

马铃薯的弹塑性力学特性试验及其损伤分析

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: 研究马铃薯的力学特性,可以指导马铃薯收获、加工、运输装备的设计,有效减少机械损伤。传统的研究均将马铃薯作为线弹性材料,没有发现生物屈服点。为此,切取鲜食马铃薯圆柱形试样,使用质构仪进行压缩试验,通过马铃薯的力-位移关系,发现了马铃薯的弹塑性规律;同时,计算出马铃薯破坏应力、弹性模量、切线模量和泊松比,并据此进行了损伤的有限元分析。研究结果表明:马铃薯存在生物屈服点;试样压缩力达到生物屈服点后,压缩位移与塑性变形量近似呈正比例线性关系;马铃薯在受到碰撞作用时,塑性变形主要发生在以马铃薯碰撞点为切点的内切球范围内,即马铃薯内部。研究结果符合弹塑性材料的力学特性,与现有的损伤试验结果吻合。

关键词: 马铃薯; 力学特性; 压缩试验; 塑性变形; 有限元分析

中图分类号: S183; S532

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2024)08-0174-05

0 引言

马铃薯在收获、加工、运输过程中容易发生挤压和碰撞,引起马铃薯变形、破裂和内部淤伤,严重影响马铃薯的外观和品质,造成大量经济损失^[1-3]。因此,减少马铃薯加工链中的损伤、研究马铃薯的生物力学特性具有重要意义。

马铃薯在发生挤压和碰撞作用后,其内部部分细胞破坏,会发生生物屈服现象。即使马铃薯外部并未破裂,也会产生不可恢复的塑性变形,引起损伤^[4]。因此,马铃薯在受到挤压和碰撞作用后会产生3种状态,即未损伤、塑性变形产生的损伤和外表破裂。近年来,为了减少马铃薯的机械损伤,国内外学者对马铃薯的力学特性和机械损伤进行了广泛研究^[5-9]。仲恺农业工程学院的马稚昱、骆少明等以及内蒙古农业大学的郭文斌、王春光等对马铃薯进行了压缩试验,但未发现马铃薯的生物屈服点^[10-11]。中国农业大学的桑永英、张东兴等以及石河子大学的郭世鲁、王卫兵等在进行有限元仿真时均将马铃薯看作线弹性体进行研究^[12-13]。但是,将马铃薯视为弹性体进行有限元仿真,只能通过等效应力最大值判断马铃薯是否破

裂,而无法判断马铃薯因塑性变形而产生的损伤,其结果有一定的指导意义,但与实际结果还有一定差距。甘肃农业大学的冯斌、孙伟等发现马铃薯受到碰撞、挤压作用后会发生塑性变形,但并未进行更加深入的研究^[14]。

本研究切取鲜食马铃薯圆柱形试样,根据马铃薯试样在压缩后会产生不可恢复的塑性变形这一特征,发现了马铃薯的弹塑性规律和生物屈服点。通过试验,得到了马铃薯的破坏应力、弹性模量、切线模量及泊松比等弹塑性力学参数,并以马铃薯的生物屈服点作为弹塑性材料的屈服点,通过有限元分析得到马铃薯受力后的应变云图以及马铃薯碰撞后的损伤规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验使用马铃薯样品从合作工厂挑选,品种为产自湖北的早大白。挑选马铃薯单果质量在100~200g之间、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72h的马铃薯若干。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12mm和19mm。

1.2 试验设备

马铃薯压缩试验主要采用美国FTC公司的质构仪TMS-Pro进行。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。试验台架与电脑连接,专用软件可实时输出力-位移曲线、力-时间曲线和位

收稿日期: 2022-07-06

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划项目(Q20171403); 百校联百县项目(BXLBX0381)

作者简介: 申阳(1983-),男,河北邯郸人,讲师,博士,(E-mail) shenyang3335@126.com。

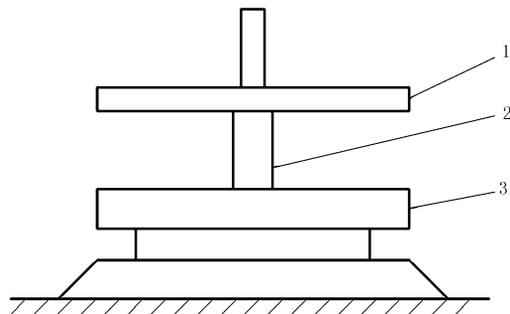
通讯作者: 周明刚(1969-),男,湖北荆门人,教授,硕士生导师,(E-mail) 13659840598@163.com。

