

GCr15 钢平面磨削力仿真分析与实验研究

张银霞, 韩程宇, 杨鑫, 王栋, 刘治华

(郑州大学 抗疲劳制造技术河南省工程实验室, 郑州 450001)

摘要: **目的** 对不同磨削工艺参数下的平面磨削力进行预测, 对磨削机理进行研究, 进而控制磨削加工质量。**方法** 考虑 CBN 砂轮表面磨粒形状的多样性、姿态的多样性和空间分布的随机性, 建立 CBN 砂轮模型, 对 GCr15 材料模型进行有限元砂轮磨削仿真。同时使用 CBN 砂轮, 采用不同的工件进给速度对 GCr15 进行单因素平面磨削实验, 使用三坐标测力仪测量不同磨削参数下的磨削力。**结果** 建立的仿真砂轮模型的表面形貌与真实砂轮接近, 仿真砂轮上的磨粒出刃高度均服从正态分布, 与实际砂轮一致。对比随机多面体磨粒模型和真实 CBN 磨粒照片, 两者形貌相似。磨削力实验和仿真结果表明, 工件进给速度由 3 m/min 增大到 18 m/min 时, 磨削力逐渐增大, 仿真所得法向磨削力最大误差远小于切向磨削力。**结论** 实验结果与仿真结果具有一致性, 证明了砂轮磨削有限元仿真模型可用于磨削力预测。因为仿真中无法考虑实际砂轮尺寸和砂轮表面结合剂对磨削的影响, 结果具有一定误差, 仿真的准确性有待进一步提高。研究结果为使用有限元方法研究磨削机理和控制磨削加工质量提供了思路。

关键词: CBN 砂轮建模; 磨削仿真; 磨削力; 平面磨削; GCr15 轴承钢

中图分类号: TG580.1+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0342-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.042

Simulation Analysis and Experimental Research on Surface Grinding Force of GCr15 Steel

ZHANG Yin-xia, HAN Cheng-yu, YANG Xin, WANG Dong, LIU Zhi-hua

(Henan Key Engineering Laboratory of Anti-fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to predict surface grinding force under different grinding process parameters and investigate the grinding mechanism to control the grinding quality. By considering the diversity of abrasive grain shape on the surface of CBN grinding wheel, the diversity of form and the randomness of spatial distribution, the CBN grinding wheel model was established and the finite element grinding wheel grinding simulation of GCr15 material model was carried out. At the same time, the single-factor plane grinding experiment of GCr15 was carried out with different workpiece feed speeds by CBN grinding wheel, and the grinding force under different grinding parameters was measured with a three-coordinate force gauge. The surface shape of the simulated grinding wheel model was close to that of the real grinding wheel. The height of the abrasive blade on the simulated grinding wheel was subject to the normal distribution and consistent with the actual grinding wheel. The random polyhedral abrasive grain model and the real CBN abrasive grain photograph were similar in appearance. The grinding force

收稿日期: 2019-02-26; 修订日期: 2019-05-27

Received: 2019-02-26; **Revised:** 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1804254); 国家留学基金委项目(201907045070); 中国博士后科学基金项目(2015M580635)

Fund: Supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (U1804254); China Scholarship Council (201907045070); China Postdoctoral Science Foundation (2015M580635)

作者简介: 张银霞(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为抗疲劳制造技术和精密超精密加工技术。邮箱: zhangyinxia@zzu.edu.cn

Biography: ZHANG Yin-xia (1974—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: anti-fatigue manufacturing technology and precision ultra-precision machining technology. E-mail: zhangyinxia@zzu.edu.cn

experiment and simulation results showed that the grinding force increased gradually when the workpiece feed speed was increased from 3 m/min to 18 m/min. The maximum error of the normal grinding force obtained by the simulation was much smaller than the maximum error of the tangential grinding force. The experimental results are consistent with the simulation results, thus proving that the grinding finite element simulation model of grinding wheel can be used for grinding force prediction. However, because the actual grinding wheel size and the influence of the surface bond of the grinding wheel on the grinding cannot be considered in the simulation, the result has certain error, and the accuracy of the simulation needs to be further improved. The research results provide an idea for using the finite element method to study the grinding mechanism and control the quality of the grinding process.

