



引用格式:申阳,胡虎标,许广泰,等.马铃薯的累积损伤特性[J].科学技术与工程,2023,23(2):536-541.

Shen Yang, Hu Hubiao, Xu Guangtai, et al. Accumulative damage Characteristics of potato[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 536-541.

农业科学

马铃薯的累积损伤特性

申阳^{1,2}, 胡虎标^{1,2}, 许广泰^{1,2}, 陈琪^{1,2}, 周明刚^{1,2*}, 张超^{1,2}

(1. 湖北工业大学农机工程研究设计院, 武汉 430068; 2. 湖北省农机装备智能化工程技术研究中心, 武汉 430068)

摘要 马铃薯在采收、加工和运输过程中易受挤压、碰撞等作用而产生损伤。切取鲜食马铃薯试样,使用质构仪进行压缩试验模拟挤压和碰撞损伤,通过一个试样的多次压缩模拟累积损伤。通过分析马铃薯试样在不被破坏的前提下受一次、多次压缩后的位移-负载关系,研究经过多次不同负载压缩后马铃薯的塑性形变规律,分析其不同作用力多次作用下的累积损伤特性。结果表明:经多次累积作用,不会改变马铃薯的临界破坏点。马铃薯存在生物屈服点,当受力超过生物屈服点后可能不会破坏,但马铃薯会产生塑性形变,即损伤。得到了若经过多次压缩,马铃薯的损伤体积会累积增加,且当下一次压缩位移超出马铃薯试样压缩过的最大位移时,马铃薯的累积损伤体积增加较大;当下一次压缩位移小于马铃薯试样压缩过的最大位移时,累积损伤体积增加较小等损伤累积规律。研究结果对于马铃薯采收、加工、转运装备的减损设计有指导作用。

关键词 马铃薯; 损伤; 多次压缩; 累积损伤

中图分类号 S532; 文献标志码 A

Accumulative Damage Characteristics of Potato

SHEN Yang^{1,2}, HU Hu-biao^{1,2}, XU Guang-tai^{1,2}, CHEN Qi^{1,2}, ZHOU Ming-gang^{1,2*}, ZHANG Chao^{1,2}

(1. Research and Design Institute of Agricultural Machinery Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Agricultural Machinery Equipment Intelligent Engineering Technology Research Center, Wuhan 430068, China)

[Abstract] Potatoes are easily damaged by extrusion and collision during harvesting, processing and transportation. Fresh potato samples were cut as a specimen, a food texture analyzer was used to conduct compression tests to simulate extrusion and collision damages, and multiple compression of one sample was used to simulate accumulative damages. The displacement-load relationship of potato specimen was analyzed after being compressed for one or multiple times without being damaged. The plastic deformation characteristics of potato after multiple compression with different loads was studied, and its accumulative damage characteristics were analyzed. The results show that the critical failure point of potatoes will not change even under repeated loads, and there is a bio-yield point of potatoes when the force exceeds the bio-yield point, as well as potato plastic deformation which known as damages. The characteristics of potato accumulative damage show that the damage volume of potato will accumulate with multiple compression. Furthermore, the accumulative damage volume increases greatly when the next compression displacement exceeds the maximum displacement of the potato specimen compressed over, and the accumulative damage volume increases less when the next compression displacement is lower than the maximum displacement of the potato samples compressed over. The above results play a important role in the designing of potato harvesting, processing and transportation equipment.

[Keywords] potato; damage; multiple compression; accumulative damage

马铃薯在采收、加工和运输过程中都容易受到不同程度的碰撞、挤压等作用产生果肉变形、破裂^[1-4]。这些都会导致马铃薯更易受到细菌侵袭,从而影响食用品质、货架期和经济价值^[5-7]。

在果蔬损伤研究方面,中外学者对苹果^[8-9]、

梨^[10-12]、番茄^[13-14]等产品进行了广泛研究,但是对马铃薯的损伤研究相对较少,特别是多次受力作用下的累积损伤。冯斌等^[15]研究了跌落高度、碰撞材料、马铃薯含水率和跌落方向等因素对马铃薯块茎损伤程度的影响,以马铃薯碰撞后的最大变形量和

