

基于 Transient Structural 的脱粒过程中大豆种子撞击损伤的全因子分析

张帅军,刘新萍,王小飞,张美玉,余永昌

(河南农业大学 机电工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:为了研究大豆种子脱粒过程中的损伤机理,首先对大豆种子脱离过程中脱粒钉齿单个子粒碰撞的周期进行了瞬态动力学分析;然后对 3 种碰撞参数进行混合水平全因子分析;最后建立碰撞过程的理论模型,结合瞬态动力学分析结果和理论模型进行分析。结果表明:应力最大值出现在靠近撞击部位的种子内部,撞击结束后大豆种子内部有残余应力存在;齿形和撞击截面面积对过程中的最大应力有显著影响;与直齿情况相比弓齿情况下最大应力减小,同时得到随着撞击截面面积的增大最大应力呈减小的趋势。

关键词:大豆种子;脱粒损伤;全因子分析;齿形;撞击截面面积

中图分类号:S225. 6 **文献标识码:**A **DOI:**10. 11861/j. issn. 1000-9841. 2017. 03. 0463

Whole Factor Analysis of Impact Damage of Soybean Seeds during Threshing Based on Transient Structural

ZHANG Shuai-jun, LIU Xin-ping, WANG Xiao-fei, ZHANG Mei-yu, YU Yong-chang

(Machinery and Electronic Engineering College, The Agriculture University of Henan, Zhengzhou 45002, China)

Abstract: In order to study the damage mechanism of soybean seed threshing process, in this paper, the transient structural analysis of the cycle of single particle stripping of the thawed pegs was carried out. Then, the three kinds of impact parameters were analyzed by the mixed level total factor analysis. Finally, the theoretical model of the impact process was established, analysis of the results and theoretical model analysis. It was found that the maximum stress appeared in the seeds near the impact site, and there was residual stress in the soybean seed after the impact process. The tooth shape and impact sectional area had a significant effect on the maximum stress in the process. Compared with the straight tooth, the maximum stress is reduced in the case of the arch tooth, and the maximum stress decreases with the increase of the impact sectional area.

Keywords: Soybean seed; Threshing damage; Total factor analysis; Tooth shape; Impact sectional area

机械脱粒过程会造成 15% 左右的大豆损伤,大豆损伤不仅降低大豆品质,而且即使表皮完好,内部子叶受到破坏的内部损伤也会极大影响大豆的发芽率,有内部损伤的大豆的发芽率不足 10%^[1-3]。同时由于内部损伤不容易发现,在精量播种作业中会造成有效株数减少,进而降低大豆产量。因此对大豆脱粒过程损伤机理的研究十分有必要。

目前,关于种子的内部损伤及接触碰撞研究的主要方法有试验研究、力学分析、损伤机理分析和软件模拟分析等方法。如高连兴等^[4-5]采用体示显微系统研究机械脱粒过程中引起的大豆损伤对发芽率的影响;徐立章等^[6]运用接触力学建立了谷粒与脱粒部件之间件冲击损伤临界速度计算公式;王显仁等^[7]基于碰撞理论和能量守恒定律得出了脱粒元件线速度和脱粒破碎率之间的数学模型;接鑫等^[8]运用压试验机进行玉米脱粒试验,得出种子玉

米脱粒时的最佳施力方式为纵向弯曲力;Ukatu^[9]通过试验研究脱粒过程中齿型、凹版间隙、滚筒转速等因素对大豆破损率的影响;Singh 等^[10]经过试验验证得到脱粒时大豆的的破损率与含水量有直接的联系。上述研究主要是通过试验研究、力学分析、损伤机理分析的方法来研究大豆脱粒过程的损伤机理,在运用有限元模型对钉齿撞击大豆种子过程进行仿真分析脱粒过程中大豆种子受力情况的研究十分匮乏。本研究采用大豆种子在撞击过程中受到的最大应力描述大豆种子损伤的创新方法,在 Transient Structural 中模拟大豆种子与钉齿的碰撞过程,研究大豆与钉齿碰撞时的损伤机理。运用全因子分析的方法分析撞击过程中对应力影响显著的因素,为大豆种子在脱粒过程中的损伤机理研究提供理论参考。

