



罗菊川, 文晟, 李涵光, 等. 甘蔗尾茎泊松比的试验分析[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 118-124.

甘蔗尾茎泊松比的试验分析

罗菊川^{1,2}, 文 晟^{1,2}, 李涵光^{1,2}, 刘庆庭^{1,3}, 朱鸿运³

(1 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 工程基础教学与训练中心, 广东 广州 510642; 3 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】为甘蔗断尾机构的设计及数学模型的建立进行动力学仿真提供理论依据。【方法】利用精密型微控电子万能试验机和静态电阻应变仪对甘蔗尾茎生长点以下第 5、6 节甘蔗皮、芯、节部位进行拉伸试验, 并用电测法与力学分析得出各组分的泊松比参数。【结果】甘蔗尾茎生长点以下第 5 节甘蔗皮同性面泊松比小于 0.028, 异性面泊松比为 0.233; 第 5 节甘蔗芯同性面泊松比小于 0.174, 异性面泊松比为 0.271; 甘蔗尾茎生长点以下第 6 节甘蔗皮同性面泊松比小于 0.001, 异性面泊松比为 0.238; 第 6 节甘蔗芯同性面泊松比小于 0.223, 异性面泊松比为 0.289; 甘蔗节同性面泊松比小于 0.305, 异性面泊松比为 0.344。【结论】甘蔗尾茎内部不同部位的同性面泊松比存在显著差异, 异性面泊松比差异不大; 甘蔗尾茎生长点以下第 5、6 节皮、芯同性面泊松比有显著差异, 异性面泊松比差异不显著。

关键词: 甘蔗尾茎; 力学分析; 泊松比; 电测法; 动力学仿真
中图分类号: S225.53; S220.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2017)06-0118-07

Experimental study on Poisson's ratio of sugarcane tail stalk

LUO Juchuan^{1,2}, WEN Sheng^{1,2}, LI Hanguang^{1,2}, LIU Qingting^{1,3}, ZHU Hongyun³

(1 Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Guangzhou 510642, China; 2 Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To provide a theoretical basis for designing a device cutting sugarcane tail stalk and establishing a mathematical model for dynamic simulation. 【Method】The precision micro control electronic universal testing machine and static resistance strain gauge were used to perform tensile tests on sugarcane skin, core and joints of the fifth and sixth sections below the growing points of sugarcane tail stalk. The Poisson's ratio parameters of each component were obtained by electrometric method and mechanical analysis. 【Result】The PRXY of sugarcane skin and core of the fifth section below the growing points of sugarcane tail stalk was less than 0.028 and 0.174, and the NUXY was 0.233 and 0.271, respectively. The PRXY of sugarcane skin and core of the sixth section below the growing points was less than 0.001 and 0.223, and the NUXY was 0.238 and 0.289 respectively. The PRXY of sugarcane joint was less than 0.305 and the NUXY was 0.344. 【Conclusion】The PRXY has significant differences among different parts of the sugarcane tail stalk, while the NUXY has little difference. Sugarcane skin and core both have significant differences in PRXY between the

fifth and sixth sections below the growing points of sugarcane tail stalk, which has no significant difference in NUXY.

Key words: sugarcane tail stalk; mechanical analysis; Poisson's ratio; electrometric method; dynamic simulation

目前,我国食糖生产成本过高、蔗糖产业国际竞争力十分低下、糖价大大高于国际标准^[1],巴西、美国等进口蔗糖的到岸价比我国蔗糖的完税价要低 8 到 10 个百分点^[2]。造成这一情况的主要原因是我国大部分蔗区的生产收获基本靠人工作业,甘蔗收获机械化程度低。断尾除叶作为甘蔗收获的关键环节,是制约甘蔗收获机械发展的瓶颈^[3]。甘蔗断尾是刚性体(机械)和柔性体(甘蔗尾茎)相互作用的过程^[4],现阶段研究^[5-9]通常是根据经验估算从而进行断尾机构的设计研究,对甘蔗尾茎力学特性的分析很少,难以从本质上揭示甘蔗断尾的机理。因此,研究甘蔗尾茎的力学特性对于甘蔗断尾机械的设计开发、建立虚拟蔗尾模型进行断尾动力学仿真及有限元分析是非常必要的。在甘蔗尾茎的力学特性研究中,泊松比参数是不可或缺的,它是建立甘蔗茎秆力学模型和虚拟仿真模型的必要参数之一^[10]。鲜见明确的测定甘蔗尾茎泊松比的方法^[11-12],构建甘蔗力学模型时所需的泊松比参数是根据横观各向异性材料力学公式及甘蔗尾茎各组分弹性模量推导得出^[10],或者部分泊松比参数根据农业生物力学由其他物料泊松比比拟得出^[13]。由于误差的累加以及各种农业物料的微观结构的差异,以上方法间接得到的甘蔗泊松比参数会产生较大误差^[14],而用电测法直接试验得到泊松比参数,过程大为简化,可缩短科研周期^[15]。