移-时间曲线,以获得有效的物性分析结果。

1.3 试验方案

1.3.1 破坏力与破坏位移试验

将马铃薯试样放置于样品台正中央,设置起始力为1N,以确保专用探头接触到马铃薯试样;探头运行速度恒定在30mm/min,进行准静态等速压缩试验;压缩深度为9mm,使马铃薯试样完全破坏,每组试验重复20次。压缩简图如图1所示,20次试验的力-位移关系如图2所示。



1. 圆盘形探头 2. 马铃薯 3. 样品台

图1 马铃薯试样压缩简图

Fig.1 Sketch of potato specimen compression

1.3.2 弹性模量与切线模量试验

根据马铃薯的破坏应力与破坏位移试验,马铃薯临界破坏点的力范围在105~160N之间,破坏位移在6.4~7.7mm之间。设置质构仪起始力为1N,并将此点作为位移零点。为了确保马铃薯不被破坏,将马铃薯试样分别压缩1、2、3、4、5、6mm后控制探头回归位移零点;经过第1次压缩后,将马铃薯试样静置5min;然后再一次将马铃薯压缩至5mm,位移零点与第1次压缩的位置相同。每组试验重复10次,共60组。

1.3.3 泊松比试验

控制质构仪探头运行速度恒定在30mm/min,将马铃薯试样压缩5mm后并保持该状态不变,使用游标卡尺测量此状态下3个不同部位的直径并进行记录。试验重复10次,共10组。

2 结果与分析

2.1 破坏力与破坏位移试验分析

由图2可以看出:马铃薯试样在压缩过程中没有明显的斜率变化点。因此,马稚昱、郭文斌等人未发现马铃薯的生物屈服点^[10-11]。马铃薯的力-位移曲线近似呈正比例线性关系,图2中力峰值点为马铃薯的临界破坏点。根据20组试验数据可知:临界破坏点的力范围在105~160N之间,破坏位移在6.4~7.7mm之间;临界破坏点的力平均值和位移平均值分别为126.95N和6.88mm,平均破坏应力为1.12MPa。

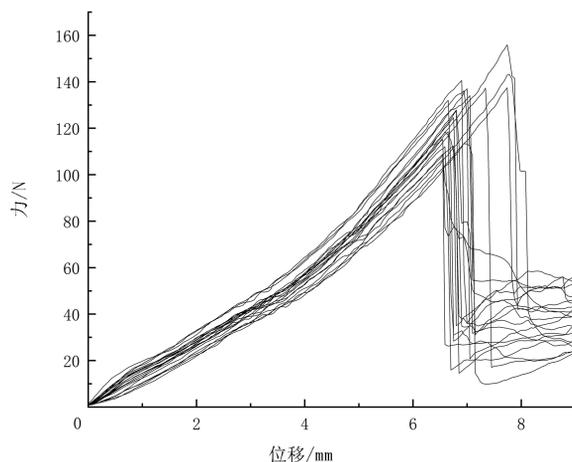


图2 压缩9mm的力-位移曲线

Fig.2 Force-displacement curve for 9mm compression

2.2 弹性模量与切线模量试验分析

2.2.1 马铃薯加载与卸载分析

根据弹性模量与切线模量试验,马铃薯试样第1次压缩3mm、第2次压缩5mm的力-位移曲线如图3所示。

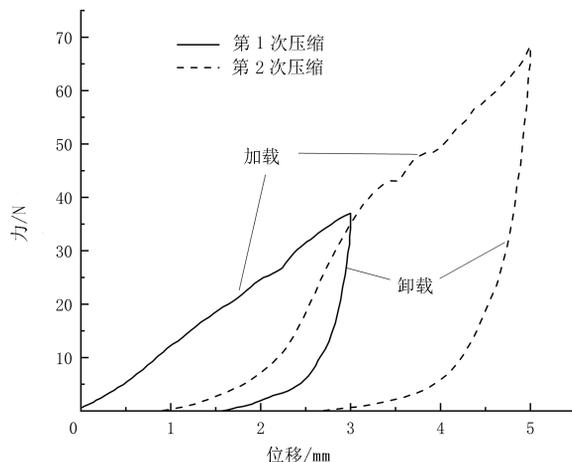


图3 压缩两次的力-位移曲线

Fig.3 Force-displacement curve for two compression

由图3可知:马铃薯试样的加载、卸载曲线并不完全相同。这说明,马铃薯试样在受力过程中发生了塑性变形。

马铃薯第2次压缩的加载曲线与第1次压缩的卸载曲线不重合,可能是由于马铃薯试样卸载后弹性恢复需要一定的时间,即马铃薯卸载完成后试样仍处于弹性恢复的状态。因此,卸载曲线的力零值点对应的位移不是马铃薯的塑性变形。马铃薯弹性变形完全恢复后,质构仪进行第2次压缩,此时压缩的力起始点即为马铃薯第1次压缩产生的塑性变形。

