

6-1-2020

Analysis of Finite Element Method on Dynamic Contact of Corn Ear

Xinping Li

College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

Ma Lei

College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis of Finite Element Method on Dynamic Contact of Corn Ear

Abstract

Abstract: According to the arrangement law of corn ear kernels, the solid model and the finite element model of the corn ear were established. ANSYS LS-DYNA software was used to analyze the distribution and transmission of stress on the corn ear shocked by wedge impact head. The simulation shows that on the corn ear the Von Mises of the region which is shocked is bigger than other region. Initial phase of the impact head shocking the corn ear, the Von Mises concentrate on both sides of shocked corn kernels. With the falling of the impact head, the Von Mises transmit to both sides of shocked corn kernels further and the stalk of corn was broken sequentially to the both sides of shocked corn kernel and the Von Mises was not so concentrated as before. It is found that the discrete features and the discrete direction of the shocked kernels are consistent with the simulated results by comparing the model calculation and the test results. The discrete of kernels and the transmission of Von Mises is along with the arrangement law of corn ear.

Keywords

corn, ear, dynamic contact, finite element method

Recommended Citation

Li Xinping, Ma Lei. Analysis of Finite Element Method on Dynamic Contact of Corn Ear[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 67-75.

玉米果穗动力接触的有限元分析

李心平, 马磊

(河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 根据玉米果穗的组砌规律, 在建立玉米果穗几何模型与有限元计算模型的基础上, 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对玉米果穗在楔形冲击头作用下动力接触过程中应力分布及传递过程进行了分析。结果表明: 玉米果穗受冲击部位籽粒等效应力较大, 冲头初接触时等效应力集中于受冲果穗籽粒两侧, 随冲头下降, 等效应力由受冲部位向两侧传递, 果柄由受冲部位横向沿籽粒组砌规律顺序断裂, 等效应力分布较初始接触时分散。经模型计算和试验结果相比较, 得出玉米果穗受冲击的宏观籽粒离散特性和离散方向与模拟结果相吻合, 籽粒离散与应力传递是沿果穗籽粒组砌规律进行。

关键词: 玉米; 果穗; 动力接触; 有限元分析

中图分类号: TJ765.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 01-0067-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701010

Analysis of Finite Element Method on Dynamic Contact of Corn Ear

Li Xinping, Ma Lei

(College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: According to the arrangement law of corn ear kernels, the solid model and the finite element model of the corn ear were established. ANSYS LS-DYNA software was used to analyze the distribution and transmission of stress on the corn ear shocked by wedge impact head. The simulation shows that on the corn ear the Von Mises of the region which is shocked is bigger than other region. Initial phase of the impact head shocking the corn ear, the Von Mises concentrate on both sides of shocked corn kernels. With the falling of the impact head, the Von Mises transmit to both sides of shocked corn kernels further and the stalk of corn was broken sequentially to the both sides of shocked corn kernel and the Von Mises was not so concentrated as before. It is found that the discrete features and the discrete direction of the shocked kernels are consistent with the simulated results by comparing the model calculation and the test results. The discrete of kernels and the transmission of Von Mises is along with the arrangement law of corn ear.

Keywords: corn; ear; dynamic contact; finite element method

引言

玉米是我国主要粮食作物之一。玉米籽粒脱粒破碎率直接影响玉米的储存、种子生产等方面。玉

米脱粒原理主要有冲击、揉搓、梳刷、碾压、挤搓等。目前国内玉米最常采用钉齿冲击脱粒原理脱粒, 籽粒破碎严重^[1]。研究玉米籽粒的相关力学特性对玉米低破损脱粒有重要的参考价值。

有限元仿真分析, 是求解各种复杂数学物理问题的重要方法, 是处理各种复杂工程问题的重要分析手段, 也是进行科学研究的重要工具^[2-4]。有限元建模和仿真分析在国内外农业工程领域有着广泛应用^[5-14]。



收稿日期: 2016-06-17 修回日期: 2016-07-16;
基金项目: 国家自然科学基金-河南人才培养联合基金(U1204514);
作者简介: 李心平(1973-), 男, 山西定襄, 博士, 副教授, 研究方向为农产品收获与加工机械; 马磊(1991-), 男, 河南周口, 硕士, 研究方向为农产品收获与加工机械。

<http://www.china-simulation.com>

玉米果穗受冲击过程短暂且不易观察,因此运用有限元仿真为果穗冲击过程中籽粒间应力的传递、籽粒离散机理、冲头冲击特性等的研究提供了有效手段。运用有限元方法,根据玉米果穗籽粒的生长排列特性,建立玉米果穗的三维模型和有限元模型,对楔形冲头冲击玉米果穗的过程在 ANSYS LS-DYNA 软件中进行动力接触分析,并进行了试验验证,有限元分析与试验结果相符。本研究分析了玉米果穗籽粒受冲击时应力传递规律,为改进脱粒工艺,优化脱粒装置提供理论参考。

1 玉米果穗组砌规律

玉米果穗籽粒在生长时存在一定的生物性特性。在玉米芯上,玉米籽粒通常排列成 16-18 纵行或更多偶数行。在果穗上除了两端最外缘籽粒外,籽粒排列是以 11-22 组砌单元为基本单元组合排列错位搭接的,该单元由 6 个籽粒组成,单层两横向籽粒侧面正对接触形成 1-1 对立接触,再与另外两层同样 1-1 接触的两横向籽粒侧面形成错位接触,对立籽粒间缝隙记为 A 缝,交错籽粒间缝隙记为 B 缝^[15],如图 1 所示。

