

# 棉花钵苗和钵体的力学特性试验

王会丽<sup>1</sup> 周勇<sup>1,2</sup> 王培通<sup>1</sup> 胡梦杰<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 优势农作物机械化生产技术与装备湖北省工程实验室, 武汉 430070

**摘要** 以棉花品种鄂抗棉-10和铜杂411为研究对象,对棉花幼苗进行不同加载速度下的剪切和弯曲试验,并对钵体进行压缩试验。结果表明:不同品种棉花幼苗的剪切强度和弯曲强度都随加载速度的增大而增大;在相同加载速度下,鄂抗棉-10的剪切强度和弯曲强度均大于铜杂411;对剪切强度和弯曲强度进行可重复双因素方差分析,结果表明加载速度和品种对棉花幼苗的剪切强度和弯曲强度均有显著影响,两者的交互作用对剪切强度和弯曲强度无显著影响。钵体在径向和轴向压缩方式下的破裂力分别为73.3~110.5 N和100.3~192.3 N,钵体的抗挤压能力具有各向异性。

**关键词** 力学特性;钵苗;移栽机;棉花;剪切强度;弯曲强度

中图分类号 S 223.9 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2017)02-0117-06

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.20170213.002

棉花是我国的主要经济作物,其生产过程现在仍然以人工操作为主,机械化水平很低。传统的棉花营养钵移栽方式需要大量人工投入,费时费工,农时季节矛盾突出,急需能完成钵苗移栽作业的机械替代人力作业。目前,我国棉花钵苗移栽机的研制在很大程度上是引进和借鉴国外移栽机并对其进行改进和仿造,技术还不成熟。国内研制和正在试用的机型基本上都是以半自动为主,其主要形式有钳夹式移栽机、链夹式移栽机、导苗管式移栽机和吊杯式移栽机等<sup>[1-3]</sup>。这些机型在作业过程中容易产生幼苗损伤和钵体破损现象,主要表现为取苗机构在机械夹持过程中会造成幼苗的损伤和折断;钵苗在栽植过程中,钵苗与导苗管壁、吊杯栽植嘴及田间土壤发生碰撞,造成幼苗损伤和钵体破损,从而降低移栽质量和幼苗成活率。钵体破损和伤苗问题不仅与机构自身设计有关,还与钵苗的力学特性参数有关,开展钵苗力学特性研究对了解钵苗抵抗外力损伤的能力、合理选择棉花品种和设计移栽机构具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

因此,本研究对棉花钵苗进行剪切和弯曲试验,对营养钵进行压缩试验,通过对棉花钵苗力学特性的分析,为移栽机械设计提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用棉花品种为铜杂411和鄂抗棉-10,育苗时间为2016年4月10日至5月1日(移栽当天),苗龄为22 d,有2片子叶和2片心叶。育苗方法和管理按照当地的农业生产实际条件进行,即在苗床上播种后进行拱架盖膜,待苗出齐后进行晒床炼苗,日揭夜盖,在移栽前3~5 d揭膜。营养钵是利用制钵器人工制成的圆柱形钵体,取自华中农业大学棉花种植基地。钵体土壤类型为黄棕壤,制钵的营养土为前茬作物收获后且封冻前进行多次深耕和翻耕,在苗床施土杂堆厩肥、腐熟饼肥及塘泥以质量比30:1:30比例混合。制钵时营养土的干湿程度以手握成团,平胸落下散开为度。

### 1.2 试验设备

试验仪器有美国FTC公司生产的TMS-PRO质构仪(最大量程为1 000 N)、HN101-2A鼓风干燥箱(南通沪南科学仪器有限公司制造)、电子天平(量程200 g)及游标卡尺等。

### 1.3 试验方法

在棉花育苗基地的苗床中选取差异不大,茎秆

收稿日期:2016-07-01

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD08B02);中央高校基本科研业务费专项(2012ZYTS022)

