

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.021

颗粒状秸秆物料流动特性试验*

姚宗路¹ 欧阳双平² 孟海波¹ 赵立欣¹ 田宜水¹

(1. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125; 2. 北京市三一重机有限公司, 北京 102206)

【摘要】以华北地区8种农作物秸秆为研究对象,通过颗粒状秸秆静态堆积角、压缩率、均匀度、抹刀角4个指标测试,采用Carr指数法及内摩擦角评价分析了各种颗粒状秸秆物料的流动特性。结果表明,通过Carr指数法得分可以反映颗粒状秸秆流动性的变化规律,得分越高,流动性越好;8种秸秆分为易于流动(如玉米芯)、一般流动(如玉米秸秆)、不易流动(如豆秸)3类,该结果与采用内摩擦角评价原料的流动特性基本一致。

关键词: 农作物秸秆 颗粒状 流动特性 内摩擦角 评价方法
中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0112-05

Flow Characterization of Biomass Particle Straw

Yao Zonglu¹ Ouyang Shuangping² Meng Haibo¹ Zhao Lixin¹ Tian Yishui¹

(1. Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China
2. Beijing SANY Heavy Machinery Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract

Carr-evaluation method for evaluating flow characterization of biomass particle straw has been studied to resolve the problem of testing flow characterization of crop straw. And the flow characterization of 8 types of crop straw came from North China was measured by the two methods of Carr-evaluation method and inner-friction angle method. The results showed that Carr-evaluation method can reflect the variation of particle straw flow characterization, the more score it had, the better flow characterization it was, and the 8 types of crop straws were divided into three categories, easy flow (such as the score of corn cob was 81), the general flow (such as corn stalks) and difficult flow (such as soybean), the results of Carr-evaluation method is similar to the results of inner-friction angle method.

Key words Crop straw, Particle, Flow characterization, Inner-friction angle, Evaluation method

引言

我国是农业大国,具有丰富的秸秆资源,据调查,2009年我国农作物秸秆理论资源量为8.20亿t,可收集资源量为6.87亿t,农作物秸秆是工、农业的重要生产资源,可用作肥料、饲料、生活燃料以及造纸等工业原料,用途广泛^[1~3]。作为能源化利用时一般需要经过铡草机或揉切机等设备进行预处理,颗粒粒度一般为5~30mm,能满足相关要求,颗粒状秸秆物料一般经过连续输送设备输送至成型加工

设备^[4~5]。
颗粒状秸秆物料是一种典型的散粒体,粒度分布范围大,目前对秸秆物料的特性研究多集中在化学特性(如低位发热量、工业分析和元素分析等),在物理特性(如全水分、堆积密度、静态堆积角、外摩擦角等)方面也开展了一定的研究^[6~7],国内外对麦秸、饲草等软茎秆的拉伸强度、剪切强度、弹性模量、刚度模量等物理特性研究较多^[8~9],但对于流动特性研究较少,流动特性是指在四周无容器侧壁限制的条件下,散粒物料具有的向四周自由流动性的性

收稿日期: 2011-12-07 修回日期: 2012-01-11
* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(201003063-03)
作者简介: 姚宗路,高级工程师,博士,主要从事生物质资源开发利用研究,E-mail: yaozonglu@163.com
通讯作者: 田宜水,研究员,主要从事节能、可再生能源技术和设备开发与推广以及能源政策研究,E-mail: yishuit@yahoo.com

质,对物料输送设备的选择与设计具有较大的影响^[10]。散粒体的流动特性评价方法较多^[11],其中 Carr 指数评价使用范围较广^[12],但目前多集中在煤粉、药粉等领域^[13],在颗粒状秸秆物料流动特性研究中采用 Carr 指数评价则未见报道。

本文选取我国粮食主产区的 8 种农作物秸秆,在分析物理化学特性的基础上^[7],对颗粒状秸秆物料开展流动特性研究,测试静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度等参数,采用 Carr 指数法对不同的颗粒状秸秆物料的流动特性进行评价,并分析对输送特性的影响,为秸秆原料仓储、输送等设备的设计及处理工艺提供科学的参数依据。

