

## 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定

张涛 刘飞 赵满全\* 麻乾 王伟 樊琦 闫鹏

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特市 010018)

**摘要** 为提高离散元方法模拟玉米秸秆揉碎过程的准确性,试验测定玉米秸秆与揉碎机锤片、玉米秸秆与玉米秸秆的接触参数。以径向堆积角相对误差值为评价指标,应用正交方法标定玉米秸秆离散元仿真需要输入的接触参数。结果表明:玉米秸秆与揉碎机锤片碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别设置为 0.663、0.226、0.119;玉米秸秆与玉米秸秆碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别设置为 0.485、0.142、0.078,此参数组合为玉米秸秆离散元仿真接触参数的最优方案,仿真结果与试验结果的相对误差为 8.127%。

**关键词** 揉碎机; 玉米秸秆; 离散元; 参数标定; 恢复系数; 摩擦因数

**中图分类号** S817;S126

**文章编号** 1007-4333(2018)04-0120-08

**文献标志码** A

## Determination of corn stalk contact parameters and calibration of Discrete Element Method simulation

ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan\*, MA Qian, WANG Wei, FAN Qi, YAN Peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract** To improve the accuracy of the discrete element method simulation of corn stalk, the contact parameters tests of corn stalk and the hammer of tearing choppers, corn straw and corn straw were conducted in this study. By using the average value of the radial stacking angle as evaluation index, the orthogonal method was used to calibrate the contact parameters of the corn stalk discrete element simulation input. The coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of rolling friction with corn straw and hammer were calibrated by discrete element simulation. The results of the optimal scheme were 0.663, 0.226, and 0.119, respectively. In addition, the coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of rolling friction with corn stalk and corn stalk were set to 0.485, 0.142 and 0.078, respectively. The mean error value of discrete element simulation using this parameter combination was 8.127%.

**Keywords** rubbing machine; corn straw; Discrete Element Method; parameter calibration; coefficient of restitution; coefficient of friction

我国玉米秸秆资源丰富,但目前开发利用率较低。将更多玉米秸秆加工作为牛、马、羊等反刍类动物的粗饲料,不但保护了环境,还为我国“节粮型”畜牧业发展提供了保障<sup>[1-5]</sup>。玉米秸秆中粗纤维含量较高,粗蛋白含量较低,适口性较差,需要较好加工方式提高玉米秸秆适口性<sup>[6]</sup>。秸秆揉碎机可将玉米秸秆加工成丝状碎料,具有较高茎节破碎率,且成品类似天然草料,可作为牛、马、羊等反刍类牲畜粗饲料。但现阶段秸秆揉碎机还具有能耗较高、效率较低的缺点,需要深入研究玉米秸秆揉碎机理,优化结

构,以达到提高加工效率、降低能耗的目的<sup>[7-9]</sup>。

随着计算机计算能力的提高,离散元方法在物料破碎过程研究方面得到了大力发展。EDEM 离散元仿真软件 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型为物料破碎仿真模型。其原理为,应用有限尺度粘结剂粘结一定数量粒子,这种粘结具有一定机械强度,当应力达到设置的极限应力时这种粘结就被破坏,破坏后的粒子不再有粘结力。该方法广泛应用于农业物料破碎过程领域研究。已有研究模拟了牛肉块在口腔中咀嚼破碎的过程,有效实现了牛肉

收稿日期:2017-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51665047);内蒙古自治区自然科学基金项目(2016BS0516)

第一作者:张涛,博士研究生,E-mail:308685885@qq.com

通讯作者:赵满全,教授,博士生导师,主要从事高寒干旱地区农业机械化工程与技术研究,E-mail:nmgzhaomq@163.com

嫩度等级的预测评定<sup>[10]</sup>;利用该模型模拟了旋耕工作过程,分析了试验过程较难得到的土壤宏观和微观运动行为,为旋耕刀与土壤相互作用机理研究提出了新的研究方法<sup>[11]</sup>;模拟了土壤深松过程,深入研究了深松铲与土壤相互作用的规律<sup>[12]</sup>;已有研究验证了离散元方法仿真玉米秸秆运动的准确性<sup>[13-15]</sup>。离散元仿真是对试验过程的理想化,为了减小离散元仿真误差,需要对仿真输入参数标定<sup>[16-18]</sup>。应用离散元模拟玉米秸秆破碎过程与输送过程,需要输入较准确的玉米秸秆接触参数,本研究旨在标定 EDEM 离散元软件仿真需要输入的 6 个接触参数,以期为玉米秸秆离散元仿真输入参数的设置提供依据。

