

小麦秸秆剪切力学性能的测试

李小城 刘梅英 牛智有

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 为分析小麦秸秆在剪切过程中力的变化规律,以及不同加载速率对剪切强度和剪切功的影响,选择成熟期自然状态下风干的宜宾1号、矮抗58、周麦22和豫麦7号4个品种小麦秸秆的第2~4节间为研究对象,采用美国FTC公司生产的TMS-PRO型质构仪在秸秆节间中心进行横纹剪切试验,测定不同加载速率下不同品种不同节间的最大剪切力、剪切强度以及剪切功。结果表明:小麦秸秆在剪切过程中力的变化规律是先上升再减小,然后上升直至切断最后卸载的变化过程,4个品种小麦秸秆不同节间的硬度为37.3~191.0 N,剪切强度为4.2~9.8 MPa,剪切功为43.53~432.23 mJ;同一小麦品种不同节间的剪切强度和剪切功均为第2节间最大,第3节间次之,第4节间最小。运用SPSS软件对不同加载速率对剪切强度和剪切功进行显著性检验,分析结果表明不同加载速率对剪切强度和剪切功均无显著影响。

关键词 小麦秸秆; 剪切; 剪切强度; 剪切功

中图分类号 S 512.1⁺1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2012)02-0253-05

小麦是中国各类农作物中种植面积最大、种植范围最广、产量最高的农作物之一。研究小麦秸秆的生物力学特性,可以为加工或收割机械器具的设计提供参数,确定机器的工作情况,减少研发成本和缩短研发周期,同时,还能够研究小麦抗倒伏机制,结合生物遗传工程改变其内部结构和机械性能,为培育优势的抗倒伏品种提供科学依据。目前,国内外学者对小麦秸秆生物力学的研究主要是通过万能试验机测定小麦秸秆的拉伸、弯曲、剪切和压缩性能,测定不同品种、不同节间小麦秸秆的弯折力、惯性矩、弹性模量、抗弯刚度、剪切强度、弯曲强度和压缩特性等生物力学指标以及含水率对力学性能的影响^[1-5],还有研究小麦秸秆的力学特性与抗倒伏之间存在的内在联系、小麦秸秆弯曲特性与密度间的关系研究、小麦力学性质与形态相关性、小麦的力学性能与化学组分和组织结构或微观结构的研究以及其他主要农作物秸秆生物力学性质^[6-15]。

切削是对材料的一种破坏过程,小麦秸秆的切削力与小麦秸秆的材性之间必然有密切的关系。笔者通过剪切试验,分析了宜宾1号、矮抗58、周麦22和豫麦7号4个品种小麦秸秆在不同的加载速率下对最大剪切力、剪切强度和最大剪切力所做功的影

响,旨在为设计高效率、低消耗、适应性强和最大限度提高小麦收获的机型提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验材料于2011年5月采自湖北省襄阳市,测试样本为宜宾1号、矮抗58、周麦22和豫麦7号4个小麦品种收获期的秸秆,选取生长良好、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。

1.2 主要设备

采用美国FTC公司生产的TMS-PRO型质构仪,选取1000 N传感器和与其配备的剪切夹具,剪切时采样频率为10 Hz,起始力为2 N;3KFG-01型电热恒温鼓风干燥箱;量程为10~220 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)和卷尺等。

1.3 测试方法

选择存放于实验室通风阴凉处自然风干的小麦秸秆,以不同加载速率对小麦不同节间的秸秆进行横纹剪切试验,在宜宾1号、矮抗58、周麦22和豫麦7号4个品种中,随机挑选茎秆粗细大致相同的

收稿日期:2011-09-27

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 60 株,分 4 组,每组 5 株,重复 3 次。从小麦茎秆齐地部分往上的节间依次定义为第 1 节间、第 2 节间、第 3 节间、第 4 节间和第 5 节间。由于第 1 节间太短、第 5 节间太细,故只选择每个品种的第 2~4 节间供试,共 180 个样本。

测试时,先剥除叶鞘并对小麦茎秆编号,量取节间距,选择每节间的中点为剪切点,量取其中点并用黑色记号笔标记。用数显游标卡尺量取每节间标记处的外径,测其最大和最小处外径取其平均值为茎秆的外径,此处处理将小麦茎秆抽象成连续性、均匀性和各向同性中空圆柱体理想化模型。待剪切试验完成后,茎秆分为 2 段,其中 1 段用剪刀剖开茎秆,用游标卡尺测其厚度,由于小麦茎秆并非均匀厚度,故多次测量取其平均值作为其壁厚。通过计算求取茎秆内径和横截面积,另外 1 段利用分析天平测其质量,准确至 0.000 1 g,然后采用烘干法参照 GB1931 的方法进行含水率的测定。所测宜宾 1 号、矮抗 58、周麦 22 和豫麦 7 号 4 个小麦品种的含水率分别为 14.27%~15.54%、14.57%~19.59%、14.11%~16.97% 和 10.92%~17.98%。试验测试时环境温度为 28.1℃,空气湿度为 49%。