收稿日期:2017-01-10
基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04);国家公益性行业(农业)科研专项基金(201303011-4)。
第一作者简介:张帅军(1992-),男,硕士,主要从事农业工程及机械化研究。E-mail:522752445@qq.com。
通讯作者:余永昌(1955-),男,教授,博导,主要从事农业工程及机械化研究。E-mail:hnyych@163.com。

1 大豆碰撞的模拟分析

1.1 物理参数的测定和三维模型

试验材料为豫豆 29 大豆种子,含水率为 12.2%,百粒重为 20.06 g。随机选取 100 粒大豆种子,测量种子平均重量为 0.201 g,平均粒长 a 为 8 mm,平均粒宽 b 为 6.5 mm,平均粒厚 c 为 6.05 mm,平均密度为 $1\,226\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。为了建模方便,取大豆种子外形为类椭圆形(图 1),长轴为 8 mm,短轴长为 6.5 mm,粒厚为 3.05 mm。在 solidworks 2014 软件中建立大豆种子模型。运用“质量特性”特征提取出大豆种子的体积为 164.741 mm^3 ,表面积为 146.910 mm^2 。脱粒部件钉齿(图 2)直径 D 为 10 mm、弯曲角度 θ 为 150° 、各段长度 d 和 e 为 30 mm。

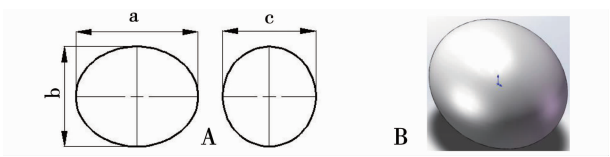
1.2 碰撞模型的建立

大豆种子与脱粒钉齿的撞击三维模型保存为 *.SLDASM 格式文件,利用 SOLIDWORKS 2014 与 ANSYS 16.0 之间的转换接口,导入到 ANSYS 16.0 中,运用 Transient Structural 模块进行动力学分析。大豆种子和脱粒钉齿的材料属性参数如表 1,由于大豆种子和脱粒钉齿的刚度相差很大,定义大豆种子为线弹性柔体,钉齿为刚体。

表 1 大豆种子与钉齿材料属性

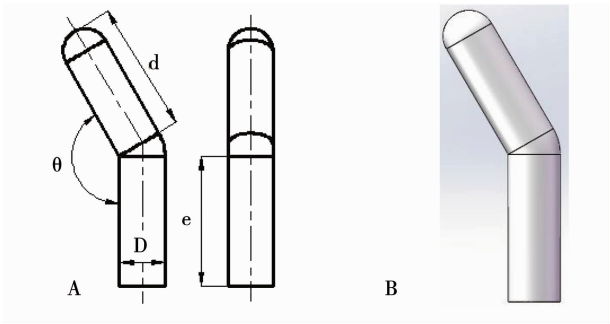
Table 1 Soybean seed and tooth material properties

物料	密度	弹性模量	剪切模量	泊松比
Material	Density / ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	Elastic modulus/MPa	Shear modulus/MPa	Poisson's ratio
大豆 Soybean	1.226	294.43	105.15	0.4
钉齿 Tooth	7.850	20000	7692.3	0.3



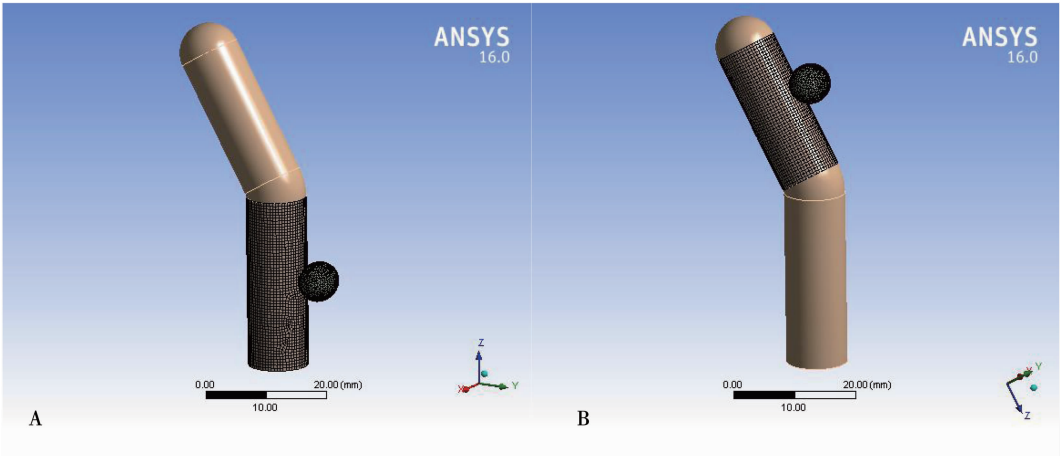
A. 大豆种子外形尺寸;B. 大豆种子三维模型。
A. Soybean seed size; B. Three-dimensional model of soybean seed.

