

含水率对大豆秸秆流体力学性能的影响

黄振华, 陈海涛, 房欣, 李丽霞

(东北农业大学 工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:通过直剪切试验,测定分析细碎化处理后大豆秸秆的内摩擦角、粘聚力和流动函数值,研究其流体力学特性,为大豆秸秆纤维制取机螺杆的优化设计提供理论依据。以细碎化处理后大豆秸秆含水率为试验因素,采用单因素对比试验方法,得出了细碎化处理后大豆秸秆的内摩擦、粘聚力和流动函数值随含水率变化的显著性程度及其变化趋势。结果表明:含水率对内摩擦角有显著的影响,随着含水率的降低,内摩擦角有先增大再减小的变化趋势,在含水率为75%时内摩擦角最小;含水率对粘聚力和流动函数值的影响均不显著。

关键词:大豆秸秆;内摩擦角;粘聚力;流动函数值

中图分类号:S226.7⁺9

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2011)05-0847-04

Flowability Parameters for Chopped Soybean Stalk

HUANG Zhen-hua, CHEN Hai-tao, FANG Xin, LI Li-xia

(Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: Internal friction angle, cohesion and flow function value are three important flowability parameters of chopped soybean stalk. In order to get the theoretical data for designing straw fiber extruder, direct shear test was used to study the flowability parameters of chopped soybean stalk. Comparing single factor experiment was employed to study the variation tendency and significant level of chopped soybean stalk in different moisture contents. The results indicated that the internal friction angle was closely related to moisture contents. The internal friction angle was smaller when the moisture contents was 75%. With the moisture contents reduced, the internal friction angle of chopped soybean stalk increased firstly, and then decreased. The effect of moisture contents on the cohesion and flow function value of chopped soybean stalk was not significant.

Key words: Soybean stalk; Internal friction angle; Cohesion; Flow function value

中国农作物秸秆资源丰富,2008年总产量达8.42亿t,其中大豆秸秆产量为0.24亿t^[1],目前,大豆秸秆资源化利用技术主要包括肥料、饲料、燃料、基料、材料等^[1-2],但因为技术、成本以及制作过程中的污染等问题,各项技术应用受到限制,大豆秸秆综合利用率低,因此研究大豆秸秆低成本无污染利用技术具有重大的现实意义。秸秆纤维制取机作为利用秸秆制备完全生物降解植物纤维材料新技术的关键设备之一,实现了秸秆纤维的清洁制取^[3-5],同时也为实现秸秆低成本无污染利用奠定了基础。

秸秆的内摩擦角、粘聚力、流动函数值等流体力学特性是优化设计秸秆纤维制取机结构参数的重要依据,制取机加工的秸秆原料具有细碎化、含水率高(通常大于45%)的特点,目前,国内缺乏对此类秸秆物料的研究,虽然国外对细碎化处理后的秸秆进行了研究,但其研究对象的含水率都较低,

一般低于20%^[6-7],这些研究成果都不足以为秸秆纤维制取机的改进设计提供理论依据。

该研究选取经过细碎化处理的大豆秸秆作为研究对象,研究大豆秸秆在不同含水率条件下的流体力学性能,为优化秸秆纤维制取机的设计提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为取自东北农业大学香坊试验农场的绥豆26大豆秸秆。将秸秆进行细碎化处理制得试样,试样物理特性如表1所示。

1.2 试样准备

参考GB/T5262-2008^[8]中关于秸秆含水率的测定和相关文献的处理方法^[9],将处理后的秸秆置于烘箱内,以(105±2)℃的温度烘干24h,使秸秆绝对干燥后密封存放,试验前按试验设计的含水率计