王会丽,硕士研究生,研究方向:现代农业装备设计与测控技术, E-mail: 1370270640@qq.com

通信作者:周勇,博士,副教授,研究方向:现代农业装备设计与测控技术, E-mail: zhyong@mail.hzau.edu.cn

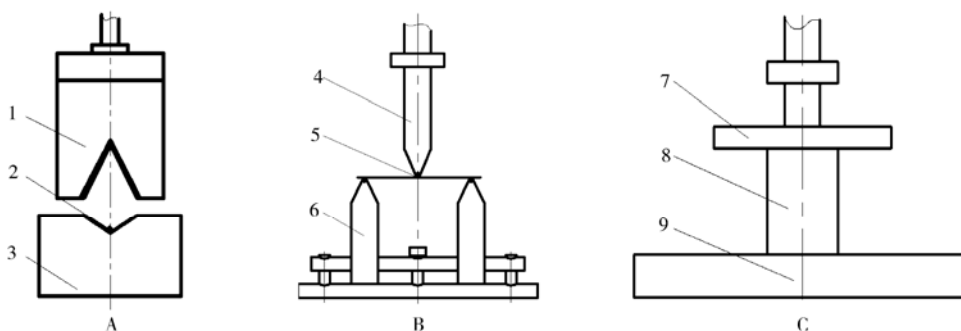
顺直和粗细均匀的棉花幼苗,每个品种各取 40 株,截取棉花幼苗中部 50 mm 的茎秆作为试样<sup>[7]</sup>,以不同的加载速度对不同品种的棉花幼苗进行剪切和弯曲试验,每个品种按照加载速度需要分为 4 组,每组试验重复 5 次。选取相对完整的营养钵钵体,去除棉花幼苗,实验前对棉花幼苗和营养钵钵体进行编号,并用游标卡尺测量直径和高度,每个试样直径重复测量 3 次求其平均值。测得钵苗鄂抗棉-10 直径为 $(2.51 \pm 0.44)$  mm,高度为 $(125.56 \pm 15.76)$  mm;铜杂 411 直径为 $(2.41 \pm 0.47)$  mm,高度为 $(128.37 \pm 23.69)$  mm;钵体直径为 $(49.63 \pm 0.59)$  mm,高度为 $(70.04 \pm 0.82)$  mm。棉花幼苗剪切、弯曲和钵体的压缩试验完成后,立即取部分试样称质量,采用烘干法进行含水率测量<sup>[8]</sup>,试验按照 GB-T 1931—1991 木材含水率的测定方法进行。测得钵苗鄂抗棉-10 含水率为 85.8%,铜杂 411 含水率为 85.4%,钵体的含水率为 20.8%。

进行剪切试验时,按照 GB/T 1937—2009 木材

顺纹抗剪强度试验方法的规定进行,将棉花幼苗试样放在质构仪剪切实验平台的 V 型夹具上,试验以匀速加载,在 1.5 min 内使试样破坏,记录下破坏载荷<sup>[9]</sup>,准确至 10 N。因此,试验采用 10、20、30、40 mm/min 的加载速度进行匀速加载<sup>[10]</sup>。棉苗剪切试验示意图如图 1A 所示。

弯曲试验采用三点弯曲的方法,按照文献<sup>[11]</sup>的规定进行,试验装置两端支座和压头的曲率半径均为 3 mm,两支座间的距离为 30 mm,试验时将棉花幼苗试样放在两端支座上,分别采用 10、20、30、40 mm/min 的加载速度进行匀速加载,记录下破坏载荷<sup>[12-13]</sup>。棉苗弯曲试验示意图如图 1B 所示。

压缩试验采用平顶圆柱的压缩方式,测试速度为 2 mm/min<sup>[14]</sup>,在进行钵体轴向和径向压缩试验时,压入深度约在 10 mm 和 8 mm 时出现破裂点。因此,压缩位移设置为 10 mm<sup>[15]</sup>,测试压缩量在 10 mm 下钵体径向和轴向的抗压特性,每组试验重复 10 次。钵体压缩试验示意图如图 1C 所示。



A.剪切试验 Shearing test; B.弯曲试验 Bending test; C.压缩试验 Compression test; 1:刀具 Tool; 2:试样 Specimen; 3:定位块 Fixed support; 4:压头 Loading head; 5:试样 Specimen; 6:两端支座 Fixed 2 point-supports; 7:压头 Loading head; 8:试样 Specimen; 9:底座 Base.