图 1 大豆种子外形尺寸和三维模型
Fig. 1 Size and 3D model of soybean seed



A. 钉齿外形尺;B. 钉齿三维模型。
A. Tooth size; B. Three-dimensional model of tooth.

图 2 钉齿外形尺寸和三维模型
Fig. 2 Size and 3D model of soybean seed tooth



A. 直齿撞击; B. 弓齿撞击。
A. Straight tooth impact; B: Arch tooth impact.

图 3 大豆种子碰撞模型网格划分
Fig. 3 Meshing of soybean seed collision model

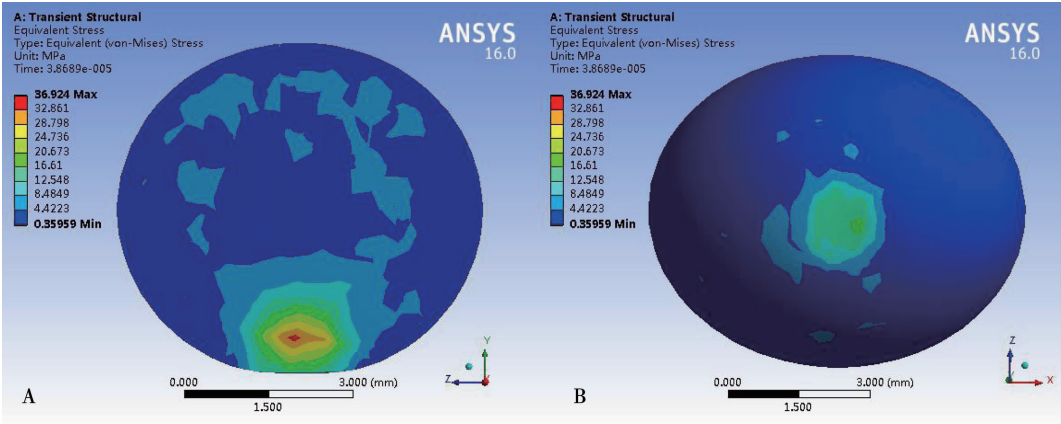
建立如图 3 所示的大豆种子撞击模型,情况 1 模拟直齿撞击,情况 2 模拟弓齿撞击。大豆种子为柔体,钉齿为刚体。实际情况中为钉齿撞击大豆种子,

在瞬态动力学分析中,采用钉齿固定,大豆种子为运动体来反向模拟撞击过程。钉齿底面采用固定约束,大豆种子与钉齿之间为摩擦接触,预测撞击,摩擦系

数为 0.4。钉齿撞击面网格划分采用面控制,大豆种子采用体控制,钉齿采用自由网格划分控制,大豆种子采用六面体网格控制,网格尺寸设置均为 0.5 mm。设大豆种子速度为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,运行 SOLVE,用 Equivalent Stress、Directional Deformation 和 Force Reaction 提取大豆种子撞击过程中的大豆种子的等效应力、滑移量、变形量和受到的作用反力。

2 大豆种子碰撞模拟及结果分析

按上述参数进行大豆种子碰撞分析,得到直齿情况下速度为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的碰撞过程中最大应力云图(图 4)、大豆种子所受作用反力随时间变化的曲线图(图 7)、应力随长度的变化曲线(图 5)及应力随时间的变化曲线(图 6)。