## 1 接触参数测定

### 1.1 秸秆揉碎机简介

秸秆揉碎机广泛应用于农作物秸秆和牧草等粗饲料加工作业,其工作过程介于铡切与粉碎之间,可将秸秆、牧草加工成柔软丝状粗饲料,对玉米、高粱等粗壮秸秆具有较高破节率,可明显改善牲畜采食适口性,提高秸秆利用率。内蒙古农业大学研制的 9R-40 型秸秆揉碎机主要由入料斗、主轴皮带轮、下机壳、转子、电机架、机架、齿条、抛送叶片、锤片、上机壳和出料槽组成(图 1)。整机质量 200 kg,配套动力 7.5 kW,额定转速 2 800 r/min,外形尺寸(长×宽×高)为 1 600 mm×1 000 mm×1 750 mm,转子

直径 400 mm,生产效率 1 t/h。其工作原理为:转子上安装有锤片,转子高速旋转使锤片具有较高线速度,秸秆由喂入口进入,与锤片碰撞接触后破碎,转子螺旋排列的输送作用与气流吸力使秸秆由喂入口向出料口边破碎边运动,经过多次与锤片撞击到达出料口附近时加工完成,由转子上的抛送叶片将丝状秸秆抛出<sup>[19]</sup>。

### 1.2 玉米秸秆本征参数测定

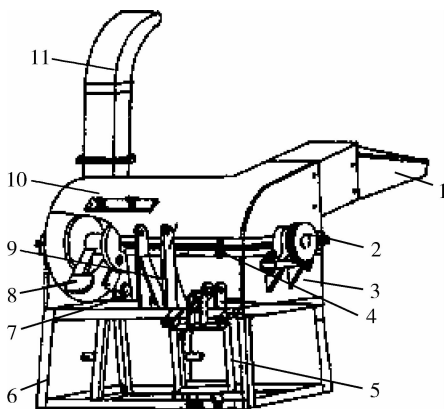
测定的玉米秸秆取自内蒙古自治区呼和浩特市赛罕区什兰岱村(北纬 40°50',东经 111°47')秋收后长时间自然风干秸秆。玉米品种为呼和浩特周边常种的玉米品种,秸秆平均株长 2 011 mm。秸秆去除叶鞘,用切割机去除茎节,测定与标定无茎节部分。应用精度为 0.001 g 天平和 DHG-9245A 型鼓风干燥箱,依据 GB/T 14699.1—2005《饲料采样》和 GB/T 6435—2006《饲料中水分和其他挥发性物质含量的测定》的含水率测量方法,测定玉米秸秆无茎节部分含水率为 8.822%。

秸秆的截面形状近似椭圆形,应用游标卡尺测量 10 段被标定秸秆截面的长轴和短轴取平均值分别为 25.415 和 21.160 mm,秸秆预切割长度为 140 mm,切割后用游标卡尺测量秸秆实际长度平均值为 138.66 mm,应用天平与游标卡尺测定秸秆密度为 110.945 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 静摩擦因数测定

将无茎节部分切割为长度 40 和 20 mm 的秸秆段,为防止测定时秸秆滚动,且使秸秆与被测定表面充分接触,将两根秸秆段用一根钢丝连接。被测定平面分别为揉碎机锤片和玉米秸秆外皮,秸秆外皮平面应用窄秸秆外皮粘结而成。静摩擦因数测定应用 CNY-1 型斜面仪。试验时,应用水平仪调节斜面仪底座水平度,将被测定的锤片和粘结的玉米秸秆外皮分别放到斜面仪平面上,当斜面仪平面缓慢转动到一定角度时,玉米秸秆在被测平面上滑动,记录开始滑动时斜面仪指示角度,计算得到玉米秸秆与锤片、玉米秸秆与玉米秸秆的静摩擦因数<sup>[20-21]</sup>。