KEY WORDS: CBN grinding wheel modeling; grinding simulation; grinding force; plane grinding; GCr15 bearing steel

磨削加工精度和加工效率较高,往往作为最终精加工工艺。由于磨削过程复杂,为了更好地描述磨削过程和研究磨削加工的规律,通常使用磨削过程基本参数来表征。例如接触弧长、砂轮当量直径、磨削力等基本参数。其中,磨削力作为重要的磨削过程基本参数,是评价砂轮和磨粒切削刃磨削状态的重要因素。一般磨削力的增大,会使砂轮磨损加快,系统振动增加,噪声增大,工件表面粗糙度上升以及表面质量恶化,所以对磨削力的测量和预测具有重要意义。

磨削仿真作为研究磨削机理的重要手段,已广泛被学者研究。磨削加工的本质是大量离散分布在砂轮表面的磨粒完成滑擦、耕犁、切削的综合作用^[1]。砂轮形貌的表面特征直接影响磨削过程,其表面的磨粒形状、大小、分布间距以及磨粒突出高度都直接影响磨削工件的表面质量^[2]。因此磨削仿真的首要任务就是研究磨粒的形状、大小以及磨粒在砂轮表面的分布,并建立砂轮模型。磨粒和砂轮模型建立后,再通过有限元方法(FEM)、分子动力学(MD)、光滑流体粒子(SPH)和离散元(DEM)等方法对磨削过程进行仿真分析。

Hou 等^[3]对大量磨粒进行统计分析,研究表明,磨粒直径符合正态分布。赵金坠和冯克明等^[4]统计得出,不同工具对树脂结合剂 CBN 砂轮修锐后,砂轮表面磨粒的出刃高度服从正态分布。刘月明等^[5]提出创建三维砂轮数值模型的方法,用不规则六面体作为磨粒模型,提取仿真砂轮表层,生成虚拟砂轮形貌,对比分析了仿真砂轮和实际砂轮的磨粒出刃高度,仿真与实验所得磨粒突出高度在同一范围内,并都近似服从正态分布。宿崇等^[6]采用随机空间平面切分正六面体的方法生成了随机多面体磨粒,通过虚拟格子方法建立了部分砂轮模型,并通过有限元(FEM)和光滑粒子流体动力学(SPH)耦合的方法进行了磨削仿真,分析了磨削过程中工件表面的创成机理。张祥雷等^[7]创建虚拟砂轮,仿真预测了端面磨削力,通过实验验证,误差控制在 10%以内。李灏楠^[8]建立了截头八面体 SiC 磨粒砂轮模型,使用离散元方法(DEM)仿真磨削过程,并提出砂轮单位宽度磨削力的概念,将实验所测磨削力与仿真值进行了对比,发现两者结

果具有一致性。目前磨削仿真多为单颗磨粒切削仿真和多颗粒端面磨削仿真,但对于使用有限元方法对砂轮周边磨削类型的仿真鲜有报道。

文中在研究了 CBN 磨粒以及砂轮表面磨粒分布情况的基础上,建立 CBN 砂轮模型,砂轮模型表面磨粒具有形状多样性、姿态随机性和空间分布随机性。然后通过 Johnson-Cook(J-C)模型建立的 GCr15 材料进行有限元(FEM)磨削仿真,对不同磨削工艺参数下的磨削力进行预测。结合树脂结合剂 CBN 砂轮磨削 GCr15 轴承钢实验,使用三坐标测力仪测量不同磨削参数下的磨削力,对仿真预测进行验证。

1 砂轮磨削有限元仿真

1.1 仿真几何模型建立

参考磨粒形状及实际加工过程,采用空间随机面切割正六面体得到随机多面体作为 CBN 磨粒模型^[9-10]。考虑到砂轮表面的磨粒具有形状、姿态、空间分布多样性,砂轮建模分为四个步骤:1)创建具有多个不同形状、不同粒径磨粒的磨粒库;2)创建砂轮基体;3)从库中随机选取磨粒,并按照实际砂轮表面磨粒平均间距,有序分布在砂轮基体表面;4)将分布在砂轮基体表面的磨粒在单位空间内随机振动,使得磨粒姿态和位置随机化。以上过程均通过 Python 语言对 Abaqus 二次开发实现,建立的砂轮模型如图 1 所示。