图 1 钵苗力学特性试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of cotton seedling mechanical properties test

## 2 结果与分析

### 2.1 钵苗剪切力与位移的变化规律

1)棉花幼苗剪切力与位移的变化规律。图 2A 是在加载速度为 10 mm/min 时铜杂 411 和鄂抗棉-10 幼苗的剪切力与位移之间的变化曲线。由图 2A 可知,铜杂 411 和鄂抗棉-10 受到剪切时剪切力与变形均呈现非线性关系,铜杂 411 和鄂抗棉-10 最大剪切力分别为 23.3 N 和 25.8 N,铜杂 411 和鄂抗棉-10 的剪切力均是先随着变形的增加而增大,在此过程中没有出现生物屈服极限,剪切力达到生物最大破坏极限后开始下降<sup>[16]</sup>,在剪切过程中,试样

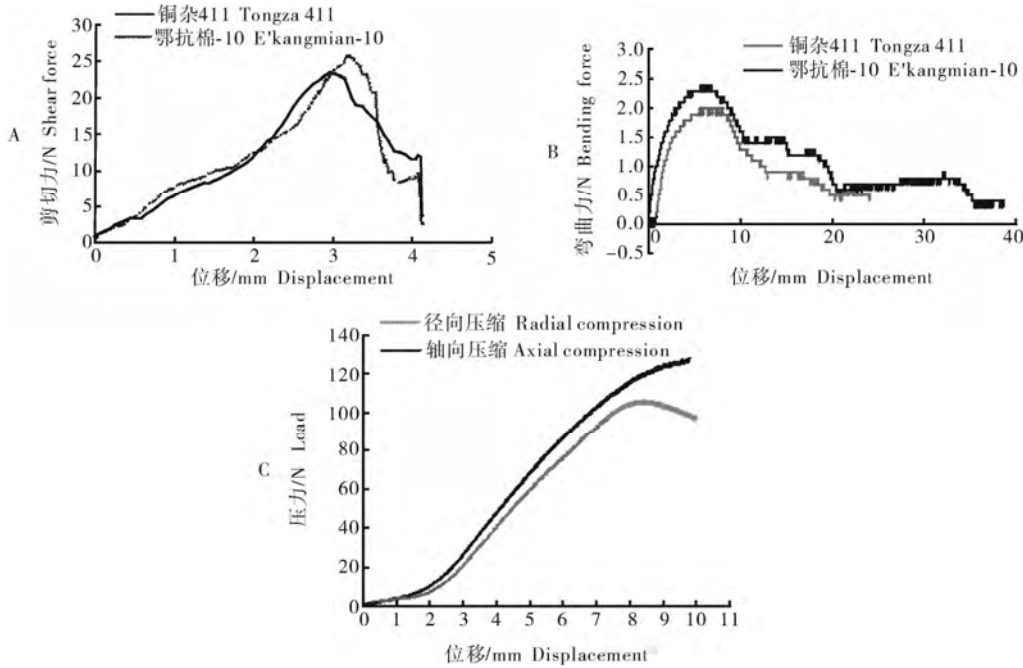
剪切部位向下凹,直到最后突然断裂。图 2A 中剪切位移量略大于茎秆直径的原因是剪切刀具间有进刀缝隙,会使茎秆在剪切过程中产生微小的变形,由此可见棉花幼苗的柔韧性好,不易切断。

2)棉花幼苗抗弯曲力与变形的关系。图 2B 是在加载速度为 10 mm/min 时,铜杂 411 和鄂抗棉-10 幼苗茎秆弯曲力与位移的变化曲线。由图 2B 可知,2 个品种幼苗茎秆的弯曲力均先随位移的增大而增大,直至达到最大值,此阶段弯曲部位向下凹,说明幼苗柔韧性好,此阶段称为弹塑性变形阶段<sup>[17]</sup>;之后样本两端滑移到支座的侧面,弯曲力随着位移的增大而减小,试样中部的水分向两边聚集,

逐渐变细,直到最后发生断裂,说明幼苗的茎秆出现了一定的木质化。铜杂 411 和鄂抗棉-10 在弯曲力达到最大值时分别为 1.9、2.4 N。

3)钵体抗压力与变形的关系。图 2C 是加载速度为 2 mm/min 时,平顶圆柱压头压缩钵体径向和轴向的抗压力与位移的变化曲线,表征营养钵在径向和轴向压缩时承受外力变形的变化曲线。由图

2C 可知,钵体受压时,抗压力随着变形的增大缓慢增大,此时钵体与平顶圆柱压头未充分接触,随着加压深度的增加,压头与钵体完全接触,抗压力随变形的增大而增大,表现出一定的屈服特性<sup>[18]</sup>,随着加压深度的继续加深,轴向受压时,钵体的侧面开始出现裂纹,中部表现出压实硬化的特性;径向受压时,钵体受压部位出现裂纹,此后钵体开始从受压部位



A:剪切试验 Shearing test; B:弯曲试验 Bending test; C:压缩试验 Compressive test.