本研究借鉴竹子、苜蓿秆、苕麻、玉米等茎秆类作物的力学分析方法^[16-21],结合甘蔗茎秆力学特性与复合材料力学理论,建立甘蔗尾茎力学模型;借鉴对农林作物泊松比的相关研究^[22-25],将电测法试验与理论分析相结合,确立甘蔗尾茎的泊松比参数,以为深入研究甘蔗断尾机理提供理论基础。

1 甘蔗尾茎结构及力学模型

1.1 甘蔗尾茎结构特点

甘蔗属于实芯秸秆类植物,内部有明显的芯结构,且不同部位具有不同的结构特点。甘蔗尾茎的横截面近似圆形,横截面由内到外分为甘蔗芯和甘蔗皮 2 部分,蔗茎由若干节和节间组成。甘蔗皮特点是细胞小,排列紧密;甘蔗芯有许多纤维状结构,这些纤维沿轴向整齐排列;甘蔗节的纤维结构较甘

蔗芯紧密。因此甘蔗茎秆在微观结构上不连续,并且在空间排列上具有明显的方向性。成熟期蔗茎尾梢被叶鞘包裹,以生长点以下约 1~5 节包裹最为紧密,这部分蔗尾含糖极少,脆弱易断,前期试验证明蔗尾茎生长点以下 1~5 节的抗弯强度明显低于 6~9 节的抗弯强度,差异极显著,蔗尾在第 5 节位置断裂,可以将甘蔗尾部 5~6 片包裹紧密的青叶连同茎秆尾梢部分一起断除,大大降低剥叶难度,有效提高原料蔗的质量^[26-28]。所以建立甘蔗材料模型进行断尾动力学研究的时候,可将甘蔗整秆简化为蔗尾部分和蔗身部分,中间是蔗节连接,蔗尾部分和蔗身部分及蔗节部分力学性能差异很大,本研究将蔗尾生长点以下第 5 节的力学参数作为蔗尾部分力学参数,第 6 节的力学参数作为蔗身部分的力学参数。

1.2 甘蔗尾茎力学模型

甘蔗尾茎皮、芯、节 3 部分可以抽象为具有正交各向异性,且横观各向同性的材料^[29-30],该材料的结构沿轴向对称,忽略甘蔗节径向尺寸的细微差异,可将甘蔗尾茎试样视为类似圆柱体的几何形状;甘蔗尾茎分别由甘蔗皮、甘蔗芯和甘蔗节 3 种不同材质组成,各材质的纤维均沿轴向整齐排列,建立如图 1 所示坐标系,沿甘蔗尾茎轴向建立 Z 轴,沿甘蔗尾茎径向分别建立 X 轴和 Y 轴。

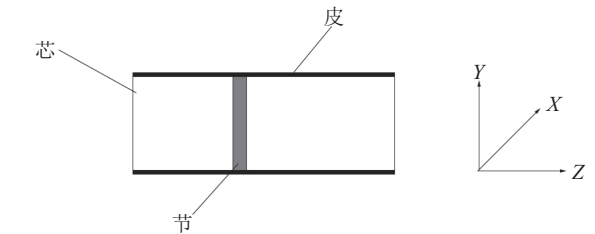


图 1 甘蔗尾茎几何模型

Fig. 1 The geometrical model of sugarcane tail stalk

1.3 甘蔗尾茎泊松比参数的确立

根据复合材料力学理论,甘蔗尾茎各组分泊松比可由 9 个工程弹性参数来表征,分别为甘蔗皮同性平面泊松比 μ_{1XY} ;甘蔗皮异性平面泊松比 μ_{1XZ} 、 μ_{1YZ} ;甘蔗芯同性平面泊松比 μ_{2XY} ;甘蔗芯异性平面泊松比 μ_{2XZ} 、 μ_{2YZ} ;甘蔗节轴向泊松比 μ_{3XY} ;甘蔗节径向泊松比 μ_{3XZ} 、 μ_{3YZ} 。

