

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.017

花生秧根茎碰撞恢复系数测定试验

贺欣¹ 彭强吉^{2,3} 李国明⁴ 王小瑜^{2,3} 张春艳^{2,3} 康建明^{2,3}

(1. 聊城大学机械与汽车工程学院, 聊城 252000; 2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100;

3. 山东省丘陵山区智慧农业装备重点实验室, 济南 250100; 4. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 针对膜杂风选机作业过程不稳定, 数值模拟缺乏参数难以仿真的问题, 通过单因素和多因素试验研究, 构建了花生秧根茎与机械工作部件之间的碰撞模型, 实现了恢复系数的准确测定。试验基于花生秧根茎力学特性差异, 选取碰撞材料、碰撞角度、下落高度、含水率作为试验因素进行试验, 研究试验因素对花生秧根、茎恢复系数的影响, 建立试验因素与恢复系数之间的回归模型, 进行试验因素回归分析。单因素试验结果表明: 花生秧根恢复系数大于花生秧茎恢复系数, 花生秧根、茎与45号钢、亚克力板、花生秧、橡胶、地膜之间的恢复系数依次减小, 恢复系数偏差随之降低, 平均偏差为0.068 4; 花生秧根、茎与45号钢之间的恢复系数, 随碰撞角度增大而增加, 恢复系数偏差先减小后增大, 平均偏差为0.092 6; 随下落高度增大而增加, 恢复系数偏差上下波动, 平均偏差为0.087 8; 随含水率增大而减小, 含水率达到40%, 恢复系数偏差急剧下降, 平均偏差为0.0827, 回归方程决定系数均大于0.97。正交试验结果表明, 影响恢复系数各因素的主次顺序为: 碰撞材料、碰撞角度、下落高度、含水率。验证试验结果表明: 花生秧根、茎平均相对误差分别为3.928%和4.146%。研究结果可为秧膜分离、膜杂风选机等设备数值模拟参数设置提供参考依据。

关键词: 花生秧; 碰撞恢复系数; 碰撞试验; 高速摄像

中图分类号: S565.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)S1-0156-09

Experiment on Determination of Recovery Coefficient of Peanut Seedling

HE Xin¹ PENG Qiangji^{2,3} LI Guoming⁴ WANG Xiaoyu^{2,3} ZHANG Chunyan^{2,3} KANG Jianming^{2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

2. Shandong Academy of Agriculture Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

3. Shandong Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Areas, Ji'nan 250100, China

4. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to solve the problem that the operation process of the membrane hybrid winnowing machine is unstable and the numerical simulation lacks parameters which is difficult to simulate, the collision model between the rhizome of peanut seedling and the mechanical working parts was constructed through single factor and multi-factor experimental research, and the accurate determination of the recovery coefficient was realized. Based on the differences in mechanical properties of peanut seedling rhizomes, the collision material, collision angle, falling height and moisture content were selected as the test factors, the influence of the test factors on the recovery coefficient of peanut seedling roots and stems was studied, the regression model between the test factors and the recovery coefficient was established, and the regression analysis of the test factors was carried out. The results of single factor test showed that the recovery coefficient of peanut seedling roots was greater than that of peanut seedling stems, and the recovery coefficients between peanut seedling roots and stems and No. 45 steel, acrylic plate, peanut seedlings, rubber sheet and plastic film decreased in turn, and the deviation of the recovery coefficient was decreased with an average deviation of 0.068 4. The average deviation was 0.092 6, the average deviation of the recovery coefficient fluctuated up and down with the increase of falling height, and the average deviation was 0.087 8, and the average deviation of the recovery coefficient was decreased sharply with the increase

收稿日期: 2024-07-21 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52175238)、山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202321)、新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-1)和山东省生态农业技术体系项目(SDAIT-30-05)

作者简介: 贺欣(1998—),男,硕士生,主要从事农业机械装备与智能控制研究,E-mail: 3054505842@qq.com

通信作者: 康建明(1984—),男,研究员,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: kjm531@sina.com

of the moisture content, the moisture content reached 40%, and the deviation of the recovery coefficient was decreased sharply, with an average deviation of 0.082 7, and the determination coefficient of the regression equation was greater than 0.97. The orthogonal test results showed that the order of the factors affecting the recovery coefficient was as follows: collision material, collision angle, falling height and moisture content. The results of the verification test showed that the average relative errors of peanut seedling roots and stems were 3.928% and 4.146%, respectively. Theresearch result can provide a reference for the setting of numerical simulation parameters of seedling film separation, membrane miscellaneous winnowing machine and other equipment

Key words: peanut seedlings; recovery coefficient; crash test; high-speed videography

0 引言

花生覆膜栽培技术具有增温保墒、抑制杂草、缩短生长周期等功能,可提高产量 15% 以上,广泛应用于花生生产^[1]。花生秧是花生收获后的产物,含有丰富的粗蛋白质、粗脂肪和维生素,是优良的饲料^[2-3],覆膜花生收获后花生秧带有大量残膜(秧膜混合物,简称秧膜),动物食用后引起消化道疾病甚至死亡^[4]。当前普遍采用膜杂风选机进行秧膜分离,但是分离过程中存在分离不彻底、不均匀、筛孔堵塞等问题^[5],由于缺乏物料接触参数,难以有效探究膜杂风选机筛分不稳定的原因。花生秧是秧膜混合物的主要部分,其恢复系数是离散元仿真的主要参数^[6],需对花生秧恢复系数进行研究。

