

陈志惠, 段宏兵, 蔡兴奎, 等. 马铃薯跌落碰撞时的接触应力分布特性 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 99-108.
CHEN Zhihui, DUAN Hongbing, CAI Xingkui, et al. Distribution characteristics of potato contact stress during the drop impact[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 99-108.

马铃薯跌落碰撞时的接触应力分布特性

陈志惠¹, 段宏兵^{1,2}, 蔡兴奎², 王军权¹, 徐 涛¹,
余参参¹, 姚飞虎¹, 严福勇¹

(1 华中农业大学 工学院, 湖北 武汉 430070; 2 农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:【目的】研究马铃薯跌落碰撞时的损伤原理。【方法】采用 Prescale 感压胶片和高速摄像技术测量在不同跌落高度马铃薯与 5 种材料碰撞时的接触应力分布特性和规律, 确定马铃薯损伤和接触应力分布的关系。【结果】正交试验的响应曲面分析表明, 碰撞材料、跌落高度、马铃薯质量对马铃薯碰撞的冲击压缩变形量影响显著, 且影响程度由大到小为碰撞材料>跌落高度>马铃薯质量。研究结果发现, 碰撞材料为 65Mn 钢、跌落高度为 300 mm 时, 马铃薯开始出现损伤, 碰撞材料为塑料 ABS、土块、马铃薯和丁腈橡胶、跌落高度为 400 mm 时, 马铃薯开始出现损伤。跌落高度 200~800 mm, 接触应力 ≤ 0.50 MPa 占主要的接触面积, 对马铃薯的损伤起主要贡献作用。马铃薯与不同材料碰撞在跌落高度 <400 mm (65Mn 钢 <300 mm) 时, 接触应力 ≤ 0.20 MPa 的区域占主要的接触面积, 在跌落高度 ≥ 400 mm (65Mn 钢 ≥ 300 mm) 后, 接触应力 (0.20, 0.60] MPa 的区域为主要接触面积, 0.20 MPa 为马铃薯跌落碰撞损伤的临界应力。跌落高度与接触面积呈高度线性正相关, 决定系数 (R^2) 均大于 0.95。接触应力和接触面积的乘积 (碰撞冲击力) 与冲击压缩变形量呈高度线性相关, R^2 大于 0.96。【结论】建立的马铃薯碰撞损伤的线性回归模型能够准确预测和评估马铃薯跌落碰撞损伤。

关键词: 马铃薯; 碰撞; 损伤; 感压胶片; 接触应力分布
中图分类号: S12; O348 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2020)05-0099-10

Distribution characteristics of potato contact stress during the drop impact

CHEN Zhihui¹, DUAN Hongbing^{1,2}, CAI Xingkui², WANG Junquan¹, XU Tao¹,
YU Cancan¹, YAO Feihu¹, YAN Fuyong¹

(1 College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2 Key Laboratory of Potato Biotechnology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objective】To explore the damage principle of potato under drop impact. 【Method】Prescale sensitive film and high speed photogrammetry were used to characterize the contact stress distribution of potato when it collided with five types of materials and dropped from different heights. The relationship between potato damage and contact stress distribution was determined by studying the distribution law of contact stress in potato. 【Result】The response surface analysis of combination orthogonal test for potato showed that collision material, dropping height and potato mass had significant influences on the impact compression deformation

amount of potato collision. The influence degree in order was collision material>dropping height>potato mass. When colliding with 65Mn steel, the potato had damage at the dropping height of 300 mm. When colliding with plastic ABS, clods, potatoes and nitrile rubber, the potato had damage at the dropping height of 400 mm. At the dropping height of 200–800 mm, the major contact area was under the contact stress of 0.01–0.50 MPa, which played a major role in potato damage. At the dropping height of <300 mm for 65Mn steel and <400 mm for other collision materials, the major contact area was under the contact stress of ≤ 0.20 MPa. At the dropping height of ≥ 300 mm for 65Mn steel and ≥ 400 mm for other collision materials, the major contact area was under the contact stress of (0.20, 0.60] MPa. The critical stress causing damage of potato was 0.20 MPa under drop impact. Dropping height and contact area showed a highly linear positive correlation, with the determination coefficient (R^2) above 0.95. Impact force was the product of contact stress and contact area, which had highly linear correlation with impact compression deformation, and R^2 was above 0.96. 【Conclusion】 The constructed linear regression model can accurately predict and evaluate damage of potato under drop impact.

Key words: potato; collision; damage; pressure sensitive film; contact stress distribution

研究发现, 马铃薯 70% 的块茎损伤出现在收获环节^[1], 机械损伤严重影响了马铃薯的品质、产量和经济效益^[2-5]。随着马铃薯收获机械化、加工自动化的快速发展, 马铃薯由碰撞导致的损伤问题亟待解决。有研究根据马铃薯果肉的变色来度量其损伤程度, 提出了损伤的评价标准^[6-8]。吴永根等^[9] 将经冲击的果实在自然环境中放置 24 h, 损伤的果肉会呈现褐色, 从而获得损伤体积、损伤深度等试验指标。桑永英等^[10] 根据淀粉遇碘变色原理, 对碰撞后的果实涂抹碘, 根据颜色深浅划分损伤程度。康璟等^[11] 提出通过多因素试验研究马铃薯机械损伤的建议, 如从挖掘深度、下落高度等角度分析马铃薯的机械损伤, 从应力应变及其临界极限值方面研究马铃薯的机械损伤等。王咏梅等^[12] 研究了马铃薯收获中的机械损伤, 分析了机械损伤产生的过程和机理, 建议对马铃薯动态力学特性进行深入研究。李辉等^[13] 通过对比国内外的马铃薯机械损伤研究, 鼓励多从实际作业中发现问题、解决问题。魏忠彩等^[14] 系统研究了收获、清选和分级对马铃薯机械损伤的影响。冯斌等^[15] 通过试验及参数的数学关系获得马铃薯块茎碰撞恢复系数, 并分析跌落高度、碰撞材料等跌落过程的参数与块茎碰撞恢复系数的关系。吕金庆等^[16] 研究了跌落高度、升运链倾角和线速度对马铃薯损伤综合指数和伤薯率的影响。Ito 等^[17] 研究了跌落高度和碰撞材料对马铃薯表面损伤的影响。Dwelle 等^[18] 研究了温度、放置时间、气体压力对马铃薯内部黑斑瘀伤形成的影响。Thomson 等^[19] 研究探讨了马铃薯块茎的特性及影响马铃薯表面损伤的处理技术。Nikara 等^[20] 采用扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 分析了

