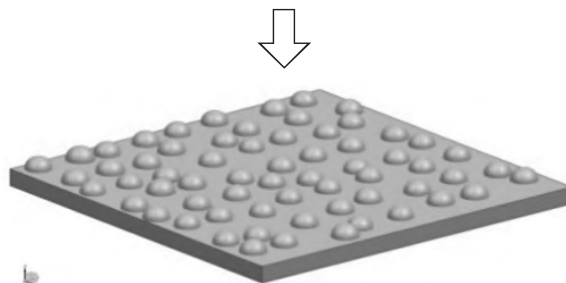


图 4 球形磨粒砂轮模型

(c) 最后在虚拟砂轮模型基础上,遵循体积相同原则,将球形磨粒替换为不规则形状的六面体。具体实施步骤如下:以球心坐标  $O$  为坐标原点,建立局部坐标系,如图 5 所示。通过改变平面上固定点  $A$  的位置、平面法矢  $n$  的方向以及法矢  $n$  与球心坐标系  $O$  对应坐标轴的夹角  $\theta$  来控制平面的位置。通过赋予随机变量  $\theta$  生成不规则六面体。转换后的虚拟砂轮示意如图 6 所示。

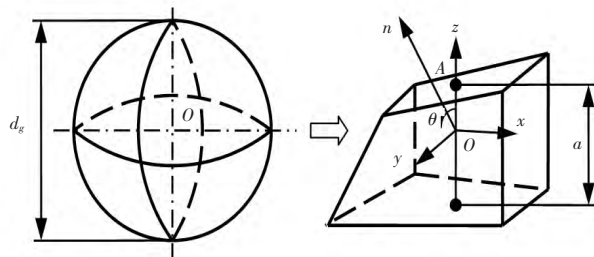


图 5 磨粒转换模型

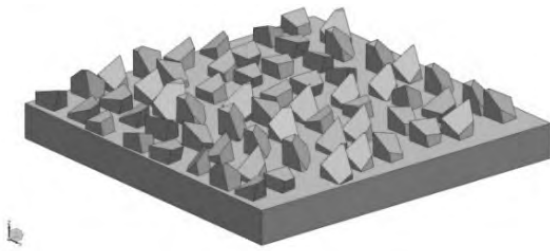


图6 转换后的虚拟砂轮

## 2 虚拟砂轮的磨削力预测与实验验证

### 2.1 虚拟仿真磨削力预测模型

虚拟仿真预测磨削力是先通过有限元方法获得虚拟磨削力,再结合砂轮接触面积内实际有效磨粒数计算出磨削力。磨削加工过程中,由于砂轮与工件相对运动关系,其最大接触面积可以近似认为是工件的磨削宽度于真实接触弧长的乘积,如式(9)所示。砂轮在制造成形过程中的表面磨粒突出高度并不一样,因此磨削过程中参与实际加工的有效磨粒数少于接触面积内的总磨粒数。研究表明。根据文献[7]的研究结果,磨削过程中实际参与加工的有效磨粒数约为10%左右,因此本文取10%进行研究。通过计算,实际磨削加工中最大接触面积内的有效磨粒数如表1所示。

$$A = b_w \times L_c \tag{9}$$

表1 磨削实验参数

实验号	磨削深度 $a_p$ /mm	砂轮进给 速度 $V_f$ (mm/min)	砂轮线速 度 $V$ /(m/s)	实际接触 弧长/mm	磨粒个数	有效磨 粒个数
1	0.02	1	20			
2	0.02	2	30			
3	0.02	3	40			
4	0.04	2	20			
5	0.04	3	30	0.872	541	55
6	0.04	1	40			
7	0.06	3	20			
8	0.06	1	30			
9	0.06	2	40			

基于虚拟砂轮模型磨粒粒径、位置、形状随机分布的原则,考虑仿真计算效率,可取部分虚拟砂轮模型进行有限元仿真。将磨削力仿真结果除以虚拟砂轮的磨粒数,获取单颗磨粒的平均磨削力。再将平均磨削力乘以砂轮工件最大接触面积的有效磨粒个数,得到不同磨削参数下的磨削力。磨削力预测计算公式如下:

$$\begin{cases} F_n = N\overline{F'_n} \\ F_t = N\overline{F'_t} \end{cases} \tag{10}$$

其中  $N$  为接触区的有效磨粒数; $\overline{F'_n}$ 、 $\overline{F'_t}$  分别是仿真获得的单颗磨粒平均法向磨削力和切向磨削力。

### 2.2 虚拟砂轮磨削仿真

在仿真中取 YG6 工件材料宽度为 0.42 mm,砂轮宽度为 0.3 mm,定义砂轮为开启传热解析模式的刚性体,工件材料为塑性体,采用相对方式划分网格,选择四面体属性网格单元,采用局部网格重划分方式,为了提高仿计算精度和计算效率,对工件与砂轮接触区域进行局部网格细化。虚拟砂轮网格设置与工件一样,得到的虚拟砂轮有限元仿真模型如图7所示。设置仿真模拟类型为拉格朗日增量形式,通过设置仿真步长和停止位置来实现仿真过程控制。为了提高仿真的精度,通常将仿真步长设置为最小网格尺寸的1/3。设置砂轮工件的接触关系,砂轮为主动件,工件为从动件,并约束工件底面。在端面磨削中,砂轮表面磨粒是旋转切削工件材料的,考虑到仿真时间很短,将磨粒的运动近似为直线运动。