剪切试验开始时,将切刀与切槽对齐并使得两者之间的摩擦力不超过 2 N,将试件水平放置在质构仪自带的剪切夹具平台上,使切刀面与试件保持垂直,选取 10、20、30、40、50 mm/min 5 种不同的加载速率以均匀速度施加载荷,得到力-位移曲线,记录破坏载荷和最大剪切力所做的功,并根据公式计算剪切强度^[12]: $\tau = F_{\max}/2A$, 式中 τ 为剪切强度 (MPa); F_{\max} 为最大剪切力 (N); A 为茎秆横截面积 (mm^2)。

2 结果与分析

2.1 小麦茎秆剪切过程中力的变化规律

选取宜宾 1 号第 3 节间茎秆在不同加载速率下(样本 2 的加载速率为 10 mm/min、样本 13 的加载速率为 20 mm/min、样本 26 的加载速率为 30 mm/min、样本 39 的加载速率为 40 mm/min、样本 50 的加载速率为 50 mm/min)的横纹剪切测试结果,其中以样本 39 为例在加载速率为 40 mm/min 时得到的力-位移曲线,分析小麦茎秆在剪切过程中剪切力的变化规律(图 1)。

由图 1 可知,曲线的起点不是从零点开始,这是因为在试验开始时设置的起始力为 2 N,为了排除

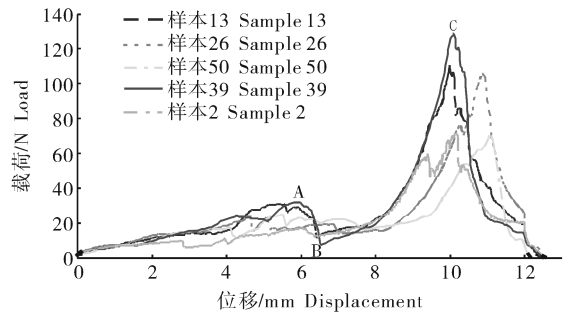


图 1 同一小麦品种同一茎秆节间在不同加载速率下的力-位移曲线

Fig. 1 Curve of load-displacement on the same species and internodes under the different loading rate

刀具与定位块间的摩擦对试验曲线的影响,故当施加的载荷大于 2 N 时才开始记录试验曲线。从起始点到 A 点的过程中,随着负荷的缓慢增加,而变形却在快速的增大,这是由于小麦自身结构是中空的,易被压扁的缘故;当负荷增加到 32.2 N、位移为 5.93 mm 时,即曲线 A 点处,小麦茎秆在该力的作用下在切刀锥形切口受挤压发生破裂,A 处受力 32.2 N 为起始破裂力;A 处至 B 处曲线先下降后上升,这是由于小麦茎秆发生破裂后挤过锥形切口处至圆形切口处,此时小麦茎秆两侧向中心凸起,茎秆被压扁,该过程中小麦茎秆受力减小,然后圆形切口开始挤压小麦茎秆,受力开始增加,圆形切口处开始剪切小麦茎秆,使得茎秆由原来的空心变成上下层重合的实体,从而剪切时所需的剪切力越来越大;当到达 C 处时,最大剪切力定义为该茎秆的硬度值,即最大载荷为 128.1 N、位移为 10.11 mm 时,茎秆完全切断,剪切过程完成,系统开始卸载并自动记录 A、C 处的力和位移以及剪切功。

选取矮抗 58 茎秆在加载速率为 50 mm/min 时其第 2~4 节间的力-位移曲线,分析同一小麦品种在相同加载速率下不同节间的剪切力的变化规律(图 2)。测试结果表明,同一小麦品种在相同加载速率条件下,不同茎秆节间的最大剪切力即硬度为第 2 节间硬度最大,为 191.0 N,第 4 节间硬度最小,为 37.3 N。

2.2 小麦茎秆不同节间的剪切强度

同一品种的同一节间在同一加载速率下的剪切试验重复 3 次,通过 5 种不同加载速率对 4 种小麦品种的 3 个不同节间进行剪切试验,测试结果得到各小麦品种不同节间在不同加载速率下的剪切强度(表 1)。

