

40CrNiMo 齿轮钢多颗磨粒干涉切削仿真

陈海锋, 陈权豪

(湖南科技大学, 湖南湘潭 411201)

摘要:为高效、直观分析磨削过程中磨粒间轨迹干涉情况,使用 ABAQUS 软件仿真磨粒间轨迹干涉情况,并以此分析单颗磨粒和干涉磨粒与工件材料的应力分布情况以及对法向磨削力、切向磨削力和轴向磨削力的对比变化趋势。有限元仿真结果表明:工件在磨粒的推挤作用下,材料发生塑性变形形成较大的侧向流动,并沿磨粒两侧隆起最终在磨粒前方形成磨屑。此外,干涉磨粒各方向磨削力均大于单颗磨粒磨削力,这是由于单颗磨粒磨削工件后残余应力引起的。

关键词:磨粒;干涉;划擦;有限元仿真

中图分类号:TG58;TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0119-03

Simulation of Multi Abrasive Grain Interference Cutting of 40CrNiMo Gear Steel

CHEN Haifeng, CHEN Quanhao

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: For effective and intuitive analysis of the track interference between abrasive particles in the grinding process, ABAQUS software is applied to simulate the track interference between abrasive particles, with which the stress distribution between single abrasive particle and interference abrasive particle and workpiece material as well as the comparative change trend of normal grinding force, tangential grinding force and axial grinding force are studied. The finite element simulation results show that the material of workpiece, pushed by abrasive particles, deforms plastically, forms a large lateral flow and bulges along both sides of the abrasive particles, forming debris in front of the abrasive particles. Moreover, the grinding force in all directions of the interference abrasive grain is greater than that of a single abrasive grain due to residual stress after grinding the workpiece with a single abrasive grain.

Keywords: abrasive grain; interference; scratch; finite element simulation

0 引言

磨削是一种多参数相互影响的特殊加工过程,可以看作是数千条不规则微刃与工件相互作用的过程,此过程涉及切割、犁削和划擦。微观层面上磨粒-工件相互作用和材料去除机制对分析磨削过程和控制磨削表面质量非常重要。单颗磨粒的切削特性是国内外研究的热点,实验是研究单颗磨粒切削机理最为直接和有效的方法,但是实验难以观察到磨粒与工件材料的微观瞬态变化过程,仿真方法能够获得实验研究难以测量的物理量及其变化规律,因此许多学者采用计算机仿真模拟磨粒的切削过程,并取得了许多有益的成果^[1-6]。但是现有的模拟仿真主要针对单颗磨粒,在整个磨削过程中,一颗磨粒去除材料而不受其他磨粒影响的现象是很少的,在绝大多数的情况下,磨粒与磨粒在去除材料的过程中是相互影响的。一颗磨粒完成材料去除,会在材料表面形成一道沟槽,当下一颗磨粒也完成材料去除时,同样在材料表面形成一道沟槽,但这两个沟槽并不完全分开,而是部分重叠,相互干涉,这一现象称为磨粒切削的干涉现象,如图 1 所示。

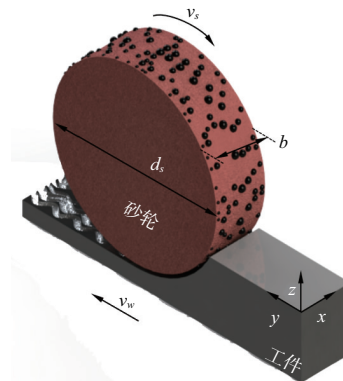


图 1 磨粒磨削干涉现象示意图

图 2 为本文磨粒干涉试验相关参数图。 h 为磨削深度; S 为两次磨粒切削仿真的间距; L 为沟槽宽度。采用 ABAQUS 软件对磨粒的干涉现象进行仿真分析,切削深度为 $15\ \mu\text{m}$ 时,两颗磨粒干涉的比例为 25%,即 $S/L = 25\%$,切削速度为 $10\ \text{m/s}$,工件材料为 40CrNiMo 钢。首先对第一颗磨粒的切削过程进行仿真分析,然后在第一颗磨粒切削轨迹的基础上,进行第二颗磨粒的干涉切削仿真。