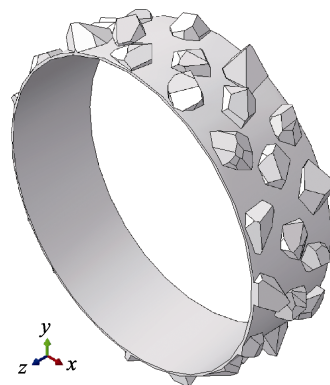


图 1 仿真砂轮模型

Fig.1 Simulated grinding wheel model

粒度号为 140/170 的磨粒粒径尺寸主要分布在 90~116 μm 之间^[11], 创建该尺寸范围内的磨粒模型库。磨粒库如图 2a 所示, 真实 CBN 磨粒如图 2b 所示。依据磨粒体积分数和磨粒平均直径, 可计算相邻磨粒中心之间的平均间距 L ^[5]。磨粒平均粒径取 $d=103 \mu\text{m}$,

浓度号为 100, 由此可知磨粒的体积分数为 25%。根据式(1)算得磨粒间平均距离 $L=182.56 \mu\text{m}$ 。

$$L = D \left(\sqrt{\frac{\pi}{4V_g}} \right) \quad (1)$$

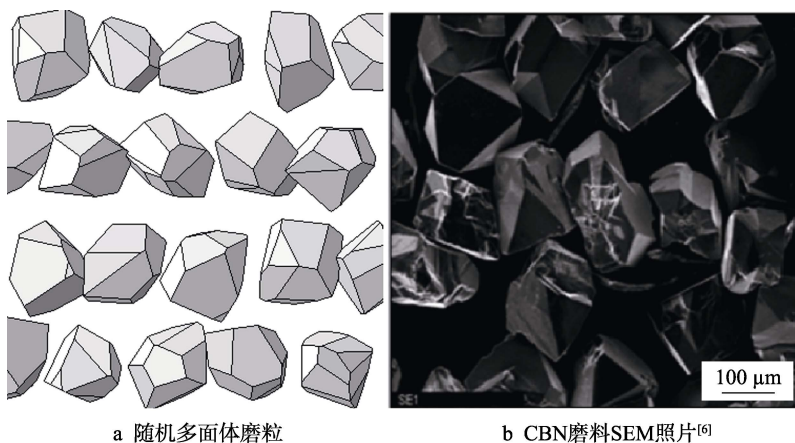


图 2 仿真砂轮磨粒库和 CBN 磨粒

Fig.2 Simulated grinding wheel abrasive grain library and CBN abrasive grain: a) random polyhedral abrasive particles; b) SEM photograph of CBN abrasive^[6]

随机振动后, 磨粒的出刃高度服从正态分布, 如图 3 所示。砂轮模型直径为 $\phi 1000 \mu\text{m}$, 宽度为 $300 \mu\text{m}$, 设为离散刚体。工件模型尺寸为 $1500 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$, 采用 C3D8RT 三维六面体热力耦合八节点缩减积分单元。使用过度网格划分技术对磨削接触区域进行局部细化, 仿真过程采用质量放大技术节省计算成本。工件的模型如图 4 所示。

1.2 材料模型与仿真参数设定

CBN 磨粒与淬火处理后的 GCr15 轴承钢的基本物理性能参数见表 1。由表 1 可知, CBN 磨粒的弹性模量和硬度比工件材料大得多, 可将砂轮仿真模型设为刚体, 工件材料特性由 Johnson-Cook (J-C) 本构模型描述^[12]。