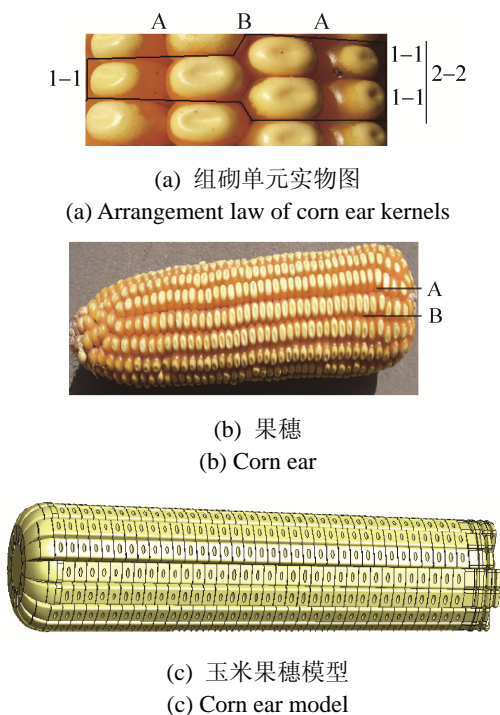


图 1 籽粒组砌规律

Fig. 1 Arrangement law of corn ear kernels

2 玉米果穗的几何模型

为建立准确的玉米芯和玉米籽粒几何模型,选取玉米芯和规则玉米籽粒各 50 个进行尺寸统计测量,籽粒含水率为 10%,玉米芯含水率为 10.5%。

2.1 玉米芯的几何模型

根据对玉米芯的长度以及不同段直径的统计测量结果,测得玉米芯平均长度 188.3 mm,玉米芯大头端部直径 20.34 mm、小头端部直径 21.46 mm、玉米芯最大直径 27.4 mm。在 Solid Works 中建立玉米芯模型。为将籽粒果柄装配至玉米芯上,在玉米芯上切出放置果柄的槽。

2.2 玉米籽粒的几何模型

根据对果穗中部籽粒长、宽、厚、胚沟尺寸统计测量结果,取籽粒长 12.79 mm、最宽处 8 mm、厚 5 mm,胚沟尺寸由胚沟上 12 个关键点尺寸确定,如图 2(a)所示。

在平面直角坐标系中确定籽粒轮廓上的相应关键点及胚沟上 12 个关键点,然后在 Solid Works 中建立玉米籽粒模型,如图 2(b)。

2.3 玉米果穗及冲头三维模型

根据果穗的组砌规律,在 Solid Works 中将籽粒装配至玉米芯,本文选取玉米果穗为 16 纵行,如图 1(c)所示。

本文主要分析在冲头作用下,果穗上籽粒应力分布、应力在籽粒间传递规律以及冲头对籽粒离散机理。为了减少分析时间,选取玉米果穗中段直径为 49.78 mm、长 20 mm 的近似圆柱体的一段作为分析对象,如图 2(d)、(e)所示。建模时对玉米果穗模型做如下假设:(1)玉米果穗上籽粒饱满、大小相同,玉米芯为圆柱体;(2)果穗上全部籽粒的含水率相同;(3)果穗上无缺籽、坏籽。该段果穗模型共 56 颗籽粒,对立行籽粒沿玉米芯轴向排列 3 颗或 4 颗籽粒,在果穗 A 缝缝隙上侧约 6 mm 处建立冲头模型,冲头宽度 10 mm,对

向 A 缝缝隙, 冲击模型如图 2(c)所示。为方便分析规定带胚沟的一侧为正面。将此 56 个籽粒一一编号, 籽粒 4, 5, 8, 9 中间虚线部分为冲头冲击部位。如图 2(f)所示。

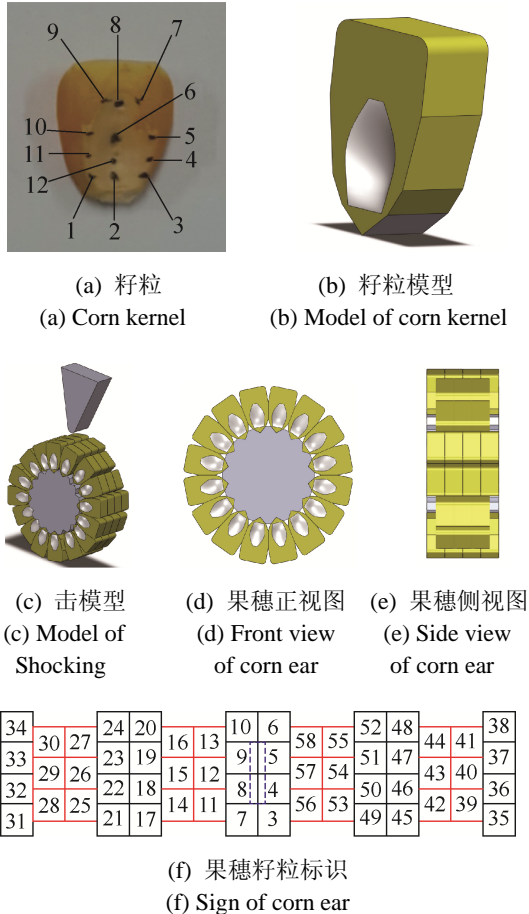


图 2 冲击果穗三维模型
Fig. 2 Model of shocking the corn ear

3 玉米果穗有限元模型

3.1 单元类型及材料属性

在 ANSYS LS-DYNA 中, 冲头、玉米芯、籽粒选用 solid164 号单元, 材料选用各向同性弹性模型: Linear-Elastic-Isotropic。采用 SINOCERA YE2533 程控静态应变仪测得含水率 10.5% 下玉米芯的弹性模量、泊松比, 采用体积排水法分别测得玉米芯和籽粒密度; 查得在含水率 10% 下玉米籽粒的弹性模量、泊松比^[16-23]。冲头选用 45 号钢; 材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

