

# 小麦茎秆弯曲性能的测试

李小城 牛智有 刘梅英 刘 晋

华中农业大学工学院, 武汉 430070

**摘要** 为能在设计小麦收获机械时提供相关参数和指导小麦优种筛选相关抗弯性能指标与评判方法提供理论依据, 选择不同品种收获期小麦茎秆的不同部位为研究对象, 根据三点弯曲原理, 采用美国 FTC 公司生产的 TMS-PRO 型质构仪测定在不同标距、含水率和加载速率条件下小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度, 并分析其相关变化规律。结果表明: 在同一小麦品种中, 茎秆中部的弹性模量和抗弯刚度均比上部大; 标距、含水率和加载速率均对小麦茎秆抗弯刚度有极显著影响; 标距和含水率对小麦茎秆弹性模量有极显著影响, 而加载速率对其弹性模量影响不显著。

**关键词** 小麦茎秆; 弹性模量; 抗弯刚度

**中图分类号** S 512.1<sup>+1</sup> **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2013)01-0120-05

小麦茎秆是由纤维素、半纤维素和木质素组成的天然高分子复合材料, 其强度和刚度主要取决于纤维素、半纤维素和木质素的含量以及其链接形式和排列方式<sup>[1]</sup>。小麦生产过程中需要不断适应各种复杂外力, 而茎秆的抗折力和承载能力的大小对植株倒伏起着决定作用, 但因暴风雨和植株材料本身缺陷引起的折断倒伏, 已成为制约小麦高产、稳产的重要因素之一。据调查, 小麦乳熟期倒伏可减产 10% 左右, 灌浆期倒伏可减产 25%~35%, 开花后倒伏可减产 40%~50%, 严重时甚至绝收<sup>[2]</sup>。

目前, 国内外已有许多学者以小麦茎秆为供试对象, 对小麦的抗倒伏性能进行了研究。胡婷等<sup>[3-4]</sup>通过四点弯曲试验, 获得小麦茎秆弹性模量和抗弯刚度等数据; 袁红梅等<sup>[5]</sup>测得小麦茎秆基部 1~4 节的弹性模量, 并探讨其与生长期间的关系; 李红波等<sup>[6]</sup>测得小麦茎秆的惯性矩和抗弯刚度等指标, 并分析了不同品种小麦在不同生长期间的抗弯性能; O'Dogherty 等<sup>[7]</sup>测量了小麦茎秆的物理参数, 研究了不同成熟度和含水率对小麦茎秆性能的影响。另外, 还有关于农作物茎秆的力学特性、茎秆作物抗倒伏生物力学的评价与分析 and 作物不同生长期茎秆力学特性与形态的相关性等研究<sup>[8-14]</sup>。笔者通过质构仪采用三点弯曲原理测试小麦茎秆的弯曲性

能, 分析了不同标距、含水率和加载速率对小麦茎秆弹性模量和抗弯刚度的影响与变化规律, 旨在为设计小麦收获机械时提供相关参数, 并为小麦优种筛选相关抗弯性能指标和评判方法提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

试验材料于 2011 年 5 月采自湖北省随州市, 测试样本为郑麦 9023、平安 6 号和周麦 22 三个小麦品种收获期的秸秆。选样时取生长良好、茎秆通直、无病虫害和茎秆表面无明显缺陷、无破损或开裂的小麦植株, 并以离地面部分向上的第 2 节开始, 连续取 2 段长 160 mm 的小麦茎秆, 第 1 次取的小麦茎秆定义为中部, 第 2 次取的茎秆定义为上部。

### 1.2 主要设备

采用美国 FTC 公司生产的 TMS-PRO 型质构仪, 选取量程为 0~100 N 传感器及其配备的弯曲夹具, 设定弯曲时的采样频率为 10 Hz, 起始力为 0.5 N; 3KFG-01 型电热恒温鼓风干燥箱; 量程为 10 mg~220 g 电子分析天平(精度为 0.1 mg); 量程为 0~150 mm 电子数显游标卡尺(精度为 0.01 mm)以及直尺、剪刀和工具刀等。