根据甘蔗几何形状的假定以及上述推论,甘蔗尾茎属于特殊的复合材料,正交各向异性,且甘蔗尾茎横截面具有横观各向同性的特点,其各组分泊松比参数满足式(1)^[31]。

$$\begin{cases} \mu_{iXZ} = \mu_{iYZ} \\ \mu_{iXY} = \frac{E_{iX}}{2G_{iXY}} - 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量, MPa; G 为剪切模量, MPa; X 、 Y 和 Z 分别为 3 个坐标轴方向; $i=1, 2, 3$ 分别代表甘蔗皮、甘蔗芯和甘蔗节。

采用电测法,设计专门夹具来测量甘蔗尾茎各组分轴向拉伸泊松比,由试验得出甘蔗尾茎各组分横向应变(ϵ')和纵向应变(ϵ),根据式(2)计算出各组分轴向泊松比^[32]。

$$\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|.$$
 (2)

最后根据复合材料力学中关于正交各向异性材料的泊松比关系式(3),结合甘蔗各组分径向拉伸弹性模量、各组分轴向拉伸弹性模量和各组分异性平面泊松比所得数据,确定甘蔗各组分径向泊松比参数。

$$\mu_{iXY} < \frac{E_{iX}^2}{2\mu_{iYZ}^2 E_{iZ}^2}.$$
 (3)

2 力学试验

2.1 试验材料

WD-E 精密型微控电子式万能试验机; YJ-4501A/SZ 静态数字电阻应变仪; 辅助测试工具包括砝码、游标卡尺、直尺、兆欧表、电烙铁、砂轮机等。

本试验根据甘蔗尾茎的结构特点设计专用夹具(图 2),该夹具主要由支座、压块、螺栓等组成。

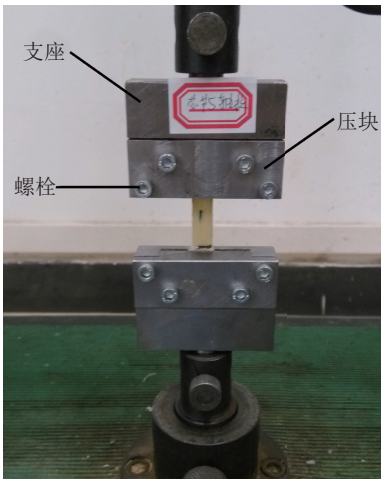


图 2 轴向拉伸夹具
Fig. 2 Fixtures for axial tensile test

为使甘蔗各组分样本受力均匀,得到较为准确的试验数据,将甘蔗各组分样本制成规则矩形,并在压块和支座上加工有凹槽,上面有斜纹滚花,以增大摩擦。

试验材料为成熟期甘蔗粤糖 159, 采自广东省广前糖业发展有限公司前进农场,采样时间为 2016 年 1 月。将甘蔗尾梢相互重叠的青叶剥除干净,取蔗尾茎顶端生长点以下第 5 节和第 6 节制作试验样本。

2.2 方法

2.2.1 拉伸试验 将甘蔗第 5 节和第 6 节的甘蔗皮和甘蔗芯制成长 60 mm、宽 10 mm、厚 2 mm 的样本,两端夹持尺寸分别为 20 和 15 mm,中间留 10 mm 标距粘贴应变片,应变片粘贴方法如图 3a 所示;将甘蔗第 5 节和第 6 节中间的蔗节部位制成如图 3b 所示试样,两端蔗身用于夹具夹持,蔗节部