Tab.1 Material properties			
材料类型	密度 kg·m ⁻³	弹性模量 Pa	泊松比
玉米芯	430	1.208×10 ⁹	0.33
冲头	7 800	2×10 ¹¹	0.3
籽粒	1 246	5.5×10 ⁹	0.4

3.2 网格划分

冲头选取 Hex 六面体单元, 采用 Mapped 方式划分网格; 玉米芯选取 Hex 六面体单元, 采用 Sweep 方式划分; 籽粒选用 Tet 四面体单元, Free 方式划分网格, 共生成 190 977 个 Node, 671 656 个 element。

3.3 点焊及边界条件

玉米果穗脱粒时, 不仅要使果柄断裂, 而且还需要克服籽粒间的相互作用力。当外力大于籽粒间的作用力和果柄处的连结力时, 方可完成脱粒。通过 ANSYS LS-DYNA 中的 Spot-welds 点焊来模拟籽粒间的作用力和果柄处的连结力。作用力失效准则为:

$$\left(\frac{|f_N|}{S_N}\right)^{EXPN} + \left(\frac{|f_S|}{S_S}\right)^{EXPS} \geq 1$$

式中: f_N , f_S 分别为点焊的法向和切向力; S_N , S_S 分别为点焊的法向和切向破坏力; EXPN, EXPS 分别为失效准则中法向力和切向力指数。用推力计测得籽粒含水率 10% 的玉米果穗中部对立行籽粒间挤压力为 15.3 N, 交错行间挤压力为 20.52 N, 籽粒沿轴向间的挤压力为 6.85 N, 测得果柄连接力为 2.05 N。

根据测得结果, 选取节点设置点焊。由于选取的每对节点较近, 且失效基本沿节点间的法向, 因此忽略切向失效, 仅设置法向失效参数。对立行每两个籽粒间通过 4 对节点设置点焊, 则每个点焊的法向破坏力为 3.825 N; 交错行间每组籽粒通过两对节点设置点焊, 则每个点焊的法向破坏力为 10.26 N; 轴向每两个籽粒间通过 4 对节点设置点焊, 则每个点焊的法向破坏力为 1.712 5 N; 每个籽粒的果柄通过籽粒与玉米芯的 4 对节点设置点焊, 则每个点焊的法向破坏力为

0.513 N。法向力指数均设置为 1。当外力大于破坏力时点焊被破坏，籽粒间或果柄处的连接失效。

4 动力接触有限元模拟及结果分析

4.1 对冲头施加载荷及求解设置

冲头最下端初始位置距籽粒上端所在圆约 6 mm，冲头以 1.69 m/s 的初速度， 9.8 m/s^2 加速度冲向玉米果穗 A 缝缝隙。对玉米芯中部用于放置籽粒 21, 22, 23, 24 和籽粒 45, 46, 47, 48 的槽底施加 ALL DOF 全约束，从而约束玉米芯。冲击时间设置为 0.0035 s，结果输出步数设置为 100。

4.2 结果分析

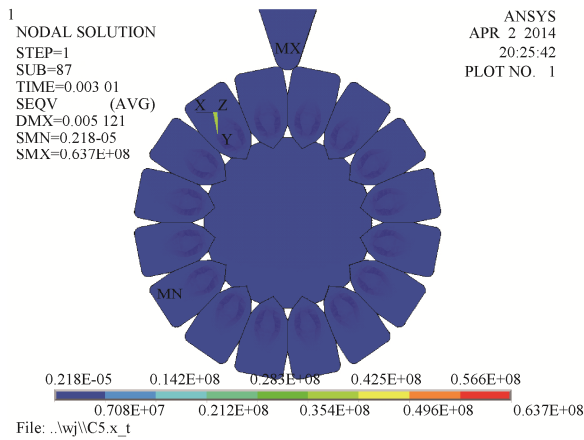
在 ANSYS LS-DYNA 后处理中观察冲击过程，冲头由起始位置至接触籽粒表面用 86 步，从 87 步始冲头与籽粒接触。为直观观察冲击过程的应力结果，俯视图不显示冲头，仅显示果穗上等效应力分布。图 3 所示，冲头由第 87 步开始接触果穗，受冲击果穗应力集中分布于受冲击 A 缝两侧对立行籽粒，编号为 4, 5, 8, 9 籽粒由于与冲头直接接触，且果穗受冲击起始阶段，籽粒仍按籽粒组砌规律紧密排列，因此果穗上较大等效应力集中分布于籽粒冲头接触区域，Von Mises 等效应力最大值为 $6.37 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，出现在与冲头接触的籽粒部位，此时冲头与籽粒开始接触，果穗所受冲头冲击力尚未传递，所以果穗上距冲头较远籽粒区域应力值较小。