试验重复 50 次取平均值,测定玉米秸秆分别与锤片和玉米秸秆平面开始滑动角度分别为 17.93°和 11.79°,计算得到静摩擦因数分别为 0.324 和 0.203。



1. 入料斗;2. 主轴皮带轮;3. 下机壳;4. 转子;5. 电机架;6. 机架;7. 齿条;8. 抛送叶片;9. 锤片;10. 上机壳;11. 出料槽

1. Feed hopper; 2. Spindle pulley; 3. Lower casing; 4. Rotor; 5. Motor frame; 6. Frame; 7. Rack; 8. Throwing blade; 9. Hammer; 10. Upper casing; 11. Discharge trough

图 1 9R-40 型秸秆揉碎机结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of 9R-40 tearing choppers

## 1.4 滚动摩擦因数测定

滚动摩擦因数测定的测试仪器和测试方法与静摩擦因数测定相同。选择截面圆度较好的秸秆,将单根秸秆放在斜面仪上边被测平面上,记录秸秆开始滚动时斜面仪指示的角度。试验重复 50 次取平均值,测定玉米秸秆与锤片和玉米秸秆平面接触时开始滚动角度分别为  $6.19^\circ$  和  $5.59^\circ$ ,计算得到滚动摩擦因数分别为 0.108 和 0.098。

## 1.5 恢复系数测定

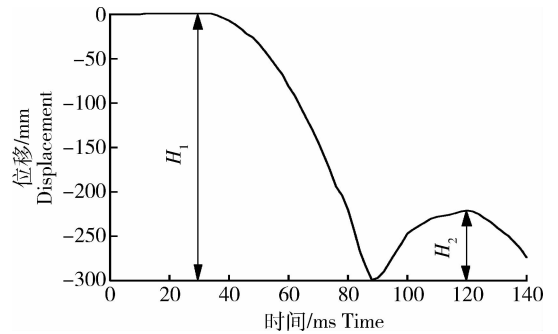
碰撞恢复系数是衡量物体碰撞后,恢复到原来形状能力的参数,其定义为碰撞后法向相对分离速度与碰撞前相对接近速度的比值。如果物体自由下落与被测物体碰撞,碰撞后物体自由弹起,下落与上升运动过程中,只有重力做功。恢复系数  $e$  的计算公式为<sup>[22-23]</sup>:

$$e = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

式中: $H_1$  为玉米秸秆下落高度, $H_2$  为玉米秸秆碰撞后弹起最高点与碰撞平面的高度差。玉米秸秆密度较小,速度较大时,空气阻力对试验结果影响较大,选择下落高度为 300 mm。试验过程为:调整三脚架使高速摄像机水平,高速摄像机与电脑连接,调整曝光量,设置高速摄像机拍摄频率为 500 Hz。玉米秸秆从高度尺前端自由下落,与被测定物体碰撞后弹起<sup>[24]</sup>。应用 pco. dimax S 型高速摄像系统拍摄试验过程,拍摄帧率设置为 500 Hz,分辨率为  $1\ 280$  像素  $\times$   $1\ 024$  像素,曝光时间设置为 1.932 ms,记录拍摄数据存入电脑。

应用 TEMA 高速摄像分析软件分析得到高速摄像机拍摄的玉米秸秆的下落位移。在高度尺前端建立坐标原点, $x$  轴为水平方向, $y$  轴为竖直方向,分析秸秆截面中心处  $y$  方向运动位移,即玉米秸秆的运动位移。导出坐标数据,应用 Origin 2017 软件得到时间-位移曲线。其中一组玉米秸秆运动时间-位移曲线见图 2。

做若干组下落试验,分别分析 10 组玉米秸秆与揉碎机锤片、玉米秸秆与玉米秸秆的正碰撞过程,计算恢复系数后取平均值。测定玉米秸秆与揉碎机锤片、玉米秸秆与玉米秸秆的碰撞恢复系数分别为 0.603 和 0.485。



$H_1$  和  $H_2$  分别为玉米秸秆碰撞前下落的最大位移和碰撞后弹起的最大位移。

$H_1$  and  $H_2$  are the maximum displacement of the corn straw before collision and the maximum displacement after the collision.