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 湖北省技术创新专项(2017ABA164); 湖北省教育厅科学技术研究计划中青年人才项目(Q20171403); 百校联百县项目(BXLBX0381)

第一作者: 申阳(1983—),男,汉族,河北邯郸人,博士,讲师。研究方向: 农业智能工厂化装备。E-mail: shenyang3335@126.com。

* 通信作者: 周明刚(1969—),男,汉族,湖北荆门人,博士,教授。研究方向: 机械动力学、农机装备研发。E-mail: 13659840598@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

恢复系数作为损伤评价指标,分析了其损伤规律,但并未进一步分析马铃薯的临界破坏条件和塑性变形规律。马稚昱等^[16]通过试验得出淀粉含量与马铃薯产生破坏的变形量正相关,但并未发现马铃薯的生物屈服点。谢胜仕等^[17]研究了马铃薯与不同材料碰撞的损伤临界值,但并未进一步研究碰撞材料对马铃薯损伤程度的影响。目前,中外学者主要研究马铃薯受到一次碰撞或挤压后的损伤特性,而未见有学者研究马铃薯在采收、加工和运输过程中的多次受力损伤问题。其结果具有一定的指导意义,但与实际结果还有一定差距。

根据马铃薯在收获、分级和打包过程中的运动情况,马铃薯在相关工作机中受到的碰撞、挤压作用往往并不止一次。因此,产生的损伤往往是连续多次碰撞或者挤压造成,研究马铃薯在经过多次受力后的累积损伤特性具有重要意义。

针对马铃薯在采收、加工和运输过程中的受力损伤问题,现设计马铃薯受到多次不同负载压缩后的实验方案,通过压缩试验得到负载-位移曲线^[18-19],确定马铃薯的临界破坏点。根据马铃薯受力后产生的塑性形变,探索多次压缩的力学特性变化规律,揭示马铃薯经多次受力后的累积损伤特性。

1 材料与方法

1.1 试验设备

马铃薯压缩特性主要采用美国 FTC 公司的质构仪 TMS-Pro 进行测试。质构仪主要由样品台、升降器、力传感器和探头 4 个部分组成。力检测精度 0.01 N,位移解析精度 0.01 mm,升降器速度准确度优于 0.1%。试验台架与电脑连接,专用软件可实时输出负载-位移曲线、负载-时间曲线和位移-时间曲线,获得有效的物性分析结果。

1.2 试验材料

参考《鲜食马铃薯等级质量标准(试行)GB/T 31784—2015》,马铃薯规格分为 4 个规格:小、中、大、特大薯。规格的划分如表 1 所示。

选用产自湖北的早大白中薯为试验对象。挑选皮色一致、表面光洁无擦伤、无病虫害、品相完好且收获后存放时间小于 72 h 的中薯若干。试验前清洗马铃薯表面并擦干,用打孔器在马铃薯中央部分提取圆柱形果肉进行参数测定。打孔器的内径和高分别为 12 mm 和 19 mm。

表 1 马铃薯规格表

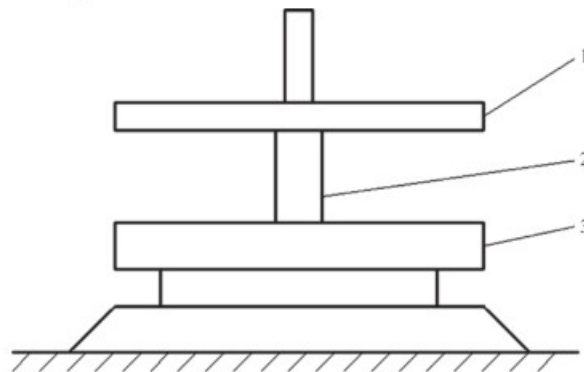
Table 1 Potato specification table

规格	特大	大	中	小
单薯质量/g	≥400	250~400	100~250	<100

1.3 试验方案

1.3.1 单次压缩试验

质构仪选用量程为 500 N 的力传感器,采用直径为 75 mm 的圆盘形探头。将马铃薯试样放置于样品台正中央,设置起始力为 1 N,以确保专用探头接触到马铃薯试样。探头运行速度恒定在 30 mm/min,进行准静态等速压缩试验。压缩深度为 9 mm,使马铃薯试样完全破坏。每组试验重复 20 次。压缩试验简图如图 1 所示。试验结果如图 2 所示。