1 秸秆流动特性评价方法

针对农作物秸秆的流动特性,目前国内外还没有开展专门测试研究,不过对于散粒物料流动性的研究较多,由于散粒体测试操作的目的不同,其评价方法也各异,不同的评价方法适用的范围不尽相同。散粒体流动特性的评价方法多采用在重力作用的情况下,测定散粒体从容器底部开孔流出的速度,或者测定散粒体能够流出的最小孔径来评价散粒体的流动性,另外也可以用筛网流动性指数(筛网全通指

数)来评价散粒体流动性,以及利用散粒体的填充特性,测出散粒体在冲击填充时的压缩率及压缩率的变化过程来定性地描述散粒体的流动性^[13~14]。但这些方法多用于粉体、粉末等散粒体流动特性,不适合测试秸秆的流动特性。

卡尔(Carr)指数法是在综合研究了影响粉体流动性和喷流性的几个单项粉体物性值的基础上,将其每个特征值指数化并累加以指数方式表示的表征粉体综合特性的方法。Carr 指数法具有快速、准确、适用范围广、易操作等优点,被广泛应用于粉体特性的综合评判和粉体系统的设计开发中^[12~13]。

Carr 流动性指数法综合考察了静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度 4 个指标,按规定折算成 Carr 流动性指数来评价散粒体的流动性,根据这些特性所对应的经验指数求得 Carr 流动性指数,其范围是 0~100,通过打来说明物料的流动特性,Carr 指数越大,散粒体的流动性越好。

在秸秆理化特性测试过程中,能够方便地测试农作物秸秆的静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度等指标,本文采用 Carr 流动性指数法建立农作物秸秆流动特性评价方法,来评价农作物秸秆的流动特性。Carr 流动性指数评价方法如表 1 所示。

表 1 Carr 指数评分表
Tab.1 Score table of Carr indexes

静堆积角		压缩率		抹刀角		均匀度		流动性能 指数合计	流动性 能评价
测定值/(°)	指数	测定值/(°)	指数	测定值/(°)	指数	测定值	指数		
0~25	25	0~5	25	0~25	25	1	25	90~100	最好
26~29	24	6~9	23	26~30	24	2~4	23		
30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
31	22	11	22	32	22	6	22	80~89	好
32~34	21	12~14	21	33~37	21	7	21		
35	20	15	20	38	20	8	20		
36	19.5	16	39.5	39	19.5	9	19	70~79	普通
37~39	18	17~19	18	40~44	18	10~11	18		
40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
41	17	21	17	46	17	13	17	60~69	差
42~44	16	22~24	16	47~59	16	14~16	16		
45	15	25	15	60	15	17	15		
46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	40~59	
47~54	12	27~30	12	62~74	12	19~21	12		
55	10	31	10	75	10	22	10		
56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	20~39	
57~64	7	33~36	7	77~89	7	24~26	7		
65	5	37	5	90	5	27	5		
66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	0~19	最差
67~89	2	39~45	2	92~99	2	29~35	2		
90	0	>45	0	>99	0	>35	0		

2 材料与方法

2.1 试验原料

选择中国粮食主产区的玉米秸、麦秸、棉秆、豆秸等农作物秸秆开展物理特性研究。试验原料样品主要取自北京市大兴区、河北省固安县等地,包括玉米秸、麦秸、棉秆、豆秸、玉米芯、花生壳、芝麻秆、葵花秆等 8 种农作物秸秆。样品采集后在北京市大兴区农业部生物质固体成型燃料示范基地进行试验研究。各种农作物秸秆经 93QS-16.0 型铡草机粉碎处理后,粒度在 5~30 mm,并进行干燥处理,各种农作物秸秆全水分在 10% 左右。

2.2 试验仪器

试验仪器主要包括堆积仪、堆积桶、抹刀角测量仪(自制)、孔径筛网、PL2002 型电子天平、60 kg 量程台秤、万能游标角度尺、卷尺、角尺、样品袋等。

2.3 测试参数与方法

流动特性的参数包括静态堆积角、压缩率、均匀度、抹刀角及内摩擦角等。

(1) 静态堆积角:根据堆积高度与堆积半径的正切值计算得到,测试标准为“JB/T 9014.7—1999 连续输送设备散粒物料堆积角的测定”。测试采用落体成堆的方法,将秸秆物料从漏斗上方均匀加料至物料在料堆平板上形成稳定保持的最大自然坡角的料堆为止。