马铃薯碰撞后组织的微观力学变化。卢立新等^[21] 通过冲击力传感器研究苹果跌落的冲击力学特性, 获得加速度与时间、冲击力与变形量、应力与应变以及跌落冲击弹性恢复系数等动态关系。李晓娟等^[22] 通过悬摆式碰撞试验, 采用加速度传感器, 得到苹果碰撞过程的加速度-时间曲线及数学表达式。Brusewitz等^[23] 使用力学传感器研究苹果的跌落, 同时测得最大撞击力、撞击持续时间、到达最大撞击力所需要的时间、冲量等冲击特性的参数。刘治震^[24] 通过冲击力传感器对马铃薯进行跌落碰撞试验, 得到马铃薯的临界损伤高度。卢琦^[25] 通过平膜盒测力传感器获得马铃薯的瞬时冲击力和冲击应力; 通过与马铃薯的坚实度比较, 得到马铃薯的损伤情况。胡奔^[26] 通过力学传感器获得马铃薯跌落碰撞的冲击力, 经过转换研究得到马铃薯损伤的极限冲击应力。冯斌等^[27] 通过压力传感器测量马铃薯的冲击特性参数与损伤综合指数的关系。但是传统的测量方法不精确, 普通的力学传感器只能测定马铃薯与其他材料发生碰撞时冲击力的大小, 无法测定碰撞时的应力分布情况。对马铃薯与各作业部件的接触力学分布特性进行研究, 可为马铃薯的机械化收割和自动化减损提供参考, 具有重要的意义。

有学者用超声波技术^[28] 或 TekScan5051 柔性薄膜网格压力传感器^[29] 测量了苹果准静态下的压缩接触应力分布。美国和日本通过微胶囊颗粒缓释控制技术研制出了压力感应胶片, 实现了动载下接触应力的精确测量, 并成功应用于医学^[30-31]。采用感压胶片对苹果挤压和碰撞的接触应力进行分析, 并获得损伤面积和体积^[32-33]。采用感压胶片对香梨跌落碰撞的接触应力分布进行研究, 确定接触应力

分布和香梨果实损伤间的关系^[34-35]。

本文采用 Prescale 感压胶片及配套的压力图像数字解析系统对马铃薯跌落碰撞的接触应力分布进行研究, 精确测量马铃薯在动载下的接触应力分布特性, 研究马铃薯在动载下的力学特性和损伤规律, 以实现对其机械损伤的可靠性评估和预测。

1 材料与方

1.1 材料

马铃薯试样为华中农业大学农业农村部马铃薯生物学与生物技术国家重点试验室试验田培育的‘中薯5号’, 早熟品种, 从出苗到收获约 60~80 d, 株高约 50 cm, 休眠期短。‘中薯5号’具有较好的增产性, 薯块大而整齐、表面光滑、芽眼极浅、综合性状好, 结薯集中, 商品薯率高^[36-37]。

收获期为 2019 年 6 月, 在确保马铃薯无虫害、无损伤后迅速冷藏。马铃薯的含水率 (w) 为 77.36%,

贮藏温度为-5~5 ℃, 相对湿度为 80%~90%。

试验材料为土块、橡胶、塑料和钢板。土块采集自马铃薯收获时的试验田, 含水率 (w) 为 22.58%; 橡胶为工业橡胶中的丁晴橡胶; 塑料的材料是 ABS。钢板采用 65Mn 钢, 为我国薯类收获机上升运链建议采用的材料^[38]。

高速摄像机 (Pco.dimaxHD) 为德国 PCO 公司生产。高速摄像机放置在距离试验台架水平 2 m 处, 记录马铃薯跌落碰撞时的运动情况, 选定的拍摄帧率为 2 000 帧/s, 曝光时间为 942 ns, 像素分辨率为 1 920 × 1 080 。

Fuji 公司研发的感压胶片 (Prescale® 双层特超低压 LLLW 型) 测量范围为 0.2~0.6 MPa, 测试精度 ≤ ± 1.0 %, 配套的压力图像数字解析系统 V2.0 (FPD-8010E 型)。

EPSON 平板扫描仪 (V370) 为爱普生公司生产。

马铃薯跌落碰撞测试系统示意图见 图 1。

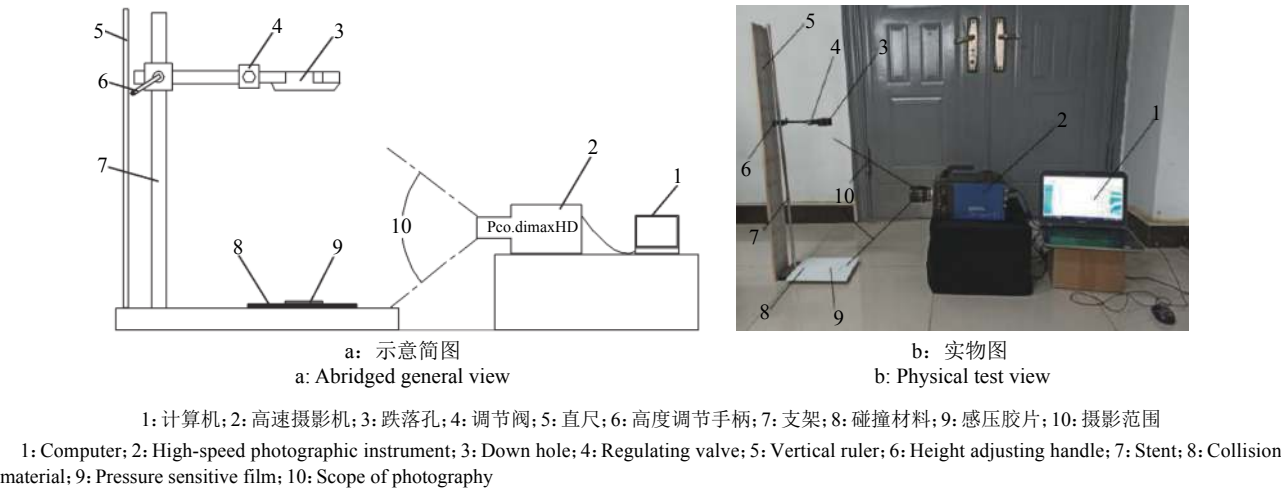


图 1 马铃薯跌落碰撞测试系统

Fig. 1 Schematic diagram of potato drop crash test system and physical picture

1.2 方法

1.2.1 马铃薯跌落试验 马铃薯试样通过调节阀固定在跌落孔中, 松开调节阀, 马铃薯试样自由下落, 保证其长轴扁平部位与不同的材料碰撞。反弹后在再次落地前接住马铃薯试样, 保证马铃薯试样经过反弹达最大高度, 也避免二次碰撞。高速摄影机记录全过程。