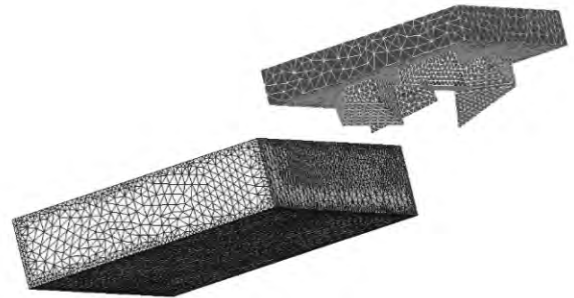


图7 虚拟砂轮磨削仿真有限元模型

按表1加工参数进行有限元仿真。磨削力预测结果如表3.6所示。

### 2.3 磨削力实验

为了验证虚拟砂轮仿真方法的有效性,在开发的五轴数控工具磨床上进行了 YG6 硬质合金材料的磨削实验。磨床主轴的转速范围 0 ~ 6 000 rpm。实验选用郑州三磨所生产的 11A2T 金刚石碗型砂轮,最大线速度为 50 m/s;工件选用 YG6 硬质合金长条,磨削面尺寸范围为 10 mm × 10 mm;通过 KISTLER 9265B 六分量动态测力系统对磨削过程中的磨削力进行实时测量。实验装置如图8所示,工件通过专用夹具固定在测力仪上。为了减少砂轮磨钝引起的加工误差,在每组实验前对砂轮磨削面进行修锐。按表1实验方案进行磨削加工。



图8 磨削力实验装置

通过DynoWare 软件控制采集过程并动态显示采集卡三个方向的磨削力信号,设置信号采样频率1 000 Hz,即采样间隔为0.001 s.采集完成后,导出csv 数据,通过MATLAB 读取和处理。由于振动和噪声的影响,需要对时域信号进行滤波。提取时域信号的频谱信息如图9所示,将滤波后信号稳定阶段的平均值减去初始阶段的平均值为最终磨削力,得到典型磨削力信号处理结果如图10所示。

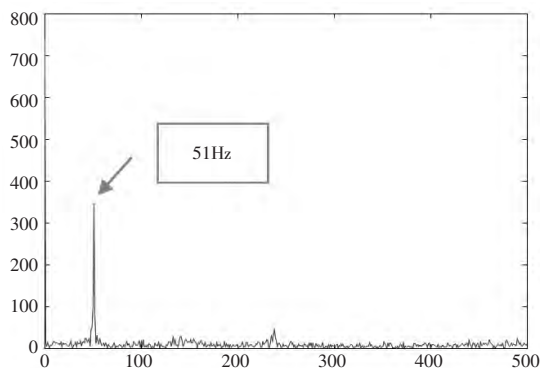
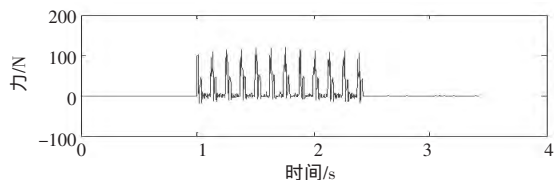
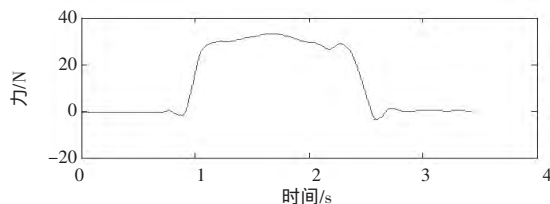


图9 频谱信号图



(a)滤波前的法向磨削力信号



(b)滤波后的法向磨削力信号

图10 典型磨削力信号

#### 2.4 试验结果对比分析

磨削仿真值与实验值对比结果如表2所示。由表2的误差计算可知,仿真值与实验值存在较大误差,误差范围控制在26%以内。并且可以看出,法向

磨削力的仿真预测值都大于实验值,并且随着磨削深度的增加,预测值的误差逐渐增大,究其原因在于砂轮与工件接触区有效磨粒数与接触弧长的计算结果存在偏差。同时虚拟砂轮的几何模型只是近似建模,无法完全表征砂轮的表面形貌,因而仿真值与实验值之间会存在一定的差距。另外,仿真将外部条件理想化,仅考虑了磨削工艺过程中磨削力的变化,忽略了机床结构的动态特性、温度等物理因素对磨削力变化的影响,在一定程度上影响了预测的精度。