图 2 玉米秸秆运动时间-位移关系

Fig. 2 Time-displacement curve of corn straw movement

## 2 玉米秸秆径向堆积角测定

标定离散元仿真输入参数,需要设置仿真条件与试验条件相同,应用径向堆积角试验对比仿真结果与试验结果的误差,从而得到较好仿真输入参数。本研究设计了具有可抽出隔板的玉米秸秆径向堆积角测定装置,材料为钢,长宽高分别为 323、215 和 150 mm。测定的玉米秸秆去除叶鞘,用切割机切除茎节,所有秸秆切割长度为 140 mm,将一定数量玉米秸秆放入径向堆积角测定装置一侧,竖直向上抽出中间隔板后,玉米秸秆整体向另一侧运动,与壁面碰撞后形成径向堆积角,应用相机拍摄记录秸秆运动后形成的径向堆积角照片<sup>[25]</sup>。

应用 Origin 2017 软件读取拍摄的径向堆积角照片,通过该软件图像到矩阵功能和屏幕位置读取功能,得到上层秸秆中心位置、径向堆积角测定装置下边框左右点的坐标位置,通过下边框左右点坐标位置与该装置实际距离比值,计算出上层玉米秸秆外截面中心黑点处实际坐标位置。以径向堆积角测定装置左下点为坐标原点, $x$  轴方向沿装置下边缘向右, $y$  轴方向沿左边框向上,应用 Origin 2017 软件计算上层秸秆中心位置的拟合直线,由拟合直线斜率计算得到该装置测定的径向堆积角。做 5 次径向堆积角测定试验,应用 Origin 2017 软件计算得到拟合直线斜率平均值为 0.289,径向堆积角平均值为  $16.108^\circ$ 。

### 3 离散元仿真参数标定

#### 3.1 本征参数设置

离散元仿真软件为 EDEM 2.7,由离散元软件的颗粒工厂与颗粒体力 API (Application Programming Interface)生成玉米秸秆模型。仿真计算时颗粒与颗粒、颗粒与几何体接触模型都选用 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型<sup>[26]</sup>。本研究不考虑粘结键断裂,仿真时玉米秸秆模型由一种颗粒粘结而成,且粘结参数对接触参数影响很小可忽略,输入较大粘结参数。考虑计算精度与计算量,应用 1 035 个半径为 2 mm 的圆球粘结成椭圆柱玉米秸秆。离散元仿真时玉米秸秆模型见图 3。设置椭圆截面长轴  $a$  为 25.415 mm,短轴  $b$  为 21.160 mm,长度  $l$  为 138.66 mm。玉米秸秆测定密度为 110.945 kg/m<sup>3</sup>,离散元圆球的填充系数为 0.587,离散元输入参数为实体密度,设置玉米秸秆离散元输入密度参数为 189 kg/m<sup>3</sup>,离散元仿真材料本征参数设置见表 1<sup>[27-28]</sup>。

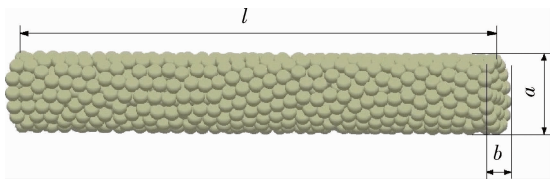


图 3 玉米秸秆离散元仿真模型

Fig. 3 Discrete Element Method model of corn stalk

表 1 离散元仿真材料本征参数设置

Table 1 Material parameter setting of Discrete Element Method simulation

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
玉米秸秆 Corn stalk	泊松比	0.4
	剪切模量/MPa	1
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	189.7
钢 Steel	泊松比	0.3
	剪切模量/MPa	79 000
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	7 865