1.2.2 接触应力分布的测定 将感压胶片放置在碰撞接触材料表面, 使感压胶片能够获取完整的碰撞接触部位。碰撞后的感压胶片, 通过扫描仪进行平滑处理, 获得接触应力分布的特征图, 然后经相配套的压力图像数字解析系统 V2.0 读取特征图并

进行数值解析, 最后获得接触面积、碰撞冲击力、接触应力及其分布等参数。

1.2.3 马铃薯冲击压缩变形量的测定 通过马铃薯的冲击压缩变形量来衡量马铃薯的损伤。马铃薯的冲击压缩变形量越大, 损伤越大。

冲击压缩变形量 (D) 表征马铃薯跌落碰撞时弹性形变的最大值, 定义公式如下:

$$D = \frac{\Delta s}{d}, \tag{1}$$

式中, Δs 是指形变量, 马铃薯从碰撞开始到压缩到最大值 (下一秒会发生反弹) (图 2); d 是与接触材料发生碰撞时, 马铃薯垂直方向的直径。

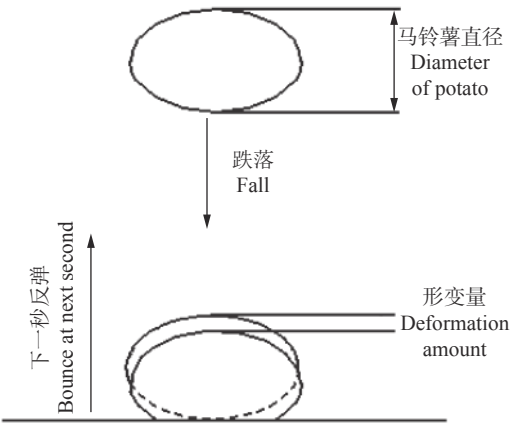


图 2 马铃薯跌落过程
Fig. 2 Potato falling process

形变量 $\Delta s = \int_0^t v_t dt$, $v_t = v_0 + \int_0^T a dT$, T 为碰撞弹性变形时间, 通过高速摄影技术获得, $t=2T$ 。

1.3 马铃薯试验方案设计

通过 Design-expert 设计了 3 因素 3 水平的组合正交试验方案, 研究因素及组合正交试验设计方案的编码值和实际值的对应关系如表 1 所示。

跌落高度是根据马铃薯收获机振动筛与地面的高度进行筛选的。碰撞材料是根据马铃薯收获时可能发生碰撞的材料选取的。马铃薯质量是将收获后的马铃薯进行分级所得。最后通过分析较显著的因素, 补充详细完整的因素水平, 进行单因素试验。

表 1 因素水平编码表
Table 1 Coding table of factor and level

水平 Level	碰撞材料(A) Collision material	跌落高度(B)/mm Dropping height	马铃薯质量(C)/g Potato mass
-1	65Mn钢 65Mn steel	200	0~50
0	马铃薯 Potato	500	100~150
1	土块 Clods	800	150~200

2 结果与分析

2.1 方差分析及响应曲面分析

组合正交试验的方差分析见表 2。跌落高度和碰撞材料的 $P<0.000\ 1$, 对冲击压缩变形量的影响极显著; 马铃薯质量的 $P=0.026\ 5<0.05$, 对冲击压缩变形量的影响是显著的。而两两因素间的交互作用影响不显著, 因素的二次方影响也不显著。通过方差分析获得冲击压缩变形量 (D) 与 3 个因素的二次回归模型。

$$D = 11.27 - 2.60A + 3.31B - 1.17C + 0.45AB - 0.25AC - 0.22BC + 0.16A^2 - 1.22B^2 + 0.082C^2.$$

(2)

失拟 $P=0.747\ 5>0.05$, 影响不显著, 说明方差分析模型是可信的。

对跌落高度、碰撞材料和马铃薯质量的响应曲

表 2 冲击压缩变形量方差分析
Table 2 Variance analysis of impact compression deformation amount

方差来源 ¹⁾ Source of variance	离差平方和 Sum of deviation square	自由度 Degree of freedom	平均离差平方和 Mean sum of deviation square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	160.25	9	17.81	12.69	0.001 5
A	54.03	1	54.03	38.52	0.000 4
B	87.62	1	87.62	62.46	<0.000 1
C	11.01	1	11.01	7.85	0.026 5
AB	0.83	1	0.83	0.59	0.467 4
AC	0.24	1	0.24	0.17	0.691 5
BC	0.19	1	0.19	0.13	0.725 8
A ²	0.11	1	0.11	0.08	0.789 2
B ²	6.30	1	6.30	4.49	0.071 8
C ²	0.03	1	0.03	0.02	0.891 5
残差 Residual	9.82	7	1.40		
失拟 Lack of fit	2.36	3	0.79	0.42	0.747 5
误差 Error	7.46	4	1.86		
总计 Total	170.07	16			

1)A为碰撞材料,B为跌落高度,C为马铃薯质量
1)A: Collision material; B: Dropping height; C: Potato mass

面分析如图 3 所示, 二维的投影曲线反映因素间的关系, 曲线在不同坐标轴具有不同疏密程度, 疏密程度反映因素对冲击压缩变形量的不同贡献程度, 曲线越密集说明对冲击压缩变形量的贡献越大。

由图 3a、3c 可看出, 随着跌落高度增加, 曲线斜率均较陡峭, 说明跌落高度对冲击压缩变形量的影响较显著, 冲击压缩变形量随着跌落高度的增加而增大。由二维的投影可知, 跌落高度的曲线密集程度比马铃薯质量的高, 比碰撞材料的低。由图 3a、

