

花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析

陆永光^{1,2} 吴努¹ 王冰² 于昭洋² 林德志^{1,2} 胡志超^{2*}

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019;
2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要 针对CFD-DEM仿真过程中花生荚果与收获机械重要工作部件间的碰撞模型参数缺失问题,利用运动学方程原理设计了花生荚果恢复系数的测定装置,对花生荚果的弹性特性参数进行试验测定与分析。花生品种选用四粒红和白沙,采用 $L_{16}(4^1 \times 2^3)$ 混合正交试验方案研究碰撞材料、下落高度、荚果质量、含水率、品种、材料厚度等因素对花生荚果恢复系数的影响。结果显示:影响花生荚果恢复系数的因素主次顺序为,碰撞材料、荚果质量、含水率、下落高度、材料厚度和花生品种,碰撞材料、荚果质量及含水率较为显著。花生荚果恢复系数随Q235、铝合金、有机玻璃、橡胶等材料依次减小,并随着荚果质量和含水率的增加而递减。碰撞材料为Q235(厚1 mm)、含水率为17.5%的白沙、下落高度为100 cm、荚果质量为1.3 g时恢复系数达到最大值为0.426 7;在相同条件下选用质量为2.5 g含水率为8.3%的荚果时恢复系数达到最大值0.390 9。该研究可为花生收获机械的参数设计及优化提供参考依据。

关键词 花生;碰撞试验;恢复系数;弹性特性

中图分类号 S 565.2 文章编号 1007-4333(2016)02-0111-08 文献标志码 A

Measurement and analysis of peanuts' restitution coefficient in point-to-plate collision mode

LU Yong-guang^{1,2}, WU Nu¹, WANG Bing², YU Zhao-yang², LIN De-zhi^{1,2}, HU Zhi-chao^{2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;
2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract In the view of lacking a collision model between peanuts and key parts of harvesting equipment and provide an important reference in parameter setting for CFD-EDEM simulation, a restitution coefficient measuring device based on kinematics was designed, and the restitution coefficient of peanut was measured and analyzed by experiment. Research on the collision materials, the thickness of collision materials, the mass of peanut, the moisture content of peanut, the falling height and the variety of peanut's effect on the restitution coefficient of the peanuts of Silihong and Baisha was conducted by a mixed orthogonal experiment based on the scheme of $L_{16}(4^1 \times 2^3)$. The results show that the most significant factor is the collision material, followed by the mass of peanut, the moisture content of peanut, the falling height and the thickness of collision material, and the variety of peanut is the most insignificant factor. Under the condition that the thickness of Q235 steel is 1 mm, the Baisha peanut's moisture content is 17.5%, the falling height is 100 cm, and the mass of peanut is 1.3 g, the value of restitution coefficient reaches the maximum which is 0.426 7. Under the same conditions except the mass of peanut is 2.5 g and the moisture content is 8.3%, the max value of restitution coefficient is 0.3909. This study provides important reference for designing and developing high performance peanuts harvesting equipment.

Keywords peanut; collision test; restitution coefficient; elasticity

收稿日期: 2015-07-02

基金项目: 中国农业科学院创新工程-土下果实收获机械创新项目; 现代农业花生产业技术体系机械化装备岗位专项(CARS-14-机械化装备)

第一作者: 陆永光, 硕士研究生, E-mail: lyg0000@163.com

通讯作者: 胡志超, 研究员, 博士生导师, 主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究, E-mail: zchu369@163.com

花生是我国重要的油料作物,含有丰富的蛋白质,同时也是重要的出口创汇产品,其种植面积、总产量及出口量均高居世界首位^[1]。但我国花生机械化收获水平较低,开展花生收获机械研发较晚,技术储备和研发力度不够,常见的花生收获机械主要为牵引式全喂入式花生联合收获机、履带自走式半喂入花生联合收获机以及半喂入摘果机等^[2]。设备精度不高,无论是国内现有分段式收获设备,还是处于样机研发和试验阶段的联合收获设备,摘果和输送环节的伤损率都较高。究其原因,在机具设计时未能有效考虑花生荚果特性,在捡拾、摘果、输送过程中,花生荚果与荚果之间、荚果与器具之间都会发生各种形态的碰撞、挤压和弹射。此外在设计之初进行的仿真模拟试验如 CFD-DEM 等都需要对荚果模型接触特性进行参数设定,因而研究花生荚果的弹性碰撞特性对于研制花生收获机械设备及对主要工作部件的设计和改进等工作都具有重要的实际意义。