收稿日期:2011-05-13

基金项目:黑龙江省科技攻关重点课题资助项目(GA09B501-1)。

第一作者简介:黄振华(1984-),男,在读硕士,从事农业机械装备及生物质材料研究。E-mail:gongcheng_jh@163.com。

通讯作者:陈海涛(1963-),男,教授,博士,博士生导师,从事农业机械装备及生物质材料研究。E-mail:hichen@neau.edu.cn。

算需水量,然后均匀喷洒在试样上,混合均匀后放入密封袋内存放 24 h 备用。

表 1 试样物理特性

Table 1 Test sample physical features

项目 Item	长度 Length/mm	平均直径 Average diameter/mm
均值 Mean	83.96	2.21
极差 Range	170.00	5.40
标准差 Standard deviation	37.60	1.69

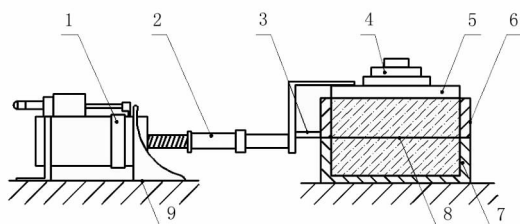
1.3 试验设备

ZJ 型直剪仪(南京土壤仪器厂)、YB502 型电子天平(上海海康电子仪器厂)、DGG-9070AD 型电热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司)以及秒表等。

1.4 试验方法

1.4.1 试验设计 采用单因素对比试验方法^[14-15],以秸秆含水率为试验因素,根据其含水饱和度的不同,设含水率 75%、65%、55%、45% 4 个处理(分别以 T1、T2、T3、T4 表示),以内摩擦角、粘聚力和流动函数值为目标函数,实施试验研究,每个处理重复 3 次。

1.4.2 目标函数的计算 利用直剪切法测定内摩擦角、粘聚力和流动函数值^[6-7,11],试验装置如图 1 所示,设定预压实正应力为 200 kPa,然后分别在 50、100、150、200 kPa 4 个等级的正应力条件下逐级实施直剪切,具体操作过程参考 GB/T 4934.1-2008^[12]。



1. 加载装置;2. 测力仪;3. 加载杆;4. 压实载荷;5. 顶盖;6. 剪切盒;7. 底座;8. 剪切平面;9. 底平面

1. Load device; 2. Dynamometer; 3. Load pole; 4. Compaction load; 5. Cap; 6. Shear cell; 7. Base; 8. Shear plane; 9. Bottom plane

图 1 直剪仪示意图

Fig. 1 Direct shear apparatus

在 Excel 2003 软件内,以 4 个等级的正应力作为 X 轴,对应的 4 个剪切应力作为 Y 轴绘制散点图,添加趋势线并拟合出线性回归方程。此趋势线即为莫尔包络线,回归方程即可看作莫尔包络线的表达式^[7,11],用式(1)表示,从而求得该组试验的内摩擦角和粘聚力的值。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力,kPa; c 为粘聚力,kPa; σ 为正应力,kPa; φ 为内摩擦角,°。

在一定预压实条件下的流动函数 FF 值等于最大主应力 σ_1 与无侧限屈服应力 σ_c 的比值^[11,13],最大主应力和无侧限屈服应力分别可以通过公式(2)(3)求出^[10],进而可以求得 FF 值。

$$\sigma_1 = \frac{2C(1 + \sin \varphi)}{\cos \varphi} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{A - \sqrt{A^2 \sin^2 \varphi - \tau_0^2 \cos^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi} \right) \times (1 + \sin \varphi) - \left(\frac{c}{\tan \varphi} \right) \quad (3)$$

式中, $A = \sigma_0 + c/\tan \varphi$, σ_0 为预压实载荷对应的最大正应力,kPa; τ_0 为最大正应力对应的剪切应力,kPa。

2 结果与分析

2.1 试验结果

各处理的内摩擦角、粘聚力及流动数值,如表 2 所示。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

处理 Treatment	重复 Repeat	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	流动函数值 FF
T1	1	14.04	41.67	2.15
	2	16.26	35.42	2.78
	3	13.81	42.71	2.12
T2	1	16.48	48.96	1.91
	2	13.81	53.13	1.65
	3	20.14	39.58	2.64
T3	1	18.65	40.63	2.44
	2	19.50	37.50	2.73
	3	21.39	31.25	3.53
T4	1	16.92	38.54	2.55
	2	15.60	41.67	2.20
	3	16.70	39.58	2.40