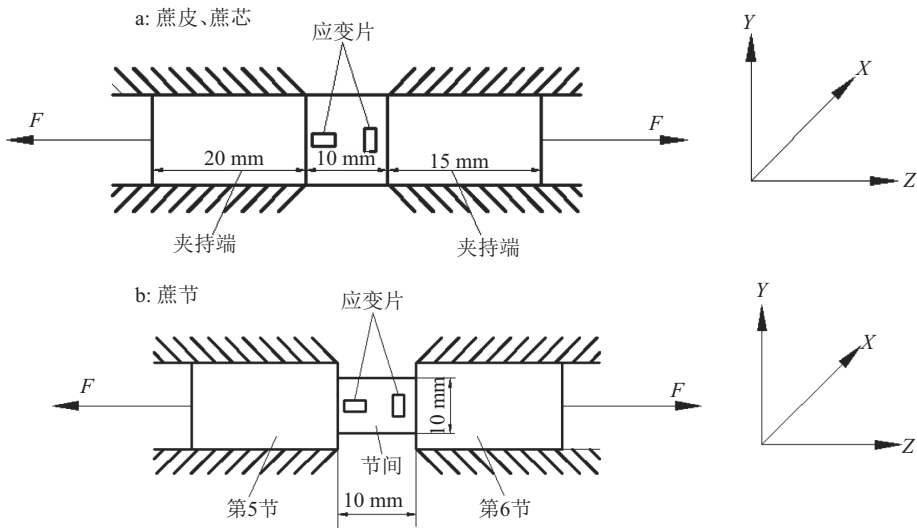


图 3 应变片粘贴方法
Fig. 3 Method of pasting strain gauges

位开槽后长宽高均为 10 mm, 用于粘贴应变片, 沿着试样的轴向进行拉伸试验。试验时为避免拉伸速率太慢, 出现滑移现象并造成数据错误, 经过测试对比, 本试验拉伸速率设定为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

为避免甘蔗试样在夹紧的过程中发生滑移和破坏, 试验样本在装夹部位用纱布、胶水和橡胶手套固紧。为保证拉伸试验的准确性, 防止试样表面不平而引起的应力集中, 在拉伸试验前用砂轮机将试验样本装夹表面磨平, 并用石蜡抹平试样装夹表面的凹凸处。

2.2.2 泊松比的提取 为了获得较为精确的泊松比数值, 每个试样在进行拉伸试验前都要用兆欧表进行绝缘检查, 防止应变片与样本短路。YJ-4501A/SZ 静态数字电阻应变仪采用半桥测量电路^[33], 外接 2 个固定电阻, 电阻应变片的贴片及接桥方式如图 4 所示。试验时用 2 台电阻应变仪分别测量试样的横向应变和轴向应变, 运用公式算出试样泊松比, 防止切换测量通道时引起的测量误差。同一部位的样本做 20 个试样, 去除试验过程中不可抗力因素引起的失败样品, 最后取 15 个成功试样进行统计分析, 得出不同组分的泊松比参数值。统计公式如下:

$$\mu_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon'_i}{\varepsilon_i} \right) \quad , \quad (4)$$

式中, μ_0 为泊松比; n 为取样数; ε'_i 为横向应变; ε_i 为轴向应变。

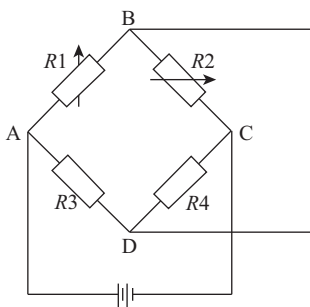


图 4 半桥电路接桥方法

Fig. 4 The bridge connecting method of half bridge

2.3 试验结果与分析

2.3.1 轴向拉伸泊松比 对甘蔗皮、芯、节的 15 组试样进行轴向拉伸试验, 为保证结果的准确性, 分别在 10、20、30、40、50 g 载荷下测量样本泊松比, 最后取其平均值, 第 5、6 节甘蔗皮的泊松比为 0.233 ± 0.073 和 0.238 ± 0.051 ; 第 5、6 节甘蔗芯的泊松比为 0.271 ± 0.045 和 0.289 ± 0.049 ; 第 5、6 节间甘

