

成形磨削18CrNiMo7-6钢磨削力仿真与试验验证

张银霞^{1,2,3}, 梁蓝夫^{1,2,3}, 宋作鹏^{1,2,3}, 李梦琪^{1,2,3}

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 抗疲劳制造产业技术研究院, 河南 郑州 451162;

3. 河南省抗疲劳制造技术工程研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了研究工艺参数对18CrNiMo7-6渗碳钢V型缺口成形外圆磨削力的影响规律, 基于缺口疲劳试样的加工过程, 构建通过空间随机平面切割正六面体生成的随机多面体CBN(cubic boron nitride)砂轮磨粒模型, 利用ABAQUS有限元仿真软件建立V型缺口成形外圆磨削三维仿真模型. 以砂轮转速 n_s 、工件转速 n_w 及砂轮径向进给速度 v_r 为自变量, 开展单因素试验, 研究法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 的变化规律, 并通过成形磨削力试验验证缺口成形切入磨削仿真模型的有效性. 结果表明: 法向磨削力始终大于切向磨削力; 相较于工件转速和砂轮径向进给速度, 砂轮转速对磨削力的影响更为显著. 磨削力仿真结果与试验结果一致, n_s , n_w 及 v_r 通过仿真所预测的法向磨削力平均误差分别为11.06%, 9.21%, 10.77%, 切向磨削力平均误差分别为9.89%, 13.89%, 15.55%.

关键词: 18CrNiMo7-6钢; V型缺口; 成形磨削; 有限元仿真; 磨削力

中图分类号: TG 580.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)12-0085-09

Simulation and Experimental Verification of Grinding Forces in Profile Grinding of 18CrNiMo7-6 Steel

ZHANG Yin-xia^{1,2,3}, LIANG Lan-fu^{1,2,3}, SONG Zuo-peng^{1,2,3}, LI Meng-qi^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Industrial Science & Technology Institute for Anti-fatigue Manufacturing, Zhengzhou 451162, China; 3. Henan Province Engineering Research Center of Anti-fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou 450001, China. Corresponding author: ZHANG Yin-xia, E-mail: zhangyinxia@zzu.edu.cn)

Abstract: In order to investigate the influence of process parameters on the grinding force in V-notch forming during cylindrical grinding of 18CrNiMo7-6 carburized steel, a cubic boron nitride (CBN) grinding wheel abrasive particle model composed of random polyhedra generated by cutting regular hexahedra with spatial random planes was constructed based on the machining process of fatigue specimens. A three-dimensional simulation model of V-notch forming during cylindrical grinding was established by using ABAQUS finite element simulation software. With the grinding wheel speed n_s , workpiece speed n_w , and radial feed speed v_r as independent variables, single-factor experiments were conducted to study the variation patterns of normal grinding force F_n and tangential grinding force F_t . The validity of the V-notch forming simulation model during plunge grinding was verified through forming grinding force experiments. The results indicate that the normal grinding force is consistently greater than the tangential grinding force, and compared with the workpiece speed and the radial feed speed, the influence of grinding wheel speed on grinding force is more significant. The simulation results agree well with experimental data, where the average errors for normal grinding force predicted by simulations of n_s , n_w , and v_r are 11.06%, 9.21%, and 10.77%, respectively, and those for tangential grinding force are 9.89%, 13.89%, and 15.55%, respectively.

Key words: 18CrNiMo7-6 steel; V-notch; forming grinding; finite element simulation; grinding force

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12432004); 教育部产学研合作协同育人项目(231106665035620).

作者简介: 张银霞(1974—), 女, 河南长垣人, 郑州大学教授.

高端精密零部件作为高端装备的核心,其制造技术代表着一个国家的制造业水平.大多数高端精密零部件的某些部位存在缺口,如孔、圆角、凹槽和肩部等,这些部位极易发生应力集中而引发疲劳断裂,导致高端精密零部件存在着寿命短、可靠性差等突出问题^[1-3].因此,研究如何提高零部件缺口部位的疲劳寿命和可靠性具有重要意义.

成形磨削具有加工精度高、加工效率高、加工质量好等特点,常被用于关键零部件的精密加工.磨削力是指砂轮与工件接触时所产生的多种力的综合,包括弹性变形、塑性变形、切屑形成、结合剂及摩擦力等,是磨削过程中的重要物理变量^[4-5].深入研究成形磨削过程中磨削力的变化有助于了解砂轮的磨损情况,帮助改善加工工艺,提高工件寿命.

理论分析、工程试验和数值模拟是磨削机理常见的研究方法,随着高性能计算机的飞速发展,数值模拟为复杂理论推导和试验研究提供了更好的解决方法^[6].高腾等^[7]针对碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)精密磨削,提出纳米增强生物润滑剂微量润滑方法,分析磨粒与碳纤维的几何干涉、接触力学行为及去除机理,建立磨削力预测模型,该润滑方式可显著降低磨削力.Yang等^[8]基于齿形磨削和平面磨削几何模型,建立了成形磨削力计算模型,得出了正常磨削深度、砂轮等效半径、砂轮线速度和砂轮轮廓之间的接触关系.Azizi等^[9]建立了单磨粒分析模型,研究了平面磨削砂轮表面特征参数对磨削力的影响,并通过试验加以验证,随着砂轮表面特征参数的增大,磨削力会减小.Sun等^[10]运用ABAQUS有限元仿真软件研究磨削SiN陶瓷过程磨削力的变化时指出磨粒形状为正八面体比圆锥体的模拟精度高,且多颗粒的模拟结果比单颗粒更接近试验结果.Ding等^[11]通过构建砂轮三维模型模拟钢轨磨削中磨削力的变化,并进行磨削试验验证,结果表明:磨削力随着磨削压力和砂轮粒度的增加而增大,随着砂轮转速的增加而减小.刘超杰^[12]对钛基复合材料平面磨削力进行仿真分析,通过磨削试验验证得出:磨削过程中磨削力呈现规律性的波动,且磨削力大小与单颗切厚、磨削速度均呈正相关.王子乐^[13]利用ABAQUS进行外圆磨削仿真插件二次开发,探究工艺参数对磨削力的影响,并开展磨削试验,验证了该模型和二次开发插件的有效性.综上所述,国内外关于成形

