

引文格式: 陈舜, 张新伟, 易克传, 等. 鲜食玉米苞叶的拉伸断裂特性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1085–1092. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202212014](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202212014)

鲜食玉米苞叶的拉伸断裂特性研究*

陈舜, 张新伟, 易克传**, 沙学猛, 陈珺炘, 苑凤霞

(安徽科技学院 机械工程学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要:【目的】研究鲜食玉米苞片在整个收获期的物理性质和拉伸性能, 旨在实现以最小能量断裂苞叶, 进行高效脱皮, 降低籽粒破损率。【方法】以金银花 1918 和闽双色 9 号 2 种鲜食玉米为研究对象, 以断裂力、抗拉强度和断裂能为参数进行收获期鲜食玉米叶片拉伸试验和叶鞘拉伸试验, 比较分析苞叶含水量、苞叶厚度和拉伸载荷方向对叶片和叶鞘拉伸性能的影响。【结果】单因素分析表明: 叶片拉伸性能对断裂力和断裂能有极显著影响 ($P<0.01$), 但对抗拉强度影响不明显 ($P>0.05$); 叶片纵向拉伸的平均断裂力、抗拉强度和平均断裂能分别约为横向拉伸的 3.91 倍、4.70 倍和 11.20 倍; 苞叶含水量对叶鞘的拉伸性能有极显著影响 ($P<0.01$), 叶鞘厚度的断裂力和断裂能对叶鞘的拉伸性能有极显著影响 ($P<0.01$), 但对叶鞘厚度的抗拉强度无显著影响 ($P>0.05$); 叶鞘拉伸受力与自然受力方向的夹角相关, 夹角越小受力越大, 夹角越大受力越小。【结论】叶片的机械剥皮过程更易发生横向断裂, 增加对苞叶的拉力角可以降低苞叶机械剥离的损耗, 提高机械剥皮的效率和质量。

关键词: 鲜食玉米苞叶; 物理性质; 拉伸性能; 断裂特性; 机械剥皮

中图分类号: S513.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 06-1085-08

Study on Tensile Properties and Fracture Characteristics of Fresh Corn Bracts

CHEN Shun, ZHANG Xinwei, YI Kechuan, SHA Xueming, CHEN Junheng, YUAN Fengxia

(College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: [Purpose] To study the physical property and tensile property of fresh corn bracts during the whole harvest period, and to achieve the minimum energy to break the bracts, carry out efficient peeling, and reduce the grain damage rate. [Methods] Two kinds of fresh corn, Jinyinhua1918 and Minshuangse No.9, were selecting as the research objects. The tensile tests of fresh corn blades and leaf sheaths at harvest stage were carried out with the parameters of fracture force, tensile strength and fracture energy. The effects of bract water content, bract thickness and tensile load direction on the tensile properties of blades and leaf sheaths were compared and analyzed. [Results] One-way factor analysis showed that the tensile properties of blade had a significant effect on fracture force and fracture energy ($P<0.01$), but the effect on tensile strength was not significant ($P>0.05$); the average fracture force, tensile strength, and average fracture energy of the longitudinal tensile blade were about 3.91 times, 4.70 times, and 11.20 times of the transverse tensile blade, respectively; the water content of bract had an extremely significant effect on the tensile properties of sheaths ($P<0.01$), the

收稿日期: 2022-12-19

修回日期: 2023-08-14

网络首发日期: 2023-11-08

*基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (202104a06020001)。

作者简介: 陈舜 (1994—), 男, 山东菏泽人, 在读硕士研究生, 主要从事农产品收获与加工机械化研究。

E-mail: 2816784528@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 易克传 (1969—), 男, 安徽凤阳人, 硕士, 教授, 主要从事农产品收获与加工研究。E-mail: yikechuan@sina.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231107.1355.004>



fracture force and fracture energy of leaf sheath thickness had an extremely significant effect on the tensile properties of leaf sheaths ($P < 0.01$), but had no significant effect on the tensile strength of leaf sheath thickness ($P > 0.05$); the tensile force of sheath was related to the angle between the direction of natural force, and the smaller the angle, the greater the force, the greater the angle, the smaller the force. [**Conclusion**] The mechanical peeling process of the blade is more prone to transverse fracture. Increasing the pulling angle of the bract can reduce the loss of mechanical peeling of the bract, and improve the efficiency and quality of mechanical peeling.

Keywords: fresh corn bracts; physical property; tensile properties; fracture characteristics; mechanical peeling

鲜食玉米也称水果玉米, 是一种粮蔬兼用的乳熟期采摘新鲜果穗玉米。近年来, 鲜食玉米以其独特的营养价值和口感, 受到越来越多消费者的欢迎^[1-2]。据统计: 截至 2020 年, 中国鲜食玉米年种植面积超过 134 万 hm^2 , 是目前全球最大的鲜食玉米生产和消费国家^[3]。鲜食玉米收获加工工序为: 剥皮剔除→果穗切端→果穗清洗→果穗蒸煮→冷却、沥水→真空包装等, 果穗剥皮是玉米机械化收获过程中的重要环节^[4]。收获期如不能及时剥除鲜食玉米苞叶, 籽粒容易发生霉变; 在去除苞叶的前提下, 实现鲜食玉米收获机械化作业对于提高生产效率、减轻劳动强度、降低收获损失和确保丰收至关重要, 其中, 减少和防止过度剥离力造成的机械损伤值得特别关注。

