

面向采摘机械手的蒜薹力学特性试验研究

朱新华 赵洲 郭文川

(西北农林科技大学 机械与工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 为确定蒜薹的机械化采摘参数,以收获期蒜薹为对象,进行不同部位蒜薹的拉伸和压缩试验,以及整根蒜薹的拉伸试验。结果表明:拉伸初期,拉应力与应变近似线性增长,表现出弹性材料的特征;当应变增大到一定值时,拉应力随着应变缓慢增大,表现出弹塑性材料的特征。从顶部到根部,蒜薹的最大拉应力单调递减,最大压力总体呈现减小的趋势,蒜薹的弹性性能逐渐减弱,相同压力下的压缩变形量依次减小。当拉伸速度为 20 mm/min 时,90%的蒜薹在根部断裂,此时最大拉应力为 (1.2 ± 0.1) MPa,最大应变为 0.15 ± 0.04 。采摘机械手夹持蒜薹的最佳部位为蒜薹中部以上,夹持载荷应 <4.1 N/mm。可用对数函数和多项式函数分别表达蒜薹的拉应力与应变及压力与压缩变形量的关系。

关键词 蒜薹;拉伸;压缩;力学特性;机械手

中图分类号 TP 241; S 225.92

文章编号 1007-4333(2016)07-0098-07

文献标志码 A

Experimental study on mechanical properties of garlic-stem for harvesting manipulator

ZHU Xin-hua, ZHAO Zhou, GUO Wen-chuan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract To provide basic data for designing harvesting manipulator, tensile and compression tests on different parts of garlic-stem, and tensile tests for whole garlic-stem were conducted on ripe garlic-stem. The results showed that the tensile stress increased almost linearly with strain at the initial tensile stage, presenting the characteristics of elastic materials. After the strain reached to certain values, the tensile stress increased slowly with the increase of strain, presenting the characteristics of elastic-plastic materials. From top to root of the garlic-stem, the maximum tensile stress decreased monotonously, the maximum compression force almost decreased gradually, the elastic property gradually decreased, and the compression deformation gradually decreased at same compressive force. When the tensile speed was 20 mm/min, 90% garlic-stems broke at the root part, with the maximum tensile stress of (1.2 ± 0.1) MPa and the maximum strain of 0.15 ± 0.04 . The best part for clipping the garlic-stems is above the middle part, and the clip load should be less than 4.1 N/mm. Logarithmic functions and polynomial functions can be used to express the relationship between tensile stress and strain, and compressive force and compression deformation, respectively.

Keywords garlic-stem; stretch; compression; mechanical properties; manipulator

蒜薹是我国目前蔬菜冷藏业中贮量最大、贮期最长,同时又是种植面积最广的蔬菜品种。2013 年我国蒜薹种植面积达 75 万 hm^2 ^[1],而蒜薹的采收一直是制约蒜薹生产效率和经济效益提高的主要问题。目前国内虽在蒜薹自动化采收装置设计方面授权了相关专利^[2-3],但尚未得到实际应用。现有的蒜

薹收获机存在蒜薹损伤率大,导致蒜薹储藏时间短以及经济效益较低的问题。随着农业产业结构的调整,研发高效率、高精度的机械化装备对实现农业生产现代化具有重要意义^[4]。

了解果蔬的力学特性是设计果蔬采摘机械手的基础^[5]。国内外对番茄^[6]、龙眼^[7]、马铃薯^[8-9]、荔

收稿日期:2015-07-27

基金项目:陕西省农业科技创新与攻关项目(2015NY001)