3b 可看出, 不同的碰撞材料中马铃薯的冲击压缩变形量差异较大, 碰撞材料的曲线密集程度比跌落高度、马铃薯质量的高。由图 3b、3c 可看出, 当马铃薯质量较小时, 曲线较陡峭, 说明此时马铃薯质量对冲击压缩变形量影响较显著。马铃薯质量的曲线密集程度比跌落高度、碰撞材料都低。综上可得各因素对冲击压缩变形量贡献的程度为碰撞材料>跌落高度>马铃薯质量。因此后续着重分析碰撞材料和跌落高度对马铃薯跌落碰撞损伤的影响。

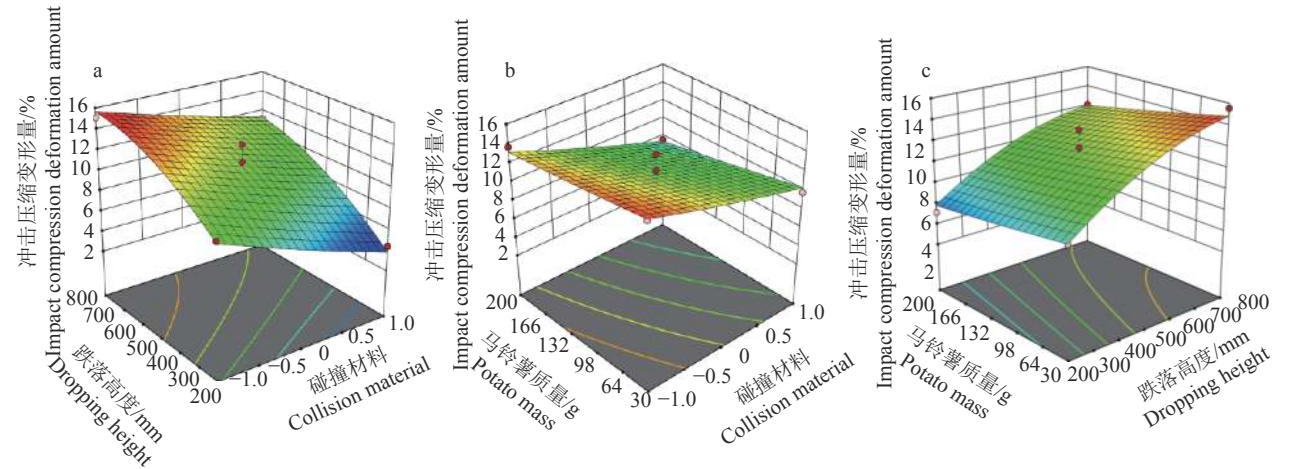


图 3 冲击压缩变形量的响应曲面图

Fig. 3 Response surface diagram of impact compression deformation amount

2.2 马铃薯跌落碰撞的损伤规律

为减少马铃薯外形差异对试验结果的影响, 保证试验因素以外的环境和条件一致, 选取的马铃薯为 100~150 g, 以减小其质量对试验的误差影响。不同跌落高度下马铃薯与不同材料碰撞的冲击压缩变形量见图 4。

由图 4 可知, 随着跌落高度的增加, 不同碰撞材料的冲击压缩变形量均呈上升趋势: 土块和马铃薯

的曲线交织上升, 65Mn 钢、塑料 ABS 和丁腈橡胶曲线上上升趋势比较清晰。65Mn 钢的冲击压缩变形量随着跌落高度增加而增加, 在跌落高度>300 mm 后, 曲线呈近似直线上升趋势, 冲击压缩变形量比其他材料的大。由于硬度比较大, 65Mn 钢碰撞时的弹性变形较小, 使马铃薯的形变较大, 因而 65Mn 钢的冲击压缩变形量比其他材料大。

塑料 ABS 的冲击压缩变形量曲线, 首先是逐渐上升, 在跌落高度>400 mm 后趋于平缓。塑料 ABS 具有一定的弹性, 对马铃薯的碰撞变形起到缓冲作用, 因而塑料 ABS 的冲击压缩变形量处于中间水平, 与土块和马铃薯的冲击压缩变形量相差不大。

马铃薯和土块的冲击压缩变形量曲线在跌落高度>400 mm 后上升, 在跌落高度>600 mm 之后趋于平缓。马铃薯具有弹性缓冲性能, 因此两两碰撞时, 能够减少变形, 而使冲击压缩变形量不大。土块本身具有一定的硬度, 但由于收获时的土块含水量较高, 能够对马铃薯的碰撞有一定的缓冲作用, 加之土块具有较多的孔隙, 跌落碰撞时的接触面积较大, 从而减少了形变, 因而土块的冲击压缩变形量处于中间水平。

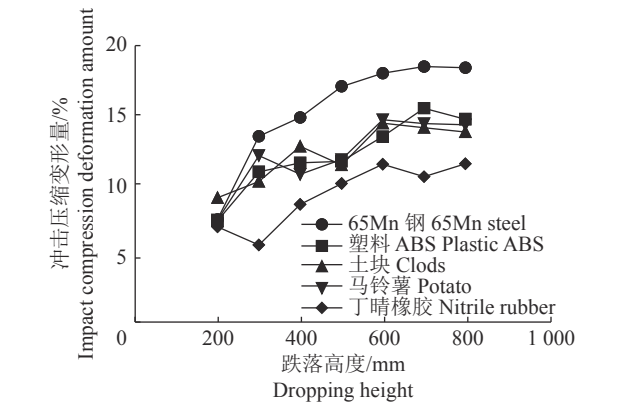


图 4 各接触材料的跌落高度与冲击压缩变形量的关系

Fig. 4 Relation between dropping height and impact compression deformation amount for each collision material

丁晴橡胶的冲击压缩变形量在跌落高度为 300 mm 时最小, 在跌落高度>400 mm 后, 曲线呈近似直线上升, 在跌落高度为 600~800 mm, 冲击压缩变形量的差异很小。丁晴橡胶的冲击压缩变形量整体上比其他材料低。丁晴橡胶是缓冲材料, 工业设计材料内部具有较多孔隙, 能够对马铃薯起到缓冲减震的作用, 使马铃薯的冲击变形较小, 因而丁晴橡胶的冲击压缩变形量最小。

