

木材单磨粒砂带磨削机理研究

蔡晨¹, 伍希志^{1,2*}, 吴雨阳¹, 李贤军¹, 马恒祺¹

(1. 中南林业科技大学材料科技与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 广州达意隆包装机械股份有限公司, 广东广州 510000)

摘要 基于多线性弹塑性材料本构模型和 Shear Damage 损伤准则, 建立榎木单磨粒砂带磨削的有限元仿真模型; 通过有限元模型, 研究了单磨粒切削的成屑机理、切削力以及切削深度和弹性支撑对切削力的影响。结果表明: 从成屑机理角度, 可将单磨粒切削过程分为滑擦、耕犁和切削 3 个过程。在稳定切削阶段, 切削深度对切削力的影响较大, 随着切削深度的增加, 平均切向切削力及其标准差均增大, 但其变异系数略微减小。理想条件下, 弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑大 44.74%, 考虑外界扰动后弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑小 8.54%。

关键词 砂带磨削; 单磨粒; ABAQUS; 弹性磨削; 木材

中图分类号 S781.3 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)01-0213-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.058



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Grinding Mechanism of Wood Single Abrasive Belt

CAI Chen¹, WU Xi-zhi^{1,2}, WU Yu-yang¹ et al (1. College of Materials Science and Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hunan 410082; 2. Guangzhou Tech-long Packaging Machinery Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000)

Abstract Based on the multi-linear elastic-plastic constitutive model and Shear Damage criterion, the finite element simulation model of single abrasive belt grinding of *Chloroxylon swietenia* was established. Through the finite element model, the chip forming mechanism and cutting force of single abrasive grinding, and the influences of cutting depth and elastic support on the cutting force were studied. The results showed that the single abrasive grinding process could be divided into three stages from the aspect of chip forming mechanism: slipping, ploughing and cutting. In the stable cutting stage, the cutting depth had a greater influence on the cutting force. With the increase of cutting depth, the average tangential cutting force and its standard deviation all increased, but its coefficient of variation decreased slightly. Under ideal conditions, the standard deviation of tangential cutting force of the elastic support was 44.74% larger than that of the rigid support. However, it was 8.54% less than the rigid support under the external disturbance.

Key words Belt grinding; Single abrasive grain; ABAQUS; Elastic grinding; Wood

砂带磨削是采用砂带磨具去除工件表面的一层材质, 使工件达到一定厚度尺寸或表面质量要求的一种工序, 在木材加工中扮演着重要的角色^[1]。砂带磨削过程是由成千上万颗磨粒的微小切削共同切削完成的, 由于磨粒数量多、几何形状不规则、每颗磨粒切削情况不一致等, 通过试验观察分析磨削过程十分困难^[2]。近年来, 有限元仿真技术已成为研究磨削机理的主要手段。许多学者从单颗磨粒磨削出发, 将磨粒抽象为具有一定规则的几何形状进行仿真, 进而解释磨削加工过程中的各类物理现象^[3-4]。

近年来, 金属磨削领域的单颗磨粒磨削过程相关研究较多。Siebrecht 等^[5]基于弹塑性材料模型预测钢材单颗金刚石磨粒的磨削力, 进而指导磨削过程的优化。在木材磨削领域, 大多数学者主要采用经验模型从统计学理论进行研究。王宝刚等^[6]针对条状刷式砂光机磨削木制品异形部件法向压力的变化规律, 研究了不同理论接触长度、砂光条长度、砂光条偏转角度等条件下水曲柳试件磨削时的法向压力变化规律。罗斌等^[7-10]研究了纹理方向、材料种类及磨削参数对木材磨削工程中磨削力及法向力的影响, 结果发现纹理方向对磨削力及法向力的影响达到显著水平, 磨削厚度及进给速

度对磨削力及法向力的影响基本上呈线性变化。

综上所述, 单颗粒磨削在金属领域受到许多学者的关注, 在木材领域尚未见报道。由于木材为非均质材料, 材料力学性能与金属材料有较大的差别, 且砂带基体及其支撑结构具有较大的弹性, 木质材料磨削过程有自己的特点, 因此开展木质材料单颗磨粒磨削过程研究十分必要。笔者采用 ABAQUS/Explicit 显示算法, 基于多线性弹塑性材料本构模型和 Shear Damage 损伤准则, 建立榎木单磨粒砂带磨削的有限元仿真模型, 再利用有限元模型研究单磨粒切削的成屑机理、切削力以及切削深度和弹性支撑对切削力的影响。