基金项目:国家自然科学基金项目(51605160)

第一作者简介:陈海锋(1986—),男,湖南邵阳人,副教授,博士,研究方向为超声辅助加工、复杂零件表面强化工艺,chenhf1986@126.com。

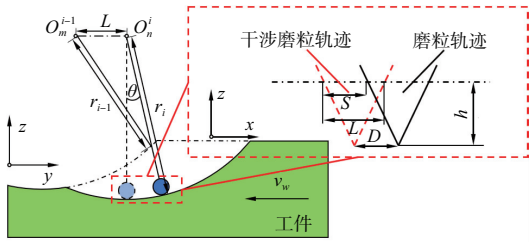


图2 磨粒干涉试验参数说明图

1 单颗磨粒磨削特性分析

已有的研究表明^[7-8],磨削过程可以分为3个阶段:滑擦、耕犁和切屑形成,并且与磨粒的形状无关。在滑擦阶段,磨粒与工件表面开始接触,工件仅发生弹性变形,随着磨粒滑过工件表面,弹性变形进一步加剧,因而法向力逐渐增大,摩擦力及切向力也同时逐渐增大,在该阶段,磨粒不起切削作用,只是在工件表面滑擦。随着磨粒与工件表面接触深度的逐渐增加,摩擦逐渐加剧,越来越多的能量转变为热,当材料被加热到临界点,逐渐增加的法向应力超过了随温度上升而逐渐下降的材料屈服应力,磨粒被压力挤入基体中,工件由弹性变形转变为塑性变形,材料被推向磨粒的两侧及前方,最终导致表面的隆起,这就是磨削中的耕犁阶段。在滑擦和耕犁阶段中,磨粒并不产生切屑,当磨粒与工件的接触深度进一步增加,超过材料的临界切削厚度 h_{crit} 后,材料才由塑性变形转变为切屑去除。如图3所示,使用MATLAB表示磨削过程中材料的变化情况。

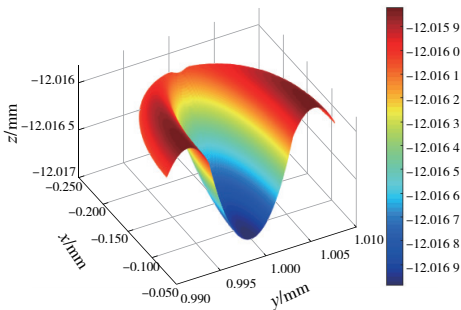


图3 考虑耕犁的单颗磨粒三维切削轨迹

2 数值仿真方法

当工件结构开始失效时,材料开始失去承载能力和变形抵抗力。因此通常根据刚度退化对材料损伤进行建模,

当材料刚度完全丧失时,称工件完全失效。图4描述了塑性材料的典型单轴应力应变曲线^[8]。曲线从弹性阶段开始(a-b),然后是使应变硬化的塑性屈服阶段(b-c),最后材料开始失去承载能力,直至完全断裂(c-d)。

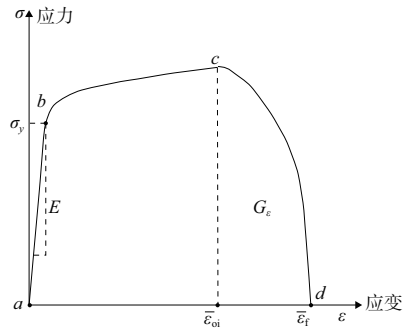


图4 金属试样的单轴应力应变曲线图

在塑性屈服阶段(b-c),本文使用Johnson-Cook本构方程作为描述磨削过程中切应力的理论基础,该方程被广泛应用于不可逆、大变形流应力数值模拟计算,适合高应变磨削变形过程。标准Johnson-cook本构方程为^[9]

$$\tau_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[A + B \left(\frac{\epsilon}{\sqrt{3}} \right)^n \right] \left[1 + \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^c \right] [1 - (\theta^*)^m] \quad (1)$$