机械拉伸是测试苞叶机械剥离最简单的方法, 对于机械去叶具有重要的现实意义^[5]。研究认为植物叶片的分布位置和取向对叶片的拉伸有着重要的影响^[6], 断裂强度取决于静脉的方向, 特别是平行于静脉的拉力^[7-8]。TANG 等^[9]研究发现: 随着水分含量的降低, 水稻叶片抗拉强度逐渐降低, 且呈先增大后减小的趋势。一些研究还发现了物种间断裂力和断裂能的差异主要来自于植物部位截面积的差异^[10-13]。可见, 施加载荷位置和取向、含水量以及横截面积对植物叶片的拉伸有较大的影响。目前, 关于鲜食玉米苞叶拉伸的研究相对较少, 研究鲜食玉米苞叶拉伸的性能有助于以最低的能量去除苞叶, 以解决提高鲜食玉米产品品质、降低机械损伤等关键问题^[14-15]。

本研究以 2 个鲜食玉米品种为样品, 对其苞叶的物理性能和拉伸性能进行测试。目的在于比较苞叶含水量、苞叶厚度和拉伸载荷方向对鲜食玉米收获期叶片和叶鞘拉伸性能的影响, 建立叶片和叶鞘的断裂力、抗拉强度、断裂能随苞叶含

水量和厚度变化的数学模型, 以期用于鲜食玉米剥皮装置的设计和参数的设置。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于安徽省滁州市安徽科技学院试验基地 ($\text{N}32^\circ52'60''\sim32^\circ54'23''$, $\text{E}117^\circ32'60''\sim117^\circ33'51''$, 海拔 197.5 m), 平均气温 15.9°C , 年降雨量 800~1000 mm。播种前试验地的土壤理化性状为: 有机质含量 13.60 g/kg, 全氮含量 0.04 g/kg, 全磷含量 0.60 g/kg, 有效磷含量 32.41 mg/kg, 全钾含量 2.72 g/kg, 速效钾含量 146.99 mg/kg, pH 值 6.01。

1.2 供试材料

以金银花 1918 和闽双色 9 号 2 种鲜食玉米品种作为试验样品。该种鲜食玉米一般一年可播种多次, 尤其在春夏季节, 成熟时间短, 易收获。本次试验试样于 2022 年 7 月播种, 从播种到成熟生长期为 80~90 d。玉米苞叶由叶片和叶鞘组成^[16], 重叠的苞叶通过花梗的连接包裹着果穗和籽粒 (图 1)。剥皮过程中, 苞叶的断裂部位主要发生于叶片或花梗交界处^[17], 因此, 本研究选取鲜食玉米苞叶叶片和叶鞘作为拉伸试验位置。

1.3 试验仪器

UTM6104 型微机控制电子万能试验机, 上海三思机械制造有限公司; ZG-TP203 型电子天平, 上海然浩电子有限公司; 300 mm 111-103 型游标卡尺, 日本三量公司。电子万能拉伸试验机试验平台 (图 2) 的配套软件可实时显示拉伸数据, 并可导出数据进行后期处理。

1.4 试验设计

1.4.1 物理性质的测定

在收获期随机选取 50 穗鲜食玉米, 测定每

个鲜食玉米的穗长、穗宽、叶片厚度、苞叶叶鞘厚度和苞叶总数;比较不同层苞叶的物理性质,测定苞叶含水量。

1.4.2 拉伸试验

金银花 1918 苞叶数为 8~13 层,闽双色 9 号苞叶数为 8~14 层。因最外层的苞叶长期与外界环境接触以及收获过程中的破坏而受损,本研究以第 2~8 层苞叶为例,研究苞叶的拉伸性能。将每片叶片切成 2 个试样进行拉伸试验,一个试样叶片沿着纵向脉方向切取长 100 mm、宽 30 mm 的矩形,进行纵向拉伸试验;另一个试样叶片沿着垂直于纵向脉方向相同叶片、相似位置的剩余部分切取长 50 mm、宽 30 mm 的矩形,进行横向

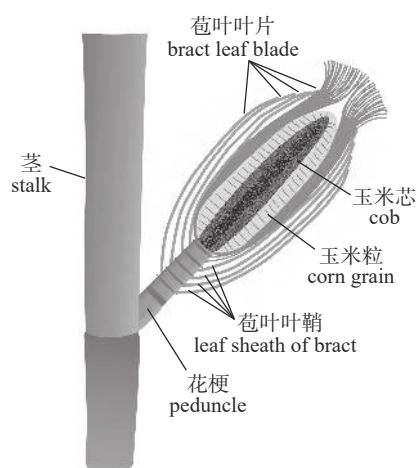


图1 鲜食玉米穗形态结构剖面图

Fig. 1 Section diagram of morphological structure of a fresh corn ear

拉伸试验。取试样果穗和苞叶进行叶鞘拉伸试验,叶鞘与花梗的连接长度控制在 15 mm,去除外层易碎或易坏苞叶,每个试验组准备 5 个试样。

试验前正确安装用于拉伸的夹具,安装时不宜过紧,以免内应力过大影响试验结果。将试样通过机械夹具固定在试验机的下横梁和动横梁之间,传感器归零。移动梁以 10 mm/min 的恒定速度向上移动,直至试样断裂。在试验过程中,试样从夹具上滑落或折断的试样判定为无效。单次试验重复 5 次,计算各试验指标的平均值和标准差,绘制有效试验荷载—位移曲线,确定断裂力、抗拉强度和断裂能。