蔗节的泊松比为 0.344 ± 0.086 。
2.3.2 甘蔗尾茎各组分泊松比 采用 WD-E 精密型微控电子式万能试验机分别对甘蔗第 5、6 节各组分的 15 个试样进行轴向和径向拉伸试验, 并在万能试验机上得到试样的载荷-位移曲线。为消除尺寸的影响, 将试验机上的载荷-位移曲线转化为应力-应变曲线, 如图 5 所示。

载荷、位移、应力和应变相互转化关系见以下公式:

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (5)$$

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (7)$$

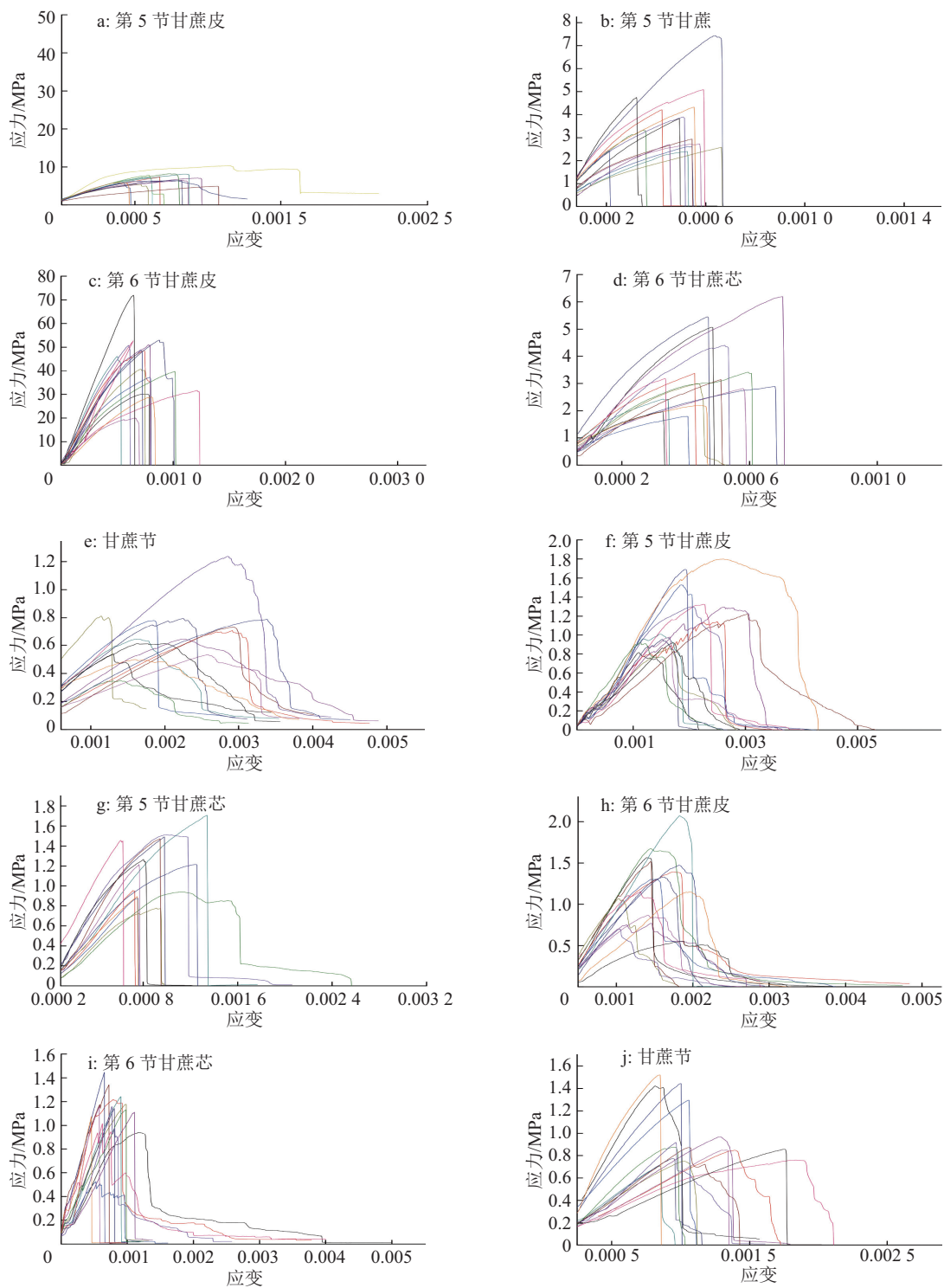
$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{A}, \quad (8)$$