花生的弹性特性反应了花生荚果碰撞后形变恢复的能力,通常用恢复系数表示,定义为碰撞后法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值^[3]。

目前,有关农作物弹性特性的研究主要集中在稻麦、油菜等主要作物,已有较多试验仪器和测试手段对其物理特性进行研究^[4-7]。王成军等^[8]对小麦的碰撞恢复系数进行了相关测定研究,黄小毛等^[9]对油菜籽粒点面碰撞中恢复系数进行了测定及分析。然而对花生荚果弹性特性的研究未见报道。花生荚果比起稻麦、油菜籽粒等质量和形态都具有较大差异,形状更加不规则,表面坑洼粗糙,因此其恢复系数测定试验需要进行大量的重复试验以排除误差的干扰。本研究基于运动学原理,采用混合正交试验方法探究影响花生荚果恢复系数的主次因素,以期对花生收获机械化收获设备的开发及优化提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用花生主产区典型花生品种“白沙”和“四粒红”,在不同品种、质量、含水率的荚果中尽量挑选形状一致的荚果作为试验对象。将被试样品放入水中浸泡约 24 h,去除表面水分放入 5 °C 的冰柜冷冻,使荚果与其籽粒含水率相同。将花生荚果分成若干组,各组在 103 °C 条件下分别烘干一定时间 0~4 h

不等,将得到的不同含水率的花生荚果分成 2 份,一份进行碰撞试验,一份进行的含水率测定。

1.2 测试装置及原理

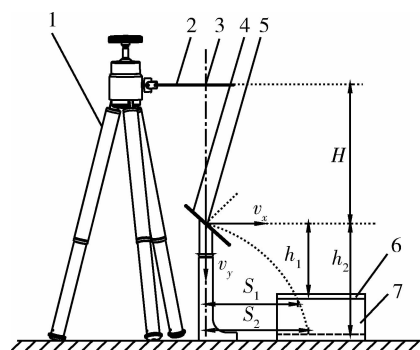
关于恢复系数的测定方法,已有大量研究^[10-19]。本研究对花生荚果恢复系数的测定采用基于运动学方程原理的测定方法。运动学方程为:

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1 - S_2)}{2(h_1S_2 - h_2S_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2v_x} \\ C_r = \frac{v_n}{v_{on}} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cdot \cos\left[45^\circ + \arctan\left(\frac{v_x}{v_y}\right)\right]}{v_o \cdot \sin 45^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

$$\quad (2)$$

式中: C_r 为荚果碰撞恢复系数, C_r 值越大,其弹性恢复变形能力越强; v_n 为碰撞后法向分离速度, m/s; v_{on} 为碰撞前法向接近速度, m/s; v_x 为碰撞后水平分速度, m/s; v_y 为碰撞后竖直分速度, m/s。

含水率采用 DGF30 型电热鼓风干燥箱利用实验室法进行测定。恢复系数由图 1 所示装置测定。试验时花生荚果从给定高度水平投料平面 4 上的投



1. 相机三脚架; 2. 投料基准面; 3. 落料孔; 4. 45° 倾斜支持面; 5. 可伸缩支撑架; 6. 沙盘; 7. 支撑底座

1. Camera tripod; 2. Datum plane; 3. Feeding hole; 4. 45° inclined plane; 5. Adjustable support; 6. Sand box; 7. Support foundation

S_1, S_2 和 h_1, h_2 分别为沙盘有、无纸箱承托时花生荚果平均落点距碰撞点的水平和竖直位移, mm; H 为荚果做自由落体的位移高度, cm; v_x 和 v_y 分别为荚果与 45° 斜面碰撞后瞬时的水平分速度和竖直分速度, m/s, 由运动学公式(2)得出。

S_1, S_2 and h_1, h_2 are displacements in horizontal and vertical directions with carton and without carton respective, mm; v_x and v_y are velocities in horizontal and vertical directions, which are calculated from formula (2).