加工磨削力建模的研究多集中于理论模型,而对磨削力三维仿真模型的研究则多为平面磨削,关于采用三维仿真模型对成形磨削力的研究还较少.三维仿真不仅可以很好地模拟材料在加工过程中的变形和去除,还可以对实际磨削工艺进行预测.因此,建立三维仿真模型对成形磨削过程中磨削力的演变规律研究至关重要.

18CrNiMo7-6渗碳钢是一种含碳量较低的优质结构钢,因其良好的机械性能和加工性能,被广泛应用于对芯部韧性要求较高的重型和高应变齿轮零件^[14-16].马少奇^[17]通过对18CrNiMo7-6钢开展外圆磨削试验,探究了磨削参数对磨削力的影响,发现工件转速对磨削力的影响较小,磨削力随砂轮径向进给速度、磨削宽度的增大而增大.吴少洋^[18]针对18CrNiMo7-6钢圆棒试样的磨削过程数值模拟表明,磨削深度是磨削力的显著影响因素,且其对法向力的影响高于切向力.由此可见,关于工艺参数对18CrNiMo7-6钢外圆磨削力的研究比较完善,但是关于V型缺口成形外圆磨削力的研究还比较少见.

因此,本文主要针对18CrNiMo7-6钢V型缺口成形外圆磨削过程,利用ABAQUS有限元仿真软件建立三维仿真模型,设计单因素试验,探究砂轮转速 n_s 、工件转速 n_w 及砂轮径向进给速度 v_r 对法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 的影响规律,并开展成形磨削V形缺口的磨削力试验,验证仿真模型的准确性.

1 磨削力仿真

1.1 几何模型建立和网格划分

本文所用的砂轮为底部圆弧半径 $R=0.14\text{ mm}$,双斜边角度为 60° 、粒度号为230/270#的CBN砂轮.砂轮表面形貌的关键特征包括有效磨粒数量、几何形状、间距及出刃高度.以往对CBN砂轮仿真模型的建立忽略了磨粒形状的不规则性和尺寸的不确定性,磨粒上存在的多个切削刃未被还原,导致仿真结果存在误差^[19-20].

构建通过空间随机平面切割正六面体生成的随机多面体CBN砂轮磨粒模型^[21],如图1所示.根据国家标准^[22]可知,粒度号为230/270#的CBN砂轮磨粒尺寸范围为 $53\sim 75\ \mu\text{m}$.图1中边长为 a 的正六面体基体为磨粒的最大尺寸,半径为 r 的虚拟球体为磨粒的最小尺寸,据此获得若干随机形状的磨粒.

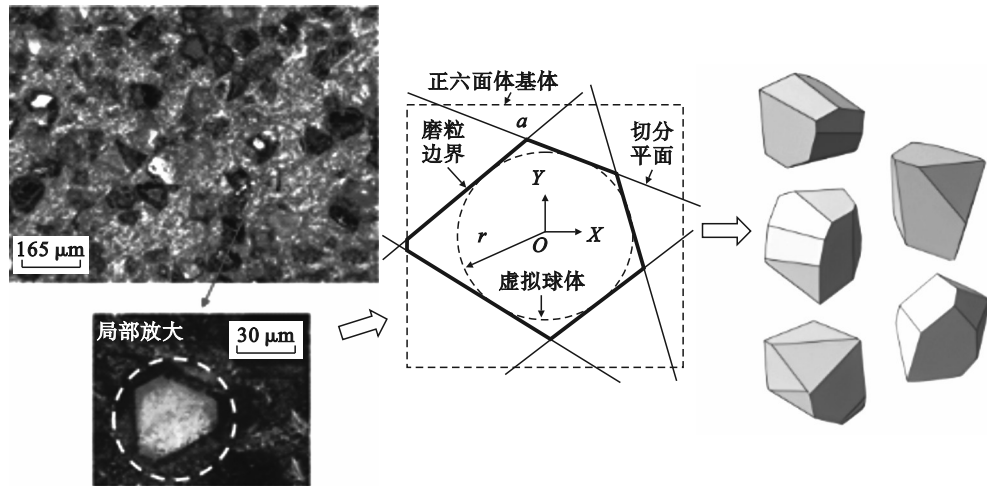


图 1 CBN 磨粒模型

Fig. 1 CBN abrasive particle model

对砂轮进行几何建模时,通过调控磨粒出刃高度与间距,改变其在砂轮基体上的分布.磨粒的平均粒径为 $\bar{d}=64\ \mu\text{m}$,出刃高度服从正态分布.实际工作中,为防止磨粒发生破碎脱落,砂轮表面磨粒最大出刃高度取 $\bar{d}/3$,磨粒平均间距 $L^{[13]}$ 如式(1)所示.

$$L = \bar{d} \left(\sqrt{\frac{\pi}{4\rho_g}} \right) \quad (1)$$

式中: \bar{d} 为磨粒的平均粒径; ρ_g 为砂轮体积质量.