2.2 方差分析

对大豆秸秆内摩擦角 φ 、粘聚力 c 、流动函数值 FF 进行方差分析,其结果见表 3。

表 3 目标函数的方差分析

Table 3 Variances analysis of target function

项目 Item	差异源 Source	自由度 df	均方和 Mean Square	F 值 F value	P 值 Prob > F
φ	组内	3	14.38	7.09	0.012
	组间	8	2.03		
	总和	11			
c	组内	3	35.20	2.21	0.164
	组间	8	15.91		
	总和	11			
FF	组内	3	0.11	0.39	0.762
	组间	8	0.28		
	总和	11			

从表 3 可以看出,大豆秸秆内摩擦角的 P 值小于 0.05,这说明含水率对这个指标的影响显著;而粘聚力和流动函数值的 P 值均大于 0.1,这说明在 0.1 的信度下,含水率对这 2 个指标的影响不显著。

2.3 含水率对目标函数影响规律

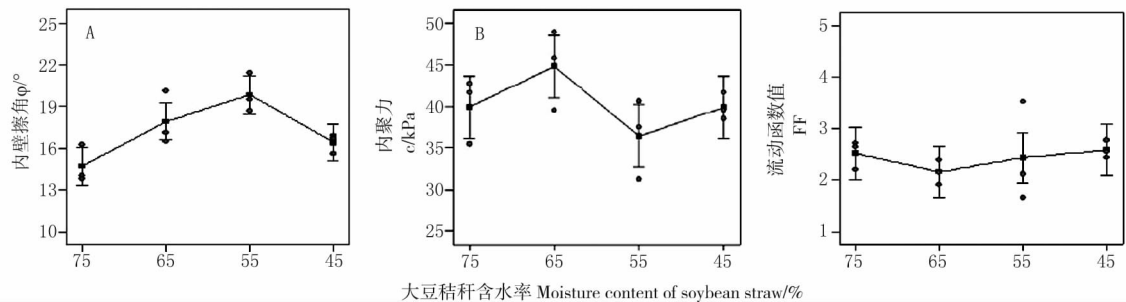
2.3.1 内摩擦角 大豆秸秆内摩擦角随含水率变化规律如图 2a 所示。随着含水率的减少,大豆秸秆的内摩擦角是呈先增加后减小的趋势。通过多重比较,表 4 说明,T1 与 T2 比较, P 值小于 0.05,这说明该区间增加的趋势显著;T2 与 A3 比较,其 P 值大于 0.05,说明该区间内的增加趋势变缓,变为不显著;T3 与 T4 比较,其 P 值小于 0.05,说明此区间的下降趋势显著。

相关研究^[6,12]表明,秸秆物料的内摩擦角与含水率呈正相关,但是,从该试验结果来看,这种规律不是绝对的,其变化趋势应该是随含水率的减小内摩擦角先增大再减小。根据美国学者 Bharat Bhushan 关于液膜介质摩擦的研究结果^[16],可以这样分析其变化趋势,当秸秆含水率较高时,一旦受到较大的压力就会有大量的水充满在秸秆之间的空隙内,此时对秸秆进行直剪切,实际上只是发生液膜的剪切,这样就降低了秸秆间的内摩擦,从而导致内摩擦角较小。随着含水率的减少,由于表面能的作用使自由水在秸秆间接触和非接触的凸体上形成了凹形弯月面液膜,从而产生了弯月面力,增加了秸秆间的内摩擦,随着含水率的继续减少,弯月

面力也随之减小,这样内摩擦就会逐渐减小。根据前期的研究结果,在制取机不同加工段内秸秆的含水率是不同的,呈逐渐减小的趋势。结合测得的内摩擦角随含水率的变化趋势来优化秸秆纤维制取机螺杆各段的结构参数,可以有效提高螺杆的输送能力,进而提高制取机的生产效率。