取第2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,将每组的塑性变形取平均值,其位移-塑性变形关系如图4所示。

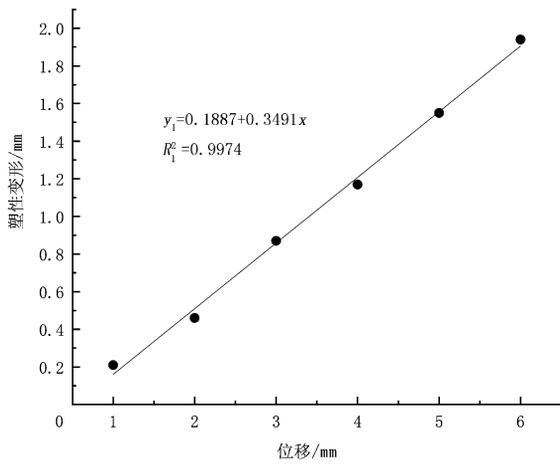


图4 塑性变形与位移图

Fig. 4 Plastic deformation and displacement diagram

由图4可知:马铃薯第1次压缩的位移越大,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的回归方程可知,回归模型与实际值较为接近。回归方程预测表明:当马铃薯压缩位移小于0.54mm时,试样不产生塑性变形,压缩位移0~0.54mm为试样的弹性范围。因此,可以将马铃薯简化为弹塑性体。

马铃薯受力时先产生弹性形变,压缩位移0.54mm是马铃薯的弹性极限;受力超过弹性极限后,马铃薯产生塑性形变,即产生生物屈服的压缩位移为0.54mm。马铃薯发生生物屈服的压缩位移较小,不易从力-位移曲线上直接发现,故生物屈服点极易忽略。根据图2中的20组力-位移曲线,计算出生物屈服点对应的力平均值为7.82N,屈服应力为0.069MPa。

2.2.2 弹塑性材料变形理论

理想的弹塑性材料的加载与卸载曲线如图5所示。图5中,加载段OA为弹性阶段,材料仅发生可恢复的弹性变形;受力超过A点后,材料将会发生塑性变形,随着力的增加,产生的弹性变形不变,塑性变形增加。卸载过程为材料的弹性变形恢复阶段(见图2中的BC段),OC为马铃薯的塑性变形量^[15]。

2.2.3 切线模量

由于马铃薯的生物屈服点的力较小,且生物屈服点前后的负载-位移斜率并无明显变化,因此切线模量可以近似根据压缩曲线上任意一点的数值计算。切线模量的计算公式为

$$E_T = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fh}{\pi r^2 l} \quad (1)$$

式中 E_T —切线模量(MPa);
 F —压缩曲线上任意一点的力(N);
 h —马铃薯试样的高(mm);
 l —马铃薯试样的压缩位移(mm);
 r —马铃薯试样半径(mm)。

将马铃薯分别压缩1、2、3、4、5、6mm后,压缩位移、力平均值、塑性变形的关系如表1。

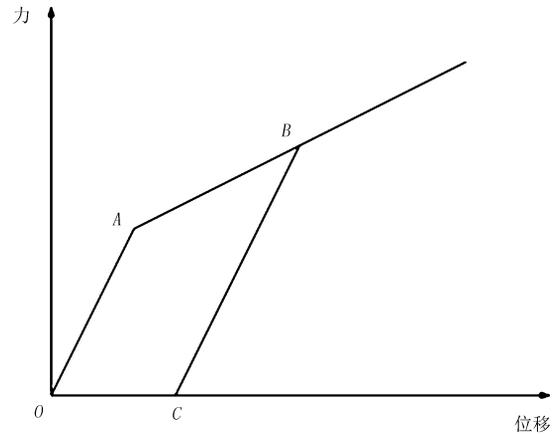


图5 弹塑性材料加载与卸载曲线

Fig. 5 Loading and unloading curves of elastic-plastic material

表1 力、位移与塑性变形

Table 1 Force, displacement and plastic deformation

位移/mm	力/N	塑性变形/mm
1	14.48	0.21
2	28.26	0.46
3	41.28	0.87
4	56.57	1.17
5	77.12	1.55
6	101.35	1.94