图 2 力与位移变化曲线

Fig.2 Force-deformation curve

断裂向两边散落,挤压力开始下降。

### 2.2 钵体抗压压力分布

图 3 是钵体的抗压压力曲线,由于钵体的直径和高度有差异,钵体发生破裂时的最大压力值不同。径向压缩的压力值在 73.3~110.5 N,轴向压缩的压

力值在 100.3~192.3 N。因此,在设计机械加持机构钵体取苗时的加持力、钵体与导苗管、吊杯栽植嘴及地面的碰撞力不得大于 73.3 N。

### 2.3 棉花幼苗剪切和弯曲强度分布规律

1)棉花幼苗剪切强度与加载速度的关系。图 4A 为不同品种的棉花幼苗在不同加载速度下的剪切强度分布。由图 4A 可知,加载速度从 10 mm/min 增加到 40 mm/min 时,剪切强度也随之增大,这是因为棉花幼苗茎秆的含水率高,随着加载速度的增加,茎秆细胞壁的应力增加,细胞的内压改变量增加,承载能力提高<sup>[19]</sup>。在相同的加载速度下,品种鄂抗棉-10 的剪切强度高于铜杂 411,这说明鄂抗棉-10 抵抗剪切破坏的能力大于铜杂 411。

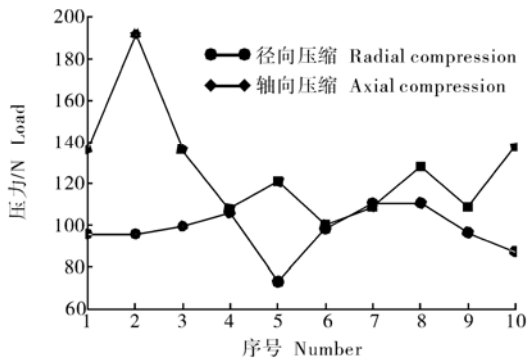


图 3 钵体抗压压力曲线

Fig.3 The compressive stress curve of the bowl

2)棉花幼苗弯曲强度与加载速度关系。图 4B 为不同品种的棉花幼苗在不同加载速度下的弯曲强度分布。由图 4B 可知鄂抗棉-10 和铜杂 411 幼苗

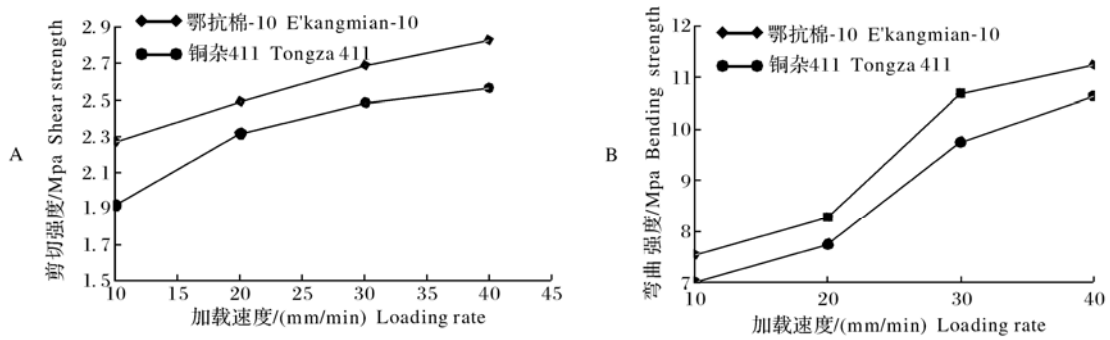


图 4 棉花幼苗剪切(A)和弯曲强度(B)分布规律

Fig.4 The distribution of cotton seedling shearing(A) and bending strength(B)

茎秆的弯曲强度随着加载速度的增大而增大,这是因为棉花幼苗茎秆含水率高,柔韧性好,相同加载速度下鄂抗棉-10的弯曲强度高于铜杂411。

2.4 不同加载速度和品种下的剪切强度和弯曲强度

1)品种和加载速度对剪切强度的影响。铜杂411和鄂抗棉-10在不同剪切速度下的剪切强度如表1所示,对其进行双因素可重复的方差分析可得到剪切速度、品种及交互作用对棉花幼苗剪切强度影响的差异程度。由表2可知,加载速度在10~40

mm/min时,对剪切强度有显著影响,品种对剪切强度也有显著的影响,两者的交互作用对剪切强度的影响不显著。

2)品种和加载速度对弯曲强度的影响。铜杂411和鄂抗棉-10在不同加载速度下的弯曲强度如表1所示,对其进行双因素可重复的方差分析可得到加载速度、品种及交互作用对棉花幼苗弯曲强度影响的差异程度。由表2可知,加载速度在10~40 mm/min时,对弯曲强度有显著的影响,品种对弯曲强度也有显著的影响,其两者的交互作用对弯曲