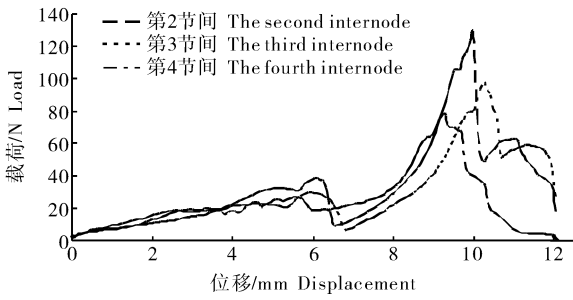


图 2 同一小麦品种不同茎秆节间在相同加载速率下的力-位移曲线

Fig. 2 Curve of load-displacement on different internodes with the same species and the same loading rate

运用 SPSS 软件分别对不同加载速率下同一品种的第 2 节间剪切强度进行方差分析,分析结果如表 2 所示。分析结果表明:在 10~50 mm/min 范围内,加载速率对宜宾 1 号、矮抗 58、周麦 22 和豫麦 7 号 4 个品种小麦茎秆的剪切强度影响差异不显著($P>0.05$),表明加载速率对小麦茎秆第 2 节间的剪切强度无显著影响。同理,在不同加载速率下对 4 个小麦品种的第 3 节间和第 4 节间剪切强度进行显著性检验,结果与第 2 节间一样,在 10~50 mm/min 范围内,对小麦茎秆的剪切强度影响差异不显著($P>0.05$),表明加载速率对小麦茎秆第 3 节间和第 4 节间的剪切强度无显著影响。

表 1 不同加载速率下小麦茎秆各节间剪切强度的均值

Table 1 Average of ultimate shear strength with different internodes and loading rate

MPa

加载速率/ (mm/min) Loading rate	宜宾 1 号 Yibin No. 1			矮抗 58 Aikang 58			周麦 22 Zhoumai 22			豫麦 7 号 Yumai No. 7		
	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
10	8.10	5.82	7.77	6.99	8.54	8.67	8.01	6.47	9.18	7.67	7.46	7.26
20	9.76	7.32	7.43	7.33	8.28	8.41	7.35	5.33	7.13	6.31	5.48	6.88
30	7.08	8.08	7.48	9.35	7.99	5.56	7.43	6.71	8.92	6.33	5.82	7.67
40	4.94	8.22	7.49	6.78	4.86	7.10	5.60	4.78	6.97	8.08	6.00	6.48
50	4.84	4.24	7.09	7.46	5.76	6.33	7.71	5.15	7.85	6.09	5.76	5.24
平均值 Average value	6.94	6.74	7.45	7.58	7.09	7.21	7.22	5.69	8.01	6.90	6.10	6.71

表 2 不同加载速率下同一小麦品种茎秆第 2 节间剪切强度的方差分析

Table 2 Analysis of variance to shear strength on the second internodes of different species and loading rate

品种 Variety	变异来源 ¹⁾ Variation factor	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P
宜宾 1 号 Yibin No. 1	I	2.413	2	1.206	0.255	0.776
	II	198.867	42	4.735		
	III	201.280	44			
矮抗 58 Aikang 58	I	1.041	2	0.520	0.156	0.856
	II	139.898	42	3.331		
	III	140.939	44			
周麦 22 Zhoumai 22	I	10.674	2	2.669	1.366	0.313
	II	19.540	42	1.954		
	III	30.214	44			
豫麦 7 号 Yumai No. 7	I	9.920	2	2.480	0.359	0.832
	II	69.046	42	6.905		
	III	78.966	44			

1) I:处理间 Treatment; II:随机误差 Random error; III:总变异 Total.