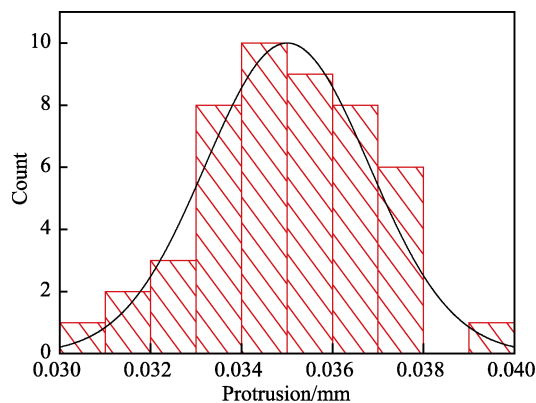


图 3 仿真砂轮磨粒出刃高度分布统计

Fig.3 Height distribution of simulated grinding wheel

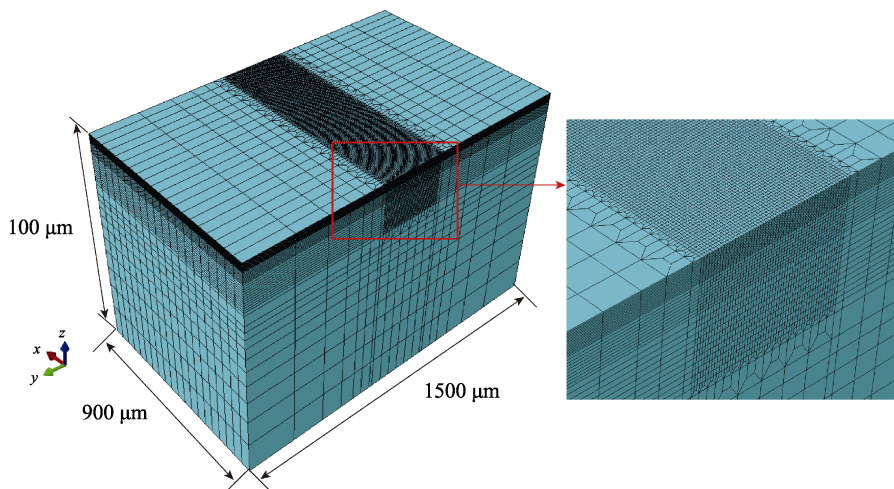


图 4 工件模型及网格划分

Fig.4 Workpiece model and grid

表 1 CBN 磨粒和 GCr15 基本物理性能参数
Tab.1 Basic physical property parameters of CBN
abrasive grains and GCr15

Material	Elasticity modulus /GPa	Poisson's ratio	Density /(kg·m ⁻³)	Hardness
CBN	706	0.15	3.45×10 ³	670~700HV
GCr15	210	0.277	7.827×10 ³	60~62HRC

J-C 模型考虑了热软化、应变速率硬化和应变强化三种效应,适用于描述大应变率下金属材料的应力应变关系^[13],其表达式见式(2):

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中: $A + B\varepsilon^n$ 为材料在高应变率下的应变强化效应; $1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$ 为流动应力与数学对应变率的关系; $1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m$ 为流动应力与温度指数的关系。
GCr15 本构模型各参数具体值及含义见表 2。

表 2 GCr15 材料本构模型参数值^[14]
Tab.2 GCr15 material constitutive
model parameter value^[14]

Parameter name	Value
Material yield strength A /MPa	688.17
Strain hardening constant B /MPa	150.82
Strain hardening coefficient n	0.336 2
Strain rate enhancement factor C	0.042 79
Thermal softening coefficient m	2.778 6

除了材料的本构模型之外,在切削和磨削仿真中,还需要考虑材料的损伤和去除。根据经典失效法则(见式(3)),Johnson 和 Cook 提出了与 J-C 塑性模型结合使用的 Johnson-Cook (J-C) 损伤准则。

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}^f} \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{\varepsilon}$ 为积分步骤中等效塑性应变的增量; $\bar{\varepsilon}^f$ 为当前条件下的等效断裂应变。当 $D=1.0$ 时,允许断裂发生,并且从计算中移除相关单元。根据 J-C 损伤准则,断裂应变的一般表达式由式(4)给出:

$$\bar{\varepsilon}^f = \left(d_1 + d_2 \exp d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \left(1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - d_5 \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: σ_m 为三个法向应力的平均值; σ 是 von Mises 等效应力。J-C 损伤模型适用于高应变率变形,因此它适用于动态仿真,如高速切削、磨削加工的仿