A. 大豆种子中性面应力云图;B. 豆种子撞击面应力云图。
A. Stress diagram of neutral surface of seed; B. Stress diagram of impact surface of seed.

图 4 大豆种子等效应力最大时刻应力云图

Fig. 4 Maximum moment stress diagram of equivalent stress of soybean seed

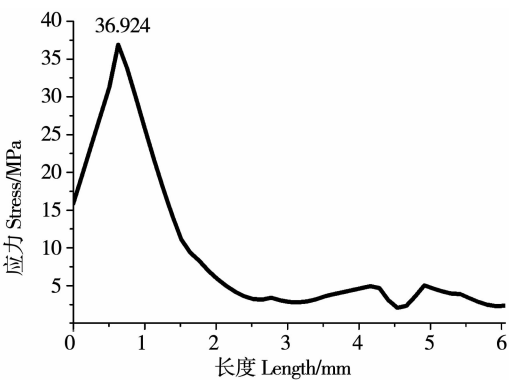


图 5 大豆种子受到应力随长度的变化曲线

Fig. 5 The curve of stress of soybean seeds with the length

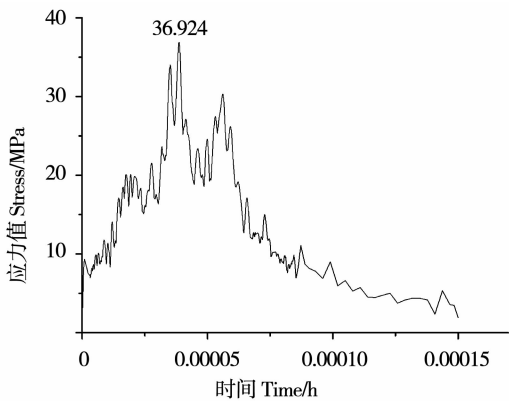


图 6 应力随时间变化的曲线图

Fig. 6 Stress versus time

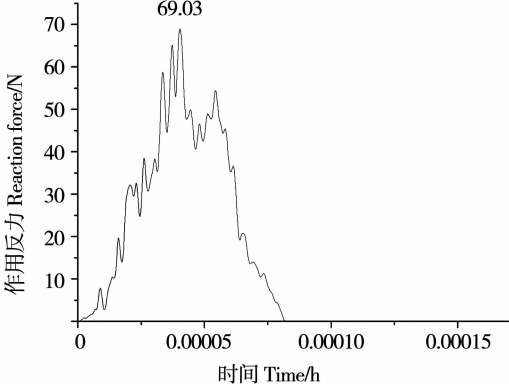


图 7 作用反力随时间变化的曲线图

Fig. 7 Reaction force versus time

由大豆种子中性面应力云图(图 4a)可得,应力集中主要发生在模型的中下部,呈向四周辐射状扩散减小的趋势。由大豆种子撞击面应力云图(图 4b)可得,应力在外表面上都呈多边形环状分布,大豆种子的网格划分精度越高,多边形形状越接近圆,且大豆种子的表面应力分布由中心向四周减小。为了更加直观地表达大豆种子变形过程中的应力分布,利用“path”工具提取大豆种子模型的 y 轴应力分布(图 5),大豆种子模型内部 y 轴方向应力分布为先增后减,最大值为 36.924 MPa,结果与图 4 大豆种子模型的应力分布分析相一致。

为了分析大豆种子的应力随时间的变化,提取大豆种子模型单个碰撞周期应力随时间变化曲线

(图 6)和作用反力随时间变化曲线(图 7)。如图 6 可知,在一个碰撞周期内,可以细分为 3 个阶段,第一个阶段,应力值成增大的趋势,在增大的过程中,有振荡存在。第二个阶段,应力值在一定范围内振荡,最大应力值出现在这个阶段。第三个阶段,在经过一段时间的振荡后,应力值开始减小,在碰撞结束后,应力曲线并没有消失,有残余应力存在。如图 7 所示,在一个碰撞周期内,大豆种子受作用反力可以分为 3 个阶段,第一阶段,大豆种子开始与钉齿接触,所受作用反力随时间振荡的增加。第二个阶段,大豆种子与钉齿充分接触,所受作用反力在一个范围内振荡。第三个阶段,大豆种子所受作用反力经过一段时间振荡后,开始减小,直到大豆种子与钉齿脱离接触,作用反力归 0。应力与作用反