第一作者:朱新华,副教授,主要从事农业机械及其自动化研究,E-mail:zxh920@nwsuaf.edu.cn

枝^[10-12]、杨梅^[13]、西瓜^[14-15]、玉米^[16]、猕猴桃^[17]和甘蔗^[18]等果蔬的力学特性进行了大量研究。这些研究成果为果蔬采摘机械手的设计和减少果蔬的机械损伤提供了基础数据。在蒜薹力学特性研究方面,徐树来等^[19]为减小采后加工过程中压力对蒜薹品质带来的负面影响,采用0.8%的CaCl₂溶液改善高压加工蒜薹的品质。通过测定其力学特性,确定了延长蒜薹品质的合理加工工艺。目前尚未见针对蒜薹采摘机械手的设计而开展的蒜薹力学特性的研究报道。蒜薹采摘机械手为钳型结构。模仿人工采摘抽薹时,首先要选定蒜薹合适的夹持部位并保持适当的夹持力,以免造成夹持损伤;机械手提升抽薹时,需要考虑蒜薹的最大拉断力、伸长率以确定机械手的抽薹力和提升位移,并尽可能使断裂发生在蒜薹的根部以减少蒜薹残茬高度,降低收获损失;而断裂位置与机械手抽薹速度密切相关。为此,本研究以收获期蒜薹为对象,研究整根蒜薹和不同部位蒜薹的最大拉应力和最大应变,以及不同部位蒜薹能够承受的最大载荷;分析不同拉伸速度下蒜薹的断裂位置;确定蒜薹机械化采摘中最佳的夹持部位,以期蒜薹采摘机械手的设计提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所用蒜薹品种为苍山蒲棵蒜。试验样品取自于陕西省杨凌区揉谷产业合作社的温室大棚,试样处于收获期。由人工将蒜薹从根部割断后密封于保鲜袋内带回实验室,采后3 d内完成试验。试验期间,试样密封于保鲜袋并置于室温(14~16℃)下存放。所用蒜薹无虫害和病变,长度为400~700 mm,中部直径为4~7 mm,湿基含水率为(87.3±3.0)%。

1.2 不同部位蒜薹最大拉应力的测量

将一批整根蒜薹切去花苞后,剩余部分均分为5等分,从顶部到根部依次编号为1、2、3、4和5段。为了保证在拉伸过程中蒜薹无打滑现象,每段试样的两端先用医用胶布缠裹一圈,再用尼龙扎带捆扎夹持部位,然后用电子万能试验机(CSS-44010型长春试验机研究所有限公司,长春)的V型夹头夹持试样两端。在10 mm/min的加载速度下对每段试样进行拉伸试验。若某段的断裂位置发生在夹头附近或扎带内部,则同根蒜薹的5段试验均作废。共获得有效试样7根,7根试样相同段测量结果的平均值作为各段的测量结果。

1.3 不同部位蒜薹均布载荷的测量方法

为了确定机械手抽薹时夹持蒜薹的最佳部位,避免夹持损伤,需要研究不同部位蒜薹的均布载荷。将一批整根蒜薹切去花苞后,每根蒜薹的剩余部分均分为5等分,从顶部到根部依次编号为第1、2、3、4和5段。将每段蒜薹横放于试验台上,使中间部位处于万能试验机的上、下压头中间。压头断面为直径为60 mm的圆,材料为钢。由于压缩变形量较小,且机械手夹持蒜薹时需要轻缓加载,压头加载速度设定为1 mm/min对蒜薹进行径向压缩。当连接万能试验机的电脑显示压力峰值骤减时,试验结束。然后用直尺测量出蒜薹受压后的轴向长度。7根试样相同段所测数值的平均值作为测量结果。

1.4 整根蒜薹最大拉应力的测量

将一批蒜薹切去花苞后分成3份,每根试样两端的包裹和夹持方法同1.2。利用电子万能试验机对3份蒜薹分别在10、20和30 mm/min的拉伸速度下进行拉伸试验,记录蒜薹在拉伸过程中拉力的变化。若拉伸过程中,试样的断裂位置位于夹持部位或靠近夹持部位,则认为试验无效。对各速度下的10组有效数据进行统计分析。

1.5 试验步骤

试验前,剥去蒜薹的假径,切去花苞,用直尺测量蒜薹长度,用数显游标卡尺测量每根或每段蒜薹两端和中间点处的直径,两端和中间点处直径的平均值作为该根或该段蒜薹的直径。因在拉伸过程中,不易测量蒜薹直径的变化,故试验结果均以加载前的平均直径进行计算。蒜薹拉伸试验结束后,根据GB 5009.3—2010中规定的直接干燥法,利用恒温鼓风干燥箱(YZF-6051型,上海姚氏仪器设备厂)和FA2104N型电子分析天平(上海精密科学仪器有限公司,精度0.000 1 g)测量并计算各段试样的湿基含水率。此外,根据式(1)和(2)计算拉伸试验过程中试样的应力和应变:

$$\sigma = \frac{4F}{D^2\pi} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

式中: σ 为拉应力,MPa; F 为拉力,N; D 为试样的平均直径,mm; ϵ 为应变; Δl 为试样绝对伸长量,mm; l 为试样原长,mm。根据式(3)计算弹性模量:

$$E=\frac{\sigma}{\epsilon}$$

(3)