秸秆压块原料的静堆积角计算式为

$$\beta = \arctan \frac{2h}{d_2 - d_1} \tag{1}$$

式中 h ——料堆测量高度,mm

d_1 ——料堆测量上端底径,mm

d_2 ——料堆测量底径,mm

(2) 压缩率:压缩率是指秸秆原料松散堆积时和振实堆积时的体积变化率,测试标准为“JB/T 9014.4—1999 连续输送设备 散粒物料密度的测定”和“NY/T 1881.6—2010 生物质固体成型燃料试验方法 第 6 部分:堆积密度”。压缩率可以表征流动特性,一般秸秆物料的压缩率越大,流动性越差。可根据秸秆原料的松散堆积密度和振实堆积密度求出压缩率

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} \times 100\% \tag{2}$$

式中 ρ_s ——原料的振实堆积密度,kg/m³

ρ_b ——原料的松散堆积密度,kg/m³

(3) 均匀度:指散体物料粒径和形状的统一程度,可以表示流动性能。取超过 20 L 的颗粒状秸秆物料,将原料依次经过孔径 63、45、32、16、8、

3.15 mm 筛网,称量各区间质量,计算各区间的质量分数,定义 60% 的试样物料通过的筛孔宽度除以 10% 试样物料通过的筛孔宽度,得到的数值称为均匀度

$$U_f = X_{60}/X_{10} \tag{3}$$

式中 X_{60} ——60% 试样物料通过的筛孔宽度,mm

X_{10} ——10% 试样物料通过的筛孔宽度,mm

(4) 抹刀角:指通过抹刀在物料上轻轻搅动形成的残留角,通过观察抹刀角可以间接衡量物料的粘着性、粒度、形状、均匀度等。物料的抹刀角也反映内摩擦情况,抹刀角表征的意义与内摩擦角一致,数值常常大于静堆积角。测试方法为将抹刀埋在压块原料堆里,通过升降装置垂直提起抹刀,待抹刀上的原料与料堆分离,测量抹刀上压块原料堆积的底角。抹刀角 θ_s 是以抹刀提起后的角度 θ_{s1} 和抹刀受到冲击掉料后的角度 θ_{s2} 的平均值来表示

$$\theta_s = (\theta_{s1} + \theta_{s2})/2 \tag{4}$$

(5) 内摩擦角:内摩擦角是物料内部沿某一断面切断时,作用于断面的剪切力与正压力之比的反正切值对应的角度。对于粒度较小的物料,其值可利用剪切仪或三轴坐标仪进行测定,对于颗粒状秸秆物料,粒度较大,不能用这些设备直接测量。本文采用内摩擦角的方法^[9]:通过将散粒物料装满一个硬纸板制成的矩形箱子,去掉一个侧面,让物料塌落下来,测量物料与水平面所形成的塌落角;对于流动性较好的秸秆压块原料,物料会塌落下来,可以直接测量物料与水平面形成的塌落角;对于流动性较差的秸秆压块原料,轻轻振动纸箱两侧面,使物料流动形成塌落角,再测量此塌落角,作为内摩擦角。

测试不同种类农作物秸秆的静态堆积角、压缩率、均匀度、抹刀角及内摩擦角,每个参数测试 5 次,取平均值,采用 SPSS 软件对数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 Carr 流动性指数评价方法

通过分析各种颗粒状秸秆物料静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度 4 项指标,8 种颗粒状秸秆原料的 Carr 指数评价打分如表 2 所示。结果表明对于静堆积角,玉米芯得分最高,花生壳和葵花秆次之,其他秸秆的都比较低,得分均为 12 分;对于压缩率,结果也是玉米芯得分最高,豆秸、棉秸、麦秸和芝麻秆得分较低;对于抹刀角,8 种颗粒状秸秆得分相对其他 3 个指标来说得分最低,除了玉米芯和葵花秆为 16 分,麦秸和芝麻秆的得分甚至低至 5.5 分;而对于均匀度,8 种秸秆的得分在 4 项指标中为最高,除麦秸较低外(20 分),其他分别为 22.5 分、23 分。