考虑现有计算条件,对实际砂轮尺寸进行合理缩小,建立外径为 3 mm 的成形砂轮模型,如图 2a 所示.磨粒分布在中间圆弧段区域以及圆弧两侧边区域,如图 2b 中 I, II, III 所示.为了模拟实际砂轮中磨粒的密度及分布,控制磨粒出刃高度 δ 为 $[0, \bar{d}/3]$,砂轮基体面积为 S ,磨粒数目 $N = S/L^2$.磨粒具体装配过程如下:

- 1) 创建区域 I 的第一个随机磨粒分布模型.
- 2) 令生成的磨粒绕 Y 方向随机旋转 θ 角度,控制磨粒在区域 I 向上的分布位置,将三维柱坐标转变为笛卡尔坐标系.
- 3) 重复以上步骤在区域 I 创建后续磨粒坐标,同时计算每个磨粒之间的距离 l .

$$l = \sqrt{(x_{i+\delta} - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2)$$

4) 将磨粒中心间距 l 与 L 进行比较,直到数量满足区域 I 的总磨粒数量 N_i .

5) II, III 区域磨粒位置建模与该过程类似,区别在于 II 区域的映射函数并非直线.

磨粒位置建模完成后,使用 Python 脚本对磨粒进行装配,至此建立了磨粒尺寸 53~63 μm 的 V 型缺口成形磨削有限元仿真砂轮模型.

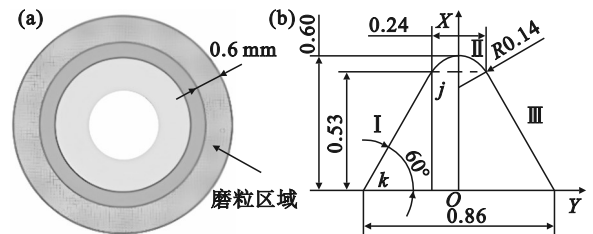


图 2 砂轮模型几何示意图(单位:mm)

Fig. 2 Geometric diagram of grinding wheel model (unit:mm)

(a)一主视图;(b)一截面尺寸.

为减少网格数量、提升计算速度,对工件几何模型进行合理简化.砂轮仿真模型与工件网格划分分别如图 3 和图 4 所示.

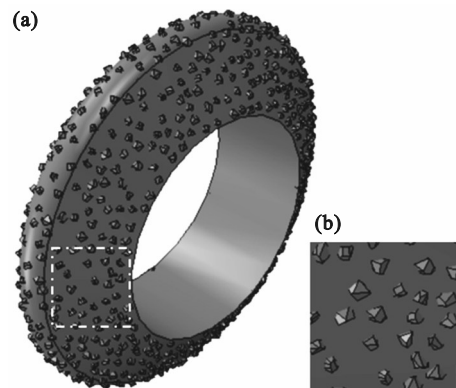


图 3 砂轮仿真模型

Fig. 3 Simulated grinding wheel model

(a)一砂轮仿真模型;(b)一局部放大图.

1.2 本构模型和参数

成形磨削 18CrNiMo7-6 渗碳钢易出现高温、高应变和高应变率等现象. Johnson-Cook (J-C) 本构模型考虑了热软化效应、应变率等因素,常被用于描述金属材料在高应变率下的应力-应变关系.本文采用 J-C 本构模型作为 18CrNiMo7-6

渗碳钢的本构模型,其表达式为

$$\sigma = \left(\sigma_0 + B_m \varepsilon_p^n \right) \left[1 + C_m \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]. \quad (3)$$

式中: σ 为屈服应力; σ_0 为初始屈服强度; B_m 为应变硬化参数; C_m 为应变率强化系数; n 为应变硬化系数; m 为热软化系数; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T 为瞬时温度; T_m 为熔点; T_r 为室温.

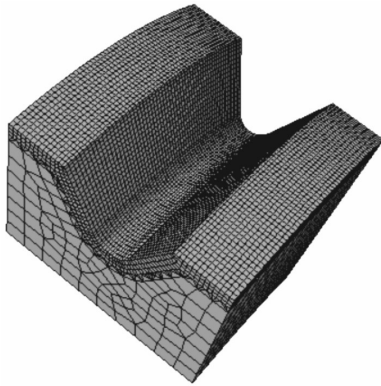


图4 工件网格划分

Fig. 4 Mesh division of workpiece

18CrNiMo7-6 渗碳钢化学成分如表 1 所示.

表 1 18CrNiMo7-6 渗碳钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 steel (mass fraction)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
0.15~0.21	0.4	0.50~0.90	≤0.035	≤0.035	1.50~1.80	1.40~1.70	0.25~0.35	余量

表 2 CBN 砂轮与工件材料基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of CBN grinding wheel and workpiece materials

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	硬度
CBN	706	0.15	3 450	8 000(HV)
18CrNiMo7-6	210	0.30	7 800	60(HRC)

表 3 18CrNiMo7-6 钢本构模型参数值

Table 3 Parameter values of constitutive model for 18CrNiMo7-6 steel

参数	数值	参数	数值
σ_0 /MPa	263	D_1	0.05
B_m /MPa	624	D_2	0.80
C_m	0.017	D_3	-1.54
m	1.3	D_4	0.01
n	0.26	D_5	1

1.4 接触摩擦类型

摩擦和塑性变形行为对工件加工精度和砂轮寿命有重要影响.磨粒磨削涉及 2 个摩擦接触区(图 5):区域 1 是磨粒前刀面与流动切屑的接触区,区域 2 是磨粒后刀面与已加工表面的接触区.