力随时间变化的趋势同步,应力是作用反力的微观体现,在作用反力归零后应力还存在,表明大豆种子内部有残余应力存在。

3 碰撞参数影响全因子试验

3.1 试验水平设置与试验结果方差分析

为进一步分析大豆种子模型碰撞过程中钉齿形状、碰撞速度和撞击面面积等因素对最大应力的影响,以最大应力值为试验标准,选用 $L_{18}(2 \times 1 + 2 \times 3)$ 正交表,进行 3 因素混合水平全因子试验,为了排除其它因素对最大应力值的影响,模型的材料属性、几何尺寸、模型网格划分、接触对的摩擦因数为定值。全因子实验的因素水平如表 2 所示,得到不同条件下的最大应力值(表 3)。

表 2 试验因素和水平

Table 2 Experimental factors and levels

因素水平 Factor level	齿型 Tooth type	碰撞速度 Speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	截面面积 Sectional area/ mm^2
1	直齿 Straight tooth	12.0	0.614
2	弓齿 Arch tooth	13.5	0.756
3	—	15.0	0.813

表 3 仿真试验结果

Table 3 Simulation results

编号 Number	因素 Factor			指标 Index
	齿型 Tooth type	碰撞速度 Speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	截面面积 Sectional area/ mm^2	应力 Stress/MPa
1	直齿 Straight tooth	12	0.614	43.255
2	直齿 Straight tooth	12	0.756	36.924
3	直齿 Straight tooth	12	0.813	24.977
4	直齿 Straight tooth	13.5	0.614	47.954
5	直齿 Straight tooth	13.5	0.756	38.211
6	直齿 Straight tooth	13.5	0.813	26.931
7	直齿 Straight tooth	15	0.614	53.978
8	直齿 Straight tooth	15	0.756	38.611
9	直齿 Straight tooth	15	0.813	26.973
10	弓齿 Arch tooth	12	0.614	41.411
11	弓齿 Arch tooth	12	0.756	29.530
12	弓齿 Arch tooth	12	0.813	23.720
13	弓齿 Arch tooth	13.5	0.614	44.462
14	弓齿 Arch tooth	13.5	0.756	30.737
15	弓齿 Arch tooth	13.5	0.813	24.242
16	弓齿 Arch tooth	15	0.614	48.811
17	弓齿 Arch tooth	15	0.756	31.130
18	弓齿 Arch tooth	15	0.813	25.011

用 SPSS 22.0 对全因子实验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。表中的模型的 P 值小于 0.0001,证明采用的模型合理。方差分析的结果中显著水平在 0.01 以下的为极显著的影响,在表 4 中

可以看出,齿型和截面面积对大豆种子模型撞击过程中所受最大应力的影响极显著,碰撞速度的影响不显著,故不在表 4 中列出。

表 4 方差分析
Table 4 Analysis of variance

误差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方值 Mean square	F	P
模型 Model	1461. 93	3	487. 31	58. 90	<0. 0001
A - 齿型 Tooth type	83. 46	1	83. 46	10. 09	0. 0067
C - 截面面积 Sectional area	1378. 46	2	689. 23	83. 31	<0. 0001
误差 Error	115. 82	14	8. 27		
总和 Sum	1577. 75	17			

3.2 大豆种子与钉齿碰撞力学模型

由于大豆种子与钉齿碰撞过程中,需要考虑应力随时间的变化,所以采用连续碰撞力学模型。在模型中将局部接触变形作为假设基础,物体间嵌入量和嵌入速度计算为参数,接触区域复杂变形以弹簧阻尼力元代替,同时将突变的库仑摩擦问题转变为连续切向弹簧阻尼模型,改善切向粘滞/滑移切换的数值性态,建立理论模型(图 8)^[11-13]。如图 8 所示,大豆种子与钉齿碰撞力学模型为:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta(K\delta^n + C\delta^m \dot{\delta})}{\Delta A} \tag{1}$$

其中 σ 为应力, ΔA 为接触面积, K 为撞击位置处局部接触刚度, C 为撞击位置处阻尼系数, δ 为接触嵌入深度, $\dot{\delta}$ 为接触点上的相对速度, n 为指数系数。不同几何形状下, n 取不同的值。