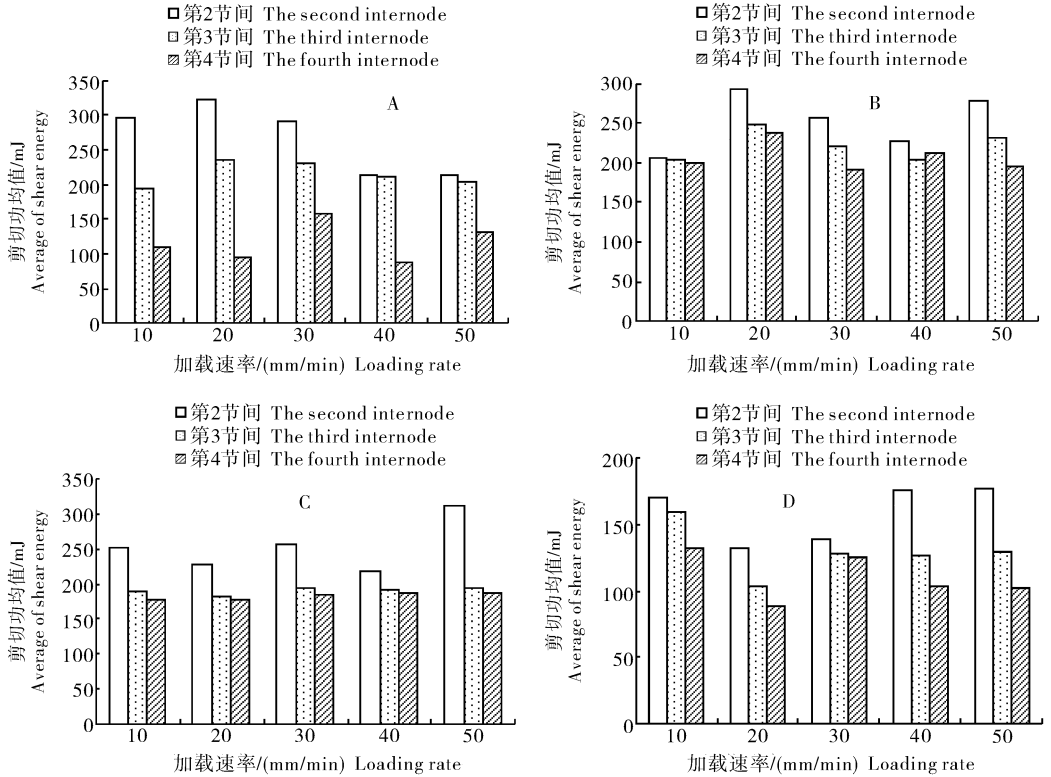
由于不同的加载速率对小麦茎秆的剪切强度没有显著影响,故对同一品种同一节间的不同加载速率下的剪切强度取其均值。由表 1 可知:宜宾 1 号小麦茎秆的剪切强度为 4.24~9.76 MPa,均值为 7.04 MPa;矮抗 58 小麦茎秆的剪切强度为 4.86~9.35 MPa,均值为 7.29 MPa;周麦 22 小麦茎秆的

剪切强度为 4.78~9.18 MPa,均值为 6.97 MPa;豫麦 7 号小麦茎秆的剪切强度为 5.24~8.08 MPa,均值为 6.57 MPa。测试结果表明,矮抗 58 小麦茎秆的剪切强度最大,宜宾 1 号次之,豫麦 7 号的剪切强度最小。

2.3 小麦茎秆不同节间剪切功的变化

在小麦茎秆剪切试验过程中,对不同小麦品种在不同加载速率下的不同节间重复测试 3 次,取其剪切功平均值,可得到不同品种在不同加载速率下不同节间剪切功的变化(图 3)。从图 3 可知:宜宾 1 号小麦茎秆的剪切功为 87.39~322.13 mJ,均值为 199.79 mJ;矮抗 58 小麦茎秆的剪切功为 190.69~293.21 mJ,均值为 226.72 mJ;周麦 22 小麦茎秆的剪切功为 177.36~312.22 mJ,均值为 209.63 mJ;豫麦 7 号小麦茎秆的剪切功为 88.06~177.01 mJ,均值为 133.03 mJ。测试结果表明,在不同加载速率下同一小麦品种不同节间的剪切功以第 2 节间的剪切功最大,第 4 节间的剪切功最小。

对不同加载速率下的剪切功进行显著性检验,分析结果表明,在 10~50 mm/min 范围内,加载速率对宜宾 1 号、矮抗 58、周麦 22 和豫麦 7 号 4 个小



A. 宜宾 1 号 Yibin No. 1; B. 矮抗 58 Aikang 58; C. 周麦 22 Zhoumai 22; D. 豫麦 7 号 Yumai No. 7.

图 3 不同小麦品种不同茎秆节间剪切功的直方图

Fig. 3 Histogram of shear energy about the different internode on different species of wheat

麦茎秆剪切功的影响差异不显著 ($P > 0.05$), 因此, 加载速率对小麦茎秆的剪切功无显著影响。

3 讨论

本试验选择成熟期自然状态下风干的宜宾 1 号、矮抗 58、周麦 22 和豫麦 7 号 4 个品种小麦茎秆的第 2~4 节间为研究对象, 通过剪切试验分析小麦茎秆在剪切过程中力的变化规律以及不同加载速率是否对剪切强度和剪切功产生影响。通过小麦剪切试验中对加载过程中力的变化的分析, 明确了小麦茎秆剪切过程中受力的变化规律, 发现同一品种不同节间在相同加载速率条件下第 2 节间硬度值最大, 第 3 节间次之, 第 4 节间硬度值最小。这与小麦茎秆自身在生长过程中的结构特点有关。