图 1 恢复系数测量原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of restitution coefficient measuring device

料孔 5 投放,做自由落体运动并与安置在与水平面成 45° 倾角的斜面 2 上的碰撞材料发生碰撞,经反弹后落到铺满黄沙的托盘 6 上。瞬时荚果接近速度为 v_0 ; 测量 2 组在不同托盘安装高度条件下的花生荚果运动水平分位移 S_1 和 S_2 和竖直分位移 h_1 和 h_2 , 并由式(1)计算出水平分速度 v_x 和竖直分速度 v_y , 再代入式(2)推导即可得出该参数设定下的荚果碰撞恢复系数。为减小测量误差及荚果个体差异对结果的影响,每次试验选取 2 颗参数基本一致的荚果各重复 50 次,用 3 倍标准差法去除异常数值,数据取平均值作为该荚果的位移测量数值。

1.3 试验方法

花生荚果恢复系数的影响因素除品种外,还可

能与花生荚果的外形尺寸、花生荚果质量、含水率、碰撞材料的厚度、碰撞材料类型和下落时的高度等有关。因此,为了减少试验次数,先用正交试验确定主要影响因素,再对重要影响因素作单因素试验进行分析,并求出对应的回归方程及决定系数,为花生荚果恢复系数的估测提供依据。

1.3.1 混合正交试验的因素水平

混合正交试验因素水平见表 1。各因素水平取值时,碰撞材料因素重点考察在花生收获机械中常用的材料 Q235、橡胶、铝合金和有机玻璃等 4 种典型的工程材料;下落高度水平取值为试验装置可调范围中均布的值;荚果质量及含水率的取值水平为花生荚果的常见值。

表 1 混合正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平 Level	A, 碰撞材料 Collision material	B, 下落高度/cm Drop height	C, 荚果质量/g Mass of peanut	D, 含水率/% Moisture content	E, 材料厚度/mm Material thickness	F, 荚果品种 Variety
1	橡胶	120	1.3	8.3	1	白沙
2	铝合金	100	1.7	17.5	5	四粒红
3	Q235	80	2.1	28.4		
4	有机玻璃	64	2.5	35.9		

1.3.2 单因素试验的因素水平

由混合正交试验得出影响花生荚果恢复系数显著较高的因素分别是碰撞材料、荚果质量及含水率。碰撞材料因素无法量化,只进行单因素试验,不进行回归分析;花生荚果质量和含水率为随机抽取样品中的荚果的最大质量、最小质量及中间水平成均匀分布依次为 1.3、1.7、2.1、2.5、2.8、3.2 g,含水率为 8.3%、11.6%、17.5%、22.6%、28.4%、35.9%。

2 结果与分析

2.1 混合正交试验结果与方差分析

混合正交试验结果见表 2, 方差分析结果见表 3。通过对比分析可以看出,花生荚果在接触碰撞过程中恢复系数的影响因子主次顺序依次为碰撞材料、荚果质量、含水率、下落高度、材料厚度和荚果品种,其中碰撞材料、荚果质量和含水率对恢复系数有较为显著的影响,而下落高度、荚果品种和材料厚度影响不显著。

2.2 单因素试验结果与分析

从混合正交试验可知,碰撞材料、荚果质量、含水率是影响恢复系数的主要因素,因此分别针对碰撞材料、荚果质量、含水率分别进行单因素试验,结果见表 4~6。

2.2.1 碰撞材料对花生荚果恢复系数的影响

混合正交试验表明,在所有试验因素中碰撞材料种类对花生荚果恢复系数的影响最为显著。单因素试验进一步表明,碰撞材料中 Q235 材料对恢复系数的影响最大,橡胶材料最小,其次是铝合金和有机玻璃材料。这是由于 Q235 材料的硬度最高,荚果与板材发生碰撞时挤压形变小,而橡胶的硬度较小碰撞形变量大,有一定的减震作用。因此,针对不同工况及不同工作部件的需求,机构设计时可选用不同的材料来减少或抑制荚果反弹。