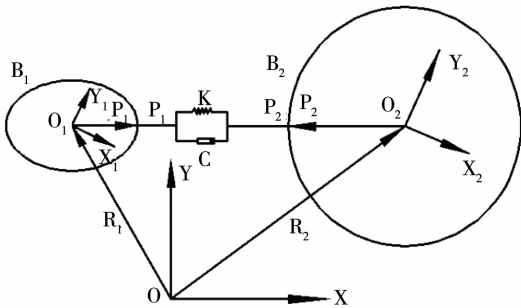
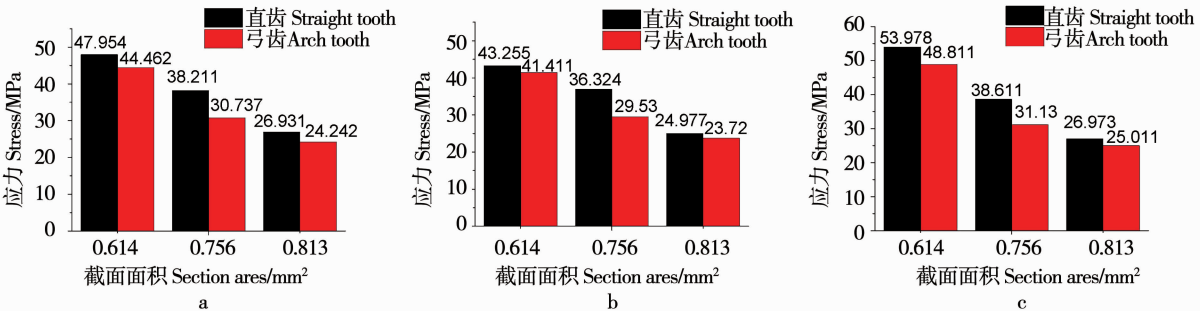


图 8 大豆种子与钉齿碰撞力学模型

Fig. 8 The mechanical model of soybean seed-to-tooth collision



a: 12 m·s⁻¹; b: 13.5 m·s⁻¹; c: 15 m·s⁻¹.

图 9 不同速度下的应力柱状图

Fig. 9 Stress histograms at different speeds

3.3 齿型对应力的影响分析

由图 9 可知,在其它指标相同的情况下,弓齿情况下大豆种子所受最大应力小于直齿情况下,最大应力最大的减小量为 20%。为探究其中原因,使用 Directional Deformation 工具测出在整个过程中大豆种子模型在垂直于速度方向的位移量,即大豆种子的滑移量,由图 10 可以看出,在直齿情况下,滑移量极其微小,在弓齿情况下,滑移量明显增大很多。在相同初始速度的条件下,整个系统的能量是恒定的,由于弓齿情况下滑移量大,大豆种子在钉齿表面的运动距离长,用于克服摩擦力的能量多,总能量一定的情况下,撞击方向的大豆种子速度就变小了,即 δ 变小,如式(1)可知,在其他因素相同的情况下,最大应力值 σ_{\max} 就相对的变小了。

3.4 撞击截面面积对应力的影响

由图 11 可知,随着撞击截面面积的增大,最大应力呈减小的趋势,最大的减小量为 50%。同样,使用 Directional Deformation 工具测出在整个过程中大豆种子在撞击方向的位移量,即大豆种子的变形量。由图 12 可知,齿形和速度相同的情况下,随着截面面积的增大,变形量呈减小的趋势,即 δ 成减小的趋势,由式(1)得,在其他指标相同的情况下,撞击截面面积越大,最大应力值 σ_{\max} 有减小的现象。