断裂力是试样在拉伸状态下断裂破坏时所承受的最大力;抗拉强度(σ_t)定义为试样单位横截面积的断裂力,单位为 MPa,计算公式为^[6, 18-19]:

$$\sigma_t = \frac{F_b}{A} = \frac{F_b}{w \cdot t}$$

式中: F_b 为断裂力, N; A 为试样截面积, mm^2 ; w 为试样宽度, mm; t 为试样平均厚度, mm。

断裂能是材料断裂所需要消耗的能量,是材料在外力作用下变形所产生的内能,描述为从试验原点到最大加载点的荷载—位移曲线下的面积,其数学表达式为^[10, 20-21]:

$$E_g = \int_0^x F(x) dx \approx \sum_{n=0}^{n=i-1} \left[\left(\frac{F_{n+1} + F_n}{2} \right) (x_{n+1} - x_n) \right]$$

式中: E_g 为断裂能, J; $F(x)$ 表示与力和变形 (N·mm) 有关的多项式和指数函数; F_n 和 F_{n+1} 为

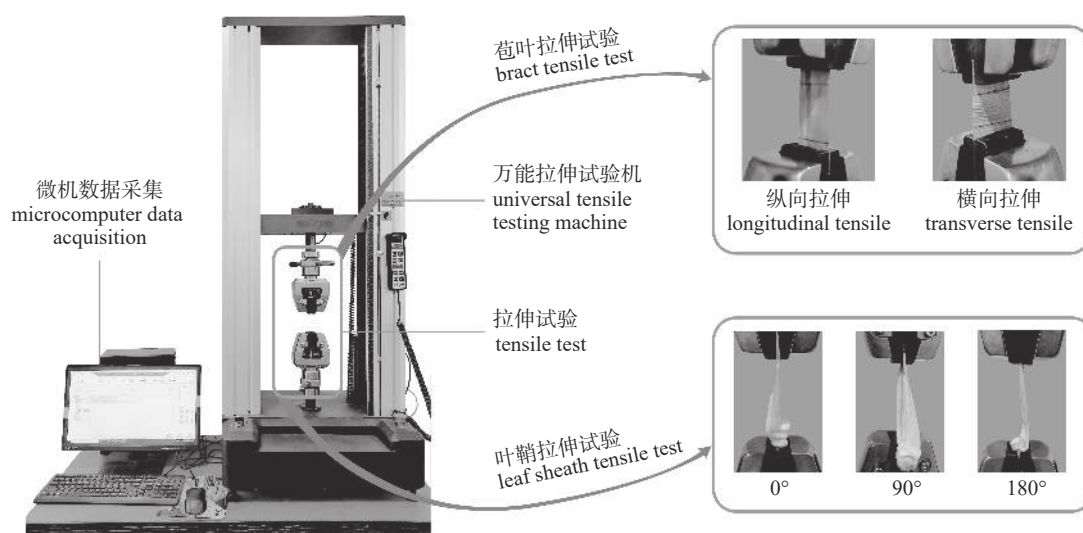


图2 微机控制电子万能试验机平台

Fig. 2 Microcomputer control electronic universal testing machine platform

拉伸载荷, N; x_n 和 x_{n+1} 为试件延伸率, mm。

1.5 数据处理与分析

试验数据使用 SPSS 22.0 软件进行回归分析和单因素方差分析 (ANOVA), 在显著性水平上设为 0.05, 用 Duncan 区间检测评估处理之间的差异, 表明显著性; 采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 鲜食玉米材料的物理性质

由表 1 可知: 2022 年 9 月 17 日—26 日, 金银花 1918 的苞叶、花梗和籽粒含水量分别下降 20.69%、26.82% 和 19.50%, 闽双色 9 号的苞叶、花梗和籽粒含水量分别下降 26.73%、23.57% 和 18.69%。可见, 随着收获日期的推迟, 鲜食玉米果穗各部位水分含量呈下降趋势。2 种鲜食玉米的叶片厚度、叶鞘厚度、苞叶长度和苞叶宽度均随着收获日期的推迟而呈减小的趋势, 即鲜食玉米叶片含水量较高时, 叶片内部间隙充满水分; 而当叶片含水量降低时, 叶片水分随时间的推移而蒸发散失, 导致叶片内部水分缺失干燥, 从而使叶片紧缩。由表 2 可知: 第 2~8 层苞叶叶片和

叶鞘的平均厚度由外层到内层逐渐减小, 平均含水量由外层到内层呈先增大后减小的趋势。

2.2 叶片拉伸试验结果

由表 3 可知: 在试样宽度相同的情况下, 2 个品种叶片的纵向拉伸和横向拉伸断裂力均表现出由外层到内层逐渐减小的趋势; 在纵向拉伸和横向拉伸过程中, 抗拉强度由外层到内层表现为减小的趋势, 但是各层叶片的抗拉强度差异性较小, 这与叶片的含水量有一定的关系; 断裂能总体呈先增大后减小的趋势, 在接近中间层偏外呈最大断裂能, 这与含水量和叶片厚度有关。单因素分析表明: 叶片拉伸性能对断裂力和断裂能有极显著的影响 ($P<0.01$), 但对抗拉强度影响不明显 ($P>0.05$)。

由图 3 可知: 叶片最大伸长率随收获日的推迟而减小, 而断裂力的变化趋势则相反。增加横、纵 2 个方向上的拉伸载荷, 试件延伸率也随之变化, 当达到试样最大承受峰值时, 试件会断裂而突然下降。纵向拉伸叶片的平均断裂力和抗拉强度分别约为横向拉伸叶片的 3.91 倍和 4.70 倍; 纵向拉伸叶片的平均断裂能约为横向拉伸叶