表 2 各种颗粒状秸秆物料的 Carr 指数流动性得分

Tab.2 Flow characterization score on Carr indexes of different biomass particle straw

农作物 秸秆	静堆积角		压缩率		抹刀角		均匀度		流动性 指数合计
	数值/(°)	评分	数值/%	评分	数值/(°)	评分	数值	评分	
玉米秸	51.2	12	25.19	15	73.0	12	4.9	22.5	61.5
麦秸	53.6	12	34.75	7	89.5	5.5	8.2	20	44.5
棉秆	53.8	12	33.21	7	79.6	7	4.4	23	49.0
豆秸	52.6	12	30.08	12	89.0	7	4.8	22.5	53.5
玉米芯	29.7	23	15.55	19.5	48.1	16	4.2	23	81.5
花生壳	39.4	18	22.18	16	61.6	13	3.6	23	70.0
芝麻秆	52.6	12	27.39	12	89.5	5.5	4.2	23	52.5
葵花秆	43.2	16	23.22	16	53.7	16	2.8	23	71.0

从表 2 可知,8 种秸秆 Carr 指数流动性得分最高的是玉米芯,为 81.5 分,其次是葵花秆 71 分、花生壳 70 分,得分最低的是麦秸为 44.5 分。而静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度指标中,对流动性指数得分影响最大的依次是压缩率、抹刀角、静堆积角,尤其是压缩率,玉米芯和麦秸相差 12.5 分;均匀度影响最小,得分均超过 20 分,相差不大。

3.2 内摩擦角测试秸秆

玉米秸、麦秸、棉秸、豆秸、玉米芯、花生壳、芝麻秆、葵花秆等 8 种颗粒状秸秆的内摩擦角分别为 37.78°、47.52°、40.5°、46.36°、29.15°、38.54°、42.48°、37.07°,差异较大。玉米芯的内摩擦角最小,为 29.15°,麦秸的摩擦角最大,为 47.52°,两者相差 18.37°。

3.3 讨论与分析

采用 Carr 指数流动特性法主要用于判断粉体或细粒物料的流动性,本研究的颗粒状秸秆属于粗粒物料,通过 Carr 指数法得分判定颗粒状秸秆的流动特性,大致反映了流动性的变化规律,得分越高,流动性越好,如玉米芯得分最高,花生壳、葵花秆和玉米秸次之,豆秸、棉秸、麦秸、芝麻秆得分较低,该结果与采用内摩擦角评价原料的流动特性基本保持一致。根据 Carr 指数评价法,并参考内摩擦角试验结果,8 种颗粒状秸秆分为以下 3 类:易于流动:玉米芯、花生壳、葵花秆;一般流动:玉米秸秆;不易流动:豆秸、棉秸、麦秸、芝麻秆。各种颗粒状秸秆物料综合评价如表 3 所示。

表 3 各种颗粒状秸秆物料综合评价

Tab.3 Comprehensive evaluation of different biomass particle straw

流动性 能评价	Carr 指数得 分范围	包含秸秆品种	主要特征	输送注意事项
易于流动	>70	玉米芯、花生壳、葵 花秆	静堆积角和压缩率最小,属于易流动 物料,难以输送	输送时要考虑输送带的表面摩擦力,输送带的角度 尽量不要高于 30°
一般流动	60~69	玉米秸	静堆积角和压缩率较小,物料流动性 一般,比较容易输送	输送时要考虑输送带的角度,尽量不要高于 40°;如 输送角度过高,要增加输送带的表面摩擦力
不易流动	<60	豆秸、棉秸、麦秸、芝 麻秆	静堆积角和压缩率大,属于难流动物 料,易于输送	一般情况下能够适应于各种输送装置