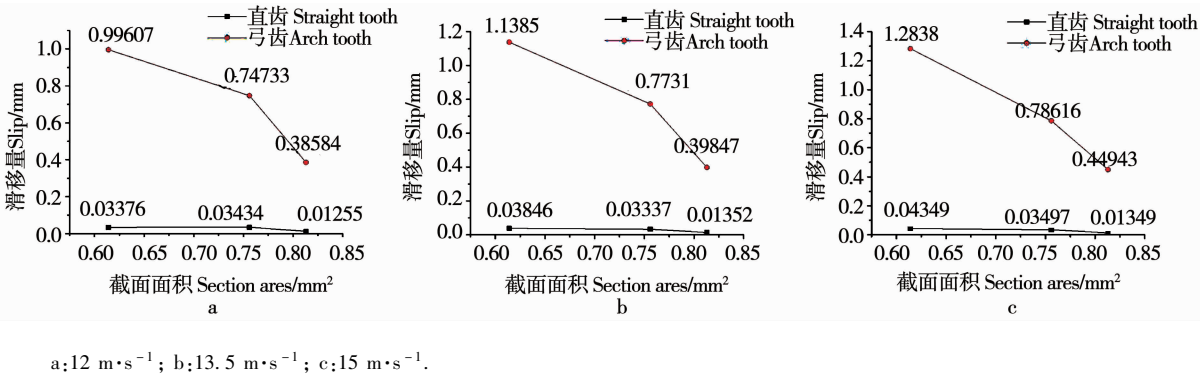


图 10 不同速度下滑移量折线图

Fig. 10 Line diagram of slip at different speeds

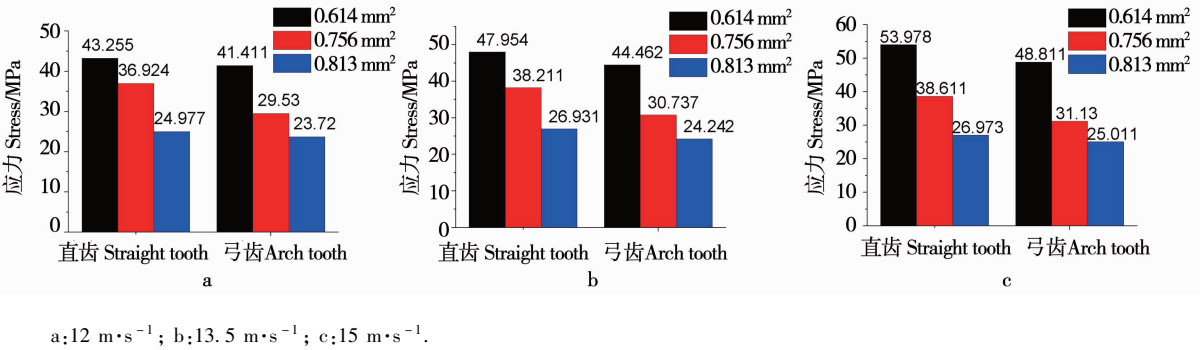


图 11 不同速度下的应力柱状图

Fig. 11 Stress histograms at different speeds

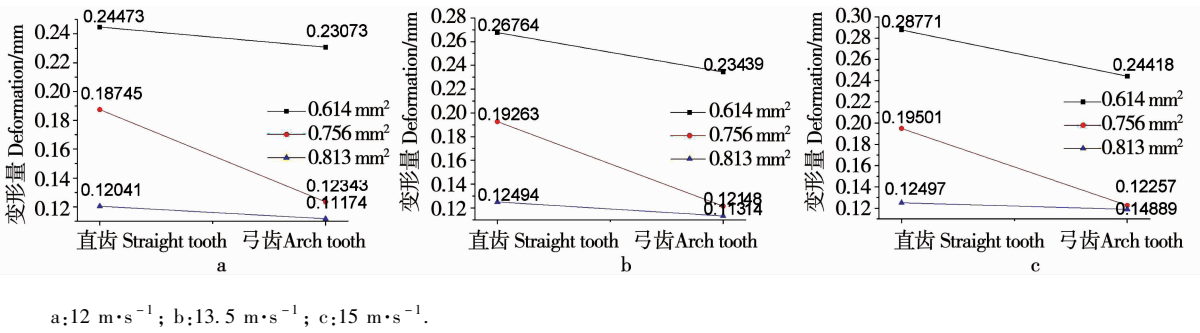


图 12 不同速度下变形量折线图

Fig. 12 Line diagram of deformation at different speeds

4 结论与讨论

利用 ANSYS 软件的 Transient Structural 模块对大豆种子和钉齿的碰撞过程进行瞬态动力学分析,分析碰撞过程中大豆种子内部的受力情况。然后对钉齿形状、碰撞速度和撞击截面面积 3 种因素做混合水平全因子试验,对试验结果进行方差分析,结合理论模型对影响显著地水平进行模拟验证,得到如下结论:

(1)在大豆种子与钉齿碰撞的一个周期内,应力最大值出现在靠近撞击部位的大豆种子内部,同时在撞击过程结束后,大豆种子内部有残余应力存在。

(2)全因子分析结果表明齿形和撞击截面面积

对最大应力值有显著地影响。

(3)弓齿情况下由于系统中部分能量用于大豆种子在齿面上的滑移,大豆种子撞击方向的速度 δ 变小,则最大应力 σ_{\max} 减小,弓齿情况下最大应力值的减小量高达 20%。