表 1 鲜食玉米材料物理性质
Tab. 1 Physical properties of fresh corn materials

材料 materials	收获日期 (mm-dd) harvest date	叶片厚度/mm blade thickness	叶鞘厚度/mm leaf sheath thickness	苞叶长度/ mm bract length	苞叶宽度/ mm bract width	苞叶含水量/% bract water content	花梗含水量/% peduncle water content	籽粒含水量/% grain water content
金银花1918 Jinyinhua1918	09-17	0.25±0.05	1.13±0.05	26.31±1.91	17.85±1.35	66.84	66.48	84.35
	09-20	0.25±0.04	1.11±0.04	26.11±1.81	17.65±1.55	63.96	60.63	80.41
	09-23	0.23±0.03	1.09±0.04	25.44±1.56	17.24±1.96	58.11	56.75	77.89
	09-26	0.21±0.02	1.05±0.04	25.10±1.90	17.21±1.29	53.01	48.65	67.90
闽双色9号 Minshuangse No.9	09-17	0.41±0.05	0.86±0.08	27.88±2.13	16.98±1.18	74.76	63.92	83.25
	09-20	0.40±0.02	0.83±0.05	27.75±2.25	16.78±1.52	69.44	57.97	79.31
	09-23	0.38±0.03	0.82±0.04	27.16±1.74	15.88±1.88	60.13	54.09	73.55
	09-26	0.37±0.04	0.78±0.02	27.33±2.17	15.75±1.75	54.77	48.85	67.69

表 2 第 2~8 个苞叶的物理性质 (2022-09-20)
Tab. 2 Physical properties of the second to eighth bracts

叶片层 layer of blades	金银花1918 Jinyinhua1918			闽双色9号 Minshuangse No.9		
	叶片厚度/mm blade thickness	叶鞘厚度/mm leaf sheath thickness	苞叶含水量/% bract water content	叶片厚度/mm blade thickness	叶鞘厚度/mm leaf sheath thickness	苞叶含水量/% bract water content
2	0.39±0.08	1.20±0.05	64.97	0.41±0.07	0.99±0.05	66.01
3	0.35±0.06	1.19±0.04	66.84	0.40±0.04	0.88±0.04	70.50
4	0.32±0.03	1.15±0.05	67.09	0.37±0.03	0.85±0.05	74.79
5	0.30±0.02	1.12±0.05	68.37	0.32±0.06	0.81±0.04	76.96
6	0.27±0.02	1.10±0.02	67.46	0.31±0.03	0.79±0.02	72.21
7	0.25±0.02	0.98±0.03	66.22	0.27±0.02	0.75±0.03	70.75
8	0.21±0.03	0.95±0.02	65.18	0.26±0.02	0.72±0.02	69.27

表 3 第 2~8 层叶片的拉伸性能及重复测量方差分析

Tab. 3 Tensile properties of the second to the eighth layer of blades and repeated measures analysis of variance

材料 materials	叶片层 layer of blades	纵向拉伸 parallel to the vein			横向拉伸 perpendicular to the vein		
		断裂力/N fracture force	抗拉强度/MPa tensile strength	断裂能×10 ⁻³ /J fracture energy	断裂力/N fracture force	抗拉强度/MPa tensile strength	断裂能×10 ⁻³ /J fracture energy
金银花1918 Jinyinhua1918	2	68.62±14.32 c	10.45±5.30 a	367.14±22.30 e	25.13±12.02 c	2.54±1.21 b	30.71±12.01 c
	3	67.48±19.51 c	9.18±4.23 a	282.88±32.17 d	19.32±9.86 c	2.30±1.17 b	24.88±7.25 bc
	4	48.11±16.76 b	8.40±5.57 a	464.56±32.44 e	17.17±8.44 bc	2.38±1.17 b	29.55±22.41 c
	5	45.90±11.95 b	9.23±4.55 a	279.33±20.69 c	14.39±8.18 abc	2.18±1.24 ab	16.27±9.07 ab
	6	34.46±11.18 ab	9.25±7.45 a	174.33±27.81 b	9.25±7.44 ab	1.28±1.03 ab	13.21±6.52 ab
	7	35.31±10.83 ab	8.21±3.78 a	167.28±18.01 a	6.38±2.54 a	0.89±0.35 ab	7.28±4.02 a
	8	26.85±4.81 a	4.89±1.32 a	158.40±12.73 a	5.49±1.47 a	0.87±0.23 a	7.15±4.85 a
	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	7.238**	1.042 ns	76.961**	5.206**	1.847 ns	9.775**
闽双色9号 Minshuangse No.9	2	74.38±9.11 c	7.87±4.83 a	220.85±18.23 b	25.71±9.13 c	2.26±0.80 c	33.37±21.91 b
	3	71.45±5.75 c	7.19±3.25 a	235.67±22.18 b	17.22±8.05 b	1.28±0.50 ab	28.64±18.91 ab
	4	69.74±4.68 c	6.13±3.62 a	274.19±27.15 b	16.44±10.66 b	1.38±0.75 ab	32.79±15.42 b
	5	62.25±4.21 b	5.98±3.35 a	230.36±20.40 b	14.02±7.67 ab	1.49±0.95 b	32.60±11.59 b
	6	61.01±4.15 b	5.48±2.83 a	229.76±21.76 b	10.36±4.41 ab	0.71±0.53 a	18.88±6.66 a
	7	49.95±4.50 a	4.54±2.06 a	186.31±18.77 a	8.72±6.57 ab	0.78±0.41 ab	16.10±7.50 ab
	8	44.23±3.69 a	3.81±1.04 a	166.39±14.49 a	7.62±6.02 a	0.73±0.57 a	15.69±8.23 a
	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	6.888 **	0.979 ns	17.175 **	5.541 **	1.167 ns	8.374 **

注: 同品种同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); F 为费希尔方差比, “***”为影响极显著 ($P<0.01$), ns为影响不显著; 下同。
Note: Different lowercase letters in the same column for the same variety indicate significant differences ($P<0.05$); F is Fisher’s variance ratio, “***” indicates extremely significant effect ($P<0.01$), ns indicates no significant effect; the same as below.