综上, 不同碰撞材料造成冲击压缩变形量的差异与其接触应力、冲击力、接触面积等有关。

2.3 马铃薯碰撞接触应力的分布特性

2.3.1 不同碰撞材料的接触应力分布特性 马铃薯与 5 种接触材料进行碰撞试验, 通过感压胶片及其压力数字解析系统获得马铃薯碰撞的接触应力及其分布。马铃薯与各种材料在不同高度碰撞时的接触应力与接触面积的关系见图 5, 不同接触材料

在不同高度碰撞后的应力分布如图 6 所示。

马铃薯与各种材料在不同高度碰撞时, 接触应力 ≤ 0.50 MPa 占主要的接触面积。接触应力为 0.50~0.60 MPa 应是应力的峰值, 因为接触应力>0.60 MPa 的接触面积非常小, 约为 0.01~1.00 mm², 几乎可以忽略不计。接触应力在 ≤ 0.50 MPa 的接触面积最大, 对马铃薯的损伤起主要贡献作用; 而接触应力为 0.50~0.60 MPa 的接触面积很小, 不是造成马铃薯损伤的主要应力。

当接触应力 ≤ 0.20 MPa 时, 不同跌落高度间的接触面积相差不大。当接触应力>0.20 MPa 后, 跌落高度为 200 和 300 mm 的接触面积相差很小, 而跌落高度 ≥ 400 mm 的接触面积比 200 和 300 mm 的接触面积大很多。说明随着跌落高度增加, 接触应力增大, 接触面积也增大, 即高应力占主要的接触面积, 是导致马铃薯碰撞损伤的主要原因。

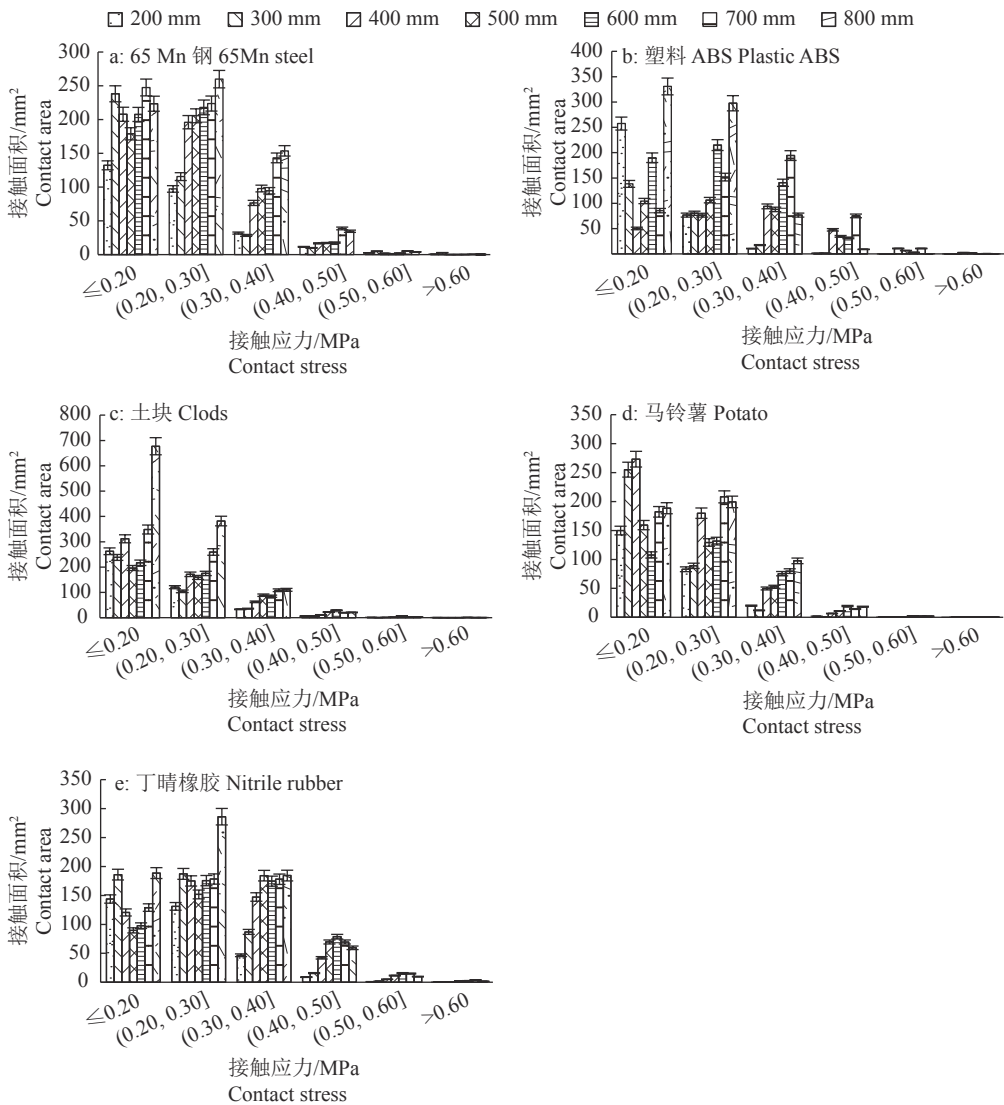


图 5 不同跌落高度下马铃薯与不同材料碰撞的接触应力分布

Fig. 5 Contact stress distribution of potato in collision with different materials at different dropping height

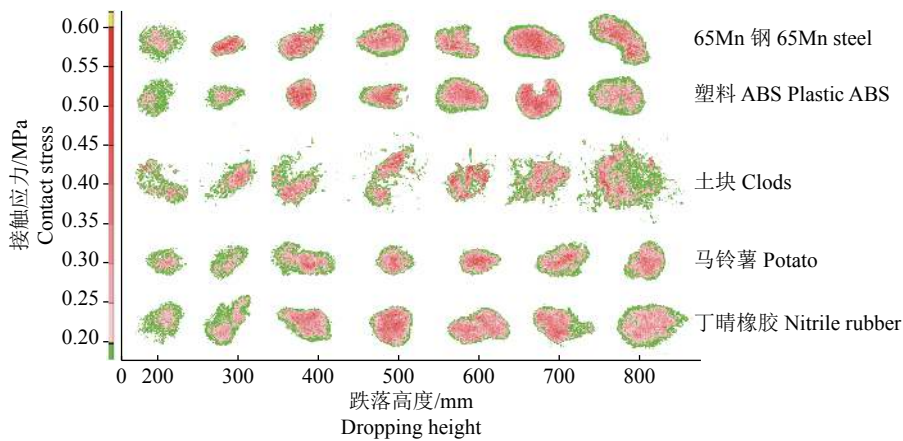


图 6 马铃薯与不同材料的碰撞接触应力典型分布图

Fig. 6 Typical distribution of contact stress on potato in collision with different materials