### 1.3 测试方法

首先用手工剥除小麦的叶鞘, 然后量取定长的

收稿日期: 2012-05-03

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201003063-04)

李小城, 硕士研究生。研究方向: 生物质秸秆机械特性。E-mail: lixiaocheng05@163.com

通讯作者: 牛智有, 博士, 教授。研究方向: 农产品加工技术与装备。E-mail: nzhy@mail.hzau.edu.cn

小麦茎秆并进行编号,选择每个样本的中点为测试点,量取其中点并用黑色记号笔标记。用数显游标卡尺量取每个样本标记处的外径,测其最大和最小处外径作为小麦椭圆茎秆的长轴和短轴,此处理将小麦茎秆抽象成连续性、均匀性和各向同性中空椭圆体理想化模型。

待弯曲试验完成后,先将小麦茎秆分为2段,用工具刀剖开茎秆其中一段,用数显游标卡尺测其厚度,因小麦茎秆并非均匀厚度,故以多次测量的平均值作为其壁厚;然后通过计算求取茎秆内径和横截面积,用分析天平测茎秆另一段的质量,精确至0.000 1 g,并采用烘干法(参照 GB1931)测定其含水率。

根据三点弯曲原理<sup>[15]</sup>测定小麦茎秆的弹性模量  $E$ ,即

$$E = \frac{F_b l^3}{48 \delta I_b} \quad (1)$$

其中  $F_b$  为跨中承受的载荷;  $l$  为标距,即2个支点间的距离;  $\delta$  为试件中点的弯曲挠度;  $I_b$  为截面对中性轴的惯性矩。

小麦茎秆的截面可近似为椭圆环形,其惯性矩的表达式为

$$I_b = \frac{\pi}{4} [ab^3 - (a-t)(b-t)^3] \quad (2)$$

其中  $a$  为小麦茎秆椭圆截面长半轴,  $b$  为小麦茎秆椭圆截面短半轴,  $t$  为茎秆的壁厚。

在质构仪上做弯曲试验时,首先将上夹头的中心与下端支撑夹具的垂直中心对齐,选定标距后将试样的两端放置在下端水平的2个金属支撑架上,并使试样的中心与上夹头中心对齐。由于小麦茎秆很细且壁厚很薄,施加很小的载荷就会压扁,故试验时选择初始加载力为0.5 N。

试验过程中,计算机通过应力传感器来采集数据,并自动绘出茎秆弯曲时的载荷-位移曲线。当试样发生明显弯曲时停止试验,然后利用公式(2)求得惯性矩  $I_b$ ,并对载荷-位移曲线上的初始直线段通过线性拟合求得其斜率,再利用公式(1)求试样弹性模量  $E$ 。抗弯刚度  $EI$  即弹性模量与惯性矩的乘积,表征抵抗弯曲变形的能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 标距对弹性模量和抗弯刚度的影响

选择收获期的郑麦 9023 和周麦 22 两个品种小

麦的茎秆各 16 根,测定在 60、80、100、120 mm 4 种不同标距条件下茎秆的弹性模量和抗弯刚度,每个标距重复 4 次。以郑麦 9023 中部茎秆在不同标距条件下得到的载荷-位移曲线为例(图 1),分析小麦茎秆在弯曲试验过程中力的变化规律。

由图 1 可知,在初始阶段,当施加载荷小于弹力时,此时小麦茎秆可视为一个弹性体,故载荷与位移成正比;随着载荷的增加,当施加载荷大于弹力时,载荷随着位移呈现先增加再减小的变化趋势。同时,随着标距的增大,载荷-位移曲线初始部分的斜率依次减小。

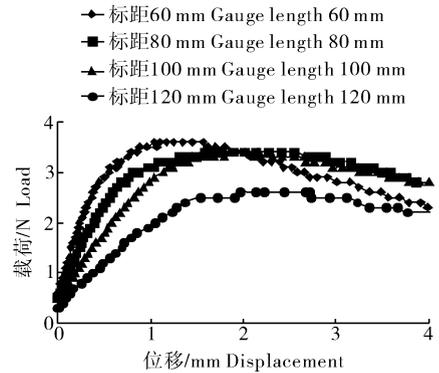


图 1 不同标距下小麦中部茎秆弯曲试验载荷-位移曲线

Fig. 1 Curve of load-displacement of wheat stalk under the different gauge length