1 单磨粒磨削仿真模型

1.1 仿真算法 ABAQUS/Explicit 通过上一增量步的动力学和运动学条件推导下一增量步的动力学条件, 采用中心差分法对运动方程进行显示时间积分。假设 t 时刻节点的动力学平衡方程如下:

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + Ku = F \quad (1)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为模型的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, F 为节点处承受外力和单元内力的合力矩阵, u 为节点位移。

利用中心差分法, 确定下一增量步中节点位移:

$$\begin{cases} \dot{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{u_{(t+\Delta t)} - u_i}{\Delta t} - \frac{u_i - u_{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right] \\ u_i = \frac{1}{2\Delta t} [u_{(t+\Delta t)} - u_{(t-\Delta t)}] \end{cases} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2), 可以得到 $t+\Delta t$ 时刻的位移:

基金项目 长沙市重点研发计划项目(Kq2004094); 国家大学生创新创业训练计划项目(S202010538015); 广州达意隆包装机械股份有限公司博士后科研工作站项目(263805)。

作者简介 蔡晨(1999—), 男, 湖南株洲人, 研究方向: 林业工程。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事林业智能装备、复合材料结构和机器视觉研究。

收稿日期 2021-05-17; **修回日期** 2021-06-19

$$\left[\frac{1}{(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] u_{i+\Delta t} = F_i - \left[K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right] u_i - \left[\frac{1}{(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] u_{i-\Delta t} \quad (3)$$

1.2 材料本构模型 本构模型是描述材料应力与应变、应变率及温度之间关系的数学模型。由于榫木塑性变形较小、磨粒磨削力较小、砂带冷却速度快等原因,磨削温度对工件材料性能的影响较小,不需要考虑磨削时的温度效应。单颗

磨粒切削榫木时,工件与磨粒从接触到分离经历了弹性变形、塑性变形和损伤失效等阶段,需要建立工件材料全历程的本构模型。

在工件材料弹塑性阶段,采用多线性弹塑性材料模型。多线性弹塑性材料模型是一个很常用的材料模型,通过多段直线等效材料的真实应力应变曲线进行模拟。榫木的屈服强度 89.52 MPa,抗拉强度 104.27 MPa,延伸率 4.36%,弹性模量 10 300 MPa,泊松比 0.3^[10],物理参数如表 1 所示。

表 1 磨粒和工件的物理参数

Table 1 Physical parameters of abrasive grain and workpiece

名称 Name	弹性模量 Elastic modulus MPa	泊松比 Poisson's ratio	密度 Density kg/m ³	σ_1 MPa	σ_2 MPa	σ_3 MPa	ε_1	ε_2	ε_3
工件 Work-piece	10 300	0.30	510	89.52	98.00	104.27	0.008 7	0.018 5	0.038 7
磨粒 Abrasive grain	370 000	0.22	3 960	—	—	—	—	—	—

在工件材料损伤失效阶段,为了模拟切削分离,有限元仿真一般采用材料断裂准则,即当单元应变或应变能达到某个值时,单元便失效,模型会自动删除失效单元。材料损伤失效需要定义材料的损伤准则和失效准则。在磨削过程中工件材料主要是剪切失效,采用 Shear Damage 损伤准则。Shear Damage 损伤准则根据单元积分点处的等效塑性应变值判断是否出现损伤。

$$\omega_s = \int \frac{d\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_s^{pl}} \quad (4)$$

式中, ε^{pl} 为材料等效塑性应变, ε_s^{pl} 为材料损伤等效塑性应变。当 $\omega_s = 1$ 时,材料开始出现损伤。

工件材料的失效准则包括能量失效准则和位移失效准则。位移失效准则根据有效塑性位移判断。

$$\dot{u} = L \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (5)$$

式中, L 为单元的特征长度。损伤后材料的应力应变关系可以选择线性关系、指数关系等。

氧化铝磨粒材料的弹性模量和屈服强度比工件大很多,磨削过程中其变形远远小于屈服强度,因此仅需考虑磨粒材料的弹性模量、泊松比和密度,其物理参数如表 1 所示。

1.3 有限元模型的建立 磨削过程中磨粒的大小和形状不确定,磨粒与工件之间存在复杂的物理和化学作用。在单颗磨粒磨削仿真研究中,需要对磨粒进行简化处理,通常的简化模型有圆锥体、球体、多棱锥体、无规则多面体等,颗粒实际形状像多棱锥体。多棱锥体单颗磨粒如图 1 所示,磨粒高度 25 μm ,上下底面正方形边长分别为 60 和 10 μm ,前倾角 -45° 。根据圣维南原理,被加工材料的应力仅集中在切削局部区域,较远区域的应力趋近于 0。在单颗磨粒磨削仿真模型中,为了减少有限元模型的单元数目,只取工件的局部材料,工件尺寸长、宽、高分别为 200、100、50 μm 。