国内外对恢复系数的研究比较广泛,常用方法主要有牛顿恢复系数、Poisson 恢复系数和能量恢复系数^[7-8],测定装置主要有平板式、双高速摄像机式、镜面-高速摄像机式、细线悬挂式、无束缚式。王成军等^[9]采用平板式测定了牛顿恢复系数,通过记录下落距离与反弹距离计算碰撞前后速度,对小麦的弹性特性进行测定。金鑫等^[10]采用双高速摄像机记录物料发生碰撞后 XY 方向上的轨迹,获得了钵苗与栽植器壁面间的碰撞恢复系数。ZHANG 等^[11]对碰撞后旋转运动产生的能量损耗进行分析,从三维角度对棉秆的恢复系数进行归纳总结。刘羊等^[12]基于镜面反射原理搭建三维空间坐标系,从能量视角测定油菜籽粒恢复系数。WANG 等^[13]搭建滑梯轨道,实现了颗粒间的无束缚碰撞,利用高速相机追踪碰撞前后的速度,测定冻玉米籽粒间的恢复系数。张国忠等^[14]通过高速摄像采用细线悬挂法测定了荸荠之间的恢复系数。WANG 等^[15]基于能量法构建了玉米颗粒恢复系数的理论模型,并通过数值模拟和物理试验进行了验证。宋少龙等^[16]基于离散元法通过仿真与物理试验对土壤的恢复系数进行测定。冯斌等^[17]研究了马铃薯块茎质量、跌落方向、品种等因素对恢复系数的影响。上述学者对恢复系数进行了大量研究,得出了有益的结论,但对花生秧恢复系数研究未见报道。

本文以花生秧为研究对象,针对花生秧根茎(花生秧根、花生秧茎)力学特性的差异,基于自制恢复系数测定装置,采用高速相机对花生秧根茎的碰撞恢复系数进

行测定,以期为膜杂风选机等设备数值模拟参数的设置提供参考依据,实现秧膜混合物分离过程的准确仿真分析。

1 材料与方法

1.1 试验材料与力学试验

2024 年 2 月 15 日,在山东省日照市勇杰农业装备有限公司采集秧膜混合物,花生秧品种为花育 25 号,鲜花生秧的含水率在 60%~70%。试验材料的长度与直径对试验结果均有影响^[11],为对膜杂风选机的筛分过程进行精确分析,选取预处理后的秧膜混合物进行统计分析,秧膜混合物预处理如图 1 所示,通过测量获得花生秧根茎平均含水率为 13.41%, $[0,2)$ 、 $[2,10)$ 、 $[10,20)$ mm 区间粒径分布范围占比分别为 8.17%、78.47%、13.36%, $[2,10)$ mm 区间占比高于其他子区间,经测量该区间长度分布位于 10~15 mm,为消除材料长度和直径对试验结果的影响,选取该区间直径 4 mm、长度 10 mm 的花生秧根茎作为试验材料。参照 GB/T 1928—2009、GB/T 1931—2009 中规定的方法和步骤调整物料含水率,设置电热鼓风干燥箱温度 $(103\pm 2)^{\circ}\text{C}$,放入物料进行干燥,间隔 2h 取出物料称量,相对误差小于 0.5%,表明物料完全干燥,使用清水充分浸泡干燥物料,根据设定的含水率梯度,在 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的电热鼓风干燥箱中进行调整,并放入恒温恒湿培养箱内进行保存。



(a) 原始物料 (b) 预处理物料

图 1 秧膜混合物预处理图

Fig. 1 Diagrams of pretreatment of seedling mixture

试验过程所需设备主要有:直径 0.075~60 mm 的标准检验筛、k-101 型电热鼓风干燥箱(温度分布精度 $\pm 2.5\%$)、DHS-20A 型电子快速水分测试仪(质量精度 0.01 g,含水率精度 0.01%)、数显游标卡尺(测量精度 0.02 mm)等。

花生秧根茎四处取样横截面见图2a,花生秧根具有密集的皮肤组织和发达的维管束,髓腔小,表现为实心结构,随着取样部位趋向于花生秧茎,髓腔逐渐增大,空心结构明显。材料的反弹能力与自身生物结构和硬度相关^[18-19],因此选取花生秧根和花生秧茎进行剪切试验,由图2b可知,相同条件下花生秧根最大剪切力470.929 7 N,花生秧茎206.331 5 N,花生秧根硬度高于花生秧茎,恢复系数存在偏差,为提高离散元仿真参数的准确度,分别对花生秧根、花生秧茎的恢复系数进行测定。

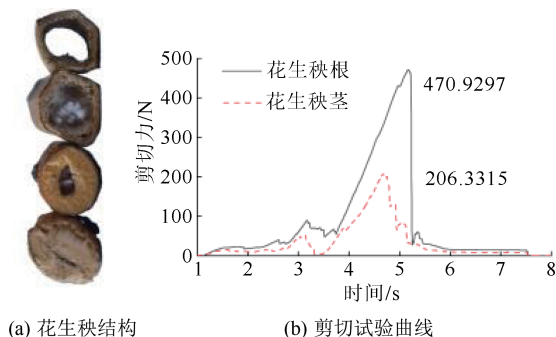


图2 力学试验
Fig. 2 Mechanical tests

1.2 碰撞接触理论分析

花生秧根茎与碰撞材料视为球体对心接触^[20],两球体开始接触到相互分离视为一个碰撞周期,分为弹性变形阶段AB、弹塑性变形阶段BC和恢复阶段CD^[21]。点A代表两球体开始接触并产生碰撞力,此时重力势能全部转化为动能,速度达到最大值,碰撞力为0,AB阶段,两球体受到弹性压缩变形,动能转化为弹性势能,碰撞力增大,速度减小。点B代表两球体接触中心达到屈服强度,BC阶段,碰撞力增大,速度减小,两球体出现弹性和塑性压缩变形。点C代表两球体相对速度减小至0,碰撞力最大,CD阶段,弹性势能开始转化为动能,两球体压缩变形恢复,产生加速度逐渐分离,碰撞力减小。点D两球体弹性压缩变形完全恢复,塑性压缩变形不可逆,碰撞力减小为0,速度增大,如图3所示。