2.2.2 荚果质量对花生荚果碰撞恢复系数的影响

荚果质量对花生荚果碰撞过程中恢复系数的影响仅次于碰撞材料。在一定范围内,恢复系数随着

表2 混合正交试验设计方案 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ 及结果

Table 2 Scheme and results of test design

试验号 Test No.	A, 碰撞 材料 Collision material	B, 下落 高度 Falling height	C, 荚果 质量 Mass of peanut	D, 含水率 Moisture content	E, 材料 厚度 Material thickness	F, 花生 品种 Variety of peanut	空列 Null column	水平分速度 $v_x/(m/s)$ Horizontal velocity	竖直分速度 $v_y/(m/s)$ Vertical velocity	恢复系 C_r Restitution coefficient
1	1	1	1	1	1	1	1	2.230 3	1.245 2	0.203 1
2	1	2	2	2	1	2	2	2.449 3	1.328 9	0.253 1
3	1	3	3	3	2	1	2	1.518 8	0.380 9	0.287 4
4	1	4	4	4	2	2	1	1.212 0	0.165 4	0.295 5
5	2	1	2	3	2	2	1	2.999 1	1.793 8	0.248 5
6	2	2	1	4	2	1	2	3.723 4	2.725 0	0.225 5
7	2	3	4	1	1	2	2	6.652 1	4.985 3	0.421 0
8	2	4	3	2	1	1	1	1.827 7	0.593 6	0.348 4
9	3	1	3	4	1	2	2	3.858 4	2.441 0	0.290 4
10	3	2	4	3	1	1	1	7.085 4	5.106 0	0.447 1
11	3	3	1	2	2	2	1	2.707 3	1.113 1	0.402 6
12	3	4	2	1	2	1	2	3.030 0	1.406 2	0.458 5
13	4	1	4	2	2	1	2	2.557 1	0.772 9	0.367 9
14	4	2	3	1	2	2	1	1.879 8	0.308 9	0.354 8
15	4	3	2	4	1	1	1	2.024 6	1.078 4	0.239 0
16	4	4	1	3	1	2	2	2.261 0	1.370 3	0.251 5
K_1	1.039 1	1.109 9	1.082 7	1.437 4	1.226 7	1.288 4	1.269 5			
K_2	1.243 4	1.280 5	1.990 0	1.372 0	1.320 3	1.258 7	1.277 6			
K_3	1.598 5	1.349 8	1.281 0	1.234 5						
K_4	1.213 1	1.353 9	1.531 4	1.050 4						
k_1	0.259 8	0.277 5	0.270 7	0.359 3	0.306 7	0.322 1	0.317 4			
k_2	0.310 9	0.320 1	0.299 8	0.343 0	0.330 1	0.314 7	0.319 4			
k_3	0.399 6	0.337 5	0.320 3	0.308 6						
k_4	0.303 3	0.338 5	0.382 9	0.262 6						
R	0.139 9	0.061 0	0.112 2	0.096 8	0.023 4	0.007 4	0.002 0			

因素排列

 $A > C > D > B > E > F$

Order of factors

注: $K_1 \sim K_4, k_1 \sim k_4$ 分别表示各因素各水平下荚果恢复系数值的总和及总和的平均值; R 为极差。Note: $K_1 \sim K_4, k_1 \sim k_4$ is refers to average of the restitution coefficient; R is range.