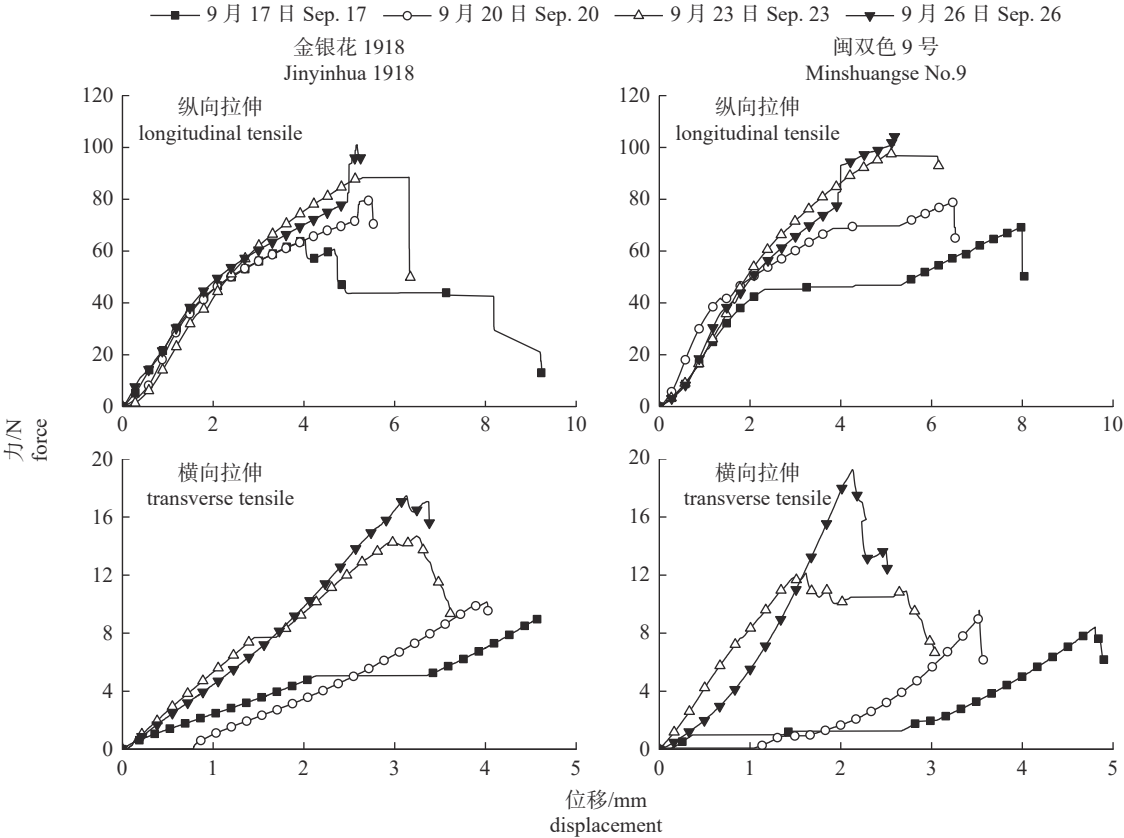


图 3 不同收获期鲜食玉米第 3 叶片拉伸试验力—位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curves of the tensile test of the third blade from fresh corn bracts in different harvest date

片的 11.20 倍。可见，在鲜食玉米剥皮过程中，苞叶的机械剥离在横向上更易断裂。

2.3 叶鞘拉伸试验结果

由表 4 可知：苞叶含水量对叶鞘的拉伸性能有极显著影响 ($P<0.01$)，叶鞘厚度的断裂力和断裂能对叶鞘的拉伸性能有极显著影响 ($P<0.01$)，但是叶鞘厚度的抗拉强度对叶鞘的拉伸性能无显著影响 ($P>0.05$)。

表 4 叶鞘拉伸特性的重复测量方差分析 (F 值)

Tab. 4 Repeated measures analysis of variance (F -value) for tensile properties of leaf sheaths

材料 materials	角度/(°) angle	苞叶含水量 bract water content			叶鞘厚度 leaf sheath thickness		
		断裂力 fracture force	抗拉强度 tensile strength	断裂能 fracture energy	断裂力 fracture force	抗拉强度 tensile strength	断裂能 fracture energy
金银花1918 Jinyinhua1918	0	34.867**	73.570**	13.337**	64.193**	1.817 ns	53.270**
	90	13.030**	43.010**	7.960**	16.723**	0.532 ns	13.087**
	180	11.609**	12.450**	5.940**	13.872**	0.297 ns	10.455**
闽双色9号 Minshuangse No.9	0	59.312**	20.687**	15.404**	24.560**	1.880 ns	34.646**
	90	71.767**	24.880**	5.840**	8.600**	1.137 ns	24.560**
	180	38.110**	55.519**	4.880**	4.091**	0.257 ns	14.620**

注：角度为叶鞘拉伸受力与自然受力方向的夹角。
Note: Angle is the angle between tensile force and natural force direction of leaf sheath.