2.3.2 粘聚力 大豆秸秆粘聚力随含水率变化规律如图 2b 所示。随着含水率的减少,粘聚力在一定程度上发生波动,这种波动可能是由一些未知噪声影响造成的。因为方差分析结果表明,这种变化趋势在 0.05 ~ 0.1 的信度下不显著,这说明在该本研究条件下,含水率不是影响秸秆粘聚力变化的主要因素。而相关研究^[7,13]表明,物料的物理特性和被压实程度都会影响其粘聚力的变化。

2.3.3 流动函数值 大豆秸秆流动函数值随含水率变化规律如图 2c 所示。随着含水率的减少,流动函数值在一定程度上发生波动,但是,方差分析结果表明,这种变化趋势在 0.05 ~ 0.5 的信度下不显著,这说明含水率不是影响秸秆流动性的主要因素。结合公式(2)、(3)和相关研究^[11,13]可知,内摩擦角、粘聚力和压实程度都会影响流动函数值的变化。



a. 含水率对大豆秸秆内摩擦角的影响;b. 含水率对大豆秸秆粘聚力的影响;c. 含水率对大豆秸秆流动函数值的影响
a. Influence of moisture content on internal friction angle of soybean stalk;b. Influence of moisture content on cohesion of soybean stalk;c. Influence of moisture content on flow function value of soybean stalk

图 2 含水率对目标函数的影响规律

Fig.2 Influence of moisture content on target function

表 4 内摩擦角多重比较

Table 4 Multiple comparison of internal friction angle

处理 Treatment	均差 Mean difference	自由度 DF	t 值 t value	P 值 Prob > t
T1vsT2	-3.21	1	-2.76	0.025
T1vsT3	-5.14	1	-4.42	0.002
T1vsT4	-1.70	1	-1.47	0.181
T2vsT3	-1.93	1	-1.66	0.136
T2vsT4	1.51	1	1.30	0.230
T3vsT4	3.44	1	2.96	0.018

在含水率为 75% 时内摩擦角取得最大值,随着含水率的降低,有先增大再减小的趋势。根据该趋势,对制取机优化设计时,各段螺棱的楔角也应先增大再减小,这将增强其输送能力,进而提高生产效率。

含水率对粘聚力的影响在 0.05 ~ 0.1 的信度下不显著;对流动函数值的影响在 0.05 ~ 0.5 的信度下不显著,这说明在对秸秆纤维制取机实施改进设计时,可以不考虑这二者变化对结构参数的影响。

3 结 论

含水率对大豆秸秆的内摩擦角有显著的影响,

参考文献

[1] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010: 90-145. (Bi Y Y. Study on straw resources evaluation