真。ABAQUS 中 J-C 损伤模型被作为损伤启动准则,式(2)被作为渐进失效准则。当应变达到 J-C 损伤标准时,损伤启动,此时 $D=0$ 。随着损伤不断累积, D 不断增大。当 $D=1$ 时,单元格失效,从模型中被去除。GCr15 的 J-C 损伤模型参数见表 3。

表 3 J-C 损伤模型参数^[15]
Tab.3 J-C damage model parameters^[15]

Parameter	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Value	0.0368	2.34	1.484	0.0035	0.411

2 试验方案

2.1 工件与砂轮

磨削工件材料为轴承钢 GCr15,为了得到原始状态统一的试样,将 GCr15 扁钢下料为 61 mm×210 mm×20.5 mm 的板状试样。再经过粗磨加工、真空淬火回火和半精磨,然后线切割成尺寸为 20 mm×30 mm×20 mm 的块状试样,试样硬度为 60~62HRC。所使用的砂轮是树脂结合剂 CBN 砂轮,砂轮浓度为 100%,砂轮粒度为 140/170,砂轮外径 $\phi 250$ mm,磨削面宽度为 15 mm。

2.2 仪器设备

磨削试验采用 MM7120 平面磨床(杭州机床厂)。磨削力测量采用三坐标磨削力测量系统,系统包括 9257B 紧凑型多分量测力计、5080A 模块化多通道实验室用电荷放大器、5697A 28 通道数据采集 DAQ 系统和 2825A DynoWare 数据采集和显示软件(该系统出自瑞士 Kistler 公司),如图 5 所示。

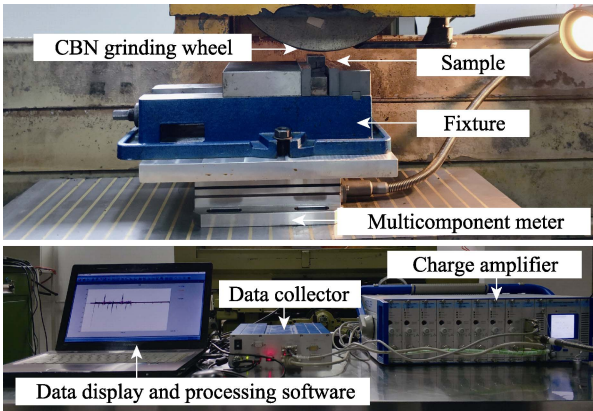


图 5 磨削力实验场景
Fig.5 Grinding force experiment scene

2.3 磨削工艺参数

实验主要研究磨削时工件进给速度对磨削力的影响。考虑到砂轮线速度对磨削力和残余应力也会有影响,所以在磨削深度 a_p 不变,两个砂轮线速度 v_s

下, 分别设计工件进给速度 v_w 的单因素实验。实验方案与仿真方案相同, 见表 4。

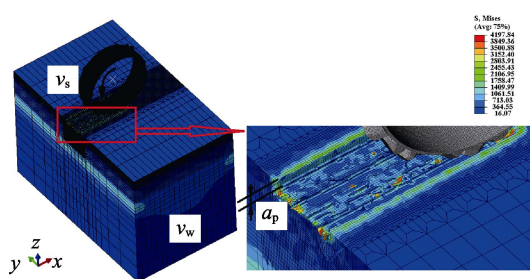
表 4 仿真及试验工艺参数
Tab.4 Simulation and test process parameters

Number	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_w/(m \cdot min^{-1})$	$a_p/\mu m$
1	20	3, 6, 9, 12, 15, 18	15
2	40	3, 6, 9, 12, 15, 18	15

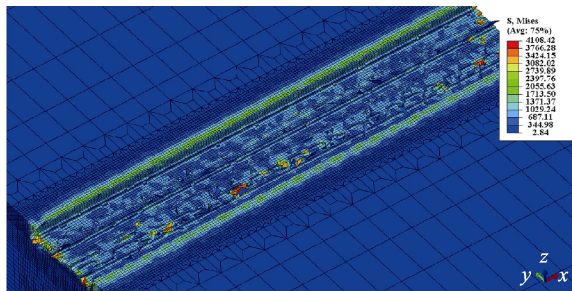
3 结果及分析

3.1 仿真结果

通过仿真砂轮模拟真实加工情况对工件模型进行磨削加工, 磨削加工中和加工后工件上的应力分布状况如图 6 所示。可以看出, 磨削表面凹凸不平, 具



a 磨削过程中



b 磨削完成后

图 6 磨削仿真得到工件上的应力分布图

Fig.6 Stress distribution diagram of workpiece obtained by grinding simulation: a) during grinding; b) after grinding