式中: E 为弹性模量,MPa。蒜薹的径向截面近似为圆形,机械手在夹持蒜薹时,夹持装置不可能均匀地包裹在蒜薹柱面上。假定压头与蒜薹接触为线接触,定义蒜薹在不发生挤压破损时所能承受的最大均布载荷为 Q ,则按式(4)计算 Q :

$$Q=\frac{F_q}{L}$$

(4)

式中: F_q 为蒜薹在不发生挤压破损时所能承受的最大压力,N; L 为蒜薹受压后的轴向长度,mm。

2 结果与讨论

2.1 试验用蒜薹直径和含水率的统计结果

试验用蒜薹试样各段直径和湿基含水率的统计结果见表1。可见,从顶部到根部,蒜薹的直径逐渐增大。顶部蒜薹的含水率明显少于其他部分,但第2段到第5段之间的含水率无明显的变化规律,且该4段的含水率比较接近。统计分析结果说明,在5%的显著水平上第2~5段与第1段的含水率有明显差异,但第2~5段之间无明显差异。

表1 蒜薹不同部位的直径和含水率统计结果

Table 1 The statistic diameter and moisture content of different garlic-stem parts

部位 Segment	直径/mm Diameter	湿基含水率/% Wet basis moisture content
第1段(顶部) Segment 1(Top)	4.43±0.52	87.6±1.1
第2段 Segment 2	4.98±0.67	89.3±0.7
第3段 Segment 3	5.58±0.66	89.9±0.6
第4段 Segment 4	6.02±0.44	89.3±0.6
第5段(根部) Segment 5(Bottom)	6.38±0.43	89.4±1.2

2.2 不同部位蒜薹拉伸试验结果与分析

图1为某根蒜薹的各段在拉伸过程中的拉应力-应变曲线。各段的拉应力-应变变化规律相同。对于每一段,在拉伸初期,拉应力与应变近似线性增长,表现出弹性材料的特征。随着拉应力的增大,蒜薹进一步被拉伸,应变增大;当应变增大到一定值时,拉应力随着应变缓慢增大,表现出弹塑性材料的特征。例如,对于第4段,当应变<0.04时,拉应力与应变近似正比例增长,当应变>0.04时,拉应力变化缓慢,但是应变增大迅速。

当应变相同时,从第1段到第5段弹性模量依次降低,说明蒜薹由顶部到根部抵抗变形的能力依次减弱;根部较顶部相比具有较大的塑性,而顶部具有较大的韧性。根部较大的塑性特征有利于蒜薹在被抽取时先从根部断裂。各段蒜薹在被拉断时所能承受的最大拉应力的统计结果见表2,可见从顶部到根部蒜薹的最大拉应力依次减小。

2.3 不同部位蒜薹压缩试验结果和分析

图2示出某根蒜薹不同部位的压力与径向变形的关系。不同部位的压力与变形的变化规律一致,加载初期,很小的压力可以使蒜薹具有较大的径向变形。随着压力的增加,蒜薹径向变形量逐渐增大,且近似呈现线性变化规律,此时无明显的生物屈服点出现,说明此期间蒜薹的变形是弹性变形。当压力增大到一定值时,蒜薹的内部组织被压破,此时蒜薹上承受的压力骤减,压力随着变形量的增加而降低。由图2还可以发现,在施压初期,较小的力可以使第1、2和3段具有较大的变形量;在相同的压力下,各段的变形量从第1段到第5段依次减小,说明蒜薹的韧性依次减小。

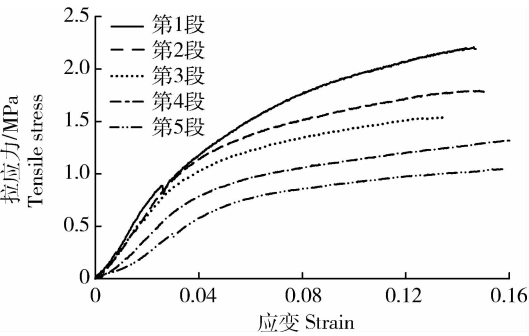


图1 某根蒜薹不同部位的拉应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curve of different garlic-stem parts

表 2 蒜薹不同部位最大拉应力和最大均布载荷

Table 2 Maximum tensile stress and maximum uniformly distributed load of different garlic-stem parts

部位 Segment	最大拉应力/MPa Maximum tensile stress	最大均布载荷/(N/mm) Maximum uniformly distributed load
第 1 段(顶部) Segment 1(Top)	2.4±0.3	4.6±0.3
第 2 段 Segment 2	1.9±0.3	4.3±0.2
第 3 段 Segment 3	1.5±0.1	3.9±0.2
第 4 段 Segment 4	1.3±0.1	3.7±0.5
第 5 段(根部) Segment 5(Bottom)	1.0±0.1	3.8±0.4