在查阅相关文献的时候, 发现小麦茎秆剪切试验的加载速率记载均不一样。运用 SPSS 软件对不同加载速率对不同品种同一节间的剪切应力和剪切功进行显著性检验, 表明在 10~50 mm/min 范围内, 不同的加载速率对宜宾 1 号、矮抗 58、周麦 22 和豫麦 7 号 4 个品种小麦茎秆剪切功的影响均不显著 ($P > 0.05$)。这说明小麦茎秆的剪切强度和剪切

功与其自身的结构有关。

剪切试验结果表明: 宜宾 1 号小麦茎秆的剪切强度为 4.24~9.76 MPa, 均值为 7.04 MPa; 矮抗 58 小麦茎秆的剪切强度为 4.86~9.35 MPa, 均值为 7.29 MPa; 周麦 22 小麦茎秆的剪切强度为 4.78~9.18 MPa, 均值为 6.97 MPa; 豫麦 7 号小麦茎秆的剪切强度为 5.24~8.08 MPa, 均值为 6.57 MPa。这说明矮抗 58 小麦茎秆的剪切强度最大, 宜宾 1 号次之, 豫麦 7 号的剪切强度最小。从外部观察各品种小麦茎秆的粗壮程度是矮抗 58 最壮, 宜宾 1 号其次, 豫麦 7 号最细。可见小麦茎秆的粗壮程度与小麦茎秆的剪切强度呈正相关。

试验结果还表明: 宜宾 1 号小麦茎秆的剪切功为 87.39~322.13 mJ, 均值为 199.79 mJ; 矮抗 58 小麦茎秆的剪切功为 190.69~293.21 mJ, 均值为 226.72 mJ; 周麦 22 小麦茎秆的剪切功为 177.36~312.22 mJ, 均值为 209.63 mJ; 豫麦 7 号小麦茎秆的剪切功为 88.06~177.01 mJ 之间, 均值为 133.03 mJ; 在不同加载速率下同一小麦品种不同节间的剪切功均为第 2 节间的剪切功最大, 第 4 节间的剪切功最小。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 赵多佳,郭维俊,宋言明,等.小麦茎秆抗拉性能研究[J].安徽农业科学,2008,36(14):5837-5838.
- [5] 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):172-175.
- [6] 郭玉明,袁红梅,阴研.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.
- [7] 袁志华,李英俊.小麦茎秆弯曲特性与密度间的关系研究[J].安徽农业科学,2009,37(32):15775,15865.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘后森,胡景龙,张海.小麦茎的组织结构力学性能与倒伏的力学问题[J].八一农学院学报,1992,15(2):91-96.
- [11] 王芬娥,黄高宝,郭维俊,等.小麦茎秆力学性能与微观结构研究[J].农业机械学报,2009,40(5):92-95.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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究[J].农业工程学报,2007,23(4):124-129.

Test of shear mechanical properties of wheat stalks

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

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

Abstract In order to analyze the variation of loading in the process of shear and whether different loading rates have an impact on shear strength and shear energy or not, four different species of wheat stalks in mature stage and dried under natural conditions were selected, which were Yibi No. 1, Aikang 58, Zhoumai 22 and Yumai No. 7, and the stems of their second, third and fourth internodes were chosen for study. The middle of each internode was tested for cross striations shear on the TMS PRO type Texture Analyzer produced by the U. S. FTC company. Through the shear testing, the biomechanical properties of the maximum loading, shear strength and shear energy were measured for various kinds of wheat stalks on different internodes with different speeding rates. The study result indicates that the variation of loading in the process of shear was that the loading increased at the beginning, then reduced because of its structural features, then added rapidly until to rupture. Meanwhile, the hardness, shear strength and shear energy on different internodes of the tested wheat stalks were respectively within the ranges of 37.3~191.0 N, 4.2~9.8 MPa, and 43.53~432.23 mJ. As for the shear strength and shear energy on different internodes of the same species of wheat stalks, those on the second internode is the largest, the fourth is the least. At last the significance test for shear strength and shear energy was run by applying SPSS, the result shows that different speeding rates have no significant impact on shear strength and shear power.

Key words wheat stem; shear; shear strength; shear energy

(责任编辑:陈红叶)