式 (5)~(8) 中, σ 为应力, MPa; P 为拉伸载荷, N; A 为断面面积, mm^2 ; ε 为应变; ΔL 为伸长量, mm; L 为标距原始长度, mm; $\sigma_{\max}$ 为抗拉强度, MPa; $P_{\max}$ 为最大拉伸载荷, N。

运用 SPSS 软件对上述应力-应变曲线进行最小二乘法拟合分析, 求取甘蔗尾茎各组分弹性模量平均值得到如下结果: 第 5 节甘蔗皮和甘蔗芯的径向弹性模量分别为 6.90 和 14.30 MPa, 相应的轴向弹性模量分别为 124.97 和 89.55 MPa; 第 6 节甘蔗皮和甘蔗芯的径向弹性模量分别为 8.14 和 15.95 MPa, 相应的轴向弹性模量分别为 705.93 和 82.66 MPa; 第 5、6 节间甘蔗节的径向弹性模量为 63.87 MPa, 轴向弹性模量为 237.58 MPa。

从图 5 可以看出, 部分应力-应变曲线差异较大, 分析其原因主要是: 甘蔗各样本结构尺寸差异大, 要制作统一的样本很困难; 各样本含水率对试验的结果影响很大, 样品含水率的差异使应力-应变曲线差异较大; 甘蔗自身组织结构的差异, 导致试验结果存在较大差异, 已有研究证明蔗尾茎秆的力学性能与其微观组织结构有关^[34]; 试验加载速率也会对试验结果产生影响。

将甘蔗皮、甘蔗芯及蔗尾茎第 5、6 节各组分轴向弹性模量和径向弹性模量代入式 (3) 得各组分同性面的泊松比, 第 5 节甘蔗同性面芯和皮泊松比分别小于 0.174 和 0.028; 第 6 节甘蔗同性面芯和皮泊松比分别小于 0.223 和 0.001。甘蔗节同性面泊松比小于 0.305。综合试验和计算所到的泊松比参数,



a~e 为轴向拉伸; f~j 为径向拉伸。

图 5 轴向和径向拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of axial and radial tension

结合式 (1), 可得甘蔗尾茎各组分泊松比, 如表 1 所示。

运用 SPSS 软件对第 5、6 节的甘蔗皮、芯试样的同性面泊松比和异性面泊松比分别进行独立样本 t 检验, 分析蔗尾顶端生长点以下 5、6 节各组分的泊松比的差异显著性。分析结果表明: 第 5、6 节的

甘蔗皮和芯试样同性面泊松比, $P < 0.01$, 由此可以认为第 5、6 节的甘蔗皮和甘蔗芯的同性面泊松比差异均显著; 第 5、6 节甘蔗皮和芯试样异性面泊松比, P 分别为 0.096 和 0.012, 由此可以认为第 5、6 节的甘蔗皮和甘蔗芯的异性面泊松比差异均不显著。

表 1 甘蔗尾茎各组分泊松比参数
Tab. 1 Poisson's ratio parameters of each part of sugarcane tail stalk

组分	同性面泊松比(μ_{XY})		异性面泊松比(μ_{YZ})		异性面泊松比(μ_{XZ})	
	第5节	第6节	第5节	第6节	第5节	第6节
甘蔗皮	<0.028	<0.001	0.233	0.238	0.233	0.238
甘蔗芯	<0.174	<0.223	0.271	0.289	0.271	0.289
甘蔗节	<0.305		0.344		0.344	