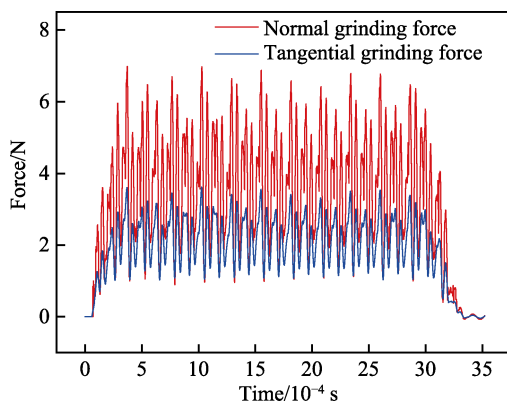


图 7 仿真得到的磨削力与时间的关系

Fig.7 Simulation grinding force versus time

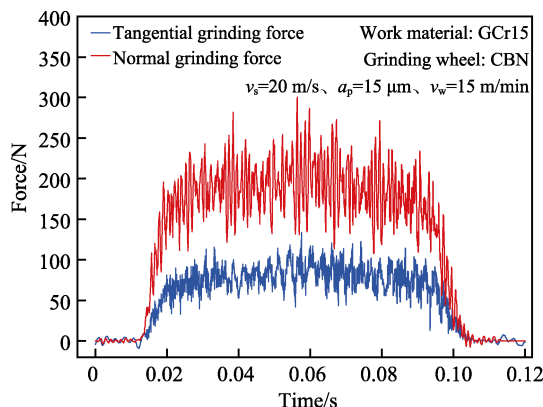


图 8 实测磨削力数据曲线

Fig.8 Measured grinding force data curve

3.3 工件进给速度对磨削力的影响

图 8 为典型的磨削力曲线, 磨削过程中, 随着砂轮切入工件到稳定磨削, 再到砂轮离开工件, 磨削力表现为先上升, 然后持续稳定, 最后降低为 0。稳定磨削阶段的磨削力更能反映真实的磨削过程, 所以将实测和仿真所得磨削力数据进行处理, 取稳定磨削阶段的磨削力求平均作为对应磨削工艺参数下的磨削力。

有磨削加工纹理, 磨削边缘略有隆起。磨削过程中, 磨削力主要有垂直于工件进给方向的法向磨削力和沿进给方向的切向磨削力。借助 ABAQUS 的历史变量输出功能, 将砂轮刚体约束的参考点上的支反力输出, 即可得到磨削仿真过程中的磨削力。仿真得到砂轮线速度 v_s 为 20 m/s、磨削深度 a_p 为 15 μm 、工作台进给速度 v_w 为 18 m/min 时, 磨削力随加工时间变化的关系如图 7 所示。

3.2 实验结果

使用磨削力测量系统实时测量磨削过程中垂直于工作台进给方向的法向磨削力和沿工作台进给方向的切向磨削力, 采样率设为 10 kHz。磨削深度 a_p 为 15 μm 、砂轮转速 v_s 为 20 m/s、工作台进给速度 v_w 为 3 m/min 时, 法向磨削力和切向磨削力的实测数据曲线如图 8 所示。

为了将仿真所得磨削力与实验所得磨削力进行对比, 需要将仿真所得的磨削力进行映射处理。虽然砂轮表面形貌分布具有随机性, 但总体具有一致性。假设砂轮直径对磨削力无影响, 将仿真砂轮作为单位宽度砂轮代表砂轮形貌特征, 然后将仿真所得磨削力取稳定阶段求平均, 再乘以实际砂轮与仿真砂轮宽的倍数^[8]。砂轮转速分别在 20、40 m/min 下, 磨削深度为 15 μm 时, 磨削力随着工作台进给速度的变化关系如图 9 所示。