CBN 砂轮和 18CrNiMo7-6 渗碳钢的基本物理参数见表 2^[22-23],18CrNiMo7-6 渗碳钢的 J-C 本构模型参数值如表 3^[23]所示.仿真过程中将砂轮定义为刚体.

1.3 损伤失效准则

Johnson-Cook 损伤失效准则^[24]考虑应力、应变和温度等的影响,适用于描述 V 型缺口成形外圆磨削过程中磨屑与工件基体的分离过程,其表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f}. \quad (4)$$

式中: D 为损伤参数; $\Delta \bar{\varepsilon}_p$ 为积分周期中等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}_f$ 为当前步长等效断裂应变;当损伤演变开始时 D 为 0,随着损伤不断积累 D 也随之增大,当 $D=1$ 时,材料会发生断裂,并且此仿真单元被移除.则材料失效断裂的应变表达式为

$$\bar{\varepsilon}_f = \left(D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]. \quad (5)$$

式中: σ_m 是平均应力; σ_{eq} 是 von Mises 等效应力; $\dot{\varepsilon}$ 是实际应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 是参考应变率; D_1, D_2, D_3, D_4 和 D_5 为 Johnson-Cook 损伤参数.

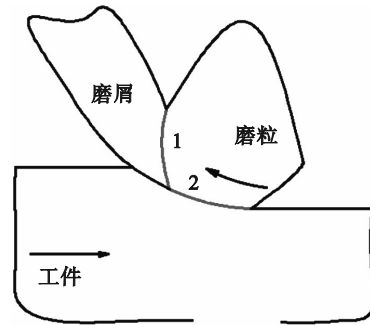


图 5 磨粒与工件摩擦接触区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of friction contact zone between abrasive particles and workpiece

根据接触应力,接触区 1 又可分为黏结区和滑动区.黏结区为靠近磨粒切削刃的位置,磨粒挤压工件材料使磨屑处于塑性变形状态,易发生黏结;滑动区为远离切削刃的位置,材料则发生

冷作硬化,磨粒与磨屑为滑动摩擦,摩擦应力符合库仑定理^[25],如式(6)所示.

$$\tau = \begin{cases} \tau_{crit}, \mu\sigma_n < \tau_{crit} \text{ (黏结区);} \\ \mu\tau, \mu\sigma_n > \tau_{crit} \text{ (滑动区).} \end{cases} \quad (6)$$

式中: τ 为摩擦应力; τ_{crit} 为剪切屈服应力; μ 为摩擦系数; σ_n 为接触面法向应力.区域2也采用库仑摩擦模型进行描述.

2 磨削力试验

2.1 试验条件与方法

试样为渗碳热处理后的 18CrNiMo7-6 钢,缺口试样最终要达到的尺寸精度要求如图 6a 所示;图 6b 为磨削力试验开始前的试样实物图.在磨削力试验阶段加工 V 型槽达到零件图要求的尺寸精度.V 型缺口成形加工设备为瑞士 EWAG 公司 WS11 万能工具磨床;测量装置是由 Kistler 公司生产的三坐标平面测力仪改装,平面测力仪加装可升降 V 型滚动支撑机构,如图 7 所示.试验装置安装方法如图 8 所示,保证测力仪水平和垂直方向平面度的跳动在 0.01 mm 以内,且工件在转动过程中的最大圆周跳动误差在 0.01 mm 以内.

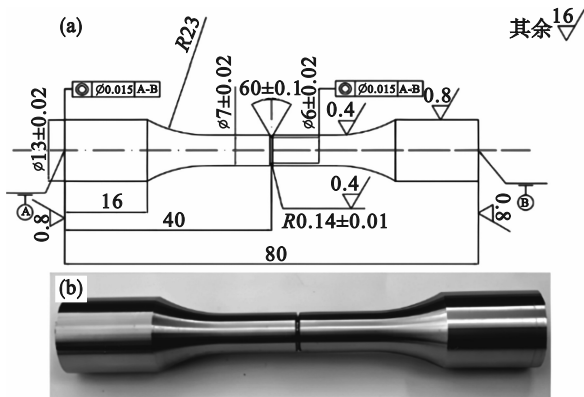


图 6 V 型缺口试样
Fig. 6 V-notch specimen
(a)—加工尺寸图;(b)—实物图.