#### 3.2 接触参数设置

本研究要标定的玉米秸秆离散元仿真实接触参数包括:玉米秸秆与揉碎机锤片(材料为钢)碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数;玉米秸秆与玉米秸秆碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数,共 6 个参数。为减少试验次数,应用 L<sub>25</sub>(5<sup>6</sup>)正交表做离散元径向堆积角试验仿真标定。离散元秸秆模型由圆球颗粒粘结而成,与实际秸秆相比增大了粗糙度,所以本研究以参数测试值为基础,适当减小了仿真参数,根据前期试验,正交试验仿真 6 个接触参数的水平设置为试验测定值的 0.7、0.8、0.9、1.0、1.1 倍,共 5 个水平,离散元仿真实接触参数设置因素水平见表 2<sup>[29-30]</sup>。

表 2 接触参数离散元仿真试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of Discrete Element Method simulation of contact parameters

水平 Level	因素 Factors					
	A	B	C	D	E	F
1	0.422	0.226	0.076	0.340	0.142	0.069
2	0.482	0.259	0.087	0.388	0.163	0.078
3	0.542	0.291	0.098	0.437	0.183	0.088
4	0.603	0.324	0.108	0.485	0.203	0.098
5	0.663	0.356	0.119	0.534	0.224	0.108

注:A、B、C 分别为玉米秸秆与揉碎机锤片接触的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数;D、E、F 分别为玉米秸秆与玉米秸秆接触的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数。

Note:A, B and C represent the corn stalk and rubbing machine hammer contact recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient, respectively. D, E and F represent the coefficient of contact recovery, the coefficient of static friction and the coefficient of rolling friction of corn straw and corn straw respectively.

离散元仿真导入的几何体模型的底部与秸秆接触部分和径向堆积角测定试验装置相同。设置能够包含整根玉米秸秆的大颗粒(名称为 Whole)和半径为 2 mm 的小球(Fraction)。仿真计算过程为:颗粒工厂生成 36 个固定方向的 Whole 颗粒,计算到 0.1 s 时进行颗粒替换,颗粒工厂 API 程序将 Whole 颗粒按照 txt 文件内颗粒位置与半径信息,替换为 2 mm 的 Fraction 颗粒组合体,下一个步长由颗粒体力 API 程序和粘结模型使 Fraction 颗粒在 3 mm 半径内产生粘结力,生成玉米秸秆模型,导出仿真结果用于离散元正交仿真。离散元软件计算得到的仿真模型见图 4。

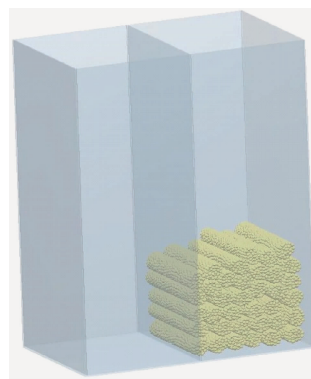


图 4 离散元仿真模型

Fig. 4 Discrete Element Method simulation model

### 3.3 仿真结果

将径向堆积角仿真模型复制 25 份,用于离散元正交仿真的开始模型,每一个离散元文件按  $L_{25}(5^6)$  正交表试验号输入接触参数后进行计算。由离散元后处理部分得到仿真计算 1.2 s 后,颗粒整体速度为 0,所以设置仿真总时间为 1.5 s。导出仿真计算

完成后玉米秸秆的正视图图片,应用 Origin 2017 软件读取离散元仿真结果图片,对图片的处理和分析方法与玉米秸秆径向堆积角测定试验相同,计算出每个仿真结果玉米秸秆径向堆积角,再得出每个仿真结果的相对误差值(表 3)。

表 3 接触参数离散元仿真结果与试验结果的相对误差

Table 3 Relative error of contact parameter between simulation results of Discrete Element Method and experimental results

试验号 Number	相对误差 Relative error	试验号 Number	相对误差 Relative error	试验号 Number	相对误差 Relative error	试验号 Number	相对误差 Relative error	试验号 Number	相对误差 Relative error
1	10.367	6	12.657	11	23.941	16	32.533	21	3.170
2	26.851	7	31.848	12	26.900	17	26.028	22	32.311
3	44.19	8	32.125	13	33.087	18	34.671	23	56.080
4	43.976	9	47.394	14	47.799	19	64.156	24	30.644
5	71.059	10	67.903	15	50.353	20	43.149	25	47.986