因此在生物质固体成型燃料加工过程中,要充分考虑物料的输送带、提升机等表面摩擦、角度的选择。如对于易流动的秸秆,要注意增加输送带的表面摩擦力,尤其是输送带的角度尽量不要高于 30°(玉米芯的内摩擦角为 29.15°),否则导致物料打滑,难以输送。

4 结论

(1) 通过分析颗粒状秸秆静堆积角、压缩率、抹刀角和均匀度等 4 个指标,采用 Carr 流动性指数法建立了颗粒状秸秆流动特性评价方法,并对 8 种颗

粒状秸秆进行试验,同时采用测试内摩擦角来验证该评价方法。

(2) 试验结果表明,通过 Carr 指数法得分判定颗粒状秸秆的流动特性,反映了秸秆流动性的变化规律,得分越高,流动性越好;8 种颗粒状秸秆分为易于流动(如玉米芯)、一般流动(如玉米秸秆)、不易流动(如豆秸)3 类,该结果与采用内摩擦角评价原料的流动特性基本一致。

(3) 建议针对不同的作物秸秆,要充分考虑物料的输送带、提升机等表面摩擦、角度的选择。

参 考 文 献

- 1 田宜水,孟海波,孙丽英,等. 秸秆能源化技术与工程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- 2 田宜水,赵立欣,孟海波,等. 农业生物质能资源分析与评价技术[J]. 中国工程科学,2011,13(2):8~10.
Tian Yishui, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Analysis and evaluation on agricultural biomass resources [J]. Engineering Sciences, 2011,13(2):8~10. (in Chinese)
- 3 何元斌,生物质压缩成型燃料及成型技术[J]. 农村能源,1995(5):12~14.
He Yuanbin. Biomass pellet fuel and briquettes technology [J]. Rural Energy, 1995(5):12~14. (in Chinese)
- 4 欧阳双平,侯书林,赵立欣,等. 生物质固体成型燃料环模成型技术研究进展[J]. 可再生能源,2011,29(1):14~18.
Ouyang Shuangping, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of annular ring technology for desified biofuel [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(1):14~18. (in Chinese)
- 5 盛奎川,吴杰. 生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(2):242~245.
Sheng Kuichuan, Wu Jie. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):242~245. (in Chinese)
- 6 田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):124~128,145.
Tian Yishui, Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):124~128,145. (in Chinese)
- 7 姚宗路,赵立欣,Ronnback M,等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):97~102.
Yao Zonglu, Zhao Lixin, Ronnback M, et al. Comparison on effect of characterization of biomass pellet fuels on combustion behavior [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):97~102. (in Chinese)
- 8 张桂花,汤楚宙,熊远福,等. 包衣稻种物理特性的测量及其应用[J]. 湖南农业大学:自然科学版,2004,30(1):68~70.
Zhang Guihua, Tang Chuzhou, Xiong Yuanfu, et al. Measurement and application of the capsule seed physical characteristics [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2004, 30(1):68~70. (in Chinese)
- 9 郭胜,赵淑红,杨悦乾,等. 除芒稻种摩擦特性测量[J]. 东北农业大学学报,2010,41(7):118~121.
Guo Sheng, Zhao Shuhong, Yang Yueqian, et al. Material characteristics determination of paddy kernal deawned [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(7):118~121. (in Chinese)
- 10 Sjaak Van Loo, Jaap Koppejan. Handbook of biomass combustion and co-firing [M]. Enschede: Twente University Press, 2002.
- 11 张善荣. 散料输送与贮运[M]. 北京:化学工业出版社,1994.
- 12 Carr R L. Evaluating flow properties of solids [J]. Chem. Eng., 1965,72(2):163~168.
- 13 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特性中的应用[J]. 中国粉体技术,2000,10(5):33~36.
Zhang Peng. Application of Carr index method in comprehensive evaluating properties of coal powder [J]. China Powder Science and Technology, 2000,10(5):33~36. (in Chinese)
- 14 Aziz Z B, Klinzing G E. Plug flow transport of cohesive coal:Horizontal and inclined flows [J]. Powder Technology, 1988, 55(2):97~105.
- 15 谢晓旭. 煤粉流动特性试验研究[D]. 南京:东南大学,2007.