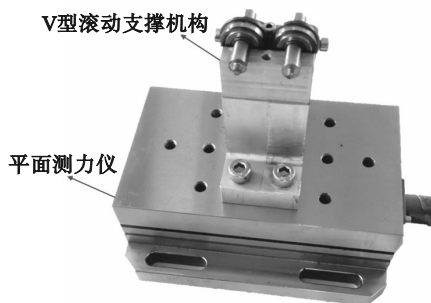


图 7 成形切入磨削测量装置
Fig. 7 Measuring device for forming plunge grinding

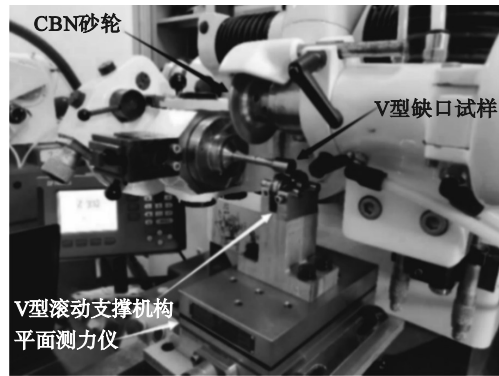


图 8 测力仪的安装

Fig. 8 Installation of force measuring instruments

试验开始前,利用悬挂标准砝码法标定测力系统.试验开始后,将砂轮与工件空转时的状态设为磨削力零点,则可将测力过程简化为简支梁力学结构,如图 9 所示,并对测力结果进行力学分析.

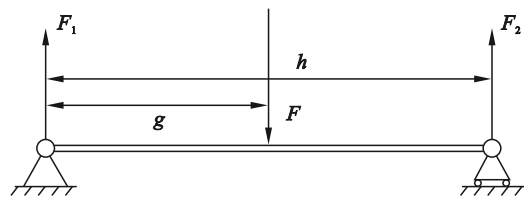


图 9 受力分析示意图

Fig. 9 Schematic diagram of force analysis

图 9 中 F 为工件所受磨削力, F_1 为磨床夹具对工件的支撑力,测力仪实际输出的力经标定后为 F_2 .由受力平衡可得

$$F = \frac{h}{g} F_2. \quad (7)$$

2.2 仿真及试验方案

仿真分析采用单因素试验法,以砂轮转速 n_s 、工件转速 n_w 及砂轮径向进给速度 v_r 为自变量,探究成形缺口磨削数值仿真过程中不同加工工艺参数对磨削力的影响.因轴向磨削力 F_a 远小于法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t ,可忽略不计,故只考虑 F_n 和 F_t ,试验方案与仿真方案相同.具体工艺参数及试验方案见表 4.

3 磨削力仿真结果与试验结果分析

3.1 仿真及试验结果分析

图 10 为 $n_s=6\ 000\ \text{r/min}$, $v_r=0.15\ \text{mm/min}$ 条件下, $n_w=500, 600, 700, 800\ \text{r/min}$ 时 V 型缺口成形外圆磨削后工件上应力分布状况.

选取仿真砂轮中心为参考点,对不同工艺

参数下的磨削力进行提取.当 $n_w=700$ r/min, $n_s=6\ 000$ r/min, $v_f=0.15$ mm/min 时,成形砂轮稳定磨削状态下, F_n 和 F_t 随仿真时间变化(图 11),再分

别求其平均值,作为该工艺参数下法向磨削力和切向磨削力的值.

表 4 单因素试验工艺参数
Table 4 Process parameters of single-factor experiment

序号	砂轮转速 $n_s/(r \cdot \min^{-1})$	工件转速 $n_w/(r \cdot \min^{-1})$	砂轮径向进给速度 $v_f/(mm \cdot \min^{-1})$
1	4 000,5 000,6 000,7 000,8 000	700	0.15
2	6 000	500,600,700,800,900	0.15
3	6 000	700	0.1,0.125,0.15,0.175,0.2

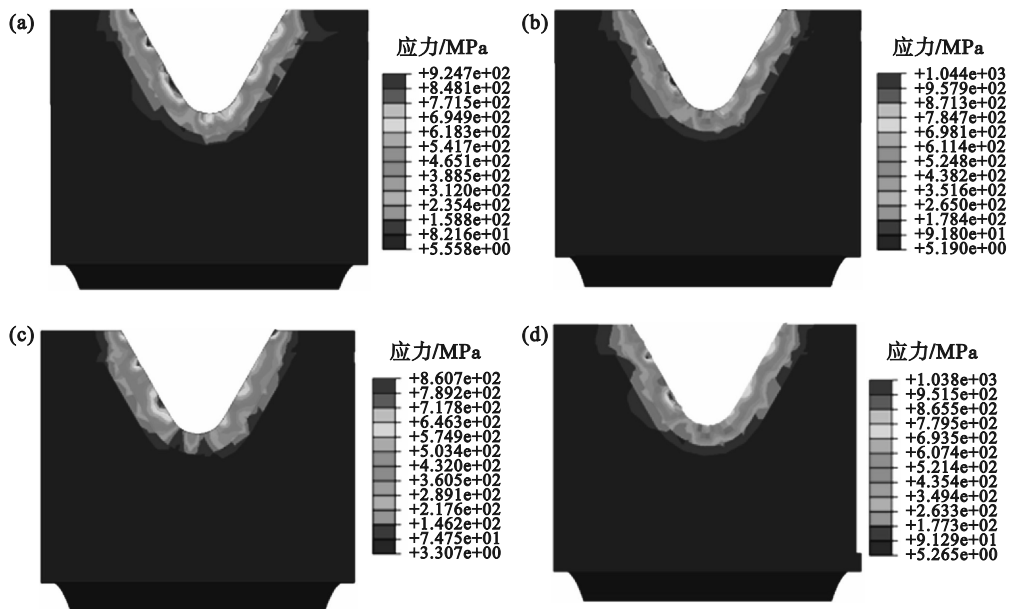


图 10 V形缺口外圆磨削仿真得到工件上的应力分布

Fig. 10 Stress distribution on workpiece obtained by V-notch's cylindrical grinding simulation

(a)— $n_w=500$ r/min; (b)— $n_w=600$ r/min; (c)— $n_w=700$ r/min; (d)— $n_w=800$ r/min.