## 4 离散元仿真结果分析

仿真相对误差值较小的试验号为 21、1、6,相对误差分别为 3.170%、10.367%、12.657%(表 3)。正交试验仿真结果极差值见表 4<sup>[31]</sup>。可见:离散元接触参数对仿真结果准确性影响主次顺序分别为玉米秸秆与锤片的静摩擦因数、玉米秸秆的静摩擦因数、玉米秸秆的滚动摩擦因数、玉米秸秆的恢复系数、锤片的滚动摩擦因数、锤片的恢复系数。由  $K$  值得出最优方案为  $A_5B_1C_5D_4E_1F_2$ ,最优方案离散元仿真分析得到,径向堆积角相对误

差为 7.298%。

为了得到相对误差较小的输入参数,设计另一组验证试验。玉米秸秆从径向堆积角测定装置的 1/2 位置运动到该装置 2/3 位置,形成径向堆积角,重复 3 次试验。结果分析方法与本研究第 2 节径向堆积角的处理方法相同,分析后得到该试验径向堆积角平均值为 17.32°。

对 1、6、21 号试验和最优方案进行验证试验模型的离散元仿真。分析后得到 1、6、21 号试验和最优方案的验证试验离散元仿真的相对误差值分别为 11.407%、20.158%、14.114%、8.957%。

表 4 接触参数离散元仿真结果极差分析

Table 4 Range analysis of Discrete Element Method simulation results of contact parameters

极差 Range	A	B	C	D	E	F
$K_1$	196.443	82.668	193.052	183.889	149.516	187.443
$K_2$	191.927	143.938	210.097	191.017	180.844	153.093
$K_3$	182.080	200.152	173.772	178.661	206.318	206.782
$K_4$	200.536	233.969	183.519	164.017	165.180	217.927
$K_5$	170.190	280.450	180.737	223.592	239.318	175.931
R	30.346	197.782	36.325	59.574	89.803	64.834

注：A、B、C、D、E、F 为离散元仿真玉米秸秆的接触参数，具体含义见表 2。 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$  分别为 1、2、3、4、5 水平的仿真结果相对误差值之和。R 为极差值，代表影响仿真结果准确性的主次因素。

Note: A, B, C, D, E and F are the contact parameters of corn straw simulated by EDEM, and the specific meaning is shown in Table 2.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  and  $K_5$  are the sum of the relative error values of the simulation results at 1, 2, 3, 4 and 5 levels, respectively. R is the range value. It represents the primary and secondary factors that affect the accuracy of simulation results.

综上，试验号为 1、6、21 和最优方案的分析试验和验证试验离散元仿真相对误差平均值分别为 10.887%、16.408%、8.642%、8.127%，最优方案相

对误差值最小。玉米秸秆堆积角分析试验结果和对应的离散元仿真结果见图 5；验证试验结果和对应的离散元仿真结果见图 6。

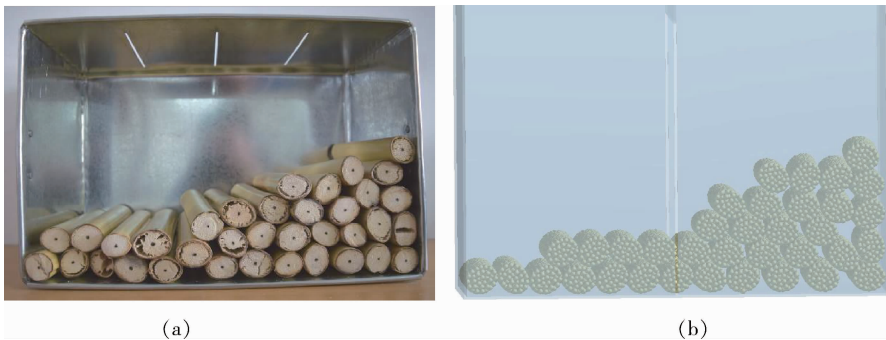


图 5 玉米秸秆堆积角分析试验结果 (a) 和对应的离散元仿真结果 (b)  
Fig. 5 Comparison between simulation results and experimental results