表 3 恢复系数方差分析和显著性检验
Table 3 ANOVA and significance tests of restitution coefficient

差异源 Source	离差平方和 Sum of squared deviations	自由度 DOF	均方 Variance	F 值 F value	临界值 F critical-value	显著性 P Significance
碰撞材料 A	0.041	3	0.014	853.659	$F_{0.05}(3,1) = 215.71$	*
下落高度 B	0.010	3	0.003	202.018	$F_{0.05}(1,1) = 161.45$	
荚果质量 C	0.027	3	0.009	561.071	$F_{0.1}(3,1) = 53.59$	*
含水率 D	0.022	3	0.007	454.092	$F_{0.1}(1,1) = 39.86$	*
材料厚度 E	0.002	1	0.002	135.888	$F_{0.025}(3,1) = 864.2$	
花生品种 F	0.000	1	0.000	13.726	$F_{0.025}(1,1) = 647.8$	
误差 e	1.612×10^{-5}	1	1.612×10^{-5}			
总计 Total	1.725	16				

表 4 碰撞材料单因素试验结果
Table 4 Results of single factor experiment of collision material

试验数 Test No.	A, 碰撞材料 Collision material	水平分位移 S_1/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_1/cm Vertical displacement	水平分位移 S_2/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_2/cm Vertical displacement	水平分速度 $v_x/(m/s)$ Horizontal velocity	竖直分速度 $v_y/(m/s)$ Vertical velocity	恢复系数 C_r Restitution coefficient
1	橡胶	34.8	28	53.6	56	1.958 4	0.705 1	0.283 1
2	铝合金	41.2	28	61.3	56	2.051 9	0.410 6	0.370 7
3	Q235	45.6	28	69.7	56	2.496 9	0.638 3	0.419 8
4	有机玻璃	37.6	28	57.8	56	2.101 3	0.688 0	0.316 9

注：试验中碰撞材料厚度为 1 mm，下落高度 100 cm，荚果含水率 17.5%，荚果质量 2.5 g，品种白沙。 S_1, S_2 和 h_1, h_2 分别为沙盘有、无纸箱承托时花生荚果平均落点距碰撞点的水平和竖直位移，mm，下表同。

Note: Falling height is 100 cm, moisture content is 17.5%, mass is 2.5 g, variety is Baisha; S_1, S_2 and h_1, h_2 are displacements in horizontal and vertical directions with carton and without carton respectively, mm, the same below.

表 5 荚果含水率单因素试验结果
Table 5 Results of single factor experiment of moisture content of peanuts

试验号 Test No.	含水率 $w/\%$ Moisture content	水平分位移 S_1/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_1/cm Vertical displacement	水平分位移 S_2/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_2/cm Vertical displacement	水平分速度 $v_x/(m/s)$ Horizontal velocity	竖直分速度 $v_y/(m/s)$ Vertical velocity	恢复系数 C_r Restitution coefficient
1	8.3	42.5	28	70.1	56	3.107 7	1.377 3	0.390 9
2	11.6	41.3	28	69.2	56	3.227 0	1.560 7	0.376 4
3	17.5	40.2	28	68.3	56	3.340 4	1.737 0	0.362 3
4	22.6	39.6	28	66.0	56	3.024 5	1.497 0	0.345 0
5	28.4	36.8	28	64.1	56	3.444 2	2.097 0	0.304 3
6	35.9	33.2	28	51.6	56	1.930 6	0.785 6	0.258 6

表6 荚果质量单因素试验结果

Table 6 Results of single factor experiment of mass of peanuts

试验数 Test No.	荚果质量 m/g Mass of peanut	水平分位移 S_1/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_1/cm Vertical displacement	水平分位移 S_2/cm Horizontal displacement	竖直分位移 h_2/cm Vertical displacement	水平分速度 $v_x/(m/s)$ Horizontal velocity	竖直分速度 $v_y/(m/s)$ Vertical velocity	恢复系数 Restitution coefficient C_r
1	1.3	46.2	28	70.0	56	2.452 2	0.563 0	0.426 7
2	1.7	44.3	28	67.5	56	2.398 7	6.111 6	0.403 8
3	2.1	40.8	28	63.8	56	2.426 1	0.841 0	0.358 1
4	2.5	39.0	28	59.8	56	2.159 7	0.665 7	0.337 5
5	2.8	37.5	28	57.4	56	2.063 8	0.650 6	0.319 2
6	3.2	36.2	28	54.3	56	1.854 7	0.478 2	0.310 9

