

大豆与仓壁材料摩擦系数的研究

冯家畅,程绪铎,严晓婕

(南京财经大学 食品科学与工程学院/粮食储运国家工程实验室,江苏 南京 210046)

摘要:利用直剪仪测定了在不同法向压应力(25,50,75,100 kPa)条件下大豆(含水率分别为10.62%、12.32%、13.84%、15.23%、17.02%)与不同仓壁材料(不锈钢板、混凝土板、木板)的摩擦系数。结果表明:大豆与不锈钢板的摩擦系数最小,与木板的摩擦系数较大,与混凝土板的摩擦系数最大,摩擦系数范围分别是0.317~0.420,0.323~0.453,0.357~0.533;在含水率一定的条件下大豆与仓壁材料的摩擦系数随着法向压应力的增大而减小,法向压应力一定的条件下大豆与仓壁材料的摩擦系数随着含水率的增大而增大。最后,分别拟合了摩擦系数与法向压应力和大豆含水率的一元二次关系方程。

关键词:大豆;含水率;摩擦系数;法向压应力

中图分类号:TS210.4

文献标识码:A

DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2014.05.0787

Research on the Coefficient of Friction between Soybean and Silo Wall Material

FENG Jia-chang, CHENG Xu-duo, YAN Xiao-jie

(College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics/National Engineering Laboratory for Grains Storage and Transportation, Nanjing 210046, China)

Abstract: In this article, the coefficient of friction between soybeans and silo wall materials were measured by direct shear apparatus. The results showed that as the moisture contents increased from 10.62% to 17.02%, the coefficient of friction between soybean and materials which were stainless steel, concrete and board ranged from 0.317 to 0.420, 0.357 to 0.533 and 0.323 to 0.453, respectively. The coefficient of friction between soybean and stainless steel was the smallest, the coefficient of friction between soybean and concrete was the biggest. Coefficients of friction decreased with the increasing of normal stress and increasing with the increase of moisture content. Finally, the relationship between the coefficient of friction and moisture content, the coefficient of friction and the normal stress were fitted as functions, respectively.

Key words: Soybean; Moisture content; Coefficient of friction; Normal stress

大豆是我国重要的粮食作物和油料作物。大豆摩擦包括外摩擦和内摩擦,外摩擦指的是大豆与仓壁材料之间的摩擦,其特性是通过摩擦系数来表示,内摩擦指的是大豆籽粒之间的摩擦,其特性则是用静止角和摩擦角来衡量^[1]。大豆摩擦特性对于粮仓的结构设计、粮食运输装卸设备设计以及粮食加工设备设计都至关重要。

关于粮食摩擦特性的研究开始于19世纪末。Dutta等^[2]通过研究发现摩擦系数的大小与接触的材料有关,根据对几种材料的试验,发现镀锌钢板的摩擦系数最小,而胶合板的摩擦系数最大。Edward等^[3]研究了班巴拉花生的摩擦系数,在含水率为5%~35%时,班巴拉花生与铝的摩擦系数的范围为0.25~0.49,胶合板的范围为0.39~0.66,镀锌铁的范围为0.29~0.58。张桂花^[4]使用剪切仪测定了包衣稻谷的内摩擦角,与普通稻谷相比,包衣稻谷的内摩擦角较小。Sacilik等^[5]研究了大麻籽粒与不同材料接触面的静摩擦系数和动摩擦系数,结果表明摩擦系数随含水率的增加而增加,

大麻籽粒与镀锌铁的摩擦系数最小,其次是胶合板,最大的是橡胶板。Karimi等^[6]通过研究3种不同品种小麦与压缩塑料、镀锌铁、胶合板的摩擦系数,发现其大小均与含水率呈线性正相关,摩擦系数的范围分别是0.43~0.53、0.33~0.53和0.35~0.41。

国内外对摩擦特性研究较多的主要是小麦和稻谷,对大豆的摩擦特性研究相对匮乏。本研究旨在测定大豆与不同仓壁材料(不锈钢板、混凝土板、木板)的摩擦系数,并着重分析法向压应力、含水率对摩擦系数的影响,以期为粮仓为大豆的水平与竖直应力分布和粮仓设计、机构加工提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 材料