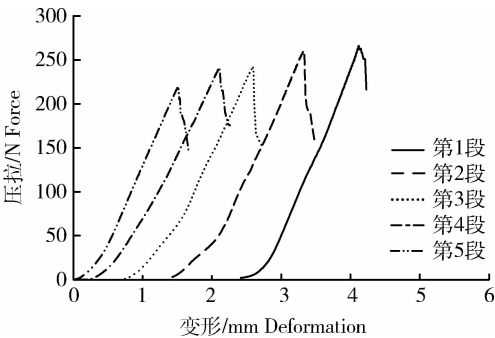


图 2 某根蒜薹不同部位的压力-变形曲线
Fig. 2 Force-deformation curve of different parts for one garlic-stem

对所有相同部位蒜薹从开始压缩至破裂时的平均数据进行回归发现,可用式(5)描述此期间压力与

压缩变形之间的关系,且决定系数 R^2 均 $>0.999\ 0$,拟合结果见表 3。

$$F_{\delta} = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 \tag{5}$$

式中: β_0 、 β_1 、 β_2 和 β_3 为拟合系数。

由蒜薹试样不同部位所能承受的最大均布载荷的统计结果(表 2)可知,不同部位的蒜薹在不发生破损时所能承受的最大均布载荷从第 1 段到第 4 段依次减小,第 5 段有小幅回升。试验结果表明,机械手夹持蒜薹的理想部位是蒜薹上部,即第 1 段或第 2 段,此时蒜薹有较大的最大均布载荷,不易被夹坏。为保证蒜薹不被夹破,所提供给蒜薹的均布载荷应 $<4.1\ \text{N/mm}$ 。第 4 和第 5 段被包裹在假径中,不适于机械手夹持抽薹。

表 3 蒜薹不同部位压力-变形关系式(5)的拟合系数及决定系数

Table 3 Regression constants and coefficients of determination of Equation (5) for different garlic-stem parts

部位 Segment	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2
第 1 段(顶部) Segment 1(Top)	21.06	−55.22	38.93	5.01	0.999 8
第 2 段 Segment 2	38.55	−141.68	137.86	−17.90	0.999 9
第 3 段 Segment 3	14.29	−77.64	92.26	−11.40	0.999 8
第 4 段 Segment 4	32.10	−111.16	131.61	−20.66	0.999 7
第 5 段(根部) Segment 5(Bottom)	85.61	−248.84	256.11	−52.99	0.999 8

2.4 整根蒜薹拉伸试验结果与分析

2.4.1 整根蒜薹的拉伸特性

整根蒜薹的拉应力-应变的变化规律与不同部位蒜薹的拉应力-应变变化规律相似(图 3),即在发生应变初期,例如应变 <0.04 时,拉应力与应变近似线性增长,蒜薹发生弹性变形;当应变大于一定值

后,拉应力随着应变的增大而缓慢增大,表现出弹塑性特征。当应变 <0.04 时,相同应变下,各拉伸速度下的拉应力值基本相同,说明拉伸速度对弹性变形的影响不大,但当应变 >0.04 时,相同应变下,各拉伸速度下的拉应力值有明显的差异,说明拉伸速度对蒜薹的塑性变形有较大的影响。

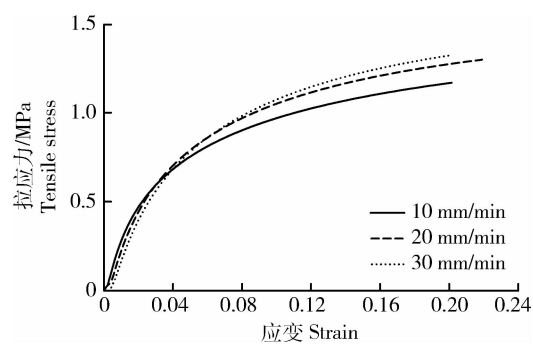


图3 不同速度下整根蒜薹拉应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of whole garlic-stem at different speeds

对图3中的曲线进行拟合发现,可用式(6)描述拉应力 σ 与应变 ϵ 的关系,且拟合关系式的决定系数 R^2 均 $>0.999\ 0$ 。不同拉伸速度下式(6)的拟合