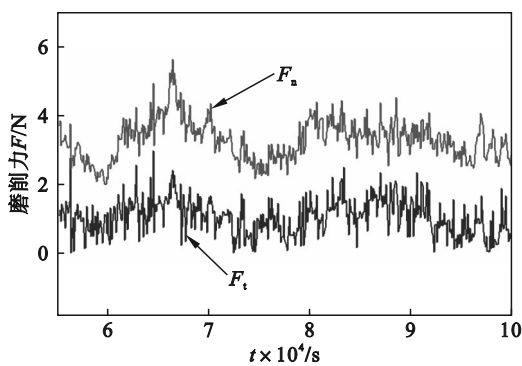


图 11 缺口磨削仿真所得磨削力曲线

Fig. 11 Grinding force curves obtained from notch grinding simulation

Kistler 测力系统的采集频率为 10 kHz,利用测力仪的数据采集与显示软件,可实时观测磨削力变化趋势.以式(7)为依据,对原始信号进行滤波和平滑处理.当 $n_w=700$ r/min, $n_s=6\ 000$ r/min, $v_f=0.15$ mm/min 时,滤波后成形磨削过程中磨削

力随磨削时间的变化曲线如图 12 所示.

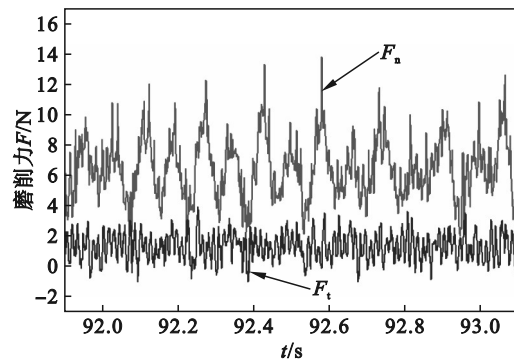


图 12 缺口磨削试验所得磨削力曲线

Fig. 12 Grinding force curves obtained from notch grinding experiments

由图 13 可知,在 V 型缺口成形外圆磨削试验和仿真过程中法向磨削力始终大于切向磨削力.由图 13a 可知,当工件转速 n_w 和砂轮径向进给速

度 v_r 一定时, 试验和仿真的法向磨削力与切向磨削力随着砂轮转速 n_s 的增大均呈现减小趋势, 法向磨削力减小的幅度更为显著. 这是由于单位时间内作用于工件的有效磨粒数量随着砂轮转速的增大而增加, 但材料的去除率在单位时间内没有发生变化, 造成单颗磨粒的材料去除体积在原有基础上减小, 磨削深度随之降低, 最大未变形磨削厚度随之减小, 导致磨削力也减小.

向磨削力随着工件转速 n_w 的提高均呈现增大的趋势, 法向磨削力增大的幅度更为显著. 这是因为单位时间内总的材料去除率随着工件转速的增加而提高, 使单颗磨粒的最大未变形磨削厚度随之增加, 导致磨削力呈现增大的趋势.

由图 13c 可知, 当砂轮转速 n_s 和工件转速 n_w 一定时, 试验和仿真的法向磨削力与切向磨削力均随着砂轮径向进给速度 v_r 的增大而呈现增大趋势. 这是因为单颗磨粒的切削厚度随着砂轮径向进给速度的增大而增大, 延长了工件与砂轮的磨削接触弧长, 磨削加工的有效磨粒数量随之增多, 导致磨削力呈现增大趋势.

3.2 仿真与试验结果误差分析

如图 14 所示, 磨削力仿真与试验结果具有一致性, 但仿真与试验结果相比存在一定误差. 在砂轮转速对磨削力的影响方面, 仿真所得法向磨削力平均误差为 11.06%, 切向磨削力平均误差为 9.89%; 在工件转速对磨削力的影响方面, 仿真所得法向磨削力平均误差为 9.21%, 切向磨削力平均误差为 13.89%; 在砂轮径向进给速度对磨削力的影响方面, 仿真所得法向磨削力平均误差为 10.77%, 切向磨削力平均误差为 15.55%. 整体上, 仿真模拟结果与试验结果的最大误差不超过 20%.