通过弯曲试验得到郑麦 9023 和周麦 22 两个品种小麦茎秆在不同标距下的弹性模量  $E$  和抗弯刚度  $EI$ (图 2)。

由图 2 可知:随着标距的增大,郑麦 9023 茎秆的中部和上部的弹性模量均随之增大;周麦 22 茎秆的中部和上部的弹性模量先增大后减小,在标距为 100 mm 时最大;在同一小麦品种中,均为茎秆上部的弹性模量大于中部的弹性模量;在不同品种小麦的同一部位时,均表现为郑麦 9023 茎秆的弹性模量比周麦 22 的弹性模量大。

由图 2 还可知:随着标距的增大,郑麦 9023 和周麦 22 两个品种小麦茎秆不同部位的抗弯刚度均增大;在同一小麦品种中,均为茎秆中部的抗弯刚度比上部的抗弯刚度大;在同一部位时,均表现为郑麦 9023 茎秆的抗弯刚度比周麦 22 的抗弯刚度大。

运用 SPSS 12.0 软件分别对不同标距下郑麦 9023 和周麦 22 两个品种小麦茎秆中部和上部的弹性模量和抗弯刚度进行单因数方差分析,结果显示标距在 60~120 mm 时,郑麦 9023 和周麦 22 两个

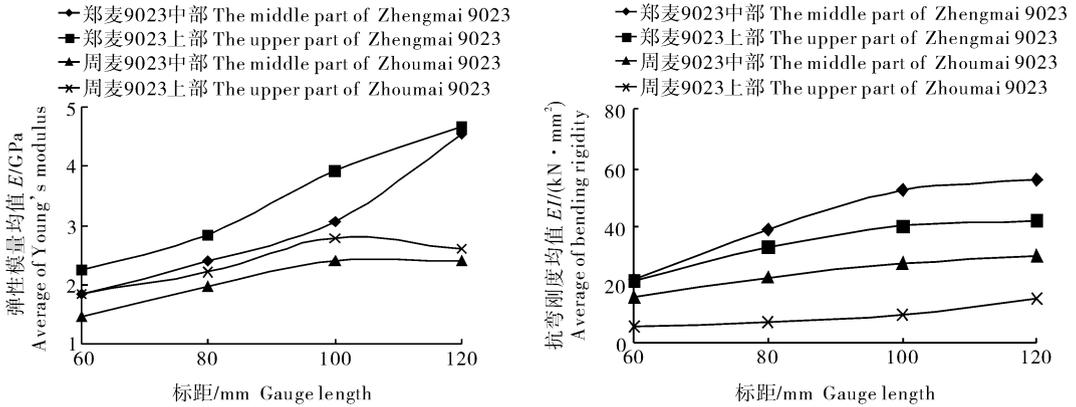


图 2 不同标距下小麦茎秆不同部位弹性模量  $E$  和抗弯刚度  $EI$  的均值

Fig. 2 Average Young's modulus and bending rigidity of wheat stalk on the different internodes under the different gauge length

个品种小麦茎秆中部和上部的弹性模量和抗弯刚度差异均极显著 ( $P < 0.01$ ), 表明不同标距对小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度有极显著影响。

## 2.2 含水率对弹性模量和抗弯刚度的影响

选择收获期的平安 6 号小麦茎秆 24 根, 测定在

加载速率为 10 mm/min、标距为 100 mm 和含水率分别为  $(9 \pm 1)\%$ 、 $(25 \pm 3)\%$ 、 $(66 \pm 5)\%$  的 3 种不同条件下茎秆的弹性模量和抗弯刚度, 每个含水率重复 8 次, 得到不同含水率下的弹性模量和抗弯刚度 (表 1)。

表 1 不同含水率下小麦茎秆不同部位弹性模量  $E$  和抗弯刚度  $EI$  的均值

Table 1 Average of Young's modulus and bending rigidity of wheat stalk under different moisture content