由图 6 可以看出, 马铃薯与 65Mn 钢碰撞, 当跌落高度为 200 mm 时, 低应力区域 (绿色区域) 占主要面积; 当跌落高度 ≥ 300 mm 后, 低应力区域分布在边缘, 高应力区域占主要面积。马铃薯与塑料 ABS、马铃薯、土块和丁晴橡胶碰撞, 当跌落高度 ≤ 300 mm 时, 低应力区域占主要面积; 当跌落高度 ≥ 400 mm 后, 低应力区域分布在边缘, 而高应力区域占主要面积。从图 6 可看出, 马铃薯与土块碰撞时的接触应力分布的轮廓非常分散, 存在较多孔隙, 同时接触面积也比其他材料大; 马铃薯与 65Mn 钢、塑料 ABS、马铃薯、丁晴橡胶碰撞的轮廓均呈较规则的椭圆形。

以上分析说明, 与 65Mn 钢碰撞, 跌落高度 ≥ 300 mm 后, 马铃薯开始出现损伤; 与塑料 ABS、土块、马铃薯、丁晴橡胶碰撞, 跌落高度 ≥ 400 mm 后,

马铃薯开始产生损伤。

与 65Mn 钢碰撞, 跌落高度 < 300 mm 时, ≤ 0.20 MPa 的区域 (低应力区域) 占据主要的接触面积 (74.57%); 在跌落高度 ≥ 300 mm 后, > 0.20 MPa 的区域 (高应力区域) 为主要接触面积 (74.37%)。与塑料 ABS、马铃薯、土块、丁晴橡胶碰撞时, 马铃薯在跌落高度 < 400 mm 时, ≤ 0.20 MPa 的区域 (低应力区域) 占主要的接触面积, 分别为 200 mm 的 74.37%、60.38%、61.73% 和 65.68%, 300 mm 的 58.23%、76.98%、71.42% 和 55.41%; 在跌落高度 ≥ 400 mm 时, > 0.20 MPa 的区域 (高应力区域) 占主要接触面积, 分别为 83.52%, 73.31%, 66.22% 和 83.87%。因此可以将马铃薯受到 0.20 MPa 的应力作为其损伤的临界应力。

2.3.2 马铃薯接触面积和接触应力 从图 7

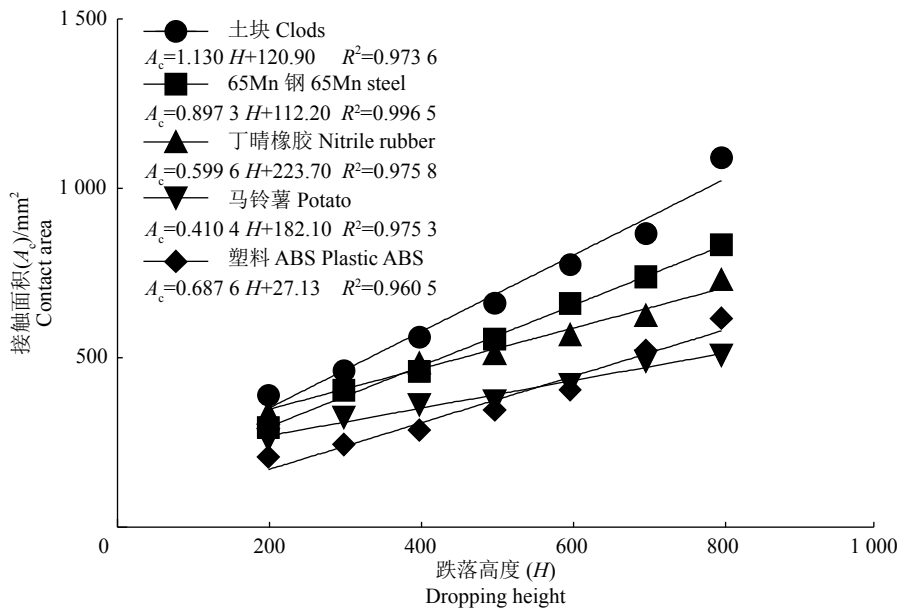


图 7 马铃薯与不同材料碰撞时跌落高度与接触面积的关系

Fig. 7 Relation between dropping height and contact area of potato in collision with different materials

可以看出,随着跌落高度的增加,不同材料的接触面积随之上升,且接触面积 (A_c) 随着跌落高度 (H) 上升呈高度线性正相关,决定系数 (R^2) 均大于 0.95。

不同材料的接触面积由高到低依次为:土块、65Mn 钢、丁晴橡胶、马铃薯、塑料 ABS。从图 7 可以看出,土块的接触面积十分分散,是因为土块本身具有较多孔隙,碰撞时通过增大接触面积,降低了马铃薯的变形和损伤。马铃薯与 65Mn 钢碰撞时的接触面积较大,是由于碰撞时 65Mn 钢塑性变形很小,形变集中于马铃薯果肉,使马铃薯碰撞变形和接触面积较大。马铃薯与马铃薯、丁晴橡胶碰撞时的接触面积较大,且马铃薯和丁晴橡胶均具有缓冲减震的作用,因此接触面积较大能够减少对马铃薯的损伤。马铃薯与塑料 ABS 碰撞时接触面积较小,应力集中,是马铃薯碰撞损伤严重的主要原因。

由此可见,马铃薯接触面积在不同碰撞材料上变化的原理不同,导致马铃薯损伤程度的不同。

如图 8 所示,马铃薯与各材料碰撞的接触应力

随着高度增加呈正态分布。65Mn 钢板和塑料 ABS 的接触应力较大,范围为 0.20~0.31 MPa,随着跌落高度增大略微起伏;而丁晴橡胶、马铃薯土块的接触应力明显小于钢板和塑料 ABS,为 0.18~0.26 MPa。