表2 法向磨削力预测值与实验值对比

实验号	仿真值/N	实测值/N	误差
1	32.10	30.3	5.6%
2	36.00	33.1	8.1%
3	33.64	30.1	10.5%
4	75.52	66.3	12.2%
5	71.68	58.7	18.1%
6	50.87	41.2	17.2%
7	90.41	70.7	21.8%
8	56.50	42.1	25.5%
9	70.55	54.6	22.6%

### 3 结束语

通过虚拟仿真方法研究金刚石碗型砂轮端面磨削YG6 硬质合金的磨削机理,并进行了磨削加工实验,通过对比分析表明在进行磨削过程仿真时,不应该仅仅考虑磨削区磨粒与工件的相互作用,而且需要考虑机床结构的动态特性对磨削过程的影响,有必要建立机床-工艺交互模型,通过耦合仿真分析更深入准确地预测磨削力。

#### 参考文献:

- [1] Feng J, Chen P, Ni J. Prediction of grinding force in micro grinding of ceramic materials by cohesive zone-based finite element method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5):1039-1053.
- [2] Koshy Philip, K Ives Lewis, Jahanmir Said. Simulation of Diamond-ground surfaces[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999(39):1451-1470.
- [3] 宿崇. 虚拟磨削关键理论及其技术的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009.
- [4] S. Malkin. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起, 巩亚东, 宗贵亮, 译. 沈阳:东北大学出版社, 2002.
- [5] Darafon A. Measuring and Modeling of Grinding Wheel Topography[D]. Dalhousie University, 2013.
- [6] 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.
- [7] 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.

(下转第102页)

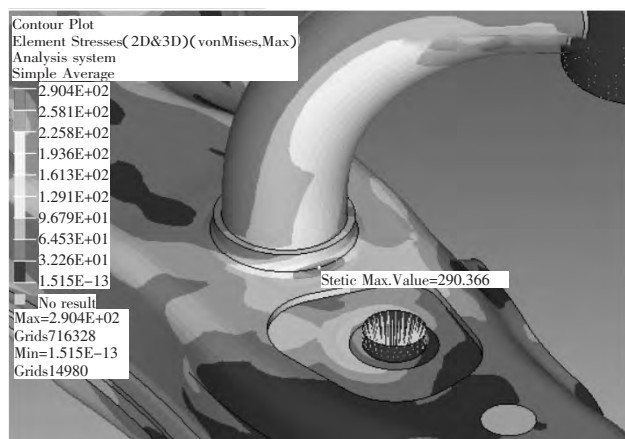


图 12 优化方案第二大应力处

优化后，前副车架重量为 35.43 kg，比优化前 36.73 kg 轻了 1.3 kg，起到了一定的轻量化作用。

### 3 结束语

对前副车架进行结构强度有限元分析发现了其存在一定的结构缺陷，经过对结构缺陷的分析找到了问题所在，通过对纵臂与上下片的搭接结构进行优化设计，使前副车架满足结构强度要求，同时还降低了重量，达到了优化的目的，而且此优化设计对同类产品也可起到借鉴作用。

#### 参考文献：

- [1] 张海燕.某轿车前副车架结构的有限元分析[D].长春:吉林大学,2011.
- [2] 郑 灏.汽车前副车架有限元分析及优化[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [3] 陈 琛.轿车副车架轻量化设计与研究[D].武汉:华南理工大学,2014.
- [4] 尹辉俊,姜美姣.某乘用车副车架轻量化改进[J].机械设计,2015(12):117-119.

## Finite Element Analysis and Optimization of a Full Frame Front Sub Frame

LIAN Hao ,CHEN Jian ,ZHU Bo

(Liuzhou Wuling Motors Co. ,Ltd. , Liuzhou Guangxi 545007 , China)

**Abstract :**Through the finite element analysis of the design of a full frame front sub frame , it is found that there is a design defect in the lap structure of the longitudinal arm and the upper and lower pieces. After analyzing the problem of structural defects , the optimal design of the structure of the front sub frame was carried out. The optimized model not only satisfies the requirement of structural strength , but also reduces the weight , and achieves the aim of optimization.

**Key words** front sub frame ; longitudinal arm ; finite element ; optimization design ; lightweight

(上接第 93 页)

## FEM Simulation of Virtual Grinding Wheel Grinding and Comparative Analysis with Relevant Experiment

WANG Jian-jun<sup>1</sup> ,HUANG Jing-shan<sup>2</sup>

(1.YTO Group Corporation ,Luoyang Henan 471003 , China 2.Xiamen University ,Xiamen Fujian 361005 , China)

**Abstract :** Abrasive Machining is the result of the common action of many abrasives. Based on the surface topography and abrasives distribution of diamond grinding wheel , virtual grinding wheel model is established by virtual simulation technology. It is necessary to further study the grinding mechanism. Through the comparative analysis of grinding simulation and grinding experiment , the significance of research on grinding mechanism under the machine process interaction is presented.

**Key words** : diamond grinding wheel ; abrasive ; surface morphology ; simulation ; grinding