单颗磨粒磨削仿真有限元模型如图 2 所示,磨粒与工件之间采用显示 General contact 接触算法,使磨粒与工件切削过程中始终保持接触;为了提高仿真计算精度,磨粒单元尺寸为 1.6~10.0 μm ,共计 450 036 个单元、474 721 个节点,工件和磨粒单元类型均采用一阶线性减缩积分单元 C3D8R。

约束工件底面 4 个角节点的 3 个自由度,约束磨粒上表面 4 个角节点 X 和 Z 方向的自由度, Y 方向移动 230 μm 。

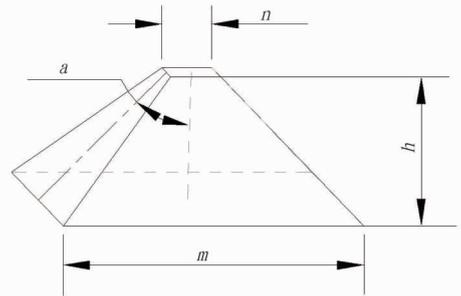


图 1 单颗磨粒形状

Fig. 1 The shape of a single abrasive grain

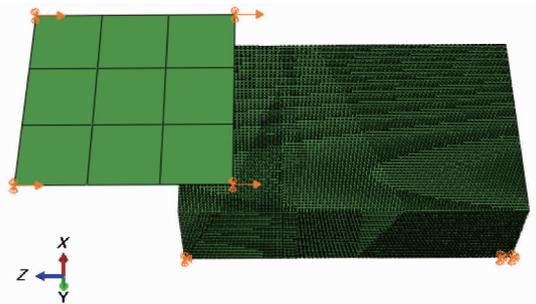


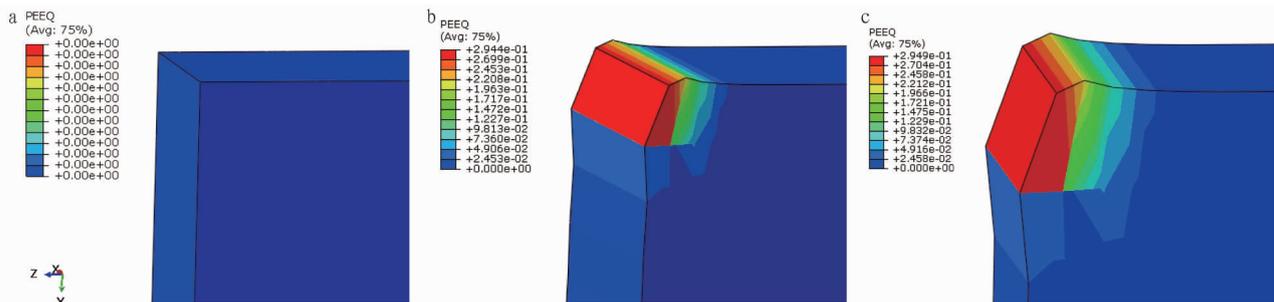
图 2 单颗磨粒磨削的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of single abrasive grain grinding

2 仿真试验结果与分析

2.1 单磨粒切削成屑机理 单颗磨粒磨削过程的等效塑性应变云图如图 3 所示。根据有限元仿真结果,将磨削过程分为滑擦、耕犁和切削 3 个阶段。①滑擦阶段。该阶段磨粒切削刃与工件开始接触,工件只发生弹性变形,其等效塑性应变为 0。如果磨粒退出切削,干涉区域材料可以弹性回复,因此该阶段磨粒不起切削作用,只在工件表面滑擦。②耕犁阶段。随着磨粒切入深度的增加,工件材料受到的法向切削力与切向切削力进一步增大,干涉区域材料变形超过材料的屈服强度,其等效塑性应变大于 0,材料已经发生塑性变形,材料在磨粒前进方向与两侧堆积形成隆起,但并不形成切屑,因此被称为耕犁阶段。③切削阶段。由于磨粒切入深度的