不同材料的接触应力具有显著差异,说明接触应力与马铃薯跌落的接触面积存在关联。

2.3.3 马铃薯碰撞接触应力分布与损伤的关系

马铃薯的接触应力 (P) 与接触面积 (A_c) 存在关联,而且接触应力与接触面积的乘积,即为碰撞冲击力 (F),即:

$$F = P \times A_c。$$
 (3)

马铃薯冲击压缩变形量与碰撞冲击力的线性拟合见图 9,两者高度线性相关。冲击压缩变形量的回归方程见表 3,除了土块 ($R^2=0.963\ 4$),其他材料的 R^2 均大于 0.99。说明通过感压胶片测量的接触应力和接触面积能够准确地预测和评估马铃薯的损伤。

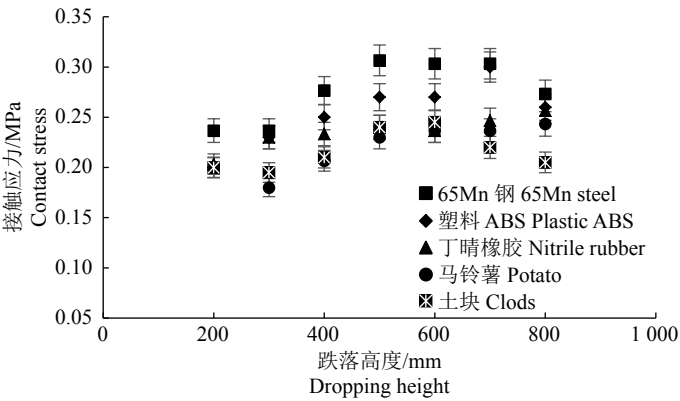


图 8 马铃薯与不同材料碰撞的接触应力与跌落高度的关系

Fig. 8 Relation between contact stress and dropping height of potato in collision with different materials

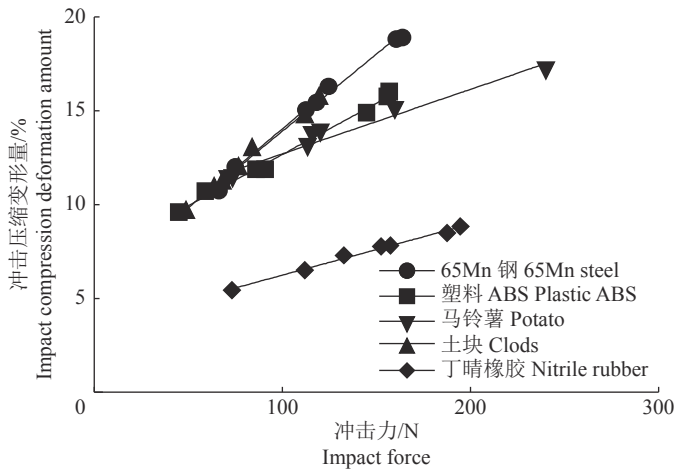


图 9 马铃薯与不同材料碰撞时冲击压缩变形量与冲击力的关系

Fig. 9 Relation between impact compression deformation amount and impact force of potato in collision with different materials

表 3 马铃薯与不同材料碰撞的冲击压缩变形量的回归方程

Table 3 Regression equation of impact compression deformation amount of potato in collision with different materials

碰撞材料 Collision material	回归方程 ¹⁾ Regression equation	R ² Determination coefficient
65Mn钢 65Mn Steel	$D=0.088\ 21A_cP+5.370$	0.993 1
塑料ABS Plastic ABS	$D=0.054\ 63A_cP+6.932$	0.992 9
马铃薯 Potato	$D=0.083\ 92A_cP+5.308$	0.992 1
土块 Clods	$D=0.034\ 42A_cP+9.026$	0.963 4
丁晴橡胶 Nitrile rubber	$D=0.027\ 18A_cP+3.296$	0.991 1

1) D 表示冲击压缩变形量, A_c 表示接触面积, P 表示接触应力
1) D represents impact compression deformation amount, A_c represents contact area, P represents contact stress

3 结论

本研究采用感压胶片及配套的压力图像数字解析系统分析马铃薯跌落碰撞的接触应力及其分布特性, 获得马铃薯跌落碰撞的损伤预测模型。研究了碰撞材料和跌落高度对马铃薯碰撞损伤影响的数学关系, 建立了相关模型。在方差分析中, 马铃薯质量对其碰撞损伤同样具有显著影响, 马铃薯质量对马铃薯碰撞损伤机理有待进一步的研究。

马铃薯组合正交试验的响应曲面分析表明, 跌落高度、碰撞材料、马铃薯质量对马铃薯碰撞的冲击压缩变形量影响显著, 且影响程度由大到小为碰撞材料>跌落高度>马铃薯质量。

跌落高度为 200~800 mm 时, 接触应力 ≤ 0.50 MPa 占主要的接触面积, 对马铃薯的损伤起主要贡献作用。马铃薯接触应力 0.50~0.60 MPa 是接触应力峰值, 因为马铃薯接触应力 >0.60 MPa 的接触面积约为 0.01~1.00 mm², 可忽略不计。不同碰撞材料马铃薯损伤的跌落高度不一致, 碰撞材料为 65Mn 钢时, 在跌落高度 ≥ 300 mm 后, 马铃薯开始出现损伤, 而塑料 ABS、土块、马铃薯、丁晴橡胶在跌落高度 ≥ 400 mm 后, 马铃薯开始发生损伤。当碰撞材料的跌落高度 <400 mm(65Mn 钢 <300 mm) 时, ≤ 0.20 MPa 的区域占据主要的接触面积, 当跌落高度 ≥ 400 mm(65Mn 钢 ≥ 300 mm) 时, (0.20, 0.60] MPa 的区域为主要接触面积。因此可以将 0.20 MPa 的接触应力作为马铃薯损伤的临界应力。跌落高度与接触面积呈高度线性正相关, R^2 均大于 0.95。随着跌落高度增大, 65Mn 钢和塑料 ABS 的接触应力有略微起伏, 为 0.20~0.31 MPa; 马铃薯、土块和丁晴橡胶的接触应力明显低于 65Mn 钢和塑料 ABS, 为 0.18~0.26 MPa。冲击压缩变形量与接触应力和接触面积的乘积即碰撞冲击力呈高度线性相关, R^2 大于 0.96, 说明冲击压缩变形量与碰撞冲击力的回归方程模型能够准确地预测和评估马

铃薯的损伤。

致谢: 感谢宋波涛教授和陈惠兰教授对试验给予的帮助和鼓励!