表 1 不同品种棉花幼苗在不同加载速度下的剪切强度和弯曲强度

Table 1 The shear strength and bending strength of different varieties of cotton seeding with different loading rate

MPa

加载速度/(mm/min) Loading rate	剪切强度 Shear strength		弯曲强度 Bending strength	
	鄂抗棉-10 E'kangmian-10	铜杂 411 Tongza 411	鄂抗棉-10 E'kangmian-10	铜杂 411 Tongza 411
10	2.45	2.02	0.75	0.58
	2.28	1.72	0.83	0.71
	2.08	1.92	0.76	0.70
	1.90	2.41	0.62	0.80
	2.65	1.54	0.81	0.71
20	2.87	2.3	0.88	0.82
	2.09	2.41	0.74	0.67
	2.66	2.58	0.79	0.70
	2.05	2.59	0.76	0.88
	2.82	1.72	0.97	0.81
30	2.51	2.50	1.22	0.97
	2.63	2.28	1.06	1.02
	2.67	2.12	0.80	0.87
	2.91	2.62	1.08	0.93
	2.74	2.91	1.18	1.09
40	2.78	2.58	1.02	1.06
	2.94	2.78	1.20	1.20
	2.96	2.32	1.08	0.96
	2.77	2.47	1.14	1.02
	2.71	2.69	1.18	1.08

表 2 棉花幼苗在不同加载速度下的剪切强度和弯曲强度的方差分析  
 Table 2 The variance analysis of shear strength and bending strength of cotton seeding  
 with different loading rate and different varieties

项目 Item	差异源 Variation factor	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F	P	F-crit 评判
剪切强度 Shear strength	样本 Sample	2.081 048	3	0.693 683	8.633 932	0.000 242	2.901 120
	列 Column	0.622 503	1	0.622 503	7.747 989	0.008 950	4.149 097
	交互 Interaction	0.043 287	3	0.014 429	0.179 593	0.909 455	2.901 120
	内部 Internal	2.571 000	32	0.080 344			
	总计 Total	5.317 838	39				
弯曲强度 Bending strength	样本 Sample	0.915 468	3	0.305 155	31.646 962	1.07259E-09	2.901 120
	列 Column	0.041 603	1	0.041 603	4.314 493	0.045 898	4.149 097
	交互 Interaction	0.002 603	3	0.000 869	0.090 139	0.964 945	2.901 120
	内部 Internal	0.308 560	32	0.009 643			
	总计 Total	1.268 234	39				

强度的影响不显著。

### 3 讨 论

为使设计的钵苗移栽装置能更好地达到钵苗移栽的要求,对钵苗和钵体的力学特性进行了分析研究。通过对棉花幼苗的剪切、弯曲试验在加载过程中的力与位移的变化分析,得出不同品种棉花幼苗在相同的加载速度下载荷的变化,这是由棉花品种自身的特点决定的。通过对营养钵钵体进行径向和轴向压缩试验,其抗压力与变形呈非线性变化。

试验结果表明,棉花幼苗在不同加载速度下的剪切强度和弯曲强度差异明显;不同品种的棉花幼苗在相同加载速度下的剪切、弯曲特性差异也明显;钵体破坏时径向和轴向压缩的压力值分别为 73.3~110.5 N 和 100.3~192.3 N,钵体径向易破碎,这可为棉花钵苗移栽机构设计方面的力学参数和棉花移栽品种的选择提供理论依据。品种鄂抗棉-10 幼苗的剪切强度和弯曲强度均高于铜杂 411,这说明鄂抗棉-10 品种相比铜杂 411 更能抵抗机械的变形和损伤。试验结果表明,对棉花幼苗在不同加载速度和品种下的剪切强度和弯曲强度进行双因素可重复方差分析,表明在不同加载速度和品种下,加载速度和品种对棉花幼苗的剪切强度和弯曲强度有显著的影响,两者的交互作用对剪切强度和弯曲强度均无显著影响。