进一步增加,干涉区域材料最终在磨粒切削作用下发生断裂,进而形成切屑,图中最左边单元已被切除。



注:(a). 滑擦;(b). 耕犁;(c). 切削

Note: (a). Slipping; (b). Ploughing; (c). Cutting

图 3 单颗磨粒磨削过程

Fig. 3 Grinding process of a single abrasive grain

2.2 单磨粒切削的切削力 单颗磨粒切削工件仿真的切削力曲线如图 4 所示, Y 表示法向切削力, Z 表示切向切削力。由于磨粒几何对称, X 方向切削力相互抵消, 不予考虑。从图 4 可以看出, 切削初始阶段, 法向切削力和切向切削力从 0 开始逐渐增大, 这是由于磨粒前端面和侧面参与切削的面积越来越大引起的; 在 6.79×10^{-6} s 后, 法向切削力和切向切削力进入平稳的波动阶段, 稳定后平均切向切削力 0.87 N, 平均法向切削力为 0.50 N, 切削力的波动与切削不断飞出, 形成微小冲击; 在 0.92×10^{-4} s 后, 法向切削力和切向切削力开始逐渐减小, 磨粒前端面和侧面参与切削的面积越来越小, 磨粒逐渐退出切削过程。

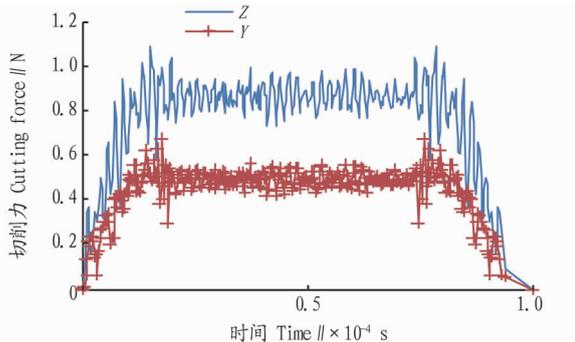


图 4 单颗磨粒切削工件仿真的切削力曲线

Fig. 4 The cutting force curve of a single abrasive grain cutting workpiece simulation

2.3 切削参数对切削力的影响

2.3.1 切削深度对切削力的影响。不同切削深度的单颗磨粒切向切削力曲线如图 5 所示。切向切削力统计量与切削深度的关系如图 6 所示。从图 5~6 可以看出, 随着切削深度的增加, 稳定切削阶段的切向切削力明显增加, 当切削深度分别为 0.04、0.09 和 0.14 mm 时, 稳定阶段的平均切削力分别为 0.30、0.86 和 1.64 N; 随着切削深度的增加, 稳定阶段切向切削力的变化幅度增大, 当切削深度分别为 0.04、0.09 和 0.14 mm 时, 稳定阶段切向切削力的标准差分别为 0.038、0.087 和 0.150 N, 但其变异系数随切削深度的增加而逐渐减小, 当切削深度分别为 0.04、0.09 和 0.14 mm 时变异系数分别为 0.128、0.101 和 0.092。

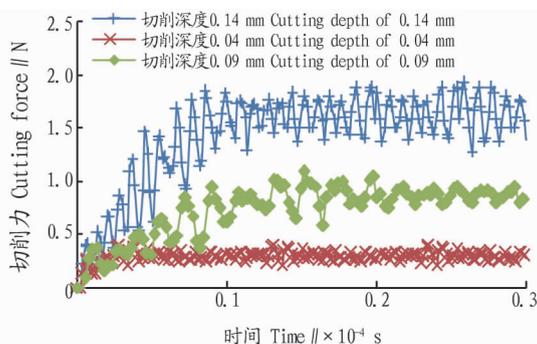


图 5 不同切削深度的单颗磨粒切向切削力曲线

Fig. 5 The tangential cutting force curve of a single abrasive grain with different cutting depth

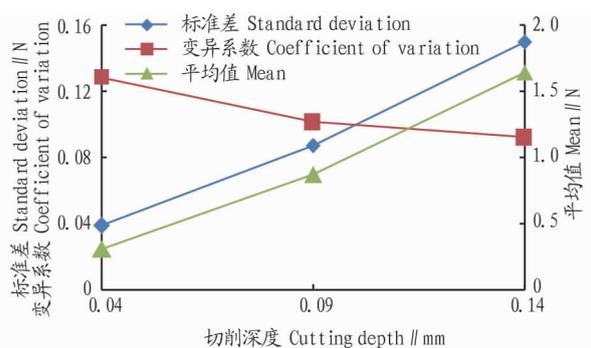


图 6 切向切削力统计量与切削深度的关系

Fig. 6 The relationship between tangential cutting force statistics and cutting depth