含水率/% Moisture content	部位 Position	$a/mm$	$b/mm$	$t/mm$	$k$	$I/mm$	$E/GPa$	$EI/(kN \cdot mm^2)$
9	中部 Middle part	2.69	2.41	0.45	3.31	16.77	4.21	70.65
	上部 Upper part	2.42	2.19	0.39	2.45	11.51	4.49	51.63
25	中部 Middle part	2.55	2.28	0.46	2.23	14.29	3.45	49.28
	上部 Upper part	2.28	2.02	0.42	1.69	9.68	3.90	37.74
66	中部 Middle part	2.67	2.39	0.48	2.10	16.70	2.65	44.23
	上部 Upper part	2.34	2.12	0.42	1.54	10.67	2.87	30.66

由表 1 可知, 在同一部位, 随着含水率的增大, 平安 6 号小麦茎秆的线性拟合斜率  $k$ 、弹性模量  $E$  和抗弯刚度  $EI$  均减小, 惯性矩  $I$  却呈现出先减小后增大的变化趋势; 在含水率相同的情况下, 平安 6 号小麦茎秆中部的线性拟合斜率  $k$ 、惯性矩  $I$  和抗弯刚度均比上部的大, 而弹性模量  $E$  则相反。

运用 SPSS 12.0 软件对不同含水率下平安 6 号小麦茎秆的中部和上部的弹性模量和抗弯刚度进行单因素方差分析, 结果显示在含水率  $(9 \pm 1)\% \sim (66 \pm 5)\%$  时, 平安 6 号小麦茎秆中部和上部的弹

性模量和抗弯刚度差异均极显著 ( $P < 0.01$ ), 表明含水率对小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度均具有极显著影响。

## 2.3 加载速率对弹性模量和抗弯刚度的影响

选择收获期的平安 6 号小麦茎秆 20 根, 测定在含水率为  $(15 \pm 1)\%$ 、标距为 100 mm 和加载速率分别为 1、3、5、8、15 mm/min 的 5 种不同条件下茎秆的弹性模量和抗弯刚度, 每个加载速率重复 4 次, 得到不同加载速率下小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度 (表 2)。

表 2 不同加载速率下小麦茎秆弯曲试验的参数均值

Table 2 Average of basic parameter on wheat stalk for bending test under different loading rate

加载速率/(mm/min) Loading rate	部位 Position	$a/mm$	$b/mm$	$t/mm$	$I/mm$	$E/GPa$	$EI/(kN \cdot mm^2)$
1	中部 Middle part	2.52	2.28	0.40	13.27	3.72	49.34
	上部 Upper part	2.40	2.16	0.36	9.91	4.75	47.04
3	中部 Middle part	2.49	2.02	0.45	9.94	3.43	34.10
	上部 Upper part	1.88	1.68	0.48	5.08	3.72	18.88
5	中部 Middle part	2.39	2.07	0.45	10.23	3.75	38.37
	上部 Upper part	1.91	1.76	0.41	6.06	4.23	25.64
8	中部 Middle part	2.56	2.36	0.44	14.55	3.07	44.71
	上部 Upper part	2.43	2.24	0.38	11.04	4.25	46.87
15	中部 Middle part	2.76	2.51	0.51	20.18	3.29	66.29
	上部 Upper part	2.61	2.35	0.44	14.79	4.71	69.58

运用 SPSS 12.0 软件对不同加载速率下平安 6 号小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度进行单因数方差分析,结果显示加载速率在 1~15 mm/min 时,平安 6 号小麦茎秆的弹性模量差异不显著( $P > 0.05$ ),但抗弯刚度差异极显著( $P < 0.01$ ),表明加载速率对小麦茎秆的弹性模量没有显著影响,但对其抗弯刚度有极显著影响。