1 为圆盘形探头;2 为马铃薯试样;3 为样品台

图 1 马铃薯试样压缩简图

Fig. 1 Sketch of potato sample compression

1.3.2 多次压缩的累积损伤试验

试验简图仍如图 1 所示。以压缩力模拟试样受到的破坏力,以试样的塑性变形标识试样受到的损伤体积大小。根据单次压缩试验,只有当压缩位移大于 6 mm 或者力大于 100 N 时才会发生破坏,因此,试验中如果不需要压缩至试样破坏,则压缩位移都需要控制在小于等于 6 mm 的范围内、压缩力控制在小于等于 100 N 的范围内。开展了下面 4 个累积损伤试验。

(1) 2 次不同位移压缩试验:试验设置起始力为 1 N。当探头压缩力为 1 N 时,将该位置设为探头位移零点。控制探头将马铃薯试样分别压缩 1、2、3、4、5、6 mm 后回归至位移零点,然后再一次控制探头将马铃薯试样压缩至完全破坏,输出位移-负载曲线。每组试验重复 10 次,共 6 组。试验结果如图 3 所示。

(2) 3 次不同位移压缩试验:类似前述试验过程,先将马铃薯试样分别压缩 1、2、3、4、5、6 mm,控制探头回到位移零点,然后将压缩过的马铃薯再一次分别压缩 1、2、3、4、5、6 mm,控制探头回归零点,最后再压缩至 9 mm,使马铃薯试样完全破坏。每组试验重复 10 次,共 36 组。试验结果如图 5 所示。

(3) 5 次相同负载压缩试验:类似前述试验过

程,位移起始点与位移零点设置保持不变,控制压缩探头向下移动,当力峰值达到 100 N 后返回位移零点,重复此过程 5 次,再压缩至破坏。试验结果如图 7 所示。

(4) 5 次相同位移压缩试验:类似前述试验过程,位移起始点与位移零点设置保持不变,控制探头向下移动 6 mm 后返回位移零点,重复此过程共 5 次,再压缩至破坏。试验结果如图 7 所示。

2 结果与分析

2.1 单次压缩试验分析

马铃薯圆柱形试样压缩 9 mm 的 20 组试验的位移-负载曲线如图 2 所示。由图 2 中可以看出,在压缩马铃薯试样过程中,马铃薯的压缩位移和负载近似呈正比例线性关系,图 2 中并未观察到明显的生物屈服点^[20]。马铃薯达到临界破坏点后,内部细胞组织破坏,细胞液大量飞速流出,承受负载的能力大幅下降。因此,曲线负载最高点为试样临界破坏点。

根据试验数据可得马铃薯临界破坏点的力范围在 105 ~ 160 N,破坏位移在 6.4 ~ 7.7 mm。临界破坏点的力平均值和位移平均值分别为 126.95 N 和 6.88 mm。

即使在同一块土地、相同环境下生长的马铃薯,会因为土壤的差异与吸收的养分不同导致生长的马铃薯个体之间产生差异,从而使马铃薯试样的压缩特性不完全相同。但从图 2 中可以看出马铃薯的位移负载曲线的变化趋势大致相同,破坏力和破坏位移始终保持在一定区间内。