2.3.2 弹性支撑对切削力的影响。由于支撑砂带的辊子和砂带基体的弹性模量比磨粒小很多, 砂带磨削实际是弹性磨削。为了分析弹性支撑对磨削的影响, 假定工件为理想平面, 磨粒支撑不受外界环境的影响, 将磨粒 4 个节点与弹簧连接, 建立仿真模型, 弹簧刚度为 2.5 N/mm。不同支撑单颗磨粒的切向切削力曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在整个切削阶段, 弹性支撑的切向切削力波动幅度比刚性支撑大, 其中稳定切削阶段 ($0.03 \times 10^{-4} \sim 0.20 \times 10^{-4}$ s), 刚性支撑和弹性支撑切向切削力的极差分别为 0.271 和 0.196 N, 其标准差分别为 0.038 和 0.055 N, 弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑大 44.74%。

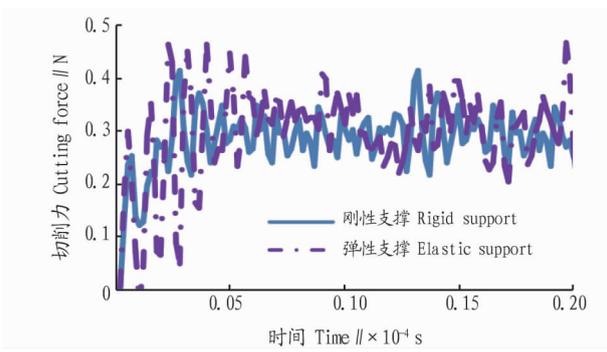


图 7 理想条件下不同支撑单颗磨粒的切向切削力曲线

Fig.7 The tangential cutting force curve of a single abrasive grain with different supports under ideal conditions

上述假定磨粒支撑不受外界环境的影响,砂带实际磨削过程中受机床振动、辊子偏心、辊子外圆圆柱度等因素的影响,磨粒支撑存在一定的位移扰动。假定磨粒支撑竖直方向的外界扰动位移为幅度 0.02 mm、频率 100 000 Hz 的正弦函数,工件为理想平面,磨粒支撑弹簧刚度为 2.5 N/mm,不同

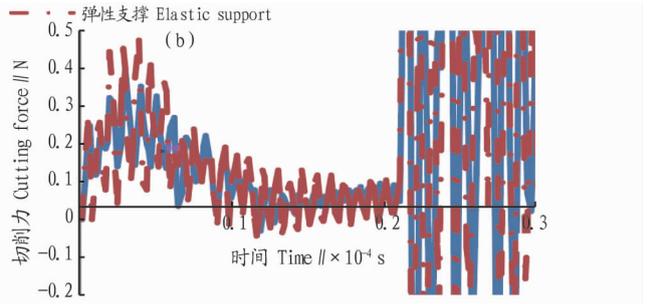
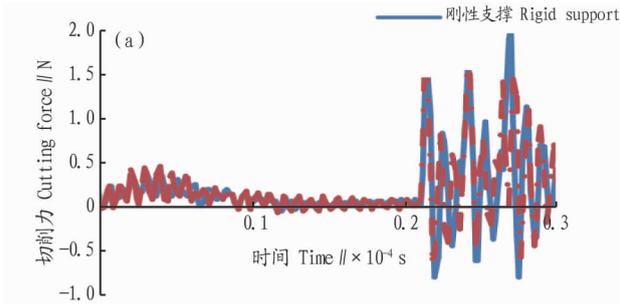
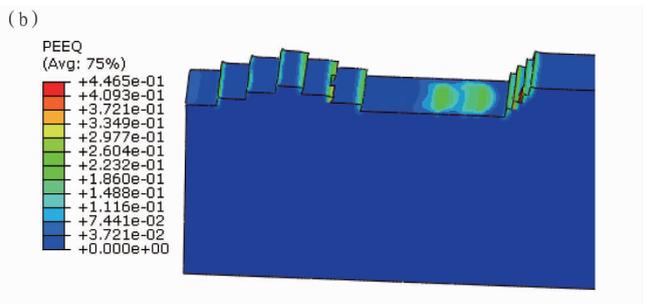
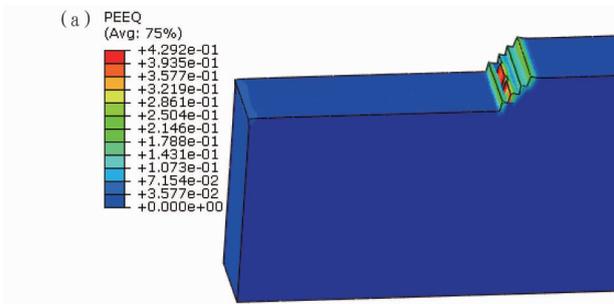