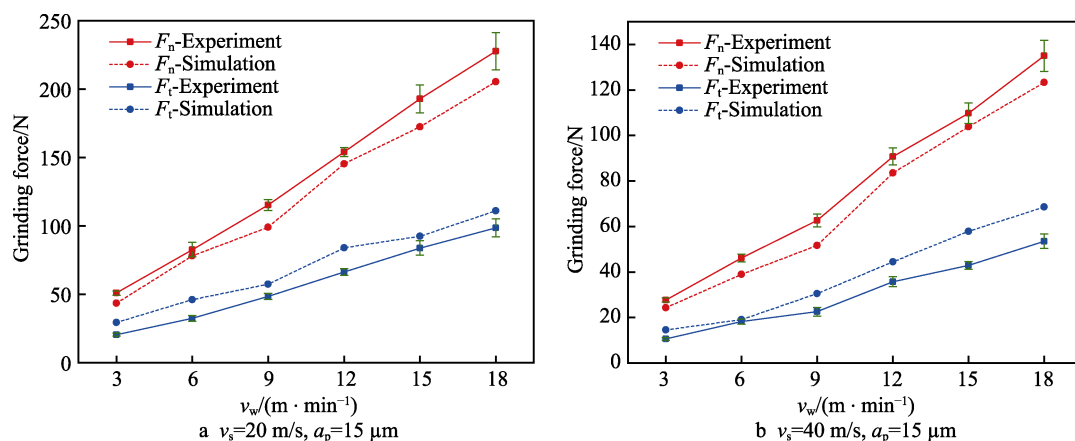


图 9 磨削力与工件进给速度之间的关系
Fig.9 Relationship between grinding force and workpiece feed rate

从图 9 可以看出,随着磨削深度和工作台进给速度的增加,磨削力增大。这是因为当工件进给速度 v_w 增大时,单位时间内磨除的材料量增大,如果其他条件不变,则每个磨粒的切削厚度随着增大,从而使磨削力增大。

对比图 9a、b 可以发现,不同砂轮线速度下,磨削力大小差别较大。这是因为砂轮线速度越高,单位时间内磨削区域中的总磨粒数越多,在材料磨除率不变的情况下,单颗粒磨粒的切削深度变薄,因此单颗粒的有效磨削力减小。同时,由于磨削深度不变,磨削弧长不会发生变化,砂轮上参与磨削作用的有效磨粒数也不会改变,故总的磨削力减小。

对比仿真结果和实验结果发现,两个不同砂轮线速度下,磨削力变化趋势一致。仿真所得法向磨削力小于实验值,最大误差为 17.4%;切向磨削力大于实验值,最大误差为 43.07%,与实验值相差较大。根据传统磨削力计算方法可知^[16],磨削力还与砂轮直径相关,故推测该误差由仿真砂轮与实际砂轮直径存在较大差异造成。通过计算 F_n/F_t 值发现,实验所得 F_n/F_t 值平均为 2.49,仿真为 1.704,仿真磨削力比明显小于实验值。这是因为 F_n/F_t 的值与砂轮锐利程度有关,砂轮钝化,磨削力比增大^[16]。仿真砂轮中,磨粒均为理想的随机多面体,具有锋利的磨削刃,且仿真砂轮并不考虑结合剂。实际砂轮存在磨粒磨损,以及结合剂的影响会导致磨削力比相应的增大。

4 结论

1) 采用空间随机面切割正六面体得到随机多面体作为 CBN 磨粒模型。根据砂轮实际参数,考虑砂轮表面的磨粒具有形状、姿态、空间分布多样性,建立的砂轮模型能够一定程度上反应真实砂轮表面特性,应用到磨削仿真中,能得到合理的仿真结果。若

要得到更加精确的仿真值,砂轮建模时还需进一步考虑磨粒磨损和结合剂的影响等情况。

2) 砂轮磨削 GCr15 轴承钢平面磨削仿真与实验所得磨削力随工件进给速度的变化规律一致,可以通过仿真预测磨削加工中磨削力随磨削参数变化的趋势,为实际加工提供理论参考。仿真也能反应磨削过程中以及磨削完成后工件上的应力分布,所以磨削仿真亦可对磨削加工后工件表面及表层残余应力的分布情况进行预测。