随着冲头下落，果穗上等效应力逐步由受冲击部位向受冲 A 缝两侧籽粒扩散。第 89 步时，在冲头与果穗籽粒的相互作用下，果穗上等效应力已向冲头冲击对立行两侧的交错行上传递，图 4(b) 所示，籽粒 4 与 57，8 与 12 之间的缝隙为交错行缝隙，应力由籽粒 4 传至籽粒 57，由籽粒 8 传至籽粒 12，等效应力通过籽粒间横向接触面传递且接触面处应力较大，但由于冲头插入缝隙距离仍较小，应力仍较集中分布于受冲击部位两侧。Von Mises 等效应力最大值为 $1.73 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，其值较第 87 步最大等效应力值大，但仍出现在与冲头接触的籽

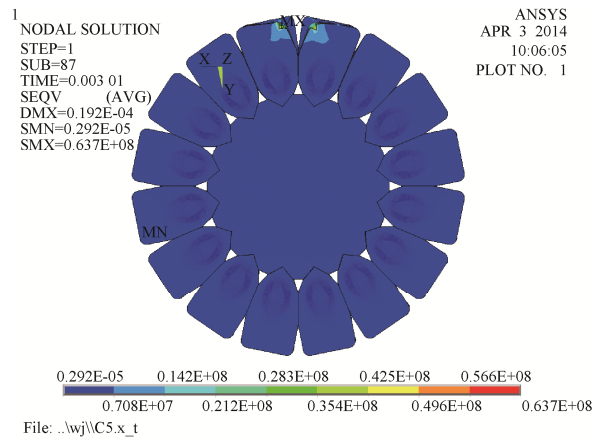
粒部位，这是由于随冲头下落，冲与头与果穗接触部位籽粒间的相互作用更加剧烈。由于玉米芯固定，冲头对籽粒的作用造成籽粒所受等效应力通过籽粒间接触面传递至相邻籽粒，一个籽粒仅可以对对立接触的另一籽粒传递等效应力而可以对交错接触的两颗籽粒传递等效应力，传递过程中应力逐步减小，籽粒受相邻籽粒传递出的等效应力通过籽粒内部传递至果柄处，当果柄处受力大于果柄连接力时果柄断裂，如图 4(b) 所示，第 88 步时，受冲 A 缝两侧已各有 5 颗籽粒的果柄断裂，这是冲头对冲击部位籽粒的作用在果穗内部籽粒间传递的结果造成，籽粒编号为 4, 8, 12, 15, 18, 22, 46, 50, 54, 57，其余籽粒由于果柄处受力较小不满足点焊失效准则，果柄并未断裂。图 4(a) 显示同一载荷步下果穗最外侧籽粒果柄未断裂，此表明果柄是沿受冲击 A 缝横向按对立交错组砌规律顺序断裂。对冲击缝隙周围不同载荷步应力分布分析发现：在冲头刚开始接触籽粒阶段如图 5 所示，第 88 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $1.4 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，第 90 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $1.70 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，第 91 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $1.77 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，第 93 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $1.40 \times 10^8 \text{ Pa}$ ，第 95 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $6.06 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，第 97 步时，Von Mises 等效应力最大值为 $4.86 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。第 90 步最大等效应力较第 88 步的最大等效应力值大，但等效应力仍较集中地分布于受冲击 A 缝两侧，这说明在冲头初始接触阶段，由于玉米果穗籽粒组砌规律并未被完全破坏，随冲头的下落，冲头与籽粒间的相互作用在加剧；第 93 步最大等效应力值较低 91 步的小且第 93 步是果穗受冲击部位的等效应力分布明显没有第 91 步时分布集中，虽然冲头继续下降，但最大等效应力值反而减小，这说明随着被冲掉籽粒的增多，第 93 步时果穗内部籽粒排列已经出现松动，冲头与籽粒间的相互作用在减弱；第 95 步以后，最大等效应力明显减小，果穗上等效应力分布分散，这是由于果穗籽粒的组砌规律被严重破坏，冲

头继续下落时, 受籽粒的反作用较完整果穗时明显减弱, 随后籽粒也更易被脱, 这样说明不完整果穗

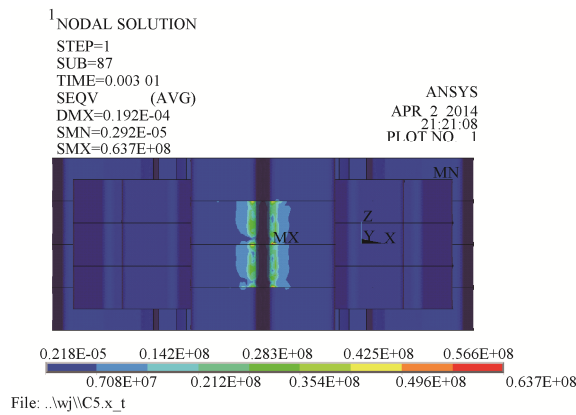
更易于脱粒。根据 ANSYS LS-DYNA 分析结果, 绘制应力传递方向示意图, 如图 5 所示。