图 8 外界扰动条件下不同支撑单颗磨粒的切向切削力曲线

Fig.8 The tangential cutting force curve of a single abrasive grain with different supports under external disturbance conditions



注:(a).理想条件;(b).扰动条件

Note:(a). Ideal conditions;(b). Disturbance conditions

图 9 理想和扰动条件下弹性支撑单颗磨粒切削形貌

Fig.9 Cutting morphology of a single abrasive grain with elastic support under ideal and disturbance conditions

3 结论

采用 ABAQUS/Explicit 显示算法,基于多线性弹塑性材料本构模型和 Shear Damage 损伤准则,建立椴木单颗粒砂带磨削的有限元仿真模型,通过有限元模型研究了单磨粒切削的成屑机理、切削力以及切削深度和弹性支撑对切削力的影响,得出以下结论:

(1)从成屑机理角度分析,单颗磨粒切削过程分为滑擦、耕犁和切削 3 个过程。

(2)在稳定切削阶段,切削深度对切削力的影响较大,随

支撑单颗磨粒的切向切削力曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,在外界扰动情况下,稳定切削阶段的弹性支撑切向切削力的波动幅度比刚性支撑小,其中刚性支撑和弹性支撑切向切削力的极差分别为 2.83 和 2.44 N,标准差分别为 0.433 和 0.396 N,弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑小 8.54%,因此木材精磨时通常使用硬度较小的胶辊磨削;稳定切削后(大于 0.03×10^{-4} s),弹性支撑和刚性支撑的切向切削力的变化曲线出现明显波动,这是由竖直方向的位移扰动引起的。在 $0 \sim 0.203 \times 10^{-4}$ s 阶段,弹性支撑和刚性支撑的切向切削力相对较小。当切削时间为 0.203×10^{-4} s 时,弹性支撑和刚性支撑的切向切削力突然增大,其原因是受位移扰动向下移动的影响,此时切削阻力突然增加,切屑明显增多。在理想条件和扰动条件下弹性支撑单颗磨粒切削形貌如图 9 所示。从图 9 可以看出,理想条件下单颗磨粒切削形貌比较光滑,扰动条件下单颗磨粒切削形貌呈波浪状,初始阶段切削深度不断减小,切削力也随之减小, 0.03×10^{-4} s 后切削深度不断增加,切削力也随之增加。

着切削深度的增加,平均切向切削力及其标准差都增大,但其变异系数略有减小。

(3)理想条件下,弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑大 44.74%,考虑外界扰动后弹性支撑切向切削力的标准差比刚性支撑小 8.54%。

参考文献

[1] 李晓旭,陈永光,李黎. 木质材料砂带磨削的若干问题[J]. 木材加工机械,2010,21(3):44-48.
 [2] 刘伟,刘仁通,邓朝晖,等. 单颗磨粒磨削仿真研究进展[J]. 宇航材料工艺,2018,48(4):1-8.