荚果质量的增大而减小,呈近似线性递减趋势,增大到一定程度后,恢复系数趋于平缓(图 2(a))。在一定的下落高度下,根据公式 $v_0 = \sqrt{2gh}$,不同荚果质量到达接触表面时的瞬时速度时一样的,但经过与板材的碰撞,质量大的荚果形变量大,能量损失变大,且根据公式 $ft = mv$,碰撞后荚果法向分离速度相对变小,从而使恢复系数降低。

2.2.3 花生荚果含水率对其碰撞恢复系数的影响

含水率对花生荚果恢复系数的显著性影响弱于碰撞材料因素和荚果质量因素。由单因素试验和图 2(b)可以看出,花生荚果恢复系数随着含水率的增大而减小。含水率越高,荚果壳表明越软,与碰撞材料碰撞时形变也越大,且与碰撞板材接触时粘黏性也越大,从而导致试验中花生荚果能量损失变大,因

此花生荚果在碰撞后反弹的法向分离速度相对变小。

2.2.4 下落高度及材料厚度对荚果恢复系数的影响

下落高度及材料厚度对荚果恢复系数的影响性不如荚果质量及含水率,但方差分析显著性 P 值接近 0.05,因此对材料厚度及下落高度也做了单因素试验,下落高度单因素试验中碰撞材料为 Q235,厚度 1 mm,含水率为 11.6%,荚果质量 2.5 g,品种白沙,分别针对 4 个水平的下落高度(120, 100, 80, 64 cm)进行试验;材料厚度单因素试验中碰撞材料为 Q235,含水率为 11.6%,下落高度 100 cm,荚果质量 2.5 g,品种白沙,碰撞材料厚度的选择根据机具材料常见厚度选取(1, 2, 3, 5 mm)4 个水平,结果见表 7 及图 2(c)、(d)所示。

表7 恢复系数单因素试验结果

Table 7 Results of single factor experiment of restitution coefficient

因素 Factors	水平 Level			
	1	2	3	4
下落高度 Falling height	0.332 5	0.328 9	0.319 0	0.302 5
材料厚度 Material thickness	0.397 9	0.403 6	0.411 2	0.420 8

下落高度对恢复系数影响在低于 100 cm 高度下,恢复系数随着下落高度的增加而增大,呈近线性增加趋势,当超过 100 cm 高度后,恢复系数增长趋于平缓。这是由于随着花生荚果下落高度的增大,荚果由势能转换获得的动能比碰撞过程中损失的能量要大,从而使花生荚果在与板材碰撞后反弹速度增大,最终导致其恢复系数增大。