### 3 讨论

通过在质构仪上进行弯曲试验时设置不同的标距,分析不同品种小麦茎秆不同部位的弹性模量和抗弯刚度的变换规律,结果表明:在标距为 60~120 mm 时,郑麦 9023 茎秆的弹性模量和抗弯刚度均随标距的增大而增大,周麦 22 茎秆的弹性模量先增大后减小,在标距为 100 mm 时最大,其抗弯刚度也随标距的增大而增大。说明小麦茎秆在标距较小时刚度增大而柔韧性减弱,在标距较大时刚度减小而柔韧性增强,这与测定标距较小时试样更易破坏甚至折断、而标距较大时试样几乎没有明显折痕的现象一致。运用数理统计软件进行分析,结果表明不同标距对小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度有极显著影响( $P < 0.01$ ),因此,标距是影响小麦茎秆弯曲性能的一个重要因素。

含水率对农作物秸秆的力学性能影响较大。通过分析在不同含水率条件下对小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度力学参数的变化规律,结果表明:在同一部位,小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度均随着含水率的增大而减小,故当含水率较小时其特性趋近于脆性材料,柔韧性减弱,脆性增强且易断裂;当含水

率较大时其特性类似于塑性材料,柔韧性较好且不易断裂。对在不同含水率条件下小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度进行单因数方差分析,结果表明含水率对小麦茎秆的弹性模量和抗弯刚度影响均极显著( $P < 0.01$ ),因此,含水率是影响小麦茎秆弯曲性能的又一重要因素。

另外,测定结果还表明加载速率对小麦茎秆的弹性模量没有显著影响,但对其抗弯刚度有极显著影响,因此,加载速率也是影响小麦茎秆弯曲性能的重要因素之一。

### 参 考 文 献

- [1] 郭维俊,王芬娥,黄高宝,等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报,2009,40(2):110-114.
- [2] 方大法. 小麦倒伏原因浅析及预防对策[J]. 安徽农学通报,2004,10(2):30-42.
- [3] 胡婷,焦群英,付志一. 小麦茎秆的拉弯性能研究[J]. 河南农业科学,2007(7):28-30.
- [4] 胡婷,付志一,焦群英. 小麦茎秆抗弯性能研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):31-35.
- [5] 袁红梅,郭玉明,李红波. 小麦茎秆弯折力学性能的试验研究[J]. 山西农业大学学报,2005,25(2):173-176.
- [6] 李红波,郭玉明,陈维毅. 冬小麦茎秆的力学性质研究[J]. 太原理工大学学报,2006,37(1):31-34.
- [7] O'DOUGHERTY M J, HUBERT J A D. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw [J]. Journal of Engineering Research,1995,62:133-142.
- [8] 刘庆庭,区刚刚,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):172-175.
- [9] 郭玉明,袁红梅,阴研,等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):14-18.
- [10] 梁莉,郭玉明. 不同生长期小麦茎秆力学性质与形态的相关性

- [J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 131-134.
- [11] 李小城, 牛智有, 刘梅英. 小麦秸秆剪切力学性能测试[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2): 253-257.
- [12] CROOK M J, ENNOS A R. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 123: 167-174.
- [13] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究 [J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47-49, 52.
- [14] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124-129.
- [15] NAZARI M, ALEDAR G, JAFARI A, et al. Effect of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 199-208.

## Test of bending properties of wheat stalk

LI Xiao-cheng NIU Zhi-you LIU Mei-ying LIU Jin

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** In order to provide reference for the design of harvest machinery and to obtain relevant biomechanical indexes and evaluating methods to choose more superior variety of wheat, the bending ability of wheat stalks under different conditions were studied. Different species of wheat stalks were chosen and cut at different positions. Young's modulus and bending rigidity under different conditions of gauge length, moisture content and loading rate were measured according to the three point bending principle on the TMS-PRO type Texture Analyzer produced by the FTC company of the U. S. and then studied. The results showed that Young's modulus and bending rigidity in middle part of the stalks are bigger than those of the upper parts in the same species; the bending rigidity of the wheat stalks was significantly affected by the gauge length, moisture content and loading rate, while Young's modulus was significantly affected by the gauge length and moisture content, but not by the loading rate.

**Key words** wheat stem; Young's modulus; bending rigidity

(责任编辑:陈红叶)