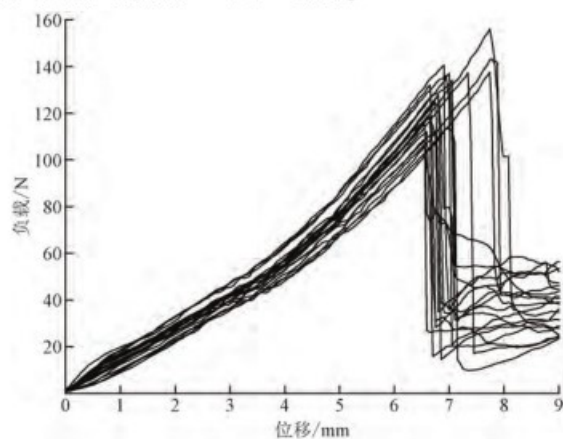


图 2 压缩 9 mm 的 20 组试验的位移-负载曲线

Fig. 2 Displacement-load curve for 20 tests with 9 mm compression

2.2 多次压缩的累积损伤分析

2.2.1 两次不同位移压缩试验分析

图 3 为先将马铃薯压缩 4 mm 后,再一次压缩至破坏的位移-负载曲线。由图 3 可以看出,马铃薯

第二次压缩的位移-负载曲线与第一次压缩的曲线相比,仅在 0 ~ 4 mm 压缩区间内不同。图 3 中第一次压缩的位移-负载曲线与第二次压缩的 4 ~ 9 mm 的曲线(如图 3 中散点描绘的曲线)一起构成较完整的类似仅压缩一次的位移-负载曲线(如图 2 的一条曲线)。

将两次压缩试验中的 6 组破坏力取平均值,其值分别为 120.27、132.69、127.81、121.35、123.85、122.38 N。两次压缩试验中破坏力的平均值与单次压缩试验中的破坏力平均值较为接近。

马铃薯第二次压缩检测到力的位移起始点为 1.17 mm,说明在经过第一次压缩后,马铃薯已经发生塑性变形,变化量为 1.17 mm。由此可以看出,压缩负载在未达到马铃薯的临界破坏点时,也会产生不可恢复的塑性变形,即马铃薯发生损伤。

取第二次压缩的力起始点为马铃薯试样第一次压缩后的塑性形变,将每组的塑性形变取平均值。经过六组试验,得到马铃薯的压缩位移与塑性形变规律如图 4 所示。

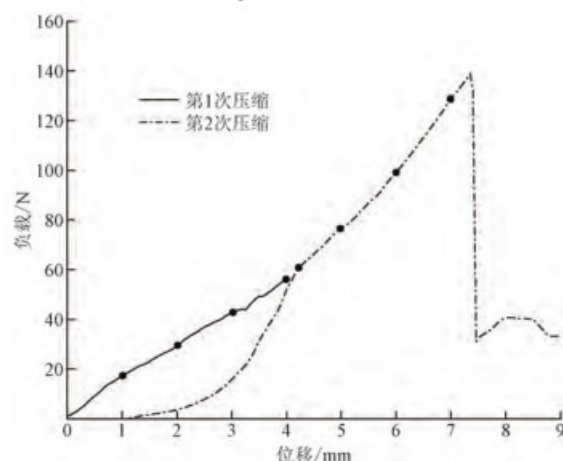


图 3 两次不同位移压缩曲线

Fig. 3 Compression curve of two different displacement

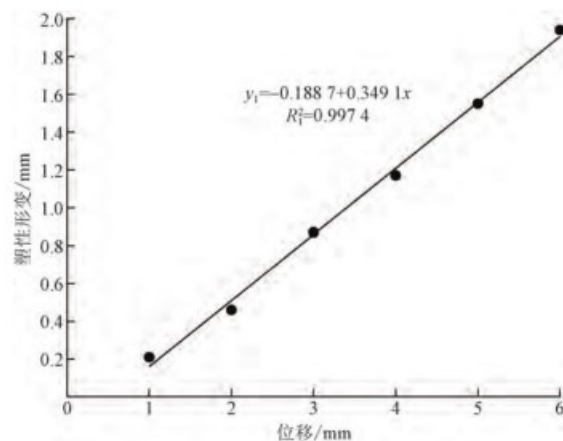


图 4 位移-塑性形变曲线

Fig. 4 Displacement-plastic deformation curve

由图4可知,马铃薯第一次压缩位移越大,其产生的塑性形变就越大,马铃薯试样压缩位移与塑性形变量近似呈正比例线性关系。通过对试验数据进行一元线性回归分析,得到其回归方程(图4),可知回归模型与实际值较为接近。根据回归方程预测,当马铃薯压缩位移小于0.54 mm时,马铃薯试样不产生塑性形变,压缩位移区间为马铃薯试样的弹性范围。即马铃薯受力时,首先产生弹性形变,压缩位移0.54 mm是马铃薯的弹性极限,受力超出弹性极限后,马铃薯产生塑性形变。