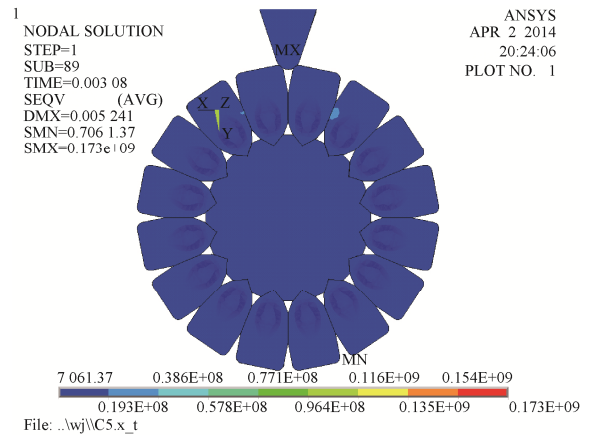
(a) 第 87 步正视图第一排
(a) The first row of front view at the 87th step



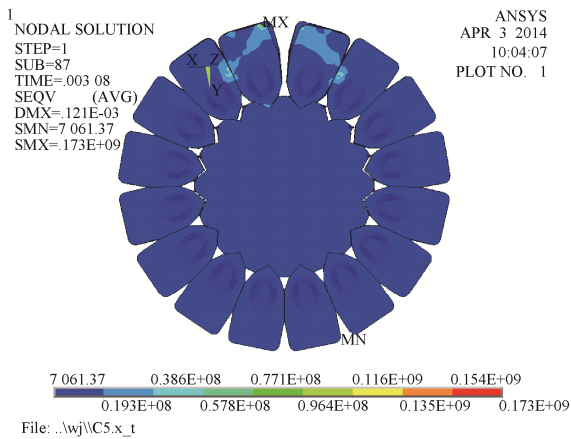
(b) 第 87 步正视图第二排
(b) The second row of front view at the 87th step



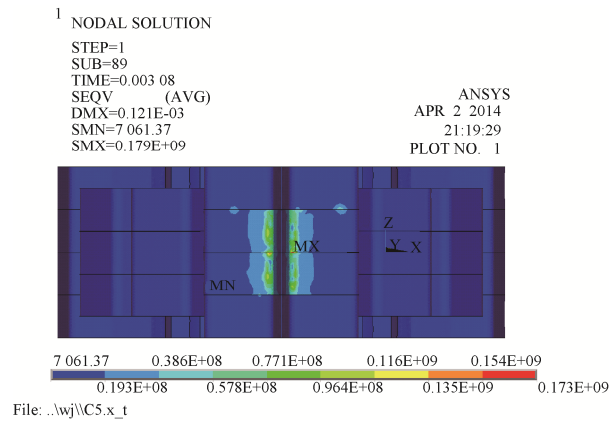
(c) 第 87 步俯视图
(c) Vertical view at the 87th step



(d) 第 89 步正视图第一排
(d) The first row of front view at the 89th step

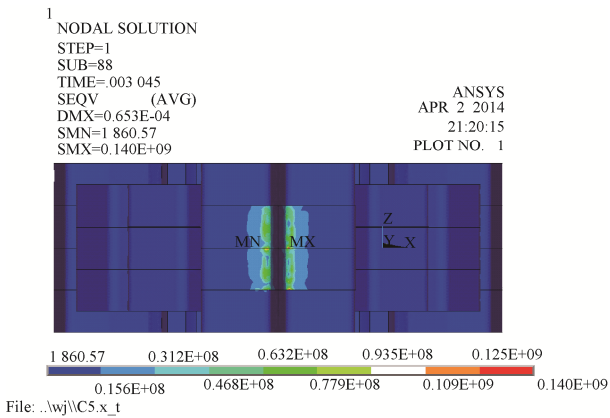


(e) 第 89 步正视图第二排
(e) The second row of front view at the 89th step

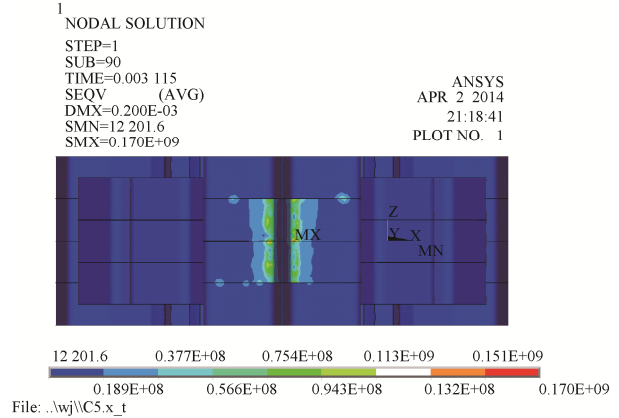


(f) 第 89 步俯视图
(f) Vertical view at the 89th step

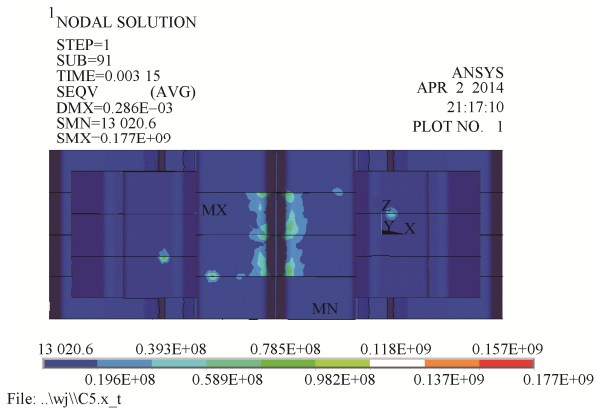
图 3 果穗受冲第 87 与第 89 步不同角度视图
Fig. 3 Different view of corn ear at the 87th and 89th step