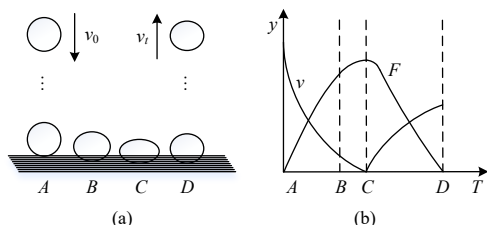


图3 花生秧碰撞过程示意图
Fig. 3 Peanut seedling collision process

如图4所示,基于Hertz弹性接触理论,接触区域视为半径为 r 的圆,接触中心 O 相距 a 处存在 M 、 N 两点, Z_1 、 Z_2 和表示为

$$Z_1 + Z_2 = \frac{a^2}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

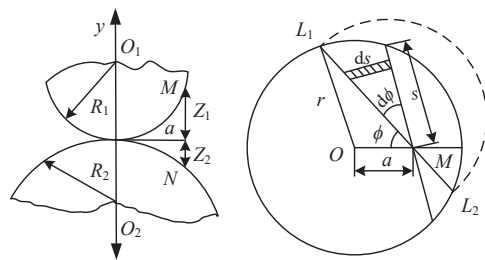


图4 花生秧碰撞模型

Fig. 4 Peanut seedling collision model

式中 Z_1 、 Z_2 ——点 M 、 N 沿 y 轴方向距离,mm

R_1 、 R_2 ——碰撞区域两球体半径,mm

图4点 M 、 N 受到局部变形产生的位移可表示为

$$w_1 + w_2 = \delta - \frac{R_1 + R_2}{2R_1 R_2} a^2 \quad (2)$$

式中 w_1 、 w_2 ——点 M 、 N 在 y 轴方向位移,mm

δ —— O_1 、 O_2 压缩形变量,mm

位移呈轴对称分布,对圆形接触面取积分得

$$w_1 + w_2 = \left(\frac{1 - \mu_1}{\pi E_1} + \frac{1 - \mu_2}{\pi E_2} \right) \iint q ds d\varphi \quad (3)$$

式中 μ_1 、 μ_2 ——花生秧根茎与碰撞材料泊松比

E_1 、 E_2 ——花生秧根茎与碰撞材料弹性模量

φ —— $L_1 L_2$ 与 MO 夹角,rad

q ——接触区域碰撞力,N

碰撞力分布呈现半球体形式,接触中心 O 处最大,

碰撞力沿弦 $L_1 L_2$ 积分,可表达为

$$\int q ds = \frac{q_0}{r} A \quad (4)$$

其中 $A = \frac{\pi}{2} (r^2 - a^2 \sin^2 \varphi)$ (5)

式中 q_0 ——接触中心最大碰撞力,N

A ——虚线半圆面积,mm²

r ——接触区域半径

联立式(1)~(5)推导出花生秧根茎接触半径 r 、压缩形变量 δ 计算式为

$$\begin{cases} r = \left(\frac{3Rp}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \\ \delta = \frac{r^2}{R} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $E = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

式中 p ——压力分布函数

1.3 试验原理

采用基于运动学原理的测试方法测定花生秧根茎恢复系数^[22],基于试验要求设计并搭建了恢复系数测试装置。测试装置由坐标纸、高速摄像机、升降平台、斜面仪、吸盘等组成,斜面仪上表面可固定相同尺寸的碰撞材料,倾斜角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内可调,坐标纸水平固定在高速摄像机前方。试验时,取已制备的花生秧根茎水平吸附在吸盘上,避免投放姿势产生的干扰,通过真空泵控制花生秧根茎做自由落体运动,高速摄像机以1 000 f/s

记录运动轨迹,参照坐标纸进行求解,如图 5 所示。



图 5 花生秧根茎碰撞恢复系数试验装置

Fig. 5 Peanut seedling rhizome collision recovery coefficient test device
1. 坐标纸 2. 高速摄像机 3. 升降平台 4. 气管 5. 吸盘 6. 数显角度仪 7. 斜面仪 8. 角度调节旋钮 9. 铝型材支架

花生秧根茎自由落体与碰撞材料发生碰撞,以抛物线轨迹运动至升降平台,参照坐标纸求解水平位移 S_1 和竖直位移 h_1 ,调整升降平台高度改变运动轨迹,求解水平位移 S_2 和竖直位移 h_2 ,每组试验重复 5 次取平均值,如图 6 所示。