3) 磨削加工时,工作台进给速度、砂轮线速度等对磨削力的影响很大。由于磨削力会随着工作台进给速度的增加而增大,所以实际生产中,在保证加工效率的情况下,应尽可能减小工作台的进给速度。这样有利于减小磨削力,进而减小机床振动,提高砂轮耐用度,提高工件表面加工质量。

参考文献:

- [1] 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.
YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yi-ming. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(11): 172-182.
- [2] 李伯民, 赵波, 李清. 磨料、磨具与磨削技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
LI Bo-min, ZHAO Bo, LI Qing. Abrasives, abrasives and grinding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [3] 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 manufacture, 2003, 43(15): 1579-1593.
- [4] 赵金坚, 冯克明, 朱建辉, 等. 不同修锐工具对树脂结合剂 CBN 砂轮修锐效果的影响[J]. 工具技术, 2016

- (12): 82-85.
ZHAO Jin-zhui, FENG Ke-ming, ZHU Jian-hui, et al. Impact of different stressing tool upon dressing effect of resin bonded CBN grinding wheel[J]. Tool engineering, 2016(12): 82-85.
- [5] 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(23): 184-190.
LIU Yue-ming, GONG Ya-dong, CAO Zhen-xuan. Analysis of numerical grinding wheel topology and experimental measurement[J]. Journal of mechanical engineering, 2012(23): 184-190.
- [6] 宿崇, 施志辉, 刘元伟. 陶瓷 CBN 砂轮地貌建模与磨削仿真[J]. 中国机械工程, 2012(14): 1742-1745.
SU Chong, SHI Zhi-hui, LIU Yuan-wei. Topography modeling and grinding simulation of vitrified bonded CBN wheel[J]. China mechanical engineering, 2012(14): 1742-1745.
- [7] 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.
ZHANG Xiang-lei, YAO Bin, FENG Wei, et al. Modeling of virtual grinding wheel based on random distribution of multi abrasive grains and prediction of grinding force [J]. Acta aeronauticaet astronautica sinica, 2014, 35(12): 3489-3498.
- [8] 李灏楠. 基于离散元素法的砂轮建模与磨削仿真研究[D]. 东北大学, 2014.
LI Hao-nan. Grinding wheel topology modeling and grinding simulation by discrete element method[D]. Northeastern University, 2014
- [9] 张景强, 王贵和, 于天彪, 等. 陶瓷 CBN 砂轮磨料性能实验及建模仿真研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程. 2012(2): 20-25.
ZHANG Jing-qiang, WANG Gui-he, YU Tian-biao, et al. Research on performance of CBN grits in vitrified grinding wheel based on experiment and simulation[J]. Diamond abrasive engineering, 2012(2): 20-25.
- [10] 郑华林, 张伟. 超声振动珩磨表面残余应力数值模拟研究[J]. 表面技术, 2015(7): 131-136.
ZHENG Hua-lin, ZHANG Wei. Simulation research on the Surface residual stress of ultrasonic vibration honing [J]. Surface technology, 2015(7): 131-136.
- [11] GB/T 6406-2016, 超硬磨料粒度检验[S].
GB/T 6406-2016, Superabrasive-checking the grain size[S].
- [12] COOK W H, JOHNSON G R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Proceedings: Seventh international symposium on ballistics, 1983(4): 654-661.
- [13] 余剑武, 肖清, 罗红, 等. 单颗 CBN 磨粒磨削 20CrMo 的微观成屑过程研究[J]. 材料导报. 2017(10): 146-150.
YU Jian-wu, XIAO Qing, LUO Hong, et al. Research on micro chipformation process of 20CrMo by single CBN grain grinding[J]. Materials herald, 2017(10): 146-150.
- [14] SHORT A, BÄKER M. Is it possible to identify Johnson-Cook law parameters from machining simulations?[J]. International journal of material forming, 2010, 3(1): 443-446.
- [15] GUO Y B, WEN Q, WOODBURY K A. Dynamic material behavior modeling using internal statevariable plasticity and its application in hard machining simulations[J]. Journal of manufacturing science & Engineering, 2006 (3): 749-759.
- [16] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 386.
REN Jing-xin, HUA Ding-an. Grinding principle[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2011: 386.