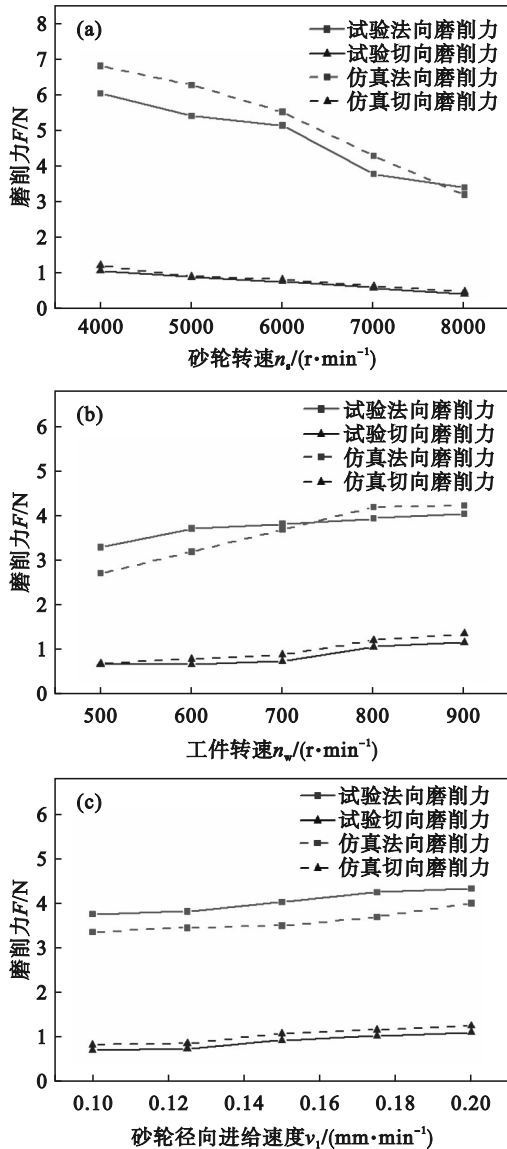
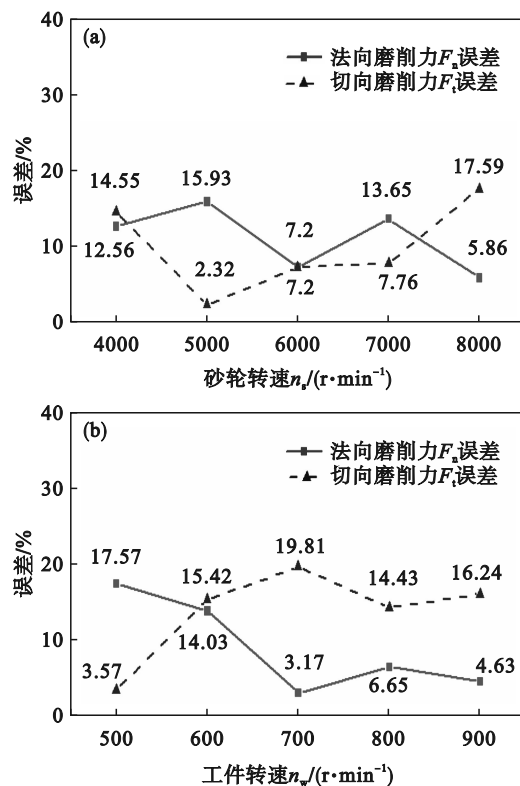


图 13 不同工艺参数对磨削力的影响

Fig. 13 Influence of different process parameters on grinding force

(a) 当 $n_w=700$ r/min, $v_r=0.15$ mm/min 时, 砂轮转速对磨削力的影响; (b) 当 $n_s=6000$ r/min, $v_r=0.15$ mm/min 时, 工件转速对磨削力的影响; (c) 当 $n_s=6000$ r/min, $n_w=700$ r/min 时, 砂轮径向进给速度对磨削力的影响.

由图 13b 可知, 当砂轮转速 n_s 和砂轮径向进给速度 v_r 一定时, 试验和仿真的法向磨削力与切



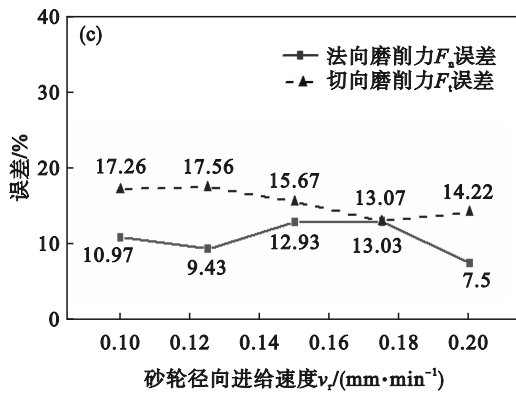


图 14 不同工艺参数下磨削力仿真与试验结果对比
Fig. 14 Comparison of simulated and experimental results of grinding force under different process parameters

(a) 当 $n_w=700$ r/min, $v_r=0.15$ mm/min 时, 砂轮转速对误差的影响; (b) 当 $n_s=6\ 000$ r/min, $v_r=0.15$ mm/min 时, 工件转速对误差的影响; (c) 当 $n_s=6\ 000$ r/min, $n_w=700$ r/min 时, 砂轮径向进给速度对误差的影响。

产生误差的原因可能有:

- 1) 18CrNiMo7-6 渗碳钢和砂轮材料参数不准确, 导致仿真计算时的受力情况与实际不符;
- 2) 仿真中将砂轮视为刚体, 虽提升了计算效率, 但忽略了实际加工中的砂轮磨损与钝化现象, 导致工况还原度不足;
- 3) 仿真模型中对砂轮尺寸作了缩小处理, 这会对磨削过程中的接触弧长造成一定影响, 从而会影响仿真磨削力的结果; 磨屑的破坏位移受限于模型网格划分的大小, 而磨屑状态对仿真结果也存在一定的影响。

4 结 论

1) 试验与仿真所得的法向磨削力始终大于切向磨削力. 法向磨削力和切向磨削力随着砂轮转速 n_s 的增大均呈现减小趋势, 随着工件转速 n_w 的增大均呈现增大趋势, 随着砂轮径向进给速度 v_r 的增加均呈现增加趋势。

2) 磨削过程中, 相较于工件转速和砂轮径向进给速度, 砂轮转速对磨削力的影响程度较为显著, 工件转速次之。

3) 磨削力仿真与试验结果的变化规律具有一致性, 验证了缺口成形磨削仿真模型的可靠性. 不同加工工艺参数下, 法向磨削力最大平均误差为 11.06%, 切向磨削力最大平均误差为 15.55%; 仿真与试验结果整体上最大误差不超过 20%。