由表1数据计算可得:马铃薯试样在不同压缩位移下的切线模量分别为2.56、2.50、2.43、2.50、2.73、2.99MPa。切线模量先减小后增大,即力-位移曲线斜率先减小后增大,马铃薯在产生变形时的力-位移关系曲线呈S型,属于典型的干聚合物物料^[16]。为了简化模型,取马铃薯切线模量平均值2.62MPa。

2.2.4 弹性模量

根据马铃薯压缩后产生塑性变形,可以将马铃薯的加载与卸载曲线简化,如图6所示。卸载曲线的斜率直接影响马铃薯的塑性变形,图6中卸载曲线类似于图5中的BC段。因此,根据卸载后塑性变形的变化计算马铃薯的弹性模量。

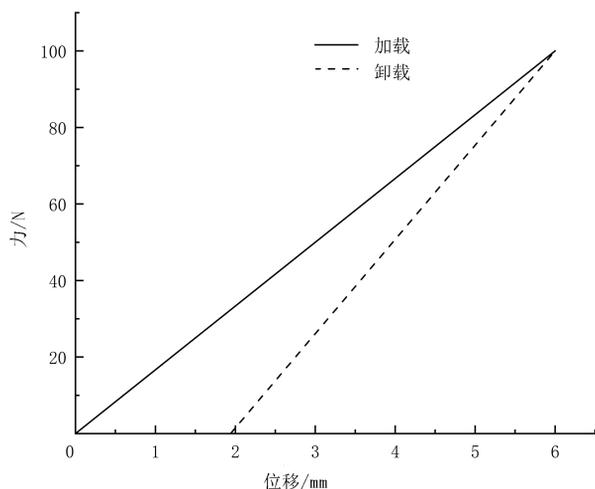


图6 压缩曲线简化

Fig. 6 Simplified compression curve

弹性模量计算公式为

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fh}{\pi r^2(l - l_1)} \quad (2)$$

式中 E —弹性模量 (MPa);

l_1 —塑性变形 (mm)。

根据表1数据,计算出弹性模量分别为3.24、3.25、3.43、3.54、3.95、4.42MPa,取马铃薯弹性模量平均值为3.64MPa。

2.3 泊松比

以马铃薯试样压缩方向为轴向,以马铃薯试样直径方向为横向,则马铃薯泊松比为轴向应变与横向应变之比,计算公式为

$$\mu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\Delta d \cdot h}{l \cdot d} \quad (3)$$

式中 μ —马铃薯泊松比;

d —马铃薯试样直径 (mm);

Δd —马铃薯试样压缩后直径的变化量 (mm)。

根据公式(3)计算出泊松比平均值为0.44。

3 弹塑性马铃薯碰撞的有限元分析

3.1 实验模型

以往的文献将马铃薯视为弹性体进行有限元分析,只能通过马铃薯在碰撞瞬间的应力云图判断马铃薯是否破裂,无法判断马铃薯外部完好而内部损伤的情况。基于马铃薯受力后会产生未损伤、内部损伤和完全破坏的3种状态,将马铃薯当做弹塑性体进行有限元分析。

马铃薯主要呈圆形和椭圆形,为了便于计算,将马铃薯简化为半径35mm的球体,将与马铃薯碰撞的加工装备简化为平板。马铃薯的碰撞过程本质上是马铃薯以一定的速度撞击接触面,因此可以根据马铃薯跌落的高度不同设置马铃薯与接触面碰撞的初速度。

3.2 基本参数设置

马铃薯碰撞的有限元分析需要确定马铃薯的力学参数,本研究将马铃薯视为各向同性的弹塑性材料。马铃薯在碰撞过程中与加工装备直接接触,因两者的弹性模量和屈服应力相差较大,可将机架设置为刚体。根据前文计算,设置马铃薯的弹性模量为3.64MPa,切线模量平均值为2.62MPa,屈服应力为0.069MPa,泊松比为0.44,破坏应力为1.12MPa,密度为1.05g/cm³[17]。