在压缩力达到一定值后,马铃薯内部微观组织产生破坏,产生不可恢复的塑性形变,该值即为马铃薯的生物屈服点。因此,本试验中弹性极限为马铃薯的生物屈服点,马铃薯产生生物屈服的外观表现为塑性形变,产生生物屈服的组织越多,塑性形变越大。

2.2.2 三次不同位移压缩试验分析

图5为一个马铃薯圆柱形试样压缩3次的位移-负载曲线,第1次压缩2 mm,第2次压缩4 mm,第3次压缩9 mm。由图5可以看出,类似于两次不同位移压缩试验分析,图5中第1次压缩的位移-负载曲线、第2次压缩的2~4 mm的曲线和第3次压缩的4~9 mm的曲线(如图5中散点描绘的曲线)一起构成较完整的类似仅压缩一次的位移-负载曲线(如图2的一条曲线)。

第2次压缩的力起始点为马铃薯试样第1次压缩后的塑性形变,第3次压缩的力起始点为马铃薯试样第2次压缩后的塑性形变,依此类推。从图5可以看出,第2次压缩后的塑性形变明显大于第1次压缩后的塑性形变,说明损伤体积明显增大,损伤体积可以累积增加。也再一次印证了马铃薯受力未达到临界破坏点时,马铃薯会发生生物屈服和损伤。

取第2次压缩的力起始点为马铃薯试样第1次压缩后的塑性形变,取第3次压缩的力起始点为马

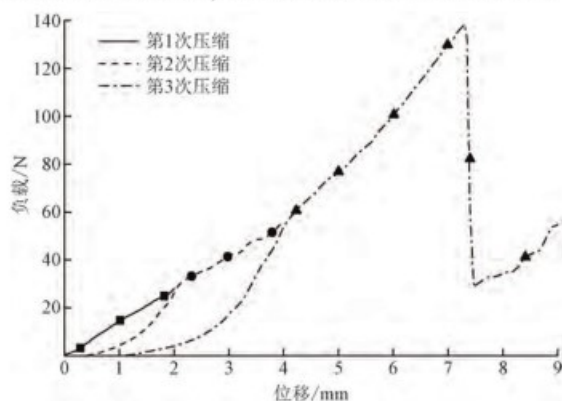


图5 3次不同位移压缩曲线

Fig. 5 Compression curve of three different displacement

铃薯试样第2次压缩后的塑性形变。将每组10次的塑性形变取平均值,记录36组试验得到第2次压缩增加的塑性形变增加量与第2次压缩位移的数据,两者关系如图6所示。

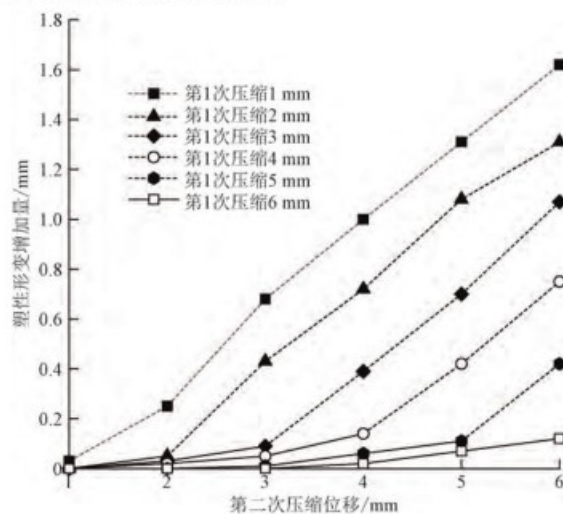


图6 塑性形变增加曲线

Fig. 6 Plastic deformation increase curve

从图6可以看出,经过第2次压缩后,塑性形变量都会增大。但是,当第2次压缩位移小于第1次压缩位移时,马铃薯塑性形变增加较小;当第2次压缩位移大于第1次时,马铃薯塑性形变增加量几乎呈线性增长。