系数和决定系数见表4。

$$\sigma = a_0 + a_1 \ln \epsilon + a_2 (\ln \epsilon)^2 + a_3 (\ln \epsilon)^3 \tag{6}$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为拟合系数。

表4 蒜薹不同拉伸速度下拉应力-应变关系式(6)的拟合系数及决定系数

Table 4 Regression constants and coefficients of determination of Equation (6) at different stretch speeds

拉伸速度/(mm/min) Tensile speed	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
10	1.452	0.069	-0.082	-0.009	0.999 8
20	1.471	-0.076	-0.149	-0.016	0.999 8
30	1.477	-0.166	-0.198	-0.022	0.999 7

2.4.2 整根蒜薹拉伸试验结果

表5示出整根蒜薹试样的最大拉应力和最大应变的统计结果。可见,随着拉伸速度的增大,蒜薹的最大拉应力和最大应变逐渐增大。当拉伸速度不同时,蒜薹在各段处断裂的概率也不同。拉伸速度为10 mm/min时,蒜薹在第3、4、5和1段出现断裂,且断裂概率依次减小,分别为44%、33%、12%和11%,说明此时蒜薹最容易在中部发生断裂。当拉伸速度为20 mm/min时,在第5和第3段出现断

裂,概率分别为90%和10%。说明此时蒜薹的断裂主要发生根部和中部,且根部断裂的概率远大于中部。当拉伸速度为30 mm/min时,断裂发生在第1、4和5段,断裂概率分别为50%、30%和20%,此时顶部最容易断裂。

从整根蒜薹拉伸试验中蒜薹断裂的位置上可以得出,20 mm/min的拉伸速度是抽取蒜薹时的最佳速度,该速度下蒜薹的最大拉应力为 (1.2 ± 0.1) MPa,最大应变为 0.15 ± 0.04 ,此时蒜薹主要从根

表5 整根蒜薹的拉伸断裂率、最大拉应力和最大应变

Table 5 Tensile fracture probability,maximum tensile stress and maximum strain of whole garlic-stem

拉伸速度/ (mm/min) Tensile speed	断裂率/% Fracture probability					最大拉应力/MPa Maximum tensile stress	最大应变 Maximum strain
	1段	2段	3段	4段	5段		
	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4	Segment 5		
10	11	0	44	33	12	1.0 ± 0.2	0.13 ± 0.03
20	0	0	10	0	90	1.2 ± 0.1	0.15 ± 0.04
30	50	0	0	30	20	1.3 ± 0.2	0.19 ± 0.04

部断裂,保证了蒜薹的经济效益。在已知蒜薹直径的前提下,可以根据最大拉应力,依据式(1)计算出设计蒜薹采摘机械手的最大拉力。为了确保机械手在抽取蒜薹时蒜薹在根部断裂,可以在蒜薹根部施加一个侧向力,促使其定点断裂。此外,在设计机械手时,要保证机械手的最小活动范围应该为蒜薹长度的119%。

3 结 论

1)蒜薹分段拉伸和整体拉伸具有相似的应力-应变趋势。屈服点前后分别呈现出弹性材料特征和弹塑性材料特征。由于组织纤维化程度不同,从顶部到根部,蒜薹能够承受的最大拉应力逐渐减小。拉伸速度对蒜薹的塑性变形有较大的影响,20 mm/min 是机械手抽薹的适宜速度。

2)在相同的压力下,蒜薹从顶部到根部各段的径向压缩变形量依次减小。机械手夹持蒜薹的理想部位是蒜薹上部,在此位置蒜薹有较大的最大均布载荷,不易被夹坏。为减少夹持损伤,夹持部件均布载荷应 ≤ 4.1 N/mm。

3)当拉伸速度为20 mm/min时,整根蒜薹的最大拉应力为 (1.2 ± 0.1) MPa,最大应变为 0.15 ± 0.04 ,根部的断裂概率为90%。为了确保抽薹时从根部断裂,有必要通过机械手在蒜薹根部施加一个侧向力,促使其定点断裂。

4)蒜薹的拉应力与应变、压力与压缩变形量的关系分别以对数函数和多项式函数给出。

本研究结果为蒜薹采摘机械手的最大拉力、夹持载荷、夹持部位和活动范围的确定提供了参考,但实际抽取蒜薹时还会受到蒜薹假径的影响,因此,应进一步研究包含假径时的最大拉力。

参 考 文 献

[1] 卞茂启. 2014 年大蒜形势展望及营销对策[J]. 中国果菜, 2014, 34(4): 8-14
Bian M Q. The prospect and marketing strategy of garlic in 2014[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2014, 34(4): 8-14 (in Chinese)