参考文献:

[1] 魏忠彩, 李学强, 张宇帆, 等. 马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 1-6.

[2] MORELLI J K, VAYDA M E. Mechanical wounding of potato tubers induces replication of potato virus S[J]. *Physiol Mol Plant P*, 1996, 49: 33-47.

[3] SABBA R P, LULAI E C. Immunocytological comparison of native and wound periderm maturation in potato tuber[J]. *Am J Potato Res*, 2004, 81(2): 119-124.

[4] OLSSON K. The influence of genotype on the effects of impact damage and light exposure on the accumulation of glycoalkaloids in potato tubers[J]. *Potato Res*, 1986, 29: 1-12.

[5] BARITELLE A L, HYDE G M, THORNTON R E. Rapid assessment of potato tuber bruise discoloration potential[C]//ASAE/CSAE Annual International Meeting. Toronto: ASAE/CSAE, 1999.

[6] 张建华, 金黎平, 谢开云, 等. 不同基因型马铃薯块茎损伤性状的综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 198-203.

[7] 冯斌. 收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.

[8] BARITELLE A, HYDE G, THORNTON R E, et al. A classification system for impact-related defects in potato tubers[J]. *Am J Potato Res*, 2000, 77(3): 143-148.

[9] 吴永根, 李汉洙. 苹果梨机械损伤的研究[J]. 延边农学院学报, 1993(3): 188-192.

[10] 桑永英, 张东兴, 张梅梅. 马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. *中国农业大学学报*, 2008, 13(1): 81-84.

[11] 康璟, 李涛, 王蒂, 等. 马铃薯收获中机械损伤的分析与思考[J]. 农业机械, 2013(10): 137-139.

[12] 王咏梅, 孙伟, 王关平. 关于马铃薯收获中机械损伤的研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(9): 2837-2840.

[13] 李辉, 吴建民, 孙伟, 等. 马铃薯机械化收获损伤机理研究现状及进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(25): 227-229.

[14] 魏忠彩, 李学强, 孙传祝, 等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 63-70.

[15] 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.

[16] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程中块茎损伤机理分析与试验[J]. [农业机械学报](#), 2019, 51(1): 1-14.

[17] ITO M, SAKAI K, HATA S, et al. Damage to the surface of the potatoes from collision[J]. [TASAE](#), 1994, 37(5): 1431-1433.

[18] DWELLE R B, STALLKNECHT G F. Rate of internal blackspot bruise development in potato tubers under conditions of elevated temperatures and gas pressures[J]. [Am Potato J](#), 1976, 53(7): 235-245.

[19] THOMSON G E, LOPRESTI J P. Size and temperature characteristics of potatoes help predict injury following impact collisions[J]. [New Zeal J Crop Hort](#), 2018, 46(1): 1-17.

[20] NIKARA S, AHMADI E, NIA A A. Scanning electron microscopy study of microstructure damage and micromechanical behavior of potato tissue by impact during storage[J]. [J Food Proc Eng](#), 2018, 41(6).doi:10.1111/jfpe.12831.

[21] 卢立新, 王志伟. 苹果跌落冲击力学特性研究[J]. [农业工程学报](#), 2007(2): 254-258.

[22] 李晓娟, 孙诚, 黄利强, 等. 苹果碰撞损伤规律的研究[J]. [包装工程](#), 2007(11): 44-46.

[23] BRUSEWITZ G H, BARTSCH J A, 吴劲松. 与苹果采摘后损伤有关的碰撞参量[J]. [力学进展](#), 1993(1): 135-140.

[24] 刘治震. 马铃薯碰撞问题及分选装备关键机构研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[25] 卢琦. 马铃薯损伤机理试验研究及联合收获机设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[26] 胡奔. 马铃薯跌落损伤机理与防损伤装置研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.

[27] 冯斌, 孙伟, 孙步功, 等. 收获期马铃薯块茎跌落冲击特性及损伤规律研究[J]. [振动与冲击](#), 2019, 38(24): 267-274.

[28] LEWIS R, YOXALL A, MARSHALL M B, et al. Characterising pressure and bruising in apple fruit[J]. [Wear](#), 2008, 264(1): 37-46.

[29] HEROLD B, GEYER M, STUDMAN C J. Fruit contact pressure distributions: Equipment[J]. [Compute Electron Agr](#), 2001, 32(3): 167-179.

[30] 司洪祥, 樊仕才, 徐艳军. 压敏片测量离体颈椎后路钢板固定术后关节突关节内压力的变化[J]. [中国组织工程研究与临床康复](#), 2007(26): 5125-5128.

[31] BACHUS K N, DEMARCO A L, JUDD K T, et al. Measuring contact area, force, and pressure for bioengineering applications: Using Fuji film and TekScan systems[J]. [Med Eng Phys](#), 2006, 28(5): 483-488.

[32] LU F, ISHIKAWA Y, KITAZAWA H, et al. Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique[J]. [J Food Eng](#), 2010, 96: 614-620.

[33] LU F, ISHIKAWA Y, KITAZAWA H, et al. Impact damage to apple fruits in commercial corrugated fiberboard box packaging evaluated by the pressure-sensitive film technique[J]. [J Food Agric Environ](#), 2010, 8: 218-222.

[34] 吴杰, 郭康权, 葛云, 等. 香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. [农业工程学报](#), 2012, 28(1): 250-254.

[35] 孙慧杰, 吴杰, 冯哲. 香梨跌落碰撞接触应力分布特性及损伤估测[J]. [食品与机械](#), 2013, 29(6): 183-186.

[36] 詹友发, 程炜, 舒俊华, 等. 早熟马铃薯新品种在湖北云梦的种植表现[J]. [中国农技推广](#), 2019, 35(11): 32-34.

[37] 鲁文娟, 叶巍, 丁建国, 等. “中薯 5 号”马铃薯品种特征特性及优质高产栽培技术[J]. [农业科技通讯](#), 2015(2): 140-141.

[38] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上、下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 1074-1084.

【责任编辑 霍 欢】