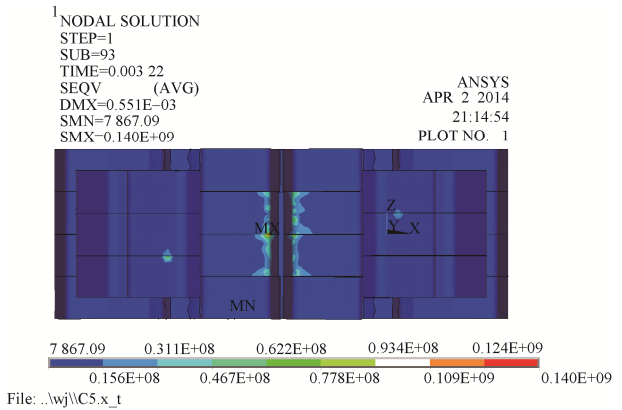
(a) 第 88 步
(a) The 88th step



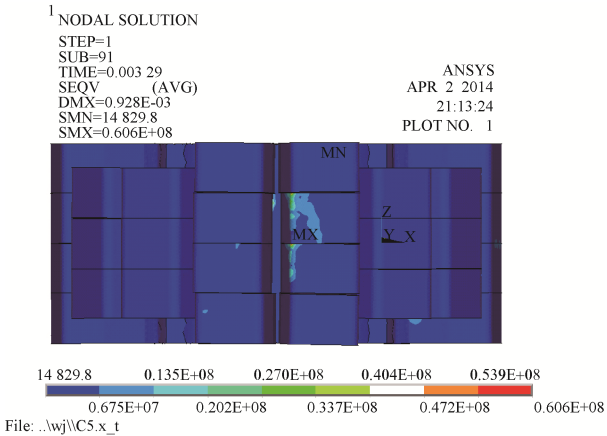
(b) 第 90 步
(b) The 90th step



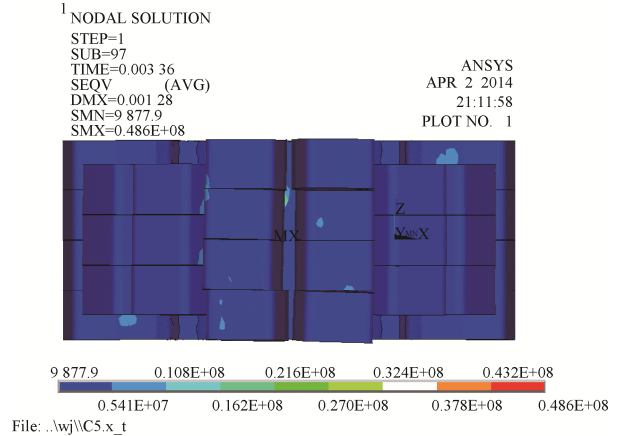
(c) 第 91 步
(c) The 91th step



(d) 第 93 步
(d) The 93th step



(e) 第 95 步
(e) The 95th step



(f) 第 97 步
(f) The 97th step

图 4 果穗受冲不同载荷步俯视图
Fig. 4 Vertical view of corn ear under different steps

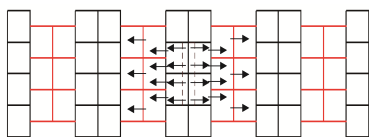


图 5 应力传递示意图
Fig. 5 Transfer of Von Mises

5 试验及对比分析

为对比验证仿真分析结果, 利用玉米果穗冲击试验台进行跌落冲击试验进行玉米果穗冲击损伤

验证试验。选取不同玉米品种和不同含水率的玉米果穗, 玉米果穗籽粒脱落时所受的最大冲击力、脱粒数和破损率作为试验指标, 采用双因素随机区组试验。试验原理为将玉米果穗固定于试验台, 将冲击锤提升至一定高度并突然释放, 冲击锤便沿轨道垂直下落, 重锤对果穗产生冲击力, 最终使玉米籽粒从果穗上脱落并产生部分破裂。冲击力最大值出现在冲击头与果穗接触的瞬间, 并被试验机记录仪记录。

玉米品种选用郑单 958 和北青 210, 含水率取低含水率 10.2%, 中含水率 16.7% 和高含水率 20.4% 为 3 个水分级进行验证试验, 选取最大冲击力、离散籽粒数与破损籽粒数作为分析指标。结果每一水平五组试验的平均值, 如表 2, 并选其中一组果穗如图 6 进行分析。结果可知, 破损率最大冲击力、离散籽粒数量以及破损率呈现有规律变化, 并且在含水率较低的水平下破损率较低, 因此楔形冲击头能够在较低破损情况下对籽粒进行有效离散, 籽粒间产生的应力集中较小, 与有限元仿真结果一致。