[2] 西北农林科技大学. 一种蒜薹自动采收机械装置[P]. 中国, 201320789166. 7, 2014-07-09
Northwest A&F University. A automatic harvesting machinery of garlic-stem. China, 201320789166. 7 [P], 2014-07-09 (in Chinese)

[3] 杨健. 自动回旋式蒜薹收获机[P]. 中国, 201220567002. 5,

2013-08-07

Yang J. Automatic rotary garlic harvester. China, 201220567002. 5 [P], 2013-08-07 (in Chinese)

- [4] 王俊, 杜冬冬, 胡金冰, 朱建锡. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 81-87
Wang J, Du D D, Hu J B, Zhu J X. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 81-87 (in Chinese)
- [5] 汤修映, 张铁中. 果蔬收获机器人研究综述[J]. 机器人, 2005, 27(1): 90-96
Tang X Y, Zhang T Z. Robotics for fruit and vegetable harvesting: A review [J]. *Robot*, 2005, 27(1): 90-96 (in Chinese)
- [6] Li Z G, Li P P, Liu J Z. Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(2): 170-178
- [7] 卿艳梅, 李长友, 黄汉东, 曹玉华. 龙眼力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 143-147
Qing Y M, Li C Y, Huang H D, Cao Y H. Finite element analysis on mechanical properties of longan[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 143-147 (in Chinese)
- [8] 武新慧, 郭玉明. 高压脉冲电场对马铃薯压缩力学性质及变形过程影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S2): 181-185
Wu X H, Guo M Y. Effect of high pulsed electrical filed on properties of compressive mechanical and deformation process of potato [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S2): 181-185 (in Chinese)
- [9] 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
Sang Y Y, Zhang D X, Zhang M M. Study on bruising damage experiment of potato and finite element analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(1): 81-84 (in Chinese)
- [10] 罗承宇, 邹湘军, 叶敏, 林桂潮, 谈建豪. 荔枝采摘机器人非线性运动刀具设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 247-252, 246
Luo C Y, Zou X J, Ye M, Lin G C, Tan J H. Design of nonlinear motion cutter for litchi harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S1): 247-252, 246 (in Chinese)
- [11] 吴良军, 杨洲, 洪添胜, 段洁利, 王慰祖, 汪刘一, 谭广能. 荔枝树枝力学特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 68-73
Wu L J, Yang Z, Hong T S, Duan W Z, Wang L Y, Tan G N. Experimental study on mechanical properties of litchi branches [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 68-73 (in Chinese)
- [12] Liu T H, Liang Z H, Guo J D. Experimental comparison of litchi fruit stalk cutting force [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012, 28(2): 297-302

- [13] 马晓丽,陈晓英,闫语丝,蒋晓英. 杨梅果的机械损伤试验和生物力学特性[J]. 农业工程学报,2012,28(16):282-287
Ma X L, Chen X Y, Yan Y S, Jiang X Y. Mechanical damage test and biomechanical characteristics of red bayberry fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 282-287 (in Chinese)
- [14] 戴思慧,孙小武,熊兴耀,李明,姚珺. 三倍体西瓜种子种壳结构及机械破壳力学特性[J]. 农业工程学报,2012,28(17):44-50
Dai S H, Sun X W, Xiong X Y, Li M, Yao J. Seedcoat structure and mechanical nicking properties of triploid watermelon seed [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 44-50 (in Chinese)
- [15] 王芳,王春光,杨晓清. 西瓜的力学特性及其有限元分析[J]. 农业工程学报,2008,24(11):118-121
Wang F, Wang C G, Yang X Q. Mechanics characteristics and finite element analysis of watermelon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 118-121 (in Chinese)
- [16] 李心平,高连兴,马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(10):64-67,72
Li X P, Gao L X, Ma F L. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 64-67, 72 (in Chinese)
- [17] 陈军,王虎,蒋浩然,高浩,雷王利,党革荣. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计[J]. 农业机械学报,2012,43(10):151-154, 199
Chen J, Wang H, Jiang H R, Gao H, Lei W L, Dang G R. Design of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(10): 151-154, 199 (in Chinese)
- [18] Mou X W, Liu Q T, Ou Y G, Wang M M, Song J M. Mechanical properties of the leaf sheath of sugarcane[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2013, 56(3): 801-812
- [19] Xu S L, Zhang S Q. Mechanical characteristics of garlic-stem after high pressure processing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(5): 202-205

责任编辑:刘迎春