原料到产品全产业过程食品安全信息的溯源,可以实现产地的来源、农事情况、储存状态的可溯源管理,实现快速跟踪定

位,提高应急反应效率,最大限度降低农产品中有害物质带来的风险。



图 4 溯源信息手机扫描查看效果示意

Fig. 4 Check effect of mobile phone scan of traceability information

5 结语

经过多年省市县的推广,农产品质量安全管理与信息溯源的理念已经深入人心,但实际应用效果不甚理想,其主要原因是现有农产品溯源管理机制和方法烦琐、信息系统使用成本较高、功能单一、信息采集困难、溯源信息不及时甚至滞后,导致种植企业、农户不愿意使用。对于农产品来说,从“农场到餐桌”的产前、产中、产后的过程涉及农资供应商、农户等生产商、加工商、中间商和末端消费者等,涉及“点多、线长、面广、错综交叉”,食品安全监管和溯源困难,不同行业、不同农产品其溯源机制各不相同,因此一种灵活、可配置、操作便捷,同时对农产品质量安全节点进行把控的信息化平台尤其重要,不仅能满足消费对农产品的知情需求,又能满足不同类型和规模的企业、种植户的质量安全管理需求。经过该研究与实践证明,应用互联网+思维构建农产品质量安全管理体系需要建立长效机制,研究溯源信息可定制机制和实现方法,建立可定制的农产品质量安全追溯系统,是构建农产品质量安全管理体系长效机制的重要内容,也是落实责任管理的重要保障,同时也是发达国家的通行做法和发展趋势^[12-14]。

参考文献

[1] 胡云锋,孙九林,张千力,等. 中国农产品质量安全追溯体系建设现状

(上接第 216 页)

[3] RÜTTIMANN N, ROETHLIN M, BUHL S, et al. Simulation of hexa-octahedral diamond grain cutting tests using the SPH method [J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 322-327.

[4] LI J, FANG Q H, LIU Y W, et al. A molecular dynamics investigation into the mechanisms of subsurface damage and material removal of monocrystalline copper subjected to nanoscale high speed grinding [J]. Applied surface science, 2014, 303: 331-343.

[5] SIEBRECHT T, BIERMANN D, LUDWIG H, et al. Simulation of grinding processes using finite element analysis and geometric simulation of individual grains [J]. Production engineering, 2014, 8(3): 345-353.

和未来发展[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 57-62.

[2] 张俊,徐杰,王秀徽,等. 基于国产基础软件的农产品质量安全溯源管理系统的设计与实现[J]. 中国农学通报, 2012, 28(9): 297-301.

[3] 李锦,傅茂润,卢曜昆,等. 中国农产品溯源管理的问题与对策[J]. 中国果菜, 2021, 41(2): 48-51, 71.

[4] 马丽平,樊广佳,张荣梅,等. 基于云计算的农产品溯源系统平台架构探讨[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 219-220.

[5] 刘炯. 从专利角度浅析中国食品溯源技术的发展[J]. 现代食品, 2018(12): 7-10, 17.

[6] 杨信廷,钱建平,孙传恒,等. 蔬菜安全生产管理及质量追溯系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 162-166.

[7] 杨信廷,孙传恒,钱建平,等. 基于流程编码的水产养殖产品质量追溯系统的构建与实现[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 159-164.

[8] 莫运书. 关于海南品牌农业建设的思考[J]. 中国农业会计, 2020(11): 38-41.

[9] 汤俊. 海南省特色现代农业发展的现状、问题与对策[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(6): 156-161.

[10] 隋欣,赵玲,张欣,等. 基于 PHP 的“接钥匙”装修网站的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(15): 92-93.

[11] 邹萍. 农产品质量安全溯源系统设计与实现:以水果为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.

[12] 张聪. “食有源,心方安”,联合打造智能农业产业链云平台:访河南云合资讯商业管理有限公司总经理肖春[J]. 食品安全导刊, 2019(10): 37-39.

[13] 吴爱忠,李林峰,俞菊生,等. 上海农业现代化评价指标体系研究[J]. 上海农业学报, 2015, 31(2): 1-7.

[14] 陈慕龄. 畜产品生产加工企业可追溯系统评价体系的构建:基于熵权理论[J]. 生产力研究, 2012(8): 48-50, 57.

[6] 王宝刚,张占宽,彭晓瑞,等. 条状刷式砂光机法向压力的测量与分析[J]. 木材工业, 2013, 27(1): 50-53.

[7] 罗斌,李黎,刘红光. 木材磨削力和影响磨削力的因素[J]. 木材加工机械, 2012, 23(1): 6-10.

[8] 刘博,李黎,杨永福. 木材与中密度纤维板的磨削力研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 197-201.

[9] LUO B, LI L, LIU H G, et al. Effects of sanding parameters on sanding force and normal force in sanding wood-based panels [J]. Holzforschung, 2015, 69(2): 241-245.

[10] 于朝阳,裴珊珊,胡进波,等. 百叶窗用榫木解剖构造及主要物理力学性能[J]. 林业工程学报, 2019, 4(3): 159-164.