分别对甘蔗第 5、6 节不同节位各组分对应参数进行单因素方差分析 (表 2)。从表 2 可以看出, 甘蔗皮同性面泊松比的 $P=0<0.05$, 甘蔗芯同性面泊松比的 $P=0.041<0.05$, 表明在 95% 的置信区间内, 第 5、6 节不同节位各组分的同性面泊松比参数有显著差异; 甘蔗皮异性面泊松比的 $P=0.791>0.05$, 甘蔗芯异性面泊松比的 $P=0.324>0.05$, 表明在 95% 的置信区间内, 第 5、6 节不同节位各组分的异性面泊松比参数差异不显著。分析结果表明, 甘蔗尾茎各组分的泊松比参数不一致, 差异显著; 甘

蔗芯部同性面泊松比参数比甘蔗皮部大 0.145, 在一定范围内, 甘蔗从表皮到内部泊松比逐渐变大, 说明在建立甘蔗尾茎材料模型的时候, 甘蔗皮、芯应视为完全不同的材料, 可简化为由皮、芯 2 种单向复合材料组合而成的复杂复合材料, 蔗皮与芯部存在结合力^[35]。第 5、6 节不同节位的各组分泊松比力学参数存在明显差异, 证明将蔗尾模型简化为蔗尾部分和蔗身部分, 蔗尾生长点以下第 5 节的力学参数作为蔗尾部分力学参数, 第 6 节的力学参数作为蔗身部分的力学参数这一假设的正确性。

表 2 甘蔗节位对泊松比参数影响方差分析
Tab. 2 Variance analysis of Poisson's ratio parameters affected by different sugarcane nodes

性状	差异来源	平方和	自由度	均方	F	$P^{1)}$
甘蔗皮同性面泊松比	组间	0.009	1	0.009	34.188	0.000**
	组内	0.008	28	0.000		
	总和	0.017	29			
甘蔗皮异性面泊松比	组间	0.000	1	0.000	0.072	0.791
	组内	0.110	28	0.004		
	总和	0.110	29			
甘蔗芯同性面泊松比	组间	0.024	1	0.024	4.142	0.041*
	组内	0.164	28	0.006		
	总和	0.188	29			
甘蔗芯异性面泊松比	组间	0.002	1	0.002	1.008	0.324
	组内	0.063	28	0.002		
	总和	0.065	29			

1) *和**分别表示在 0.05、0.01 水平差异显著。

3 结论

运用复合材料力学理论假定甘蔗力学模型, 采用电测法代替传统的比拟法测量分析获得甘蔗各组分试样的横纵向变形量, 得到较为准确的甘蔗第 5、6 节各组分泊松比参数值。

试验得到甘蔗尾茎生长点以下第 5 节甘蔗皮同性面泊松比小于 0.028, 异性面泊松比为 0.233; 第 5 节甘蔗芯同性面泊松比小于 0.174, 异性面泊松比为 0.271; 甘蔗生长点以下第 6 节甘蔗皮同性

面泊松比小于 0.001, 异性面泊松比为 0.238; 第 6 节甘蔗芯同性面泊松比小于 0.223, 异性面泊松比为 0.289; 甘蔗节同性面泊松比小于 0.305, 异性面泊松比为 0.344。甘蔗尾茎内部不同部位的同性面泊松比有显著差异, 异性面泊松比差异不大; 甘蔗芯部同性面泊松比参数比甘蔗皮部大 0.145。试验结果表明, 在一定范围内, 甘蔗从表皮到内部泊松比逐渐变大。甘蔗尾茎第 5、6 节不同节位的皮、芯同性面泊松比参数有显著差异; 第 5、6 节不同节位的皮、芯异性面泊松比参数差异不显著。甘蔗第

5 节皮部同性面泊松比参数比第 6 节大 0.027, 第 5 节芯部同性面泊松比参数比第 6 节小 0.050。本研究可为甘蔗断尾机构的设计及数学模型的建立进行动力学仿真提供理论基础。

参考文献:

- [1] 梁兆新. 甘蔗生产机械化发展状况探讨[J]. 中国农业机械化, 2003(2): 14-18.
- [2] 何礼新, 伍勤忠. 蔗糖业应在稳定中发展[J]. 广西农业学报, 2003(3): 35-38.
- [3] 莫建霖, 刘庆庭. 我国甘蔗收获机械化技术探讨[J]. 农机化研究, 2013, 35(3): 12-18.
- [4] 沈成, 李显旺, 田昆鹏, 等. 苕麻茎秆力学模型的试验分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 26-33.
- [5] MENOSSE M, SILVA-FILHO M C, VINCENTZ M, et al. Sugarcane functional genomics: Gene discovery for agronomic trait development[J/OL]. Int J Plant Genom, 2007, 2008: 1-11. <http://downloads.hindawi.com/journals/ijpg/2008/458732.pdf>.
- [6] 罗菊川, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 整秆式甘蔗联合收获机断蔗尾机构[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 89-94.
- [7] 麻芳兰, 蒋红梅, 李尚平, 等. 整秆式甘蔗收获机剥叶断尾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 73-78.
- [8] 肖宏儒, 王明友, 宋卫东, 等. 整秆式甘蔗联合收获机降低含杂率的技术改进与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 42-45.
- [9] 牟向伟, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 弹性齿滚筒式甘蔗剥叶装置[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 60-65.
- [10] 黄汉东, 王玉兴, 唐艳芹, 等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 161-166.
- [11] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆在扭转、压缩、拉伸荷载下的破坏试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 201-204.
- [12] 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.
- [13] 孟海波. 秸秆切割破碎与揉切机刀片耐用性试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [14] 刘春香, 马小愚, 雷浦. 马铃薯块茎组织泊松比的试验研究[J]. 农机化研究, 2007(3): 101-103.
- [15] HIRAI Y, INOUE E, MORI K, et al. Investigation of mechanical interaction between a combine harvester reel and crop stalks[J]. Biosyst Eng, 2002, 83(3): 307-317.
- [16] SHANE M W, MCCULLY M E, CANNY M J. The vascular system of maize stems revisited: Implications for water transport and xylem safety[J]. Ann Bot-London, 2000, 86(2): 245-258.
- [17] 廖娜, 黄光群, 陈龙健, 等. 玉米秸秆芯结构建模与径向压缩过程模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 117-121.
- [18] GALEDAR M N, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems[J]. Biosys Eng, 2008, 101(2): 199-208.
- [19] MA J, CHEN W, ZHAO L, et al. Elastic buckling of bionic cylindrical shells based on bamboo[J]. J Bionic Eng, 2008, 5(3): 231-238.
- [20] 刘兆朋, 谢方平, 吴明亮, 等. 苕麻成熟期底部茎秆的机械物理特性参数研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2011, 37(3): 329-332.
- [21] 崔英. 实芯植物秸秆的力学模型及受压缩状态应力分析研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [22] 康福华. 矮丰三号小麦茎秆的力学性质初探[J]. 西北农业大学学报, 1986, 14(3): 17-29.
- [23] 杨望, 杨坚, 刘增汉, 等. 入土切割对甘蔗切割过程影响的仿真试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 150-156.
- [24] 王丽宇, 鹿振友, 申世杰. 白桦材 12 个弹性常数的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 64-67.
- [25] KÖHLER L. Biphasic mechanical behaviour of plant tissues[J]. Mat Sci Eng: C, 2000, 11(1): 51-56.
- [26] 罗菊川, 区颖刚, 刘庆庭. 甘蔗尾茎弯曲的力学性能[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 400-403.
- [27] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 78-89.
- [28] 陈梦成, 张安哥. 横观各向同性材料的三维断裂力学问题[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 612-617.
- [29] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 113-148.
- [30] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 85-86.
- [31] 丁皓江, 梁剑, 邹道勤. 横观各向同性弹性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 36-47.
- [32] O'DOHERTY M J, HUBER J A, DYSON J, et al. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw[J]. J Agr Eng Res, 1995, 62(2): 133-142.
- [33] 葛宜元, 王金武, 李世伟, 等. 整株秸秆还田机刀轴载荷谱编制与疲劳寿命估算[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 77-80.
- [34] 赵春花, 韩正晟, 王芬娥, 等. 收割期牧草底部茎秆生物力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 85-89.
- [35] 刘庆庭, 区颖刚, 王万章, 等. 甘蔗茎秆的材料模型与本构方程[C]//中国农业工程学会. 中国农业工程学会 2007 年学术年会论文集. 北京: 中国农业工程学会, 2007: 16-19.

【责任编辑 霍 欢】