碰撞材料的刚度与其厚度有关,材料厚度越大,碰撞时材料的变形量越小,从而由变形引起的能量损失越小,使其恢复系数呈现随着厚度增大而递增的趋势。

在花生荚果恢复系数测定过程中,荚果碰撞经历变形和恢复 2 个基本过程,由于花生荚果形状复杂个体差异大,表面坑洼不平,除了文中讨论的因素

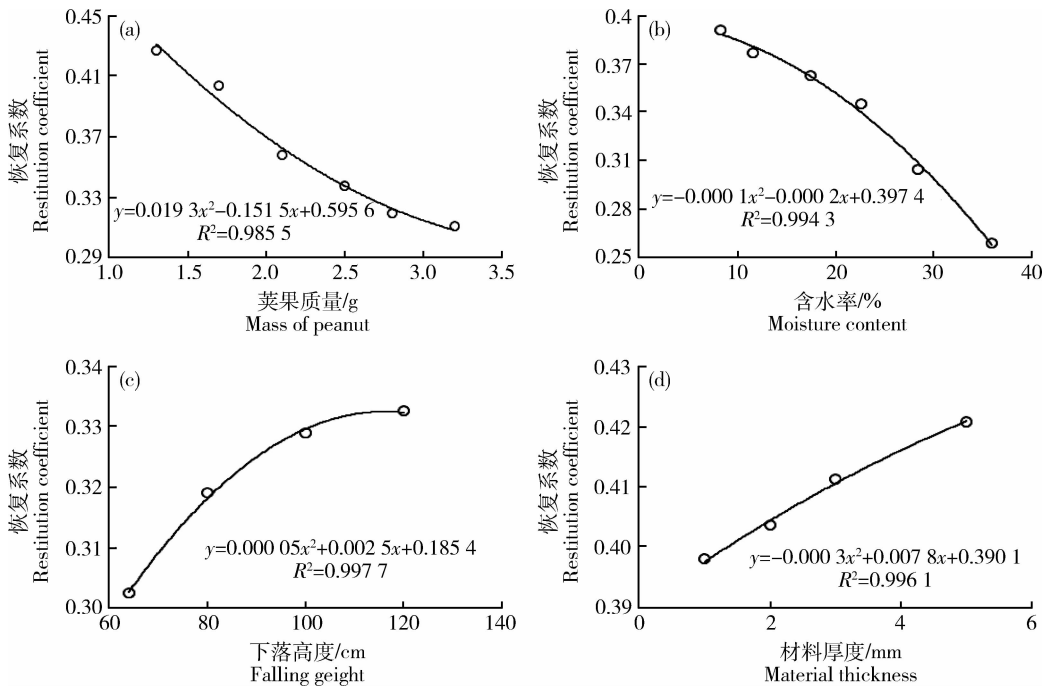


图 2 花生荚果质量(a)、含水率(b)、下落高度(c)、材料厚度(d)对恢复系数的影响

Fig. 2 Effect of mass (a)、moisture content (b)、falling height (c)、material thickness (d) on restitution coefficient of peanuts

外,可能还受荚果球形度、转动惯量、碰撞部位等因素的影响,而上述因素具有的随机性、不可控性,本研究在正交试验、单因素试验中开展了多次重复性试验,均排除了随机、不可控因素的影响。另外,研究发现碰撞位置若为荚果两端尖头,则恢复系数会相对较大;若碰撞位置为荚果中端侧面,恢复系数则相对偏小。

3 结论

1) 本研究所选试验因素中,影响恢复系数的因子主次顺序依次为碰撞材料、荚果质量、荚果含水率、下落高度、材料厚度以及花生品种,其中碰撞材料、荚果质量、含水率对恢复系数的影响较为显著,而下落高度,材料厚度和花生品种的影响相对不显著。

2) 单因素试验结果表明:在花生荚果碰撞模型中,各材质板材对花生荚果恢复系数的影响从大到小依次为 Q235、铝合金、有机玻璃、橡胶;随荚果质量和含水率的增加而呈近线性减小;下落高度、材料厚度和花生品种影响不显著。在碰撞材料厚度为 1 mm 的 Q235 板材,含水率为 17.5% 的白沙,下落高度为 100 cm 的条件下,花生荚果恢复系数随荚果

质量变化的回归方程为 $y = 0.0194x^2 - 0.1518x + 0.5959$, 决定系数 $R^2 = 0.9856$; 在其余因素条件相同的情况下,选用质量为 2.5 g 的荚果得到恢复系数随含水率变化的回归方程为 $y = -0.0001x^2 - 0.0002x + 0.3974$, 决定系数 $R^2 = 0.9943$ 。

3) 在花生收获机械设计研制过程中,对于需要减少花生荚果反弹的环节,如花生联合收获机的捡拾台、输送槽、集果箱等应尽量选用恢复系数较小的材料如橡胶等或采用将恢复系数较大材料的表面喷塑的方式;而针对需要增加花生荚果反弹性以增加花生荚果的流通顺畅性,高效性的环节如联合收获机的摘果滚筒、清选振动筛以及气力输送管道等则尽量选用恢复系数较大的材料进行制造,并在关键部位适当选用刚性较强的材料。由于荚果含水率对恢复系数的影响也较为显著,因此在实收鲜花生和干花生这 2 种不同工况时,可更换关键部件的材料或结构以达到最佳的收获效果。而花生品种的影响较不显著,归根结底品种的影响还是受荚果质量与含水率的影响,本研究在进行单因素试验时,已控制了荚果质量与含水率的变化,故品种因素较不显著,在实际收获时,可根据品种特性的差异换算为质量与含水率等因素进行参考。