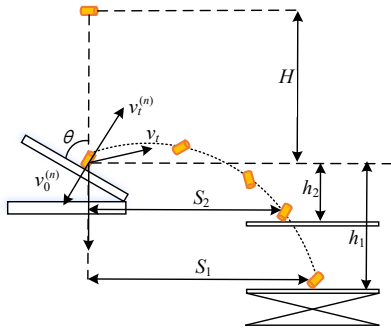


图 6 花生秧根茎碰撞试验原理图

Fig. 6 Schematic of peanut seedling rhizome collision test

古典牛顿恢复系数 e 定义为接触点法向接近速度与分离速度之比^[23],公式为

$$e = \frac{v_t^{(n)}}{v_0^{(n)}} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cos\left(\theta + \arctan \frac{v_y}{v_x}\right)}{v_0 \sin \theta} \tag{7}$$

式中 θ ——碰撞角度,rad
 $v_t^{(n)}$ ——碰撞后法向分离速度,m/s
 $v_0^{(n)}$ ——碰撞前法向接近速度,m/s
 v_0 ——碰撞前接近速度,m/s

花生秧根茎在高度 H 处自由落体,忽略空气阻力,由运动学方程可得

$$\begin{cases} v_0 = gt \\ H = \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{8}$$

解得花生秧根茎碰撞前接近速度

$$v_0 = \sqrt{2gH} \tag{9}$$

花生秧根茎碰撞后做抛物线运动,分解为水平方向匀速直线运动(速度 v_x)和竖直方向匀变速运动(速度 v_y),根据运动学公式得

$$\begin{cases} v_x = \frac{S}{t} \\ v_y = \frac{2h - gt^2}{2t} \end{cases} \tag{10}$$

式中 S ——花生秧根茎碰撞后水平位移,mm
 h ——花生秧根茎碰撞后竖直位移,mm
 t ——花生秧根茎反弹运动时间,s

式(10)中反弹时间 t 无法求解,测量水平位移 S_1 、 S_2 和竖直位移 h_1 、 h_2 ,间接求解水平速度 v_x 和竖直速度 v_y ,即

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1 - S_2)}{2(h_1S_2 - h_2S_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2v_x} \end{cases} \tag{11}$$

1.4 单因素试验设计

影响花生秧根茎碰撞恢复系数大小的因素有自身特性、碰撞材料种类、碰撞材料厚度、碰撞角度、下落高度等^[24-27],依据实际作业要求,本文重点研究含水率、碰撞材料、碰撞角度及下落高度的影响,求解对应的回归方程,以期为秧膜混合物分离过程参数设置提供理论依据。

花生秧破碎、分离等设备相关部件的材料有 45 号钢、橡胶、亚克力板,数值模拟膜杂风选机的分离过程,花生秧与花生秧、花生秧与地膜之间的恢复系数是基础参数,因此选择 45 号钢、橡胶、亚克力板、花生秧、地膜 5 种碰撞材料作为试验因素。膜杂风选机滚筒筛直径为 600 mm,综合工作要求下落高度因素水平值分别取 200、300、400、500、600 mm。新鲜花生秧根茎含水率在 60%~70%,充分晾晒后测定含水率为 10%^[22],故含水率选择 10%、20%、30%、40%、50%。结合滚筒筛、螺旋叶片、粉碎刀具等部件的工作情况,碰撞角度选择 0°、15°、30°、45°、60°。单因素试验时,需确定其余因素水平值,膜杂风选机滚筒筛采用 45 号钢加工,筛分时秧膜混合物已经过充分晾晒,翻抛高度为 400 mm^[5],为对筛分过程进行精确分析,统一碰撞材料为 45 号钢、下落高度 400 mm、含水率 10%、碰撞角度 30°。单因素水平见表 1,每组试验重复 5 次求平均值。

表 1 单因素试验水平

Tab. 1 Univariate test levels

水平	碰撞材料	碰撞角度/(°)	下落高度/mm	含水率/%
1	45 号钢	0	200	10
2	橡胶	15	300	20
3	亚克力板	30	400	30
4	花生秧	45	500	40
5	地膜	60	600	50

1.5 正交试验设计

结合膜杂风选机工作情况,选择碰撞角度、下落高度、含水率、碰撞材料作为试验因素,采用 $L_{16}(4^3 \times 3)$ 正交

表方案进行混合正交试验,试验因素水平见表2,每组试验重复5次取平均值。

表2 正交试验因素水平
Tab. 2 Orthogonal test level

水平	因素			
	碰撞角度/(°)	下落高度/mm	含水率/%	碰撞材料
1	0	100	10	45号钢
2	15	300	20	花生秧
3	30	500	30	地膜
4	45	700	40	

1.6 验证试验设计

根据试验测定恢复系数计算花生秧根茎反弹高度,与实际反弹高度对比,计算相对误差,评估测定恢复系数准确性。试验时花生秧根茎以相同姿态,从不同高度投放,碰撞材料水平放置,通过高速摄像和坐标纸计算花生秧根茎垂直弹跳高度,每组试验重复5次取平均值。

根据恢复系数定义,花生秧根茎在高度 H 处下落,碰撞后垂直反弹高度为 h ,则恢复系数可以简化为

$$e = \frac{v_t}{v_0} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (12)$$

可得预测反弹高度 h_1 为

$$h_1 = He^2 \quad (13)$$

以实际反弹高度与预测高度的相对误差作为评价指标,相对误差 r' 表达式为

$$r' = \frac{|h_1 - h|}{h} \times 100\% \quad (14)$$

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

结合试验现象和结果,分析试验因素对花生秧根茎(花生秧根和花生秧茎)恢复系数的影响规律,计算恢复系数的回归方程和决定系数。碰撞材料无法量化,不做回归分析。碰撞试验示意图如图7所示。