式中: $\theta^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$; A, B, C, n, m 为标准Johnson-cook模型的材料参数,具体数值如表1所示; ϵ 是等效应变; $\dot{\epsilon}$ 为等效应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考等效应变率; T 为材料变形过程中的温度; T_m 为材料熔点; T_r 环境参考温度。

在失效断裂阶段(c-d),本文使用J-C失效模型计算40CrNiMo钢材在磨削过程中的失效过程。塑性等效塑性断裂应变可表示为^[10]

$$\bar{\epsilon}_{oi} = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{P}{\tau_0} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 \theta^*] \quad (2)$$

式中 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 为J-C失效模型参数,具体数值如表1所示。表2为40CrNiMo钢的力学特性。在塑性变形过程中,当塑性应变累积增加到失效应变时,材料的损伤演化阶段开始,失效能量通常用于描述损伤演化的终止,如式(3)所示。

$$G_f = \int_{\dot{\epsilon}_{oi}}^{\dot{\epsilon}_f} L \sigma_y d \dot{\epsilon} \quad (3)$$

式中: L 是单元特征长度; σ_y 是屈服应力。

表1 40CrNiMo钢Johnson-cook本构模型参数

A	B	n	C	m	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
792	510	0.26	0.014	1.03	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61

表 2 40CrNiMo 合金钢力学特性参数

参数	数值
热传导率 $K_c/(W/m^{\circ}C)$	38
弹性模量 E/GPa	200
密度 (kg/m^3)	7 830
泊松比	0.298
比热容 $\alpha_c/(J/(kg \cdot ^{\circ}C))$	477
熔点 T_m/K	1 793

3 仿真结果分析

在磨削过程中,划擦、耕犁和切屑形成是 3 个阶段。划擦阶段仅包括弹性变形,而耕犁阶段包括弹性变形和塑性变形。图 5 展示了从划擦阶段到耕犁阶段的转变。

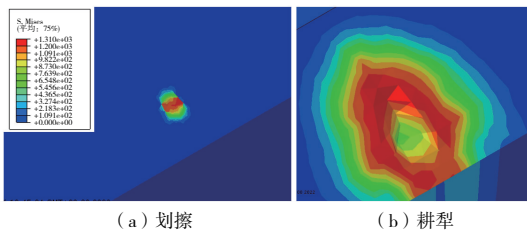


图 5 单颗磨粒划擦转换至耕犁

图 6 为单颗磨粒切屑成形阶段有限元仿真结果,通过沿仿真路径的应力分布可以发现:仿真过程中的应力变化非常明显,磨粒-工件接触区,同时存在弹性变形和塑性变形,当应力达到材料的断裂点时,可能会形成切屑。由于工件材料在磨粒的挤压下沿磨粒两侧隆起,形成的切屑在磨粒的前方开始堆积。磨粒磨削工件后,弹性变形产生的应力将从工件上快速消失,只有塑性变形产生的残余应