针对图6中第2次压缩位移大于第1次压缩位移的试验数据(如图6中点划线部分)分别进行一元线性回归分析或求解一元方程。塑性形变增加量与第2次压缩位移的线性回归方程和一元方程分别为

$$y_2 = -0.3300 + 0.3271x, \quad R^2 = 0.9957 \quad (1)$$

$$y_3 = -0.5500 + 0.3170x, \quad R^2 = 0.9943 \quad (2)$$

$$y_4 = -0.9000 + 0.3250x, \quad R^2 = 0.9975 \quad (3)$$

$$y_5 = -1.0883 + 0.3050x, \quad R^2 = 0.9978 \quad (4)$$

$$y_6 = -1.4400 + 0.3100x \quad (5)$$

从5个线性回归方程可以看出其斜率几乎相等,即增加的塑性形变与压缩位移呈相同系数的正比例关系,取5个斜率平均值 $k=0.3168$ 。

由此知经过多次压缩后,马铃薯的塑性形变量均有不同程度的累积增加。

2.2.3 5次相同负载压缩与相同位移压缩

根据5次相同负载压缩试验和5次相同位移压缩试验描述,可以得到马铃薯的位移-负载曲线。同样取后一次压缩的力起始点为试样前一次压缩后的塑性形变,得到压缩5次的塑性形变。将每组的塑性形变取平均值,记录塑性形变与压缩次数之间的关系,得到两者之间的规律如图7所示。

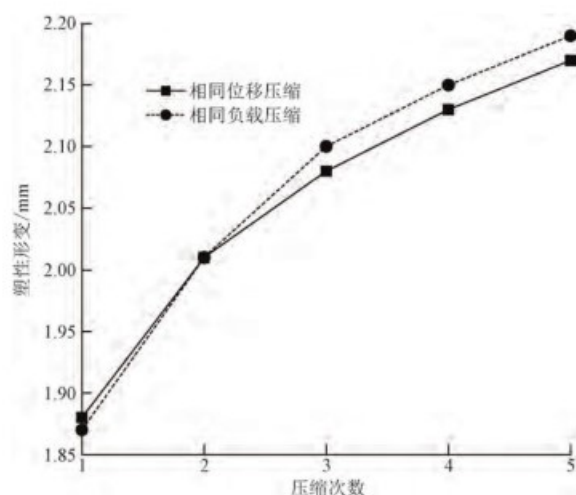


图7 5次相同负载和相同位移压缩曲线

Fig. 7 Compression curve of five times the same load and same displacement

从图7中可以看出,每压缩一次,马铃薯的塑性形变都会累积增加,且增加程度逐渐减小。经相同负载压缩产生的塑性形变的增加程度略大于相同位移压缩产生的塑性形变。

如果将马铃薯形状看作半径为35 mm圆球,塑性形变区域等同于损伤体积。马铃薯的5次相同负载压缩试验使马铃薯的塑性形变由1.88 mm增加至2.17 mm,5次相同位移压缩试验使马铃薯塑性形变由1.86 mm增加至2.19 mm。根据球缺的体积计算公式可以计算出5次相同负载压缩和5次相同位移损伤体积增加的百分比分别为32.85%和38.19%。由此,虽然马铃薯塑性形变看起来增加较小,但其实损伤体积明显增大。

3 结论

切取鲜食马铃薯圆柱形试样,进行压缩试验,模拟马铃薯受到的压缩、碰撞等作用。通过多次连续压缩试验,研究马铃薯在多次作用下的损伤累积特性,得出以下结论。

(1) 马铃薯试样本身的差异性,使马铃薯临界破坏点力范围在105~160 N内波动。临界破坏点的力平均值和力的范围相差不大,可以得出马铃薯经过多次累积作用,不会改变马铃薯的临界破坏点。

(2) 马铃薯的弹性极限为生物屈服点。马铃薯受力超过生物屈服点且未达到临界破坏点时,会产生不可恢复的塑性形变,即产生损伤。马铃薯的生物屈服点并不明显,无法通过单次压缩的位移-负载曲线直接得出,但可以通过对塑性形变与压缩位移的数据进行一元线性回归预测得出。

(3) 马铃薯受力超过生物屈服点后,马铃薯受

到多次作用产生的损伤体积会累积增加。当下一次压缩位移超出马铃薯试样压缩过的最大位移时,马铃薯的累积损伤体积增加较大,且累积损伤体积的增加与压缩位移呈正比例线性关系;当下一次压缩位移小于马铃薯试样压缩过的最大位移时,马铃薯的累积损伤体积增加较小。