(4)随着撞击截面面积的增大,变形量 δ 成减小的趋势,则最大应力 σ_{\max} 减小,最大应力值 σ_{\max} 减小量高达 50%。

本研究创新的对大豆种子在脱粒过程中与钉齿碰撞过程进行瞬态动力学分析,得到大豆种子受力情况与钉齿形状、碰撞速度和撞击截面面积 3 种因素之间的关系,在脱粒过程中大豆种子损伤与受力情况有直接的联系,为大豆种子脱粒过程中损伤机理研究和低损伤率大豆种子脱粒部件研制提供

理论基础。

参考文献

[1] 焦维鹏,赵学观. 弓齿滚筒梳刷式大豆脱粒机的设计[J]. 农业科技与装备,2012(6):40-42. (Jiao W P, Zhao X X. Design of squeezegee soybean threshing machine with bow tooth roller[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2012 (6): 40-42.)

[2] 李心平,吴康,金鑫,等. 基于仿生脱粒的鸡喙啄取玉米果穗引起籽粒离散过程分析[J]. 农业工程学报,2015(18):34-40. (Li X P, Wu K, Jin X, et al. Analysis of the discretization process of the corn-ear caused by the beak-beak pecking based on bionic threshing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015 (18): 34-40.)

[3] 张鑫鑫. 摘荚和种子损伤所致大豆叶片持绿现象的生理和分子机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2016. (Zhang X X. Physiological and molecular mechanisms of green-keeping in soybean leaves caused by pod and seed injury [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2016.)

[4] 高连兴,李晓峰,接鑫,等. 大豆机械脱粒损伤特征及损伤率研究[J]. 沈阳农业大学学报,2010,41(1):55-58. (Gao L X, Li X F, Jie X, et al. Study on mechanical threshing damage and damage rate of soybean [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010,41 (1): 55-58.)

[5] 顿国强,陈海涛,刘环宇,等. 基于正交试验和 SolidWorks Simulation 的大豆种子脱粒过程碰撞模拟分析[J]. 图学学报,2015(5):724-729. (Deng G Q, Chen H T, Liu H Y, et al. Simulation of soybean seed threshing based on orthogonal experiment and SolidWorks simulation [J]. Journal of Graphics, 2015 (5): 724-729.)

[6] 徐立章,李耀明,王显仁. 稻谷脱粒损伤的量化与检测方法[J]. 农业机械学报,2007,38(11):185-188. (Xu L Z, Li Y M, Wang X R. Quantification and detection of rice threshing injury [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38 (11): 185-188.)

[7] 王显仁,李耀明,徐立章. 水稻脱粒破碎率与脱粒元件速度关系研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):16-19. (Wang X R, Li Y M, Xu L Z. Study on the relationship between threshing broken rate and threshing speed of rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23 (8): 16-19.)

[8] 接鑫,李晓峰,孙亮,等. 种子玉米机械脱粒最佳施力方式试验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):71-75, 29. (Jie X, Li X F, Sun L, et al. Experimental study on the best method of mechanical threshing of seed corn [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40 (12): 71-75, 29.)

[9] Ukatu A C. A modified threshing unit for SOYA beans[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95 (3): 371-377.

[10] Singh K N, Singh B. Effect of crop and machine parameters on threshing effectiveness and seed quality of soybean[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26 (4): 349-355.

[11] 段玥晨. 考虑刚柔耦合效应的柔性多体系统碰撞动力学研究[D]. 南京:南京理工大学,2012. (Duan Y C. Study on the dynamics of flexible multi-body systems with rigid-flexible coupling effects [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.)

[12] 董富祥,洪嘉振. 多体系统动力学碰撞问题研究综述[J]. 力学进展,2009(3):352-359. (Dong F X, Hong J Z. Study on the collision of multi-body system dynamics [J]. Advances in Mechanics, 2009 (3): 352-359.)

[13] 杜妍辰,秦婧. 弹性约束下颗粒碰撞阻尼器的理论与实验研究[J]. 中国机械工程,2016,27(21):2934-2938. (Du Y C, Qin Q. Theoretical and experimental study of particle impact damper under elastic restraint [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (21): 2934-2938.)