参 考 文 献

- [1] 吕小莲,胡志超,于昭洋,时晓杰.花生籽粒几何尺寸及物理特性的研究[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2013(3):61-64
 Lyu X L, Hu Z C, Yu Z Y, Shi X J. Experimental research on the geometric dimensions and physical properties of peanut seeds[J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2013(3):61-64 (in Chinese)
- [2] 滕美茹,田立忠,陈广成.花生收获机的现状与展望[J].农机化研究,2011(10):211-215
 Teng M R, Tian L Z, Chen G C. The situation and expectation of peanut harvest machine [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011(10):211-215 (in Chinese)
- [3] 葛藤,贾智宏,周克栋.计算点面接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J].机械设计与研究,2007,23(6):14-16
 Ge T, Jia Z H, Zhou K D. A theoretical model for the coefficient of restitution calculation of point impact [J]. *Machine Design and Research*, 2007, 23(6):14-16 (in Chinese)
- [4] Durda D D, Movshovitz N, Richardson D C, Asphaug E, Morgan A, Rawlings A R, Vest C. Experimental determination of the coefficient of restitution for meter-scale granite spheres [J]. *Icarus*, 2011, 211(1):849-855
- [5] Hastie D B. Experimental measurement of the coefficient of restitution of irregular shaped particles impacting on horizontal surfaces[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 101(9):828-836
- [6] Aryaei A, Hashemnia K, Jafarpur K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(10):1037-1044
- [7] Li T H, Zhang J Y, Ge W. Simple measurement of restitution coefficient of irregular particles[J]. *China Particuology*, 2004, 2(6):274-275
- [8] 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)
- [9] 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,2014,24:22-29
 Huang X M, Zha X T, PAN H B, Zong W Y, Chen H. Measurement and analysis of rapeseed's restitution coefficient in point-to-plate collision model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014(24)22-29 (in Chinese)
- [10] 章广成,向欣,唐辉明.落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1266-1272
 Zhang G C, Xiang X, Tang M H. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6):1266-1272 (in Chinese)
- [11] 俞晓明,崔益和,陈飞,胡国庆.恢复系数及重力加速度的落球弹跳法测量[J].大学物理,2010,29(11):35-37
 Yu X M, Cui Y H, Chen F, Hu G Q. Measurement of coefficient of restitution and gravitational acceleration by using bouncing ball [J]. *College Physics*, 2010, 29(11):35-37 (in Chinese)
- [12] 任文涛,董滨,崔红光,韩双,向权力,代丽丽.水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J].农业工程学报,2009,25(7):103-107
 Ren W T, Dong B, Cui H G, Han S, Xiang Q L, Dai L L. Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with different slopes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7):103-107 (in Chinese)
- [13] 杨明金,杨玲,李庆东.颗粒物料恢复系数简易测量方法及其应用[J].农机化研究,2009(10):25-27
 Yang M J, Yang L, Li Q D. Simple measurement of restitution coefficient of granular material and its application [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(10):25-27 (in Chinese)
- [14] 李洪昌,高芳,李耀明.水稻籽粒物理特性测定[J].农机化研究,2014(3):23-27
 Li H C, Gao F, Li Y M, Yan J C. Determination of rice grain physical properties [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(3):23-27 (in Chinese)
- [15] Chanchal L, Himadri C, Pradip K, Chatterjee. Effect of coefficient of restitution in Euler-Euler CFD simulation of fluidized-bed hydrodynamics [J]. *Particuology*, 2013(15):170-177
- [16] Karimi M, Kheiralippour K, Tabatabaefar A, Khoubakht G M, Naderi M, Heidarbeigi K. The effect of moisture content on physical properties of wheat [J]. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2009 8(1):763-766
- [17] Asteriou P, Saroglou H, Tsiambaos G. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54(1):103-113
- [18] Mangwandi Y S, Cheong M J, Adams M J, Hounslow A D, Salman A D. The coefficient of restitution of different representative types of granules [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(1):437-450
- [19] Marinack Jr M C, Musgrave R E, Higgs III C Fred. Experimental Investigations on the coefficient of restitution of single particles [J]. *Tribology Transactions*, 2013, 56(4):572-580