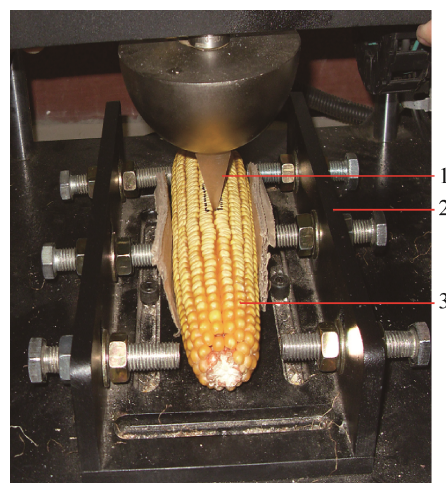
表 2 试验结果

Tab.2 Test Results

品种	含水率/%	最大冲击力/N	离散籽粒数	破损率/%
郑单 958	10.2	250.00	20	0
	16.7	361.12	12	0
	20.4	83.33	1	0
北青 210	10.2	388.88	16	0
	16.7	472.22	15	0.76
	20.4	166.66	6	1.96

如图 6 所示试验结果显示, 籽粒沿受冲 A 缝横向两侧散落, 籽粒间作用力按图 5 所示进行横向传递, 与冲击头接触的 A 缝籽粒直接被冲击头离散; 由于籽粒间组砌规律的存在, 冲击头产生并经过 A 缝籽粒传递的力将位于冲击头附近两侧籽粒离散。而有限元分析过程表明, 应力由受冲击 A 缝向两侧籽粒传递, 籽粒果柄断裂顺序是沿受冲 A 缝横向按果穗籽粒组砌规律进行的。有限元分析发现, 最大等效应力出现在受冲击籽粒与冲击头接触部位, 这也映证了试验中较高含水率的果穗北青

210 受冲击部位籽粒有一定破碎的现象。试验中果穗籽粒的离散特征、籽粒散落方向与有限元分析结果相符。通过分析可知, 模拟状态下, 条件比较理想, 楔形冲击头正对籽粒缝隙冲击, 且玉米果穗完全固定不变; 而试验状态下, 由于冲击头冲击时对着籽粒缝隙不可能完全重合, 且冲击瞬间会导致果穗出现微小位移, 结果使果穗上冲击力的传递不能完全顺着果穗籽粒向两侧同时传递, 使得冲击力便向一边, 就会出现图示的试验结果。



1. 冲击头 2. 夹具 3. 玉米果穗
1. Impact head 2. Fixture 3. Corn ear



图 6 玉米果穗冲击前后对比

Fig.6 Comparison of shoked and unshoked corn ear

6 结论

(1) 楔型冲击头冲击果穗 A 缝, 起初阶段籽粒组砌规律破坏小, 等效应力集中于受冲 A 缝两侧且最大应力值较大, 随冲击头下降, 等效应力沿 A 缝两侧按组砌规律传递, 当籽粒离散较多时, 籽粒

组砌规律严重破坏, 果穗籽粒等效应力分布分散, 且最大等效应力较初始阶段变小。

(2) 有限元分析发现果穗受冲击初始阶段, 籽粒受冲击部位应力较大且集中分布; 试验时发现, 受冲击部位籽粒易破碎。此表明籽粒受冲击时与冲头接触部分受力最大, 较易破碎, 且破碎是在冲头接触籽粒的初始阶段造成的, 因此脱粒单元应使用柔性材料, 以降低果穗脱粒初始阶段及脱粒过程中籽粒的损伤。

(3) 在冲头作用下, 由于玉米芯固定, 等效应力由受冲部位经籽粒向相邻籽粒传递且经籽粒内部传递至果柄处, 当果柄处受力大于果柄连接力时, 果柄断裂。果柄是沿受冲 A 缝横向按组砌规律顺序断裂。当部分籽粒脱落后, 由于籽粒间排列松散, 籽粒间相互作用力减弱, 不完整果穗脱粒较完整果穗果穗容易, 因此在玉米果穗实际脱粒过程中, 果穗进入脱粒滚筒前可通过适当方式先冲掉部分籽粒以减少功率及籽粒破损率。

(4) 试验冲击过程短暂, 无法观察冲击过程中果穗籽粒的微观变化, 有限分析可以揭示果穗冲击过程中籽粒间等效应力传递、果柄断裂机理, 试验结果与有限元分析结果相符。

参考文献:

- [1] 徐立章, 李耀明, 王显仁. 谷物脱粒损伤的研究进展分析 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 303-307. (Xu Lizhang, Li Yaoming, Wang Xianren. Research development of grain damage during threshing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (S1002-6819), 2009, 25(1): 303-307.)
- [2] 王子才. 仿真科学的发展及形成 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1279-1281. (Wang Zicai. Development and Formation of Simulation Science [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2005, 17(6): 1279-1281.)
- [3] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1871-1878. (Li Bohu, Chai Xudong, Zhu Wenhai, et al. Some Focusing Points in Development of Modern Modeling and Simulation Technology [J]. Journal of System Simulation, (S1004-731X), 2004, 16(9): 1871-1878.)
- [4] 刘晓平, 唐益明, 郑利平, 等. 复杂系统与复杂系统仿真研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6303-6315. (Liu Xiaoping, Tang Yiming, Zhang Liping. Survey of Complex System and Complex System Simulation [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(23): 6303-6315.)
- [5] K Muthukumarappan, S Gunasekaran. Moisture Diffusivity of Corn Kernel Components During Adsorption Part II: Pericarp [J]. Transactions of the ASAE (S0001-2351), 1994, 37(4): 1269-1274.
- [6] K Muthukumarappan, S Gunasekaran. Moisture Diffusivity of Corn Kernel Components During Adsorption PartIII: Soft and Hard Endosperms [J]. Transactions of the ASAE (S0001-2351), 1994, 37(4): 1275-1280.
- [7] Tijskens E, Ramon H, Baerdemaeker J De. Discrete element modeling for process simulation in agriculture [J]. Journal of Sound and Vibration(S0022-460X), 2003, 266(3): 496-514.
- [8] Bruce D M, Hobson R N, Morgan C L, et al. Thresh ability of Shatter-Resistant Seed Pods in Oilseed Rape [J]. Journal of Agricultural Engineering Research (S0021-8634), 2001, 80(4): 343-350.
- [9] Turgut Ö Ztürk, Bilge Esen. Physical and mechanical properties of some hybrid corn varieties [J]. Journal of Agricultural and Biological Engineering (S1934-6344), 2013, 6(1): 111-116.
- [10] Songül Gürsoy, Ruplal Choudhary, Dennis G Watson. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering (S1934-6344), 2013, 6(1): 90-99.
- [11] Gopal U Shinde, Shyam R Kajale. Computer aided engineering analysis and design optimization of rotary tillage tool components [J]. Journal of Agricultural and Biological Engineering (S1934-6344), 2011, 4(3): 1-6.
- [12] K Muthukumarappan, S Gunasekaran. Finite Element Simulation of Corn Moisture Adsorption [J]. Transactions of the ASAE (S0001-2351), 1996, 39(6): 2217-2222.
- [13] 白欣欣, 刘继展, 李萍萍. 有限元法在农业物料力学研究中的应用进展 [J]. 农机化研究, 2013, (8): 5-8. (Bai Xinxin, Liu Jizhan, Li Pingping. The Application Progress of agricultural material mechanics research with finite element method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, (8): 5-8.)
- [14] 于亚军, 周海玲, 付宏等. 基于颗粒聚合体的玉米果

- 穗建模方法 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167-174. (Yu Yajun, Zhou Hailing, Fu Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), (S1002-6819), 2012, 28(8): 167-174.)
- [15] 李心平, 刘赢, 马义东, 等. 玉米果穗籽粒间缝隙走向对其循环力衰败的影响 [J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 183-187. (Li Xinping, Liu Ying, Ma Yidong, et al. Effect of Gap Direction Among Corn Ear Kernels on the Circulating Dint Decline [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 183-187.)
- [16] 徐立章, 李耀明, 丁林峰. 水稻谷粒与脱粒元件撞过程的接触力学分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 146-149. (Xu Lizhang, Li Yaoming, Ding Linfeng. Contacting mechanics analysis during impact process between rice and threshing component [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 146-149.)
- [17] 卿艳梅, 李长友, 黄汉东, 等. 龙眼力学特性的有限元分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 143-147. (Qing Yanmei, Li Changyou, Huang Handong, et al. Finite Element Analysis on Mechanical Properties of Longan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (S1000-1298), 2011, 42(6): 143-147. (in Chinese))
- [18] 赵淑红, 蒋恩臣, 闫以勋, 等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 26-32. (Zhao Shuhong, Jiang Enchen, Yan Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) (S1002-6819), 2013, 29(14): 26-32. (in Chinese with English abstract))
- [19] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48. (Shi Linrong, Wu Jianmin, Sun Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) (S1002-6819), 2014, 30(8): 40-48. (in Chinese with English abstract))
- [20] 朱忠祥, 岳小微, 杜岳峰, 等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 42-48. (Zhu Zhongxiang, Yue Xiaowei, Du Yuefeng, et al. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn-ear husking [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) (S1002-6819), 2015, 31(6): 42-48. (in Chinese with English abstract))
- [21] 舒彩霞, 严磊, 李磊, 等. 油菜割晒机液压驱动系统管道设计与仿真优化 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 3087-3095. (Shu Caixia, Yan Lei, Li Lei, et al. Pipeline Design and Simulation Optimization of Hydraulic Driving System for Rape Windrower [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2015, 27(12): 3087-3095.)
- [22] 兰江, 朱磊, 赵竞全. 基于 Flowmaster 的多喷嘴引射器建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 410-415. (Lan Jiang, Zhu Lei, Zhao Jingquan. Modeling and Simulation of Multi-nozzle Ejector based on Flowmaster [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(2): 410-415.)
- [23] 欧阳玉平, 洪添胜, 马煜东. 山地果园双轨运输机牵引系统动力学仿真与试验 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1502-1510. (Ouyang Yuping, Hong Tiansheng, Ma Yudong. Dynamic Simulation and Test of Mountain Orchard Double-track Transport Traction System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2015, 27(7): 1502-1510.)

-----◆-----
(上接第 66 页)

- [23] 何飞, 方金云. 基于自适应的并行空间插值算法及仿真实现 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(4): 761-768. (He Fei, Fang Jinyun. Algorithm for Spatial Interpolation Based on Self-Adaptive Parallel Programming [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(4): 761-768 (in Chinese).)
- [24] 王石, 郭建文, 江务学, 等. 微细电火花加工中材料蚀除机理的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2891-2897. (Wang Shi, Guo Jianwen, Jiang Wuxue, et al. Simulative Study of Machining Mechanism of Material in Micro-EDM [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2015, 27(12): 2891-2897(in Chinese).)
- [25] Luo G, Zhang D. Efficiency Improvement for Data-Processing of Partial Discharge Signals Using Parallel Computing [C]// Solid Dielectrics (ICSD), 2010 10th IEEE International Conference on. Potsdam, Germany: IEEE, 2010: 1-4.