- and utilization in china[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010; 90-145.)
- [2] Ranilla M J, Carro M D, Lo'pez S, et al. Influence of nitrogen source on the fermentation of fibre from barley straw and sugarbeet pulp by ruminal micro-organisms in vitro[J]. The British Journal of Nutrition, 2001, 86(6): 717-25.
- [3] 韩永俊, 陈海涛, 刘丽雪, 等. 水稻秸秆纤维制取工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 281-286. (Han Y J, Chen H T, Liu L X, et al. Optimization of technical parameters for preparing fiber from rice straw[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 281-286.)
- [4] 韩永俊, 陈海涛, 刘丽雪, 等. 水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 242-247. (Han Y J, Chen H T, Liu L X, et al. Optimization of technical parameters for making mulch from rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 242-247.)
- [5] 陈海涛, 李浩, 孙培灵. 一种组合式秸秆纤维制取机: 中国, 200910206283. 4[P]. 2009. (Chen H T, Li H, Sun P L. A combined type straw fiber extruder: China, 200910206283. 4 [P]. 2009.)
- [6] Chevanan N, Womac A R, Bitra V S P, et al. Flowability parameters for chopped switchgrass, wheat straw and corn stover[J]. Powder Technology, 2009, 193: 79-86.
- [7] Fasina O O. Flow and physical properties of switchgrass, peanut hull, and poultry litter[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 721-728.
- [8] GB/T 5262-2008. 农业机械试验条件测定方法的一般规定[S]. (GB/T 5262-2008. Agricultural machinery testing conditions-general rules for measuring methods[S].)
- [9] Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S, et al. Mechanical properties of corn stover grind[C]. An ASAE Meeting Presentation, 2003.
- [10] Puri V M. Characterizing powder flowability[J]. Chemical Processing, 2002, 65(1): 39-42.
- [11] 周祖鄂. 农业物料学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 101-109. (Zhou Z E. Agricultural material science[M]. Beijing: Agricultural Press, 1994: 101-109.)
- [12] GB/T 4934. 1-2008. 土工试验仪器 剪切仪 第1部分: 应变控制式直剪仪[S]. (GB/T 4934. 1-2008. Instrument for soil test-Shear apparatus-Part1: Strain-controlled direct shear apparatus [S].)
- [13] 谢晓旭, 沈湘林, 汤雪美, 等. 煤粉流动特性若干影响因素的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 85-88. (Xie X X, Shen X L, Tang X, et al. Study on some factors impacting flowability of pulverized coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 85-88.)
- [14] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 72-86. (Yuan Z F, Zhou J Y. Design and analysis of experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 72-86.)
- [15] Chen H T. Study on the cluster separator for automatically planting baker's garlic in a sandy field[D]. Tottori Japan: Tottori University, 2004: 74-77.
- [16] B. 布尚. 摩擦学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 137. (Bharat B. Introduction to tribology[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 137.)

(上接第 846 页)

- [3] Schmid K J, S rensen T R, Stracke R, et al. Large-scale identification and analysis of genome-wide single-nucleotide polymorphisms for mapping in *Arabidopsis thaliana*[J]. Genome Research, 2003, 13(6): 1250-1257.
- [4] Zhu Y, Song Q, Hyten D, et al. Single-nucleotide polymorphisms in soybean[J]. Genetics, 2003, 163(3): 1123-1134.
- [5] Comai L, Young K, Till B J, et al. Efficient discovery of DNA polymorphisms in natural populations by Ecotilling[J]. The Plant Journal, 2004, 37(5): 778-786.
- [6] Kadaru S B, Yadav A S, Fjellstrom R G, et al. Alternative Ecotilling protocol for rapid, cost-effective single-nucleotide polymorphism discovery and genotyping in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2006, 24(1): 3-22.
- [7] Gilchrist E J, Haughn G W, Ying C C, et al. Use of Ecotilling as an efficient SNP discovery tool to survey genetic variation in wild populations of *Populus trichocarpa* [J]. Molecular ecology, 2006, 15(5): 1367-1378.
- [8] Wang N, Shi L, Tian F, et al. Assessment of FAE 1 polymorphisms in three *Brassica* species using Ecotilling and their association with differences in seed erucic acid contents[J]. BMC Plant Biology, 2010, 10(1): 137-147.
- [9] Hofinger B J, Jing H C, Hammond-Kosack K E, et al. High-resolution melting analysis of cDNA-derived PCR amplicons for rapid and cost-effective identification of novel alleles in barley[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2009, 119(5): 851-865.
- [10] Willmore-Payne C, Holden J A, Tripp S, et al. Human malignant melanoma; detection of BRAF-and c-kit-activating mutations by high-resolution amplicon melting analysis[J]. Human pathology, 2005, 36(5): 486-493.
- [11] Doyle J J. Isolation of plant DNA from fresh tissue[J]. Focus, 1990, 12: 13-15.
- [12] Caldwell D G, McCallum N, Shaw P, et al. A structured mutant population for forward and reverse genetics in Barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. The Plant Journal, 2004, 40(1): 143-150.
- [13] Martins-Lopes P, Zhang H, Koebner R. Detection of single nucleotide mutations in wheat using single strand conformation polymorphism gels[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2001, 19(2): 159-162.
- [14] He S, Ohm H, Mackenzie S. Detection of DNA sequence polymorphisms among wheat varieties[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1992, 84(5): 573-578.