图 6 玉米秸秆堆积角验证试验结果 (a) 和对应的离散元仿真结果 (b)  
Fig. 6 Comparison between simulation results and experimental results



## 5 结 论

本研究应用斜面仪和高速摄像系统测定了玉米秸秆接触参数,进行了玉米秸秆径向堆积角试验,以离散元仿真与试验相对误差值为评价标准,应用正交方法对接触参数进行了仿真标定,得到接触参数离散元仿真输入的最优方案。试验测定与仿真标定结果如下:

1)玉米秸秆与揉碎机锤片碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数测定值分别为 0.603、0.324、0.108;玉米秸秆与玉米秸秆的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数测定值分别为 0.485、0.203、0.098。

2)玉米秸秆与揉碎机锤片的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数离散元仿真参数标定值分别为 0.663、0.226、0.119;玉米秸秆与玉米秸秆的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数,离散元仿真参数标定值分别为 0.485、0.142、0.078。应用标定后参数组离散元仿真,计算得到的仿真结果与试验结果的相对误差为 8.127%。

## 参考文献 References

- [1] 楚天舒,杨增玲,韩鲁佳. 中国农作物秸秆饲料化利用满足度和优势度分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 1-9  
Chu T S, Yang Z L, Han L J. Analysis on satisfied degree and advantage degree of agricultural crop straw feed utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 1-9 (in Chinese)
- [2] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32-44  
Wei M G, Wang X Y, Xie G H. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one provinces of China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6): 32-44 (in Chinese)
- [3] 陈超玲, 杨阳, 谢光辉. 我国秸秆资源管理政策发展研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 1-11  
Chen C L, Yang Y, Xie G H. Study of the development of crop straw management policy in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 1-11 (in Chinese)
- [4] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7  
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 1-7 (in Chinese)
- [5] 王亚静, 王红彦, 高春雨, 王磊, 毕于运. 稻麦玉米秸秆残留还田量定量估算方法及应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 244-250

- Wang Y J, Wang H Y, Gao C Y, Wang L, Bi Y Y. Quantitative estimation method and its application to rice, wheat and corn straw residues left in field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 244-250 (in Chinese)
- [6] 杨连玉, 高阳. 玉米秸秆饲料化高效利用的瓶颈及解决策略 [J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 634-638, 644  
Yang L Y, Gao Y. Bottlenecks of efficient utilization of corn straw feed and its solutions [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(5): 634-638, 644 (in Chinese)
- [7] 麻乾, 刘飞, 赵满全. 揉碎机揉碎机理分析及锤片结构优化 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 7-15  
Ma Q, Liu F, Zhao M Q. Working mechanism and structure optimization of hammer of rubbing machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 7-15 (in Chinese)
- [8] 刘向阳, 韩鲁佳, 阎巧娟, 刘依. 9RZ-60 型秸秆揉切机性能的试验研究 [J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4): 27-29  
Liu X Y, Han L J, Yan Q J, Liu Y. Experimental study on 9RZ-60 chopping and rubbing machine for crops straw and stalk [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(4): 27-29 (in Chinese)
- [9] 张三强, 李林, 张庆旭, 杨淑华, 赵振国. 秸秆揉碎特点及机理分析 [J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 179-183  
Zhang S Q, Li L, Zhang Q X, Yang S H, Zhao Z G. Analysis of character and mechanism of rubbing and breaking machine of crop straw [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2009, 30(2): 179-183 (in Chinese)
- [10] 王笑丹, 王洪美, 韩云秀, 焦娜, 才英明, 金佳慧, 徐丽萍, 刘爱阳. 基于离散元法的牛牛咀嚼破碎模型构建 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 228-234  
Wang X D, Wang H M, Han Y X, Jiao N, Cai Y M, Jin J H, Xu L P, Liu A Y. Structure of beef chewing model based on discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(4): 228-234 (in Chinese)
- [11] 方会敏, 姬长英, Farman A C, 郭俊, 张庆怡, Chaudhry A. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28  
Fang H M, Ji C Y, Farman A C, Guo J, Zhang Q Y, Chaudhry A. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on Distinct Element Method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 22-28 (in Chinese)
- [12] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婷, 汪博涛, 朱瑞祥. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88  
Hang Y X, Hang C G, Yuan M C, Wang B T, Zhu R X. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 80-88 (in Chinese)
- [13] Bart L, Thomas A, Engelbert T, Bart D, Herman R, Wouter S. Simulation of grain-straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 24-33