4) 仿真模型可反映缺口成形磨削加工过程

中及缺口成形磨削完成后 V 型缺口的应力分布状况, 因此可对磨削加工后工件表面及表层残余应力的分布状况进行预测。

参考文献:

- [1] Liao D, Zhu S P, Correia J A F O, et al. Recent advances on Notch effects in metal fatigue: a review [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(4): 637-659.
- [2] Witkin D B, Patel D N, Bean G E. Notched fatigue testing of Inconel 718 prepared by selective laser melting [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(1): 166-177.
- [3] Li Z L, Shi D Q, Li S L, et al. A systematical weight function modified critical distance method to estimate the creep-fatigue life of geometrically different structures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 126: 6-19.
- [4] Meng Q Y, Guo B, Zhao Q L, et al. Modelling of grinding mechanics: a review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(7): 25-39.
- [5] Zhang Y B, Li C H, Ji H J, et al. Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 122: 81-97.
- [6] Gao P E, Tian P E, Tang Z H, et al. Comprehensive review of simulation methods in grinding processes: models, mechanisms, applications, and future directions [J]. *Journal of Metals*, 2025, 77(9): 1-18.
- [7] 高腾, 李长河, 张彦彬, 等. 纳米增强生物润滑剂 CFRP 材料去除力学行为与磨削力预测模型 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(13): 325-342.
(Gao Teng, Li Chang-he, Zhang Yan-bin, et al. Mechanical behavior of material removal and predictive force model for CFRP grinding using nano reinforced biological lubricant [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(13): 325-342.)
- [8] Yang S Y, Liang R J, Chen W F, et al. Modelling and experiment for grinding forces of gear form grinding considering complete tooth depth engagement [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, 236(13): 1738-1750.
- [9] Azizi A, Mohamadyari M. Modeling and analysis of grinding forces based on the single grit scratch [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5): 1223-1231.
- [10] Sun J, Wu Y H, Zhou P, et al. Simulation and experimental research on Si_3N_4 ceramic grinding based on different diamond grains [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(6): 168781401770559.
- [11] Ding H H, Han Y C, Zhou K, et al. Grinding force modeling and experimental verification of rail grinding [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020, 234(8): 1254-1264.
- [12] 刘超杰. 钛基复合材料高速磨削加工磨削力仿真分析 [J]. *机械制造与自动化*, 2019, 48(2): 89-93.
(Liu Chao-jie. Simulation analysis of grinding force in high speed grinding of titanium matrix composites [J]. *Machine Building & Automation*, 2019, 48(2): 89-93.)
- [13] 王子乐. 18CrNiMo7-6 钢外圆磨削仿真与试验研究 [D].

- 郑州:郑州大学, 2021.
(Wang Zi-le. Simulation and experimental research on cylindrical grinding of 18CrNiMo7-6 steel [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.)
- [14] Fu P, Jiang C H, Ji V. Microstructural evolution and mechanical response of the surface of 18CrNiMo7-6 steel after multistep shot peening during annealing[J]. *Materials Transactions*, 2013, 54(12): 2180-2184.
- [15] 张银霞, 杨鑫, 原少帅, 等. 18CrNiMo7-6 钢高速外圆磨削的残余应力[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5): 540-546.
(Zhang Yin-xia, Yang Xin, Yuan Shao-shuai, et al. Residual stress of high-speed cylindrical grinding of 18CrNiMo7-6 steel [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5): 540-546.)
- [16] Zhang Y X, Yuan S S, Yang X, et al. Dry hard turning versus grinding: the influence of machining-induced surface integrity on fatigue performance [J]. *Coatings*, 2023, 13: 809.
- [17] 马少奇. 18CrNiMo7-6 钢外圆磨削力及表面完整性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
(Ma Shao-qi. Research on grinding force and surface integrity of 18CrNiMo7-6 steel in cylindrical grind [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.)
- [18] 吴少洋. 18CrNiMo7-6 合金钢外圆及缺口磨削仿真研究与试验验证 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
(Wu Shao-yang. Simulation study and experimental verification of cylindrical and notch grinding of 18CrNiMo7-6 alloy steel [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.)
- [19] Li X K, Wolf S, Zhi G, et al. The modelling and experimental verification of the grinding wheel topographical properties based on the 'through-the-process' method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1): 649-659.
- [20] Li C S, Sun L, Yang S, et al. Three-dimensional characterization and modeling of diamond electroplated grinding wheels [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 553-563.
- [21] 张银霞, 韩程宇, 杨鑫, 等. GCr15 钢平面磨削力仿真分析与实验研究 [J]. 表面技术, 2019, 48(10): 342-348.
(Zhang Yin-xia, Han Cheng-yu, Yang Xin, et al. Simulation analysis and experimental research on surface grinding force of GCr15 steel [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 342-348.)
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 超硬磨料 粒度检验: GB/T 6406—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. Superabrasive—checking the grain size: GB/T 6406—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.)
- [23] 王栋, 王建军, 李宁. 外圆磨削 18CrNiMo7-6 表面完整性研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学版), 2020, 34(4): 76-86.
(Wang Dong, Wang Jian-jun, Li Ning. Study on surface integrity of cylindrical grinding 18CrNiMo7-6 [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2020, 34(4): 76-86.)
- [24] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [25] Özel T. The influence of friction models on finite element simulations of machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(5): 518-530.