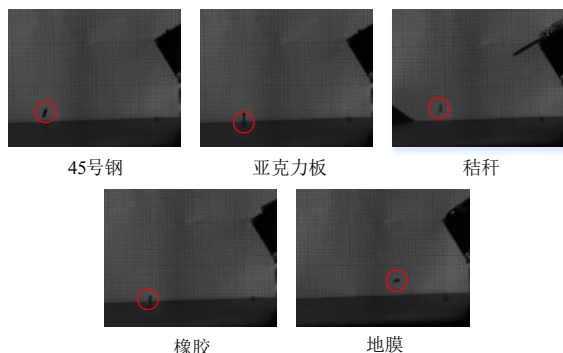


图7 碰撞试验示意图

Fig. 7 Schematic of crash test

2.1.1 碰撞材料对恢复系数的影响

如图8所示,碰撞材料对花生秧根和花生秧茎恢复系数影响较大,含水率10%,下落高度400 mm、碰撞角

30°的试验条件下,花生秧根、花生秧茎与碰撞材料的恢复系数从大到小依次为:45号钢、亚克力板、橡胶、花生秧、地膜。

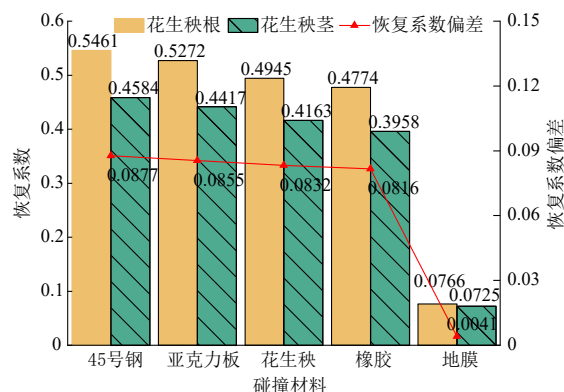


图8 碰撞材料对恢复系数的影响

Fig. 8 Effect of colliding material on recovery coefficient

碰撞过程中,花生秧根和花生秧茎的总能量保持不变,45号钢硬度大弹性强,碰撞后形变量和能量损失小,恢复系数大,亚克力板和橡胶硬度小,形变量和能量损失大,恢复系数小,地膜具有柔性特征,减震缓冲作用强,可吸收大部分能量,恢复系数最小。且花生秧根为实心结构硬度高,花生秧茎为空心结构硬度低,花生秧根的弹性性能优于花生秧茎,随着碰撞材料硬度降低,花生秧根和花生秧茎自身硬度差异形成的影响逐渐缩小,恢复系数偏差逐渐降低。冯斌等^[28]研究马铃薯块茎恢复系数影响因素时,得出柔软物体具有吸收碰撞能量减小反弹的作用。因此在设计滚筒筛时应选择硬度较大的材料,避免堆积,提高分离率,地膜具有柔性特征,恢复系数小,碰撞后反弹特性差,分离前应进行充分破碎,避免花生秧根茎与地膜缠绕堵塞筛孔。

2.1.2 碰撞角度对恢复系数的影响

碰撞角度对恢复系数的影响如图9所示,在含水率10%、下落高度400 mm、碰撞材料45号钢的试验条件下,花生秧根、花生秧茎恢复系数随着碰撞角度的增加均呈现增大趋势,回归方程决定系数分别为0.990 84和0.985 66。

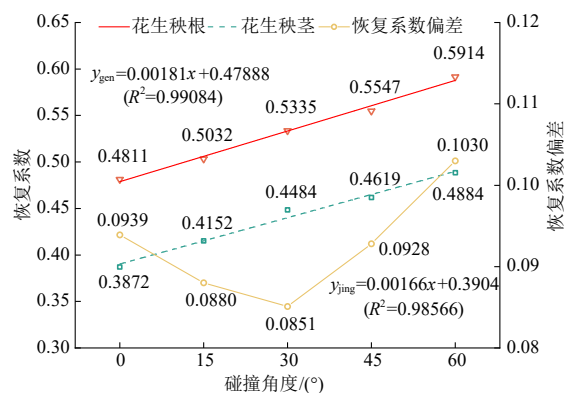


图9 碰撞角度对恢复系数的影响

Fig. 9 Effect of collision angle on recovery coefficient

碰撞角度影响旋转、摩擦、变形,碰撞角度处于0~30°区间内,花生秧根、花生秧茎与碰撞材料发生直接线接触,接触时间长,能量损失包括摩擦做功和弹性变形,以弹性变形能量损失为主,花生秧根能量损失大于花生秧茎,随着碰撞角度增加,弹性变形能量损失开始减小,恢复系数增大,且花生秧根能量损失逐渐接近花生秧茎,恢复系数偏差降低。碰撞角度处于30°~60°区间内,碰撞由线接触转变为点接触,摩擦与旋转运动能量损失减小,恢复系数增大,低硬度花生秧茎出现塑性变形,能量损失大于花生秧根,恢复系数偏差逐渐增大。因此膜杂风选机的进料口,应增大碰撞角,使物料碰撞后均匀布满空间,增大流动性,提高筛分效率,收集箱应减小碰撞角,避免物料损失。

2.1.3 下落高度对恢复系数的影响

下落高度对恢复系数的影响如图10所示。在碰撞材料45号钢、含水率10%、碰撞角度30°的试验条件下,花生秧根、花生秧茎恢复系数随着下落高度的增加均呈先增长后下降趋势,回归方程决定系数分别为0.997 24和0.981 33。