(4) 在设计马铃薯采收、加工、转运装备时尽可能地减小马铃薯碰撞力之外,还需要尽可能减少碰撞次数从而避免损伤累积,以降低马铃薯的损伤概率和损伤程度。本文研究主要根据马铃薯受力产生的塑性形变标识损伤体积,而实际中马铃薯损伤体积大小会使马铃薯产生果肉产生不同程度的褐变,根据褐变程度将马铃薯的损伤程度分级。因此有必要进一步研究塑性形变与损伤程度之间的关系。

参 考 文 献

- [1] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 103-113.
Lü Jinqing, Yang Xiaohan, Lü Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103-113.
- [2] Xie S, Wang C, Deng W. Experimental study on collision acceleration and damage characteristics of potato[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(9): e13457. 1-e13457. 7.
- [3] Xie S, Wang C, Deng W. Model for the prediction of potato impact damage depth[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2517-2526.
- [4] 戚得众, 郭林, 阮晓松, 等. 果园运输车减振降噪性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9775-9781.
Qi Dezong, Guo Lin, Ruan Xiaosong, et al. Vibration reduction and loss reduction performance of orchard transport trolley[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9775-9781.
- [5] Li J, Ma Y, Tong J, et al. Mechanical properties and microstructure of potato peels[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1395-1413.
- [6] Graeme E T, John P L. Size and temperature characteristics of potatoes help predict injury following impact collisions[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2018, 46(1): 1-17.
- [7] 姜宏, 于永波, 章翔峰, 等. 马铃薯外部品质分级方法综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5519-5527.
Jiang Hong, Yu Yongbo, Zhang Xiangfeng, et al. Potato external quality grading methods: a review[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5519-5527.
- [8] Ahmadi E, Barikloo H, Kashfi M. Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 1-11.
- [9] Stopa R, Szyjewicz D, Komarnicki P, et al. Limit values of impact energy determined from contours and surface pressure distribution of

- apples under impact loads[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 1-9.
- [10] 欧阳爱国, 侯兆国, 肖毅华, 等. 基于压缩实验的酥梨果肉弹性模量和泊松比[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 82-87. Ouyang Aiguo, Hou Zhaoguo, Xiao Yihua, et al. Elastic modulus and poisson's ratio of pear fruit flesh based on compression experiment[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 82-87.
- [11] Pham Q T, Liou N. Investigating texture and mechanical properties of Asian pear flesh by compression tests[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(8): 3671-3674.
- [12] Stopek Z, Golacki K. Impact characteristics of pears[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2019, 147: 100-106.
- [13] 章永年, 张任飞, 孙晔, 等. 局部按压对不同成熟度番茄机械损伤的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 292-298. Zhang Yongnian, Zhang Renfei, Sun Ye, et al. Effects of local compression on the mechanical damage of tomato with different maturity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 292-298.
- [14] Li Z, Andrews J, Wang Y. Mathematical modelling of mechanical damage to tomato fruits[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 126: 50-56.
- [15] 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. Feng Bin, Sun Wei, Sun Bugong, et al. A study on dropping impact characteristics and damage regularity of potato tubers during harvest[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 267-274.
- [16] 马雅昱, 骆少明, 孟庆书, 等. 南方冬种马铃薯压缩力学特性与理化指标相关性研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4): 64-71. Ma Zhiyu, Luo Shaoming, Meng Qingshu, et al. Study on correlation between the compression characteristics and chemical indices of winter planting potatoes in southern China[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(4): 64-71.
- [17] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 163-169. Xie Shengshi, Wang Chunguang, Deng Weigang. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 163-169.
- [18] Ahangarnezhad N, Najafi G, Jahanbakhshi A. Determination of the physical and mechanical properties of a potato (the Agria variety) in order to mechanise the harvesting and post-harvesting operations[J]. Research in Agricultural Engineering, 2019, 65(2): 33-39.
- [19] Shahgholi G, Latifi M, Jahanbakhshi A. Potato creep analysis during storage using experimental measurement and finite element method (FEM)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): e13522.
- [20] Zulkifli N, Hashim N, Harith H H, et al. Finite element modelling for fruit stress analysis-a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 29-37.