本研究仅对铜杂 411 和鄂抗棉-10 2 个品种进行了剪切、弯曲规律分析,不同棉花品种间存在物理差异,今后还要进一步探讨其他棉花品种幼苗的剪

切、弯曲强度,找到更能适宜机械移栽的棉花品种。

### 参 考 文 献

- [1] 夏俊芳,王树才,许绮川.我国棉花营养钵移栽机械现状与发展趋势[J].中国农机化,2002(1):36-37.
- [2] PRASANNA-KUMAR G V, RAHEMAN H. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings[J]. Biosystems engineering, 2011, 110:189-197.
- [3] RYU K H, KIM G, HAN J S. Development of a Robotic Transplanter for Bedding Plants [J]. Journal of agricultural engineering research, 2001, 78(2):141-146
- [4] 倪有亮,金诚谦,刘基.全自动移栽机取苗系统的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(23):10-19.
- [5] 廖庆喜,胡先朋,张照,等.油菜移栽机分苗装置分苗过程与钵苗钵体完整性分析[J].农业工程学报,2015,31(16):22-29.
- [6] 张国忠,黄海东.棉花营养钵苗机械移栽技术重难点分析[J].湖北农机化,2003(2):25.
- [7] 蔡则谟.木材物理力学试验的取样方法[J].东北林学院学报,1982(2):121-142.
- [8] 杜现军,李玉道,颜世涛,等.棉秆力学性能试验[J].农业机械学报,2011,42(4):87-91.
- [9] 安徽农业大学,国际竹藤网络中心,中国林业科学研究院,等.木材顺纹抗剪强度试验方法:GB/T 1937—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [10] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.农作物茎秆的力学特性研究进展[J].农业机械学报,2007,38(7):172-176.
- [11] 中国林业科学研究院木材工业研究所.木材抗弯弹性模量测定方法:GB/T 1936.2—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [12] CHATOPADHYAY P S, PANDEY K P. Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi-static deformation[J]. Journal of agricultural engineering research, 1999, 73(2):199-

- 206.
- [13] 郭洋民,夏俊芳,肖科星,等.莲藕屈服强度和抗压强度的测定与分析[J].华中农业大学学报,2015,34(1):148-151.
- [14] 王英,陈建能,吴加伟,等.用于机械化栽植的西兰花钵苗力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(24):1-10.
- [15] 王子华,付志一,邓西民.果实硬度和脆性的测量方法探索[C]//北京力学学会.北京力学学会第十六届学术年会论文集.北京:清华大学出版社,2010:80-81.
- [16] 张开飞,李赫,何玉静,等.大豆秸秆力学特性的试验研究[J].大豆科学,2016(2):306-309.
- [17] 李玉道,杜现军,宋占华,等.棉花秸秆剪切力学性能试验[J].农业工程学报,2011,27(2):124-128.
- [18] 韩绿化,毛罕平,胡建平,等.穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J].农业工程学报,2013,29(2):24-29.
- [19] 高永毅,焦群英,陈安华.剪切载荷作用下植物细胞的力学特性分析[J].应用力学学报,2006,23(4):682-686;704.

## Mechanical properties of cotton bowl seedling and cotton bowl

WANG Huili<sup>1</sup> ZHOU Yong<sup>1,2</sup> WANG Peitong<sup>1</sup> HU Mengjie<sup>1</sup>

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Hubei Provincial Engineering Laboratory for Mechanization Technology and Equipment of Main Crop Production, Wuhan 430070, China

**Abstract** Cotton cultivars including E'kangmian-10 and Tongza 411 were used to study the mechanical damage of cotton bowl seedling during seedling transplanting. The shear and bending of cotton seedling was tested at different loading rate. The cotton bowl was tested with compression. Two-factor variance analysis with duplication was used to analyze shear strength and bending strength. The results showed that the shear strength and bending strength was increased with the increase of the loading rates. When loading rate was the same, the shear strength and bending strength of E'kangmian-10 were greater than that of Tongza 411. Both the load rate and varieties had significant effect on the shear strength and bending strength. The interaction between them had no significant effect on the shear strength and bending strength of cotton seedling. Bowl rupture force was 73.3–110.5 N and 100.3–192.3 N at radial and axial compression. The anti-extrusion capability of bowl had anisotropies. It will provide a theoretical basis for the design of mechanically transplanting the cotton seedling.

**Keywords** mechanical properties; bowl seedling; transplanting mechanical; cotton; shear strength; bending strength

(责任编辑:陆文昌)