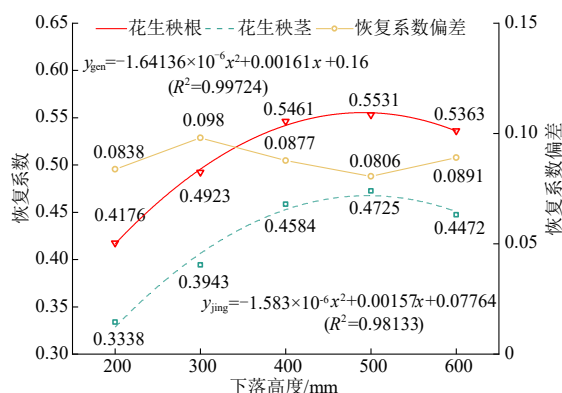


图10 下落高度对恢复系数的影响

Fig. 10 Effect of drop height on recovery coefficient

随着下落高度增加,重力势能逐渐增大,增加了碰撞前后的初速度与反弹速度,恢复系数增大,释放高度大于500 mm时,碰撞力增大至屈服强度,花生秧根和花生秧茎产生塑性变形,能量损失增大,恢复系数开始减小。此外,花生秧根为实心结构,花生秧茎为空心结构,与空气间的摩擦呈现出不同的现象,形成了恢复系数偏差上下波动的特点,杨勇等^[29]通过理论与试验验证得出下落高度影响物料的塑性变形。因此膜杂风选机向上抛掷物料高度应小于500 mm,均匀分散布满空间有利于筛分。

2.1.4 含水率对恢复系数的影响

含水率对恢复系数的影响如图11所示。在碰撞材料45号钢、下落高度400 mm、碰撞角度30°的试验条件下,随着花生秧根和花生秧茎含水率的增加,恢复系数逐渐减小,花生秧根和花生秧茎回归方程决定系数分别为0.998 75和0.977 47。

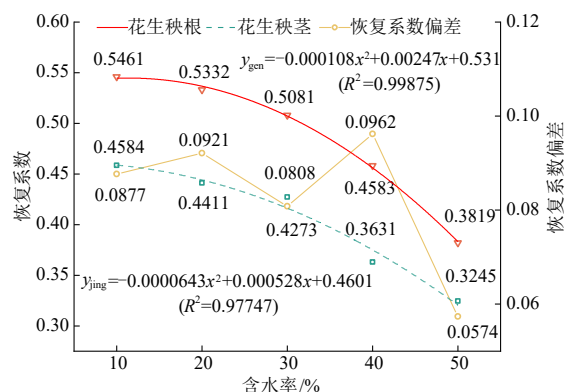


图11 含水率对恢复系数的影响

Fig. 11 Effect of moisture content on recovery coefficient

含水率增加影响花生秧根和花生秧茎的硬度与粘性^[30-31],导致碰撞过程中接触时间增加,摩擦做功能量损失增大,恢复系数减小,恢复系数偏差上下波动,当含水率增加到40%,分水降低了花生秧根和花生秧茎本身的硬度,且水分具有缓冲作用,吸收了大部分碰撞能量,恢复系数与偏差都急剧减小。因此进行秧膜混合物破碎分离时,充分晾晒降低含水率,有利于增加破碎程度,提高分离率。

2.2 正交试验结果分析

正交试验方案与试验结果如表3所示。影响花生秧根、花生秧茎恢复系数的主次顺序均为:碰撞材料、碰撞角度、下落高度、含水率,各因素中含水率影响程度最小。混合正交试验结果方差分析如表4所示,碰撞材料、下落高度、碰撞角度对花生秧根恢复系数影响极显著($P<0.01$),含水率对恢复系数影响显著($P<0.05$)。碰撞材料、碰撞角度对花生秧根恢复系数影响极显著($P<0.01$),下落高度、含水率对恢复系数影响显著($P<0.05$),其中下落高度对花生秧根的影响大于花生秧茎。优先设置碰撞材料、碰撞角度、下落高度的离散元仿真参数,可实现分离环节中花生秧根茎碰撞行为的准确表达。

2.3 验证试验结果分析

验证试验结果见图12。试验结果表明:计算预测反弹高度曲线与实际反弹高度曲线接近,花生秧根平均相对误差为3.928%,花生秧茎平均相对误差为4.146%,能较好反映花生秧根茎的反弹特性,为数值模拟参数设置提供参考。

3 结论

(1)针对秧膜分离、膜杂风选机等设备作业过程不稳定,缺乏参数无法进行离散元仿真分析的问题,基于花生秧根茎力学特性差异,采用自制恢复系数测定装置,得到了不同条件花生秧根茎的恢复系数及恢复系数偏差。