由图 4 可知：随着收获日期的延迟，2 个品种第 1 层叶鞘的平均断裂力和抗拉强度均随着水分含量的降低而增大，平均断裂能则呈先增大后减小的趋势。金银花 1918 和闽双色 9 号叶鞘的断裂力和抗拉强度与苞叶含水量分别满足相关系数 $R^2>0.849$ 和 $R^2>0.897$ ，2 个品种的叶鞘断裂能与苞叶含水量均满足相关系数 $R^2>0.931$ 。叶鞘在 0°、90°和 180°拉伸时，去除第 3 层叶鞘所需的平均断裂力分别为 61.67、17.73 和 12.57 N，平均抗拉强度分别为 3.60、1.31 和 1.06 MPa，平均断裂能分别为 78.62×10^{-3} 、 23.55×10^{-3} 和 6.16×10^{-3} J。

由图 5 可知：2 个品种第 2~8 层叶鞘与花梗之间的平均断裂力由外到内依次减小。叶鞘厚度对叶鞘抗拉强度无显著影响 ($P>0.05$)，当拉伸角为 0°和 90°时，外层的平均拉伸强度高于内层；当拉伸角为 180°时，各层的平均拉伸强度相差不大。断裂能则由外层向内层呈先增大后减小的趋势。2 个品种的叶鞘平均断裂力与叶鞘厚度均满足相关系数 $R^2>0.919$ (0°) 和 $R^2>0.830$ (90°、180°)；叶鞘的平均抗拉强度和断裂能与叶鞘厚度分别满足相关系数 $R^2>0.474$ 和 $R^2>0.872$ 。在 0°、90°和 180°的角度下拉伸时，去除第 2~8 层叶鞘所需的平均断裂力分别为 47.52、13.18 和 8.51 N，平均抗拉强度分别为 1.09、0.65 和 0.22 MPa，平均断裂能分别为 67.82×10^{-3} 、 20.12×10^{-3} 和 5.41×10^{-3} J。

3 讨论

对鲜食玉米而言，其果穗幼嫩、含水量高、

苞叶与籽粒之间粘连性高等特点是制约农业机械化剥皮的主要因素，如何最大限度地利用有限资源以最小能量断裂苞叶，对指导和推广鲜食玉米果穗脱皮技术、促进鲜食玉米产业发展具有重要的现实意义^[22-24]。

LI 等^[25]研究表明：在进行叶片拉伸试验时，纵向和横向拉伸断裂力均表现出由外层向内层逐渐减小的趋势，除第 2 层叶片抗拉强度较大外，各层相差不大，这与苞叶含水量有关；最大断裂能出现在中间层，这与苞叶含水量和叶片厚度有关；纵向拉伸比横向拉伸大，这与拉伸载荷方向有关。多项研究表明：断裂力与截面积有很强的相关性^[11-12]；叶片厚度对断裂力和断裂能有极显著影响，但对抗拉强度没有显著影响^[10]。本研究选用 2 个鲜食玉米品种进行叶片拉伸试验，结果显示：叶片在进行纵向和横向拉伸时，各层叶片抗拉强度差异不大，这与叶片含水量有关；在接近中间层偏外出现最大断裂能，这与叶片含水量和叶片厚度有关。然而，部分研究表明苞叶剥离试验与含水量无关^[15,17]，这与本研究结果相反。在实际农业生产中，受农业生产条件的影响，在鲜食玉米成熟收获时，各品种鲜食玉米果穗有不同的差异，选取具有代表性的鲜食玉米品种进行苞叶拉伸研究，虽有一定的限制性，但苞叶拉伸试验结果基本保持一致^[17]。