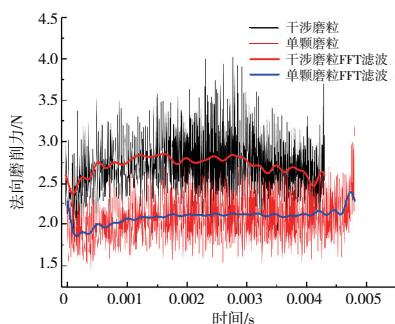


图 8 法向力对比

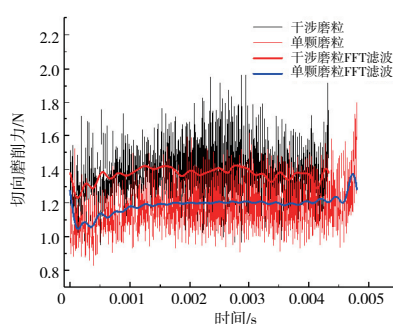


图 9 切向力对比

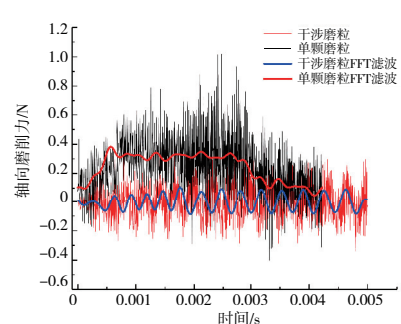


图 10 轴向力对比

表 3 3 个方向切削力的平均值

切削力/N	单颗磨粒	干涉磨粒	比值
法向力	2.093 0	2.763 8	0.757 3
切向力	1.191 7	1.384 1	0.861 9
轴向力	0	0.321 9	—

由图 8—图 10 可知,第一颗磨粒的法向力与切向力均小于第二颗干涉磨粒,干涉磨粒的轴向力大于第一颗磨

力留在工件上。

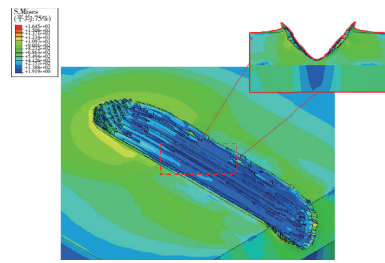


图 6 单颗磨粒有限元仿真

图 7 为单颗磨粒与干涉磨粒划痕有限元仿真结果,在已加工工件表面进行干涉磨削仿真中可以发现:由于磨粒左侧的挤压作用,工件出现隆起的塑性变形现象,磨粒右侧挤压工件时,由于塑性变形的影响存在材料“侵入”单颗磨粒轨迹的现象。在整个磨粒划痕仿真过程中,应力集中主要表现在磨粒-工件接触区。

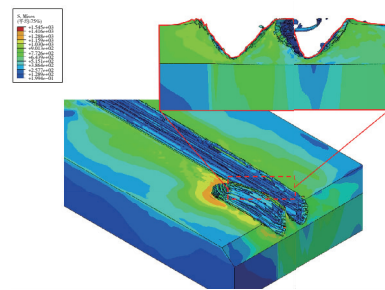


图 7 干涉磨粒有限元仿真

通过采集磨粒反作用力得到初步仿真单颗磨粒与第二颗磨粒在 3 个方向的切削力,并使用 Origin 快速傅里叶变换对切削力进行数据处理,如图 8—图 10 所示,其平均值如表 3 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

粒。根据几何关系计算得到第一颗磨粒的切削截面面积为 $1.677 6 \times 10^{-4} mm^2$,第二颗磨粒的切削截面面积为 $1.488 1 \times 10^{-4} mm^2$,第二颗磨粒的切削截面面积与第一颗磨粒的比为 0.887 0,大于两者切向力的比值。这是由于在切削过程中摩擦力的影响,因为第一颗磨粒与工件的接触区域大于第二颗磨粒,因此切向力中摩擦力所占的比例大于第一颗磨粒,从而使得两者的比值小于切削截面面积的 (下转第 126 页)

4 结语

本文针对机床设备的故障预测与预测问题,提出了基于卷积神经网络的机床健康管理模型。该模型利用卷积神经网络的特征提取能力对输入的特征数据进行有效分类以实现故障的诊断,之后系统根据故障诊断结果调用相应的专家系统知识库给出相应的健康管理策略,最终实现健康管理的功能。从测试的结果来看,该系统可以胜任对机床设备的故障诊断与健康管理的,除此之外,图形化窗口界面极大地改善了用户的使用体验,从而使得该系统具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 高宏力,刘庆杰,黄柏权,等. 数控机床故障预测与健康管理系统关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2217-2226.
- [2] 陈志强,陈旭东, José Valente de Oliveira, 等. 深度学习在设备故障预测与健康中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 206-226.
- [3] SMIRNOV E A, TIMOSHENKO D M, ANDRIANOV S N. Comparison of regularization methods for ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. AASRI Procedia, 2014, 6: 89-94.