(2)单因素试验结果表明,相同试验条件下,花生秧根、花生秧茎与45号钢、亚克力板、花生秧、橡胶、地膜之

表 3 正交试验方案与结果
Tab. 3 Hybrid orthogonal test protocol and results

序号	因素				花生秧茎恢复系数	花生秧根恢复系数
	下落高度/mm	碰撞角度/(°)	含水率/%	碰撞材料		
1	100	0	10	45号钢	0.368 0	0.457 1
2	500	30	10	地膜	0.072 7	0.076 8
3	700	45	10	45号钢	0.427 0	0.563 1
4	300	15	10	花生秧	0.358 4	0.457 0
5	300	45	30	45号钢	0.435 6	0.544 6
6	700	30	20	45号钢	0.405 2	0.503 1
7	500	15	40	45号钢	0.394 6	0.483 0
8	100	45	40	地膜	0.068 6	0.071 3
9	700	0	40	花生秧	0.321 4	0.399 0
10	100	30	30	花生秧	0.347 8	0.364 0
11	300	30	40	45号钢	0.361 3	0.467 9
12	300	0	20	地膜	0.071 3	0.076 2
13	500	0	30	45号钢	0.428 4	0.481 7
14	500	45	20	花生秧	0.452 1	0.541 2
15	700	15	30	地膜	0.075 7	0.078 3
16	100	15	20	45号钢	0.379 9	0.462 0
K_1	0.291 1	0.297 3	0.306 5	0.400 0		
K_2	0.306 7	0.302 2	0.327 1	0.369 9		
K_3	0.337 0	0.296 8	0.321 9	0.072 1		
K_4	0.307 3	0.345 8	0.286 5			
R	0.045 9	0.048 6	0.031 1	0.297 9		

注: $K_1 \sim K_4$ 分别为在不同因素水平下恢复系数平均值, R 为极差。

表 4 方差分析
Tab. 4 Analysis of variance

方差来源	花生秧根				花生秧茎			
	自由度	均方	F	P	自由度	均方	F	P
碰撞材料	2	0.246	1 533.86	<0.001**	2	0.152	1 482.97	<0.001**
下落高度	3	0.003	16.573	0.01*	3	0.002	14.259	0.013*
含水率	3	0.001	8.714	0.032*	3	0.001	12.925	0.16
碰撞角度	3	0.005	33.242	0.003**	3	0.002	21.76	0.006**
误差	4	<0.001			4	<0.001		
总计	16				16			

注:**表示影响极显著($P<0.01$);*表示影响显著($0.01\leq P<0.05$)。

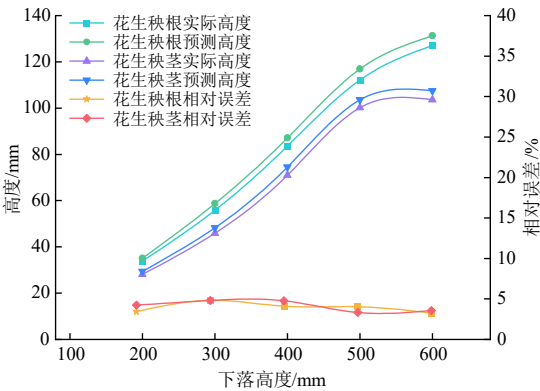


图 12 验证试验结果

Fig. 12 Test results verifying

间的恢复系数依次递减;花生秧根、花生秧茎与 45 号钢之间恢复系数,随碰撞角度增大而增大,随下落高度先增大后减小,随含水率增大而减小;相应的恢复系数平

均偏差分别为 0.068 4、0.092 6、0.087 8、0.082 7;花生秧根与下落高度、碰撞角度、含水率相应回归方程决定系数分别为 0.997 24、0.990 84、0.998 75,花生秧茎对应回归方程决定系数为 0.981 33、0.985 66、0.987 47。

(3)正交试验结果表明:影响花生秧根和花生秧茎恢复系数各因素的主次顺序为碰撞材料、碰撞角度、下落高度、含水率,其中碰撞材料、下落高度、碰撞角度对花生秧根恢复系数影响极显著($P<0.01$),含水率对花生秧根恢复系数影响显著($P<0.05$)。碰撞材料、碰撞角度对花生秧茎恢复系数影响极显著($P<0.01$),下落高度、含水率对花生秧茎恢复系数影响显著($P<0.05$)。

(4)验证试验结果表明:花生秧根实际反弹高度与预测高度之间的误差为 3.928%,花生秧茎实际反弹高度与预测高度之间的误差为 4.162%,表明基于运动学原理测定的恢复系数具有高准确度。