- [14] Gomez A R, Gallego E, Fuentes J M, Montellano C G, Ayuga F. Values for particle-scale properties of biomass briquettes made from agroforestry residues[J]. *Particology*, 2014, 12: 100-106
- [15] 方会敏, 姬长英, Ahmed A T, 张庆怡, 郭俊. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67  
Fang H M, Ji C Y, Ahmed A T, Zhang Q Y, Guo J. Analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 60-67 (in Chinese)
- [16] 冯俊小, 林佳, 李十中, 周敬之, 周知星. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 208-213  
Feng J X, Lin J, Li S Z, Zhou J Z, Zhou Z X. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 208-213 (in Chinese)
- [17] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 何远, 李建桥. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49-56  
Zhang R, Han D L, Ji Q L, He Y, Li J Q. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of Discrete Element Method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 49-56 (in Chinese)
- [18] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 刘扬, 张强. 颗粒滚动摩擦因数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 173-179  
Han Y L, Jia F G, Tang Y R, Liu Y, Zhang Q. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 173-179 (in Chinese)
- [19] 赵振国. 9R-40 型揉碎机揉碎性能的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011  
Zhao Z G. The experimental study on the performance of 9R-40 model rubbing chopper [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [20] 杨磊, 宋欣, 李艳聪, 单慧勇. 苹果表面摩擦系数的试验研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 220-221, 224  
Yang L, Song X, Li Y C, Shan H Y. Test study on the apple friction coefficient [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(12): 220-221, 224 (in Chinese)
- [21] 牟光辉, 郭锦山, 朱旭, 周志权. 林木种子静摩擦系数的实验研究[J]. 东北林业大学学报, 1994, 22(2): 37, 40  
Mou G H, Guo J S, Zhu X, Zhou Z Q. Study on experiment of static friction coefficient of forest trees seeds [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1994, 22(2): 37, 40 (in Chinese)
- [22] 黄小毛, 查显涛, 潘海兵, 宗望远, 陈辉. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 22-29  
Huang X M, Zha X T, Pan H B, Zong W Y, Chen H. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point-to-plate collision model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 22-29 (in Chinese)
- [23] 王成军, 李耀明, 马履中, 马征. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 274-278  
Wang C J, Li Y M, Ma L Z, Ma Z. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 274-278 (in Chinese)
- [24] 陆永光, 吴努, 王冰, 于昭洋, 林德志, 胡志超. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 111-118  
Lu Y G, Wu N, Wang B, Yu Z Y, Lin D Z, Hu Z C. Measurement and analysis of peanuts' restitution coefficient in point-to-plate collision mode [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 111-118 (in Chinese)
- [25] 刘凡一, 张舰, 李博, 陈军. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253  
Liu F Y, Zhang J, Li B, Chen J. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 247-253 (in Chinese)
- [26] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010  
Hu G M. *Analysis and Simulation of Particle System by Discrete Element Method* [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010 (in Chinese)
- [27] 陈成. 秸秆螺旋筛分理论分析与筛分性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016  
Chen C. Theory analysis and screening performance research of straw sifter based on spiral conveyor [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016 (in Chinese)
- [28] 杨廷文. 玉米茎秆及其打捆力学特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014  
Yang Y W. Study on the mechanical characteristics of maize stalk and its round bundle [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014 (in Chinese)
- [29] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 张东兴, 张瑞, 蓝薇. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41  
Cui T, Liu J, Yang L, Zhang D X, Zhang R, Lan W. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 34-41 (in Chinese)
- [30] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 崔涛, 史嵩, 李克鸿, 杨丽. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42  
Wang Y X, Liang Z J, Zhang D X, Cui T, Shi S, Li K H, Yang L. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 36-42 (in Chinese)
- [31] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008  
Li Y Y, Hu C R. *Experimental Design and Data Processing* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008 (in Chinese)