- [4] 卢宏涛,张秦川. 深度卷积神经网络在计算机视觉中的应用研究综述[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(1): 1-17.
- [5] CHEN Z Q, LI C, SANCHEZ R V. Gearbox fault identification and classification with convolutional neural networks[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1-10.
- [6] 李恒,张氢,秦仙蓉,等. 基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 124-131.
- [7] 李涛,段礼祥,张东宁,等. 自适应卷积神经网络在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 275-282, 288.
- [8] ZHANG Y L, WANG Y C, LUO G M. A new optimization algorithm for non-stationary time series prediction based on recurrent neural networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 102: 738-745.
- [9] SZEGEDY C, VANHOUCHE V, IOFFE S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE Computer Society, 2016: 2818-2826.
- [10] BERGSTRA J S, BARDENET R, BENGIO Y, et al. Algorithms for hyper-parameter optimization[J]. Advances in neural information processing systems, 2011, 24: 2546-2554.

收稿日期: 2022-03-23

(上接第 121 页)

比。此外,第二颗磨粒的轴向力大于第一颗磨粒,这是由于在第一次切削时,磨粒受到材料左右两侧的挤压力,而在第二次切削时,由于磨粒一侧切削的材料多,而另一侧切削的材料少,两侧产生的挤压力不平衡,导致磨粒产生偏移以及存在于已加工工件表面的残余应力所致,从而形成较大的轴向力。

4 结语

采用 ABAQUS 软件对单颗磨粒的干涉现象进行仿真分析,磨粒在塑性材料的去除过程中,当磨削深度接近临界切削深度时,工件材料会发生严重的塑性变形,形成较大的侧向流动,工件材料在磨粒的挤压下沿磨粒两侧隆起以及堆积在磨粒前端,且已加工工件表面存在一定残余应力。对磨削力监测发现第二颗磨粒的法向力、切向力以及轴向均大于第一颗磨粒,但是与切削截面的面积比不成正比。

参考文献:

- [1] 宿崇,丁江民,许立,等. 单颗立方氮化硼磨粒切削特性及工件材料变形行为的微观力学分析[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 425-431.
- [2] BARGE M, KERMOUCHE G, GILLES P, et al. Experimental and numerical study of the ploughing part of abrasive wear[J]. Wear, 2003, 255(1/2/3/4/5/6): 30-37.
- [3] GUERRINI G, BRUZZONE A A G, CRENNNA F. Single grain

grinding: an experimental and FEM assessment[J]. Procedia CIRP, 2017, 62: 287-292.

- [4] YAN L, JIANG F, HU Z W, et al. Numerical simulation of single grit cutting[J]. Key Engineering Materials, 2013, 589/590: 188-193.
- [5] YAN L, ZHOU Z X, JIANG F, et al. Grain-workpiece interaction study of grinding process through single grain cutting simulation[J]. Key Engineering Materials, 2010, 431/432: 269-272.
- [6] 黄熙程,苏宏华,何静远,等. 单颗磨粒超声振动辅助划擦 C/SiC 复合材料三维有限元仿真[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 98-100, 112.
- [7] ÖPÖZ T T, CHEN X. Experimental investigation of material removal mechanism in single grit grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 63: 32-40.
- [8] AXINTE D, BUTLER-SMITH P, AKGUN C, et al. On the influence of single grit micro-geometry on grinding behavior of ductile and brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 74: 12-18.
- [9] JOHNSON G R, COOK W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. Hague: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983: 541-547.
- [10] 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.

收稿日期: 2022-04-18