参 考 文 献

- [1] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29–37.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 29–37. (in Chinese)
- [2] 曾斌, 唐敏, 唐伟, 等. 花生粕和花生秸秆在动物饲用中的研究进展[J]. 中国饲料, 2023(5): 152–162.
ZENG Bin, TANG Min, TANG Wei, et al. Research progress of peanut meal and peanut straw in animal feeding[J]. China Feed, 2023(5): 152–162. (in Chinese)
- [3] 王庆东, 赵婧伊, 赵林萍, 等. 14个花生品种秸秆的营养品质分析[J]. 中国饲料, 2019(7): 75–78.
WANG Qingdong, ZHAO Jingyi, ZHAO Linping, et al. Analysis of the feeding quality of peanut vine of 14 cultivars[J]. China Feed, 2019(7): 75–78. (in Chinese)
- [4] 王徽友, 宋振环. 谨防化纤地膜危害家畜[J]. 山东畜牧兽医, 1999(2): 45.
- [5] 康建明, 解臣硕, 王小瑜, 等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 91–98.
KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 91–98. (in Chinese)
- [6] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1–20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)
- [7] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313–322.
WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313–322. (in Chinese)
- [8] 王悦. 一维对心碰撞恢复系数的讨论[J]. 物理与工程, 2014, 24(5): 66–69.
WANG Yue. Discussion on one dimensional collision restitution coefficient[J]. Physics and Engineering, 2014, 24(5): 66–69. (in Chinese)
- [9] 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 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 Chengjun, LI Yaoming, MA Lülzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 274–278. (in Chinese)
- [10] 金鑫, 姬江涛, 刘卫想, 等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 58–67.
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 58–67. (in Chinese)
- [11] ZHANG B, CHEN X, LIANG R, et al. Cotton stalk restitution coefficient determination tests based on the binocular high-speed camera technology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(4): 181–189.
- [12] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油菜籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44–53.
LIU Yang, ZONG Wangyuan, MA Lina, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 44–53. (in Chinese)
- [13] WANG L, WU B, WU Z, et al. Experimental determination of the coefficient of restitution of particle-particle collision for frozen maize grains[J]. Powder Technology, 2018, 338: 263–273.
- [14] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 41–50.
ZHANG Guozhong, CHEN Liming, LIU Haopeng, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 41–50. (in Chinese)
- [15] WANG L, ZHENG Z, YU Y, et al. Determination of the energetic coefficient of restitution of maize grain based on laboratory experiments and DEM simulations[J]. Powder Technology, 2020, 362: 645–658.
- [16] 宋少龙, 汤智辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63–70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63–70. (in Chinese)
- [17] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 50–57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50–57. (in Chinese)
- [18] 关萌, 沈永哲, 高连兴, 等. 花生起挖晾晒后的果柄机械特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 87–93.
GUAN Meng, SHEN Yongzhe, GAO Lianxing, et al. Mechanical properties of peanut peg after digging and drying[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 87–93. (in Chinese)
- [19] 邹志祥, 刘彦平. 颗粒碰撞恢复系数的研究进展与应用[J]. 科技与创新, 2024(5): 188–190.
ZOU Zhixiang, LIU Yanping. Research progress and application of particle collision recovery coefficient[J]. Science and Technology and Innovation, 2024(5): 188–190. (in Chinese)
- [20] 彭才望, 周婷, 宋世圣, 等. 基于Hertz接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 125–134.
PENG Caiwang, ZHOU Ting, SONG Shisheng, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125–134. (in Chinese)
- [21] 杜妍辰, 王树林. 两颗粒弹塑性正碰撞的耗散模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 149–156.
DU Yanchen, WANG Shulin. Elastoplastic normal impact dissipation model of two particles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 149–156. (in Chinese)
- [22] 王旭鹏, 林文周, 刘更, 等. 牛顿碰撞恢复系数评价下的碰撞力研究进展[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(10): 1526–1533.
WANG Xupeng, LIN Wenzhou, LIU Geng, et al. Advance in impact force model research with evolution of newton restitution coefficient

- [J]. Mechanical Science and Technology, 2020, 39(10): 1526 - 1533. (in Chinese)
- [23] 葛藤, 贾智宏, 周克栋. 计算点接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J]. 机械设计与研究, 2007(3): 14 - 15, 22.
GE Teng, JIA Zhihong, ZHOU Kedong. A theoretical model for the coefficient of restitution calculation of point impact [J]. Machine Design and Research, 2007(3): 14 - 15, 22. (in Chinese)
- [24] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 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 Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. 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)
- [25] 梁振伟, 李耀明, 赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 18 - 26.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 18 - 26. (in Chinese)
- [26] 张春, 杜文亮, 陈震, 等. 荞麦米筛分物料接触参数测量与离散元仿真标定[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 46 - 51.
ZHANG Chun, DU Wenliang, CHEN Zhen, et al. The measurement of contact parameters of buckwheat rice screening material and discrete element simulation calibration [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 46 - 51. (in Chinese)
- [27] 张园, 邓怡国, 廖宇兰, 等. 响应面法优化橡胶专用颗粒肥碰撞恢复系数测定[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2534 - 2540.
ZHANG Yuan, DENG Yiguo, LIAO Yulan, et al. Determination of impact recovery coefficient of rubber granular fertilizer optimized by response surface method [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2534 - 2540. (in Chinese)
- [28] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 50 - 57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50 - 57. (in Chinese)
- [29] 杨勇, 侯俊铭, 白晶波, 等. 典型蓖麻蒴果碰撞恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 138 - 148.
YANG Yong, HOU Junming, BAI Jingbo, et al. Determination and analysis of typical castor seed collision restitution coefficient [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 138 - 148. (in Chinese)
- [30] 卢立新, 王志伟. 基于准静态压缩的果实黏弹塑性模型[J]. 农业工程学报, 2005, 31(12): 30 - 33.
LU Lixin, WANG Zhiwei. Nonlinear viscoelastic plastic model of the fruits under quasi-static compressive loading [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 30 - 33. (in Chinese)
- [31] 孙慧杰, 吴杰, 冯哲, 等. 香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的接触应力分布分析及损伤预测[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 48 - 52.
SUN Huijie, WU Jie, FENG Zhe, et al. Contact stress of drop impact to corrugated board and damage predication for korla pear [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(2): 48 - 52. (in Chinese)

(上接第146页)

- [34] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 松土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.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. 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)
- [35] ZENG Zhiwei, CHEN Ying, ZHANG Xirui. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130 - 138.
- [36] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [37] 王学振. 土壤-带翼松土铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG Xuezen. Soil-winged subsoiler interactions and their effects [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [38] 张喜瑞, 曾望强, 刘俊孝, 等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式松土铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40 - 49.
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40 - 49. (in Chinese)
- [39] 张岁岐. 根系与植物高效用水[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [40] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [41] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85 - 92.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85 - 92. (in Chinese)
- [42] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 20 - 30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20 - 30. (in Chinese)
- [43] 郭慧, 陈志, 贾洪雷, 等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 56 - 65.
GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 - 65. (in Chinese)
- [44] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135 - 140.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135 - 140. (in Chinese)