有研究表明：由木质素和纤维成分组成的叶片具有相对较高的极限强度，在进行拉伸断裂时，会有一段较长时间的裂纹扩展后再断裂，若

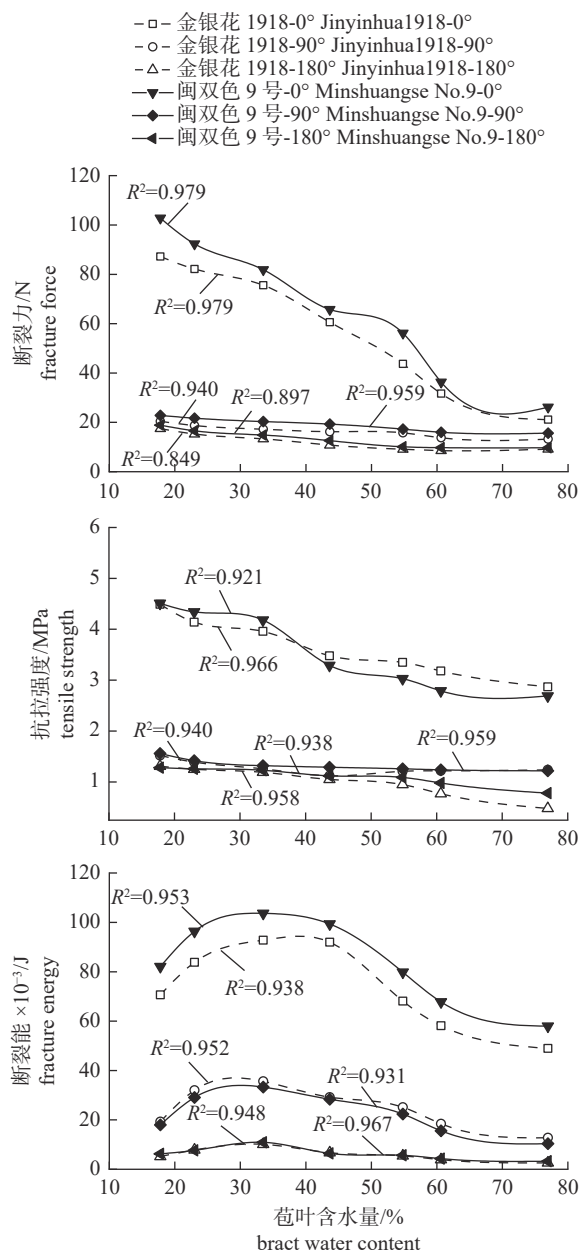


图4 叶鞘拉伸性能与苞叶含水量的关系

Fig. 4 Relationship between tensile properties and bract water content of leaf sheath

改变拉伸断裂角度, 也会相应发生应力转变成弯曲应力, 外层比内层极限应力大^[25-27]。本研究表明: 在横向拉伸的过程中可以观察到叶片试样的断裂形态较为规则, 因横向拉伸时叶脉阻力小, 断裂方式为叶肉组织沿纵脉方向断裂, 裂纹发生在相邻2条纵向脉间, 然后迅速扩展直至试样断裂; 在0°拉伸叶鞘时, 叶鞘的断裂方式与叶片纵向拉伸的断裂方式相似; 在180°拉伸叶鞘时, 叶鞘的抗拉强度较小, 叶鞘的断裂方式在叶鞘的根部断裂, 断裂方式的变化是由于鲜食玉米表面纤

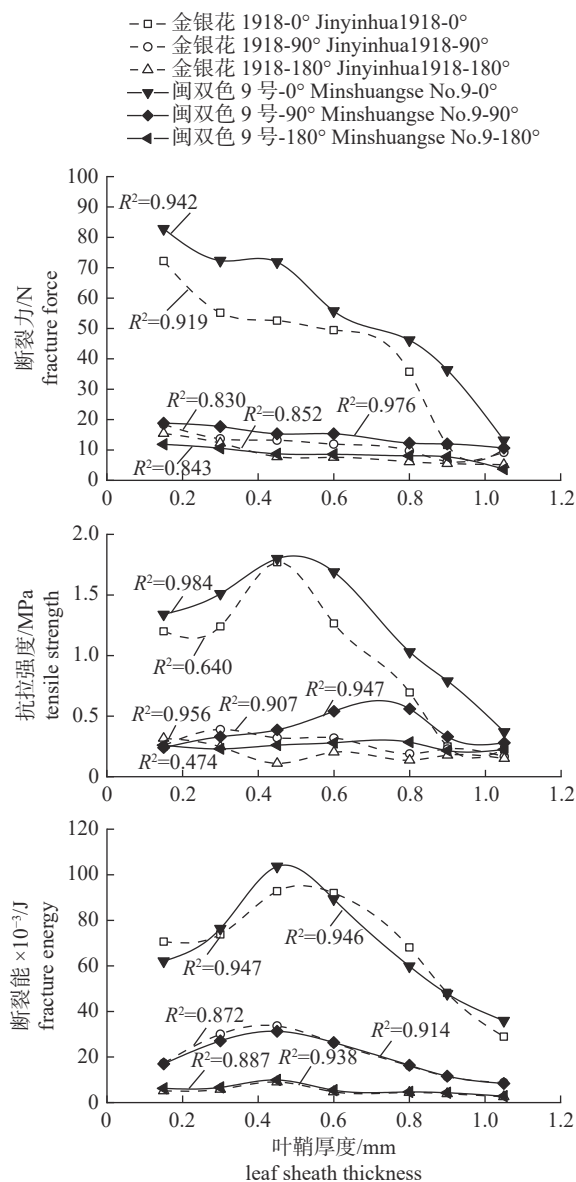


图5 叶鞘拉伸性能与叶鞘厚度的关系

Fig. 5 Relationship between the tensile properties and the thickness of leaf sheath

维的拉应力转变成弯曲应力, 从而改变了裂纹的萌生和扩展机制^[28]。因此, 本研究采用拉伸断裂特性研究2种鲜食玉米品种, 并对其苞叶进行物理特性及拉伸结果分析, 得出苞叶拉伸断裂的特点, 以最小能量断裂苞叶, 提高剥皮效率, 可促进鲜食玉米产业的可持续发展。

4 结论

金银花 1918 和闽双色 9 号 2 个品种的苞叶尺寸和含水量随着收获时间和苞叶层数的变化而变化。苞叶含水量对断裂力、抗拉强度和断裂能

有显著影响,而苞叶厚度仅对断裂力和断裂能有显著影响,对抗拉强度的影响不明显;纵向拉伸叶片的平均断裂力、抗拉强度和平均断裂能分别约为横向拉伸叶片的 3.91 倍、4.70 倍和 11.20 倍;叶鞘的拉伸性能取决于方向的夹角,随着拉力角的增大,拉伸性能逐渐下降。叶片的机械剥离过程中更容易发生横向断裂,增加对苞叶的拉力角,可以降低机械剥离的损耗,提高机械剥离的效率和质量,有利于减少果穗的苞叶残留。

[参考文献]