运用有限元软件分析马铃薯与加工装备碰撞,使用显示分析进行仿真。在碰撞过程中,马铃薯的形变较大,为了防止应力奇异的发生和减小计算量,将马铃薯划分为六面体单元,接触设置为刚体与柔体的面-面接触。马铃薯的建模和网格划分如图7所示。

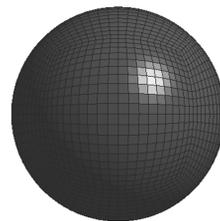


图7 马铃薯网格划分图

Fig. 7 Potato grid division diagram

3.3 仿真结果与分析

通过仿真计算,获得了马铃薯碰撞后的应变云图,马铃薯以3m/s的速度撞击接触面的应变云图如图8~图10所示。

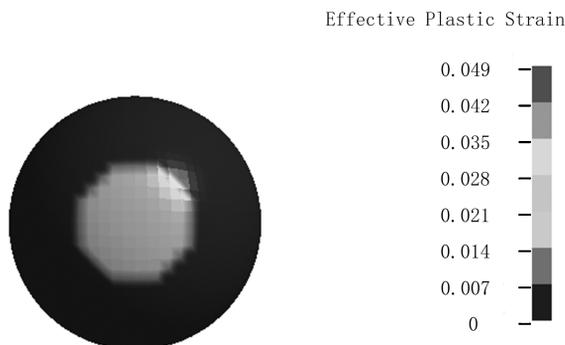


图8 马铃薯仰视应变云图

Fig. 8 Effective plastic strain for potato elevation view

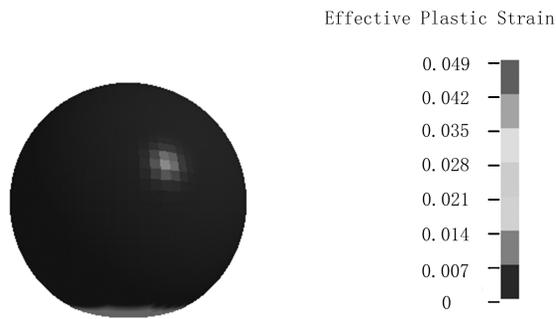


图9 马铃薯正视应变云图

Fig.9 Effective plastic strain for potato front view

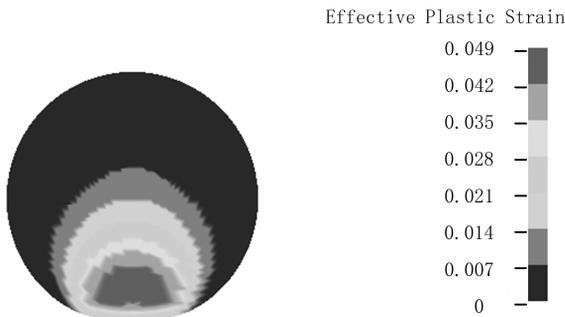


图10 马铃薯剖面应变云图

Fig.10 Effective plastic strain for potato profile view

当马铃薯受力超过屈服应力后会产生塑性变形,即马铃薯内部微观结构发生破坏且产生损伤。因此,以马铃薯的塑性变形表示马铃薯的损伤位置。由图8~10可以看出:马铃薯的损伤主要发生在以马铃薯碰撞点为切点的内切球范围内,最大应变发生在碰撞点的正上方,即损伤更容易发生在马铃薯的内部。仿真结果与中国农业大学的桑永英和石河子大学的郭世鲁所做的马铃薯碰撞试验完全吻合^[10,18],即马铃薯在碰撞后,即使没有完全破裂,达到马铃薯的生物屈服点后也会产生损伤。将马铃薯视为弹性体进行有限元的仿真,只能通过等效应力最大值判断马铃薯是否破裂;而将马铃薯视为弹塑性体进行仿真,可以输出等效应变云图,不仅可以判断马铃薯的破坏条件,还可以直观地看出马铃薯的损伤部位。因此,将马铃薯视为弹塑性体进行仿真更为合适。

4 结论

1) 马铃薯在受力达到生物屈服点后,虽然力-位移曲线斜率变化不明显,但还是会产生不可恢复的塑性变形(即损伤)。

2) 相比于弹性体,将马铃薯视为弹塑性体进行有限元仿真更加合理,不仅可以判断马铃薯的破坏条件,还可以直观地看出马铃薯的损伤部位。

3) 马铃薯在受到碰撞作用后,损伤主要发生在以

马铃薯碰撞点为切点的内切球范围内。

4) 马铃薯在受到挤压或碰撞作用后,即使没有完全破裂,达到马铃薯的生物屈服点后也会产生损伤。

参考文献:

- [1] 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(9):2837-2840.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 甘露萍,张建. 紫色马铃薯力学特性试验研究[J]. 成都大学学报(自然科学版),2016,35(3):225-228.
- [6] 石林榕,吴建民,孙伟,等. 马铃薯整茎压缩力学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):189-195,204.
- [7] 王咏梅,孙伟,王关平. 马铃薯压缩力学性能试验研究[J]. 农机化研究,2015,37(3):170-174.
- [8] BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R, et al. Physico-mechanical properties of potato tubers during cold storage[J]. Biosystems engineering, 2009,140(1):25-32.
- [9] EDRRIS M K, AL-GAADI K A, HASSABALLA A A, et al. Impact of soil compaction on the engineering properties of potato tubers[J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2020, 13(2):163.
- [10] 马稚昱,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.
- [11] 郭文斌,王春光,王芳,等. 马铃薯压缩特性与淀粉含量相关性研究[J]. 农机化研究,2009,31(12):133-137.
- [12] 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.
- [13] 郭世鲁,王卫兵,陈绍杰,等. 小型马铃薯收获机薯机碰撞有限元分析[J]. 中国农机化学报,2016,37(5):14-17.
- [14] 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.
- [15] 黄海明,郭然. 计算固体力学[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [16] 马云海. 农业物料学[M]. 北京:化学工业出版社,2015.

(下转第185页)

Study on Adaptability of Mechanized Transplanting of Capsicum Floating Seedlings

Wu Xuemei^a, Guan Yixuan^b, Gen Guangdong^b, Zhang Dabin^a

(a. College of Mechanical Engineering; b. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the adaptability of capsicum floating seedlings to mechanized transplanting, the capsicum floating seedlings at the appropriate planting period in a capsicum base in Guizhou and 2ZB-2 dry land hanging cup duckbill clip transplanter were tested. The experimental studies on the measurement of capsicum seedling morphological characteristic parameters, seedling media loss and field mechanized planting were completed. The results show that the media of the floating seedlings was full, and it is suitable for the common duckbill clip planter. When the moisture content of media of floating seedlings is 56.4~63.5%, it is beneficial to maintain the media of mechanical transplanting. The qualified rate of planting depth, the rate of missed planting and the rate of injured seedlings were 76.7%, 2.4% and 3.2% respectively, which meet the index requirements; The acceptable rate of straightness is 88.7%, which is lower than the lower limit of 93%. In general, the adaptability of capsicum floating plate seedling and transplanter is good, which can basically meet the requirements of mechanized capsicum planting in Guizhou.

Key words: capsicum; floating seedling; mechanized transplanting; dry land transplanter; planting performance

(上接第178页)

[17] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报,2018,34(6):35-42.

[18] 郭世鲁,王卫兵,李猛,等. 马铃薯机械碰撞有限元分析与试验研究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(1):56-59.

Abstract ID:1003-188X(2024)08-0174-EA

Elastic-plastic Mechanical Characteristic Test and Damage Analysis of Potato

Shen Yang^{1,2}, Hu Hubiao^{1,2}, Xu Guangtai^{1,2}, Chen Qi^{1,2}, Zhou Minggang^{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: The study of the mechanical characteristics of potatoes can guide the design of potato harvesting, processing and transportation equipment to effectively reduce damage of potatoes. Traditionally, potato is considered as a linear elastic material and no bio-yield point. In this paper, fresh potato samples are cut as a cylindrical specimen and conducted compression tests using a Food Texture Analyzer. The elastic-plastic characteristics of potatoes is discovered through the force-displacement relationship of potato specimen. The potato failure stress, elastic modulus, tangential modulus and Poisson's ratio are calculated from the compression tests, and the finite element analysis is conducted. The results show that there is a bio-yield point in potatoes. After the compression force of the potato specimen exceeds the bio-yield point, the compression displacement and plastic deformation are approximately proportional linear relationship. When potatoes are impacted, damage is more likely to occur inside the potato and occurs mainly within the inner tangent sphere with the potato collision point as the tangent point, which is consistent with the mechanical characteristics of elastic-plastic material and with the existing damage experimental results.

Key words: potato; mechanical characteristic; compression test; plastic deformation; finite element analysis