- [1] 吕桂华,陈坚剑,徐秀红,等.鲜食糯玉米苞叶相关性状的遗传相关分析[J].浙江农业学报,2015,27(7): 1122. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2015.07.02.
- [2] 赵玉强,何晓鹏,师建芳,等.鲜食玉米剥皮机的设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(2): 114. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.018.
- [3] 徐丽,赵久然,卢柏山,等.我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J].中国种业,2020(10): 14. DOI: 10.19462/j.cnki.1671-895x.2020.10.005.
- [4] 朱忠祥,岳小微,杜岳峰,等.玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J].农业工程学报,2015,31(6): 142. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.006.
- [5] READ J, SANSON G D. Characterizing sclerophylly: the mechanical properties of a diverse range of leaf types[J]. New Phytologist, 2003, 160(1): 81. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00855.x.
- [6] LIU J J, YE W, ZHANG Z H, et al. Vein distribution on the deformation behavior and fracture mechanisms of typical plant leaves by quasi in situ tensile test under a digital microscope[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2020, 2020: 8792143. DOI: 10.1155/2020/8792143.
- [7] TOOLE G A, PARKER M L, SMITH A C, et al. Mechanical properties of lettuce[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(14): 3553. DOI: 10.1023/A:1004809428967.
- [8] KOHYAMA K, TAKADA A, SAKURAI N, et al. Tensile test of cabbage leaves for quality evaluation of shredded cabbage[J]. Food Science and Technology Research, 2008, 14(4): 337. DOI: 10.3136/fstr.14.337.
- [9] TANG Z, LI Y, ZHANG B, et al. Controlling rice leaf breaking force by temperature and moisture content to reduce breakage[J]. Agronomy, 2020, 10(5): 628. DOI: 10.3390/agronomy10050-628.
- [10] JACOBS A A, SCHEPER J A, BENVENUTTI M A, et al. Tensile fracture properties of seven tropical grasses at different phenological stages[J]. Grass and Forage Science, 2011, 66(4): 551. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2011.00812.x.
- [11] ZHANG J M, HONGO A, AKIMOTO M. Physical strength and its relation to leaf anatomical characteristics of nine forage grasses[J]. Australian Journal of Botany, 2004, 52(6): 799. DOI: 10.1071/BT03049.
- [12] BENVENUTTI M A, GORDON I J, POPPI D P. The effect of the density and physical properties of grass stems on the foraging behaviour and instantaneous intake rate by cattle grazing an artificial reproductive tropical sward[J]. Grass and Forage Science, 2006, 61(3): 272. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2006.00531.x.
- [13] CHOONG M F, LUCAS P W, ONG J S Y, et al. Leaf fracture toughness and sclerophylly: their correlations and ecological implications[J]. New Phytologist, 1992, 121(4): 597. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1992.tb01131.x.
- [14] 赵成帅,徐丽明,刘佳,等.玉米苞叶力学特性试验研究:基于玉米联合收获机剥皮机构[J].农机化研究,2011,33(12): 100. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2011.12.047.
- [15] 白瑜,杨中平,郭康权,等.玉米苞叶力学性能研究[J].农机化研究,2008,30(4): 143. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2008.04.035.
- [16] EL-SHEMY H A, NISHIMURA T, FUJITA K. Characterization and localization of a novel protein (HFN 40) in maize genotypes without husk leaf blades[J]. Biologia Plantarum, 2001, 44(4): 623. DOI: 10.1023/A:1013775611198.
- [17] 解福祥,宋健,霍洪鹏,等.玉米苞叶力学性能与剥离试验[J].农机化研究,2018,40(8): 129. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2018.08.023.
- [18] WANG S J, REN L Q, LIU Y, et al. Mechanical characteristics of typical plant leaves[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(3): 294. DOI: 10.1016/S1672-6529(10)60253-3.
- [19] YU M L, IGATHINATHANE C, HENDRICKSON J, et al. Mechanical shear and tensile properties of selected biomass stems[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(4): 1231. DOI: 10.13031/trans.57.10131.
- [20] SU Y, CUI T, ZHANG D X, et al. Effects of shape feature on compression characteristics and crack rules of maize kernel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(1): e14307. DOI: 10.1111/jfpp.14307.
- [21] DEMIREL C, KABUTEY A, HERAK D, et al. Numerical estimation of deformation energy of selected bulk oilseeds in compression loading[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 237(1): 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/237/1/012004.
- [22] 邢强,蒋春和,宋世武,等.不同覆盖物和行距对夏玉米农艺性状及产量的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2022,37(3): 406. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202105026.
- [23] 王春华,赵忠良. XNYB-8型鲜糯玉米剥皮机的研制[J].农机使用与维修,2019(10): 26. DOI: 10.1403/j.cnki.njwx.2019.10.012.
- [24] 周云峰,占胜平,徐滨威,等.鲜食甜玉米剥皮机安全作业技术规程[J].南方农机,2022,53(8): 63. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2022.08.017.
- [25] LI Z Y, FU J, LUO X W. Tensile properties and fracture mechanisms of corn bract for corn peeling device design[J]. Agriculture, 2021, 8(11): 796. DOI: 10.3390/AGRI-CULTURE11080796.
- [26] 任露泉,王淑杰,韩志武,等.典型植物叶片非光滑表面的纳米力学特性[J].吉林大学学报(工学版),2007,37(5): 1121. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb2007.05.008.
- [27] 张宁.谷子叶片拉伸及撕裂力学特性试验研究[J].农业技术与装备,2018(10): 81. DOI: 10.3969/j.issn.1673-887X.2018.10.036.
- [28] 付乾坤,付君,陈志,等.不同玉米果穗位姿与含水率对穗柄断裂特性的影响[J].农业工程学报,2019,35(16): 60. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.16.007.

责任编辑:何承刚