选用的大豆产自黑龙江省(2013年),其粒径长分别为:大直径7.74 mm,中直径7.39 mm,小直径

收稿日期:2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金(31371865);公益性行业(粮食)科研专项(201313001)。

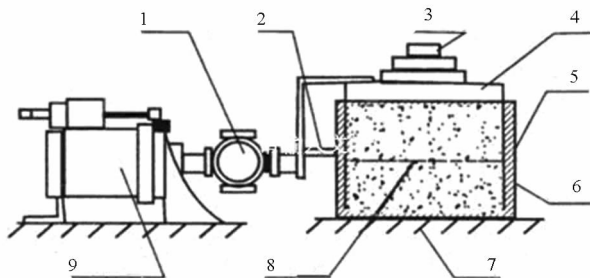
第一作者简介:冯家畅(1992-),男,硕士,主要从事农产品加工及贮藏研究。E-mail:fjc2012@126.com。

通讯作者:程绪铎(1957-),男,教授,硕导,主要从事农产品加工及贮藏研究。E-mail:chengxuduo@hotmail.com。

6.97 mm(随机取样 40 粒所得平均值)。选取不锈钢板、混凝土板和木板作为试验材料,其表面粗糙度分别为 0.60,0.75 和 0.70 μm 。

1.2 仪器

TZY-1 直剪仪(南京土壤仪器厂有限公司,图 1)、PQX 型多段可编程人工气候箱(宁波东南仪器有限公司)、HG202-2(2A/2AD)电热干燥箱(南京盈鑫试验仪器有限公司)、JSFD-粉碎机(上海嘉定粮油有限公司)。



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

1: Dynamometer; 2: Loaded bar; 3: Compaction load; 4: Head cover; 5: Shear ring; 6: Base; 7: Backplane; 8: Shear plane; 9: Loading device.

图 1 直剪仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of direct shear apparatus

1.3 试验原理

依据 Coulomb 理论,采用直剪仪测定大豆与不同材料的摩擦系数。先在下试样盒中填充所需的仓壁材料(不锈钢板、混凝土板、木板),然后将大豆填充上试样盒,在上试验盒顶部施加一定的垂直压应力 σ ,在下试验盒施加水平推应力 τ ,使大豆与仓壁材料接触面发生剪切直至破坏^[7]。水平推应力与垂直压应力的比值就是摩擦系数 μ ,即 $\mu = \tau/\sigma$ 。

1.4 试验方法

1.4.1 样品的准备 原始样品首先进行除杂,接着通过 105℃ 烘干法^[8]测定其含水率为 12.32%,然后调制其他含水率(13.84%、15.23%、17.02%)的样品,大豆样品的含水率调节方法为:取一份大豆烘干,测定其含水率为 10.62%,根据公式(1)计算出调节到目标含水率所需要增加的蒸馏水的质量,然后将加过水的大豆放进密封袋中置于 15℃ 的人工气候箱里 5 d,并每天翻转密封袋 1 次,使水分均匀。样品需在室温条件下平衡 2 h 后进行试验。

$$Q = \frac{W_i(M_f - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (1)$$

其中:Q-所需要添加蒸馏水的质量(kg); W_i -大豆样品的质量(kg); M_i -调制前大豆样品含水率(%); M_f -调制后大豆样品含水率(%);

1.4.2 荷载大小的选择 根据大豆本身的特点以及直剪仪使用的资料,预算粮仓内大豆竖直压应力和水平压应力普遍使用如下的 Janssen 方程:

$$p_v = (\rho g z / k \mu) (1 - e^{-k \mu z / R}) \quad (2)$$

$$p_h = k p_v = (\rho g z / \mu) (1 - e^{-k \mu z / R}) \quad (3)$$

$$k = p_h / p_v = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \quad (4)$$

式中: ρ -大豆堆的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g -重力加速度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); z -大豆堆的高度(m); μ -仓壁与大豆间的摩擦系数; R -粮仓水力半径(m); p_v -大豆堆竖直压应力(kPa); p_h -大豆堆水平压应力(kPa); φ -大豆堆的内摩擦角($^\circ$); k -大豆堆侧压应力与竖直压应力的比值。

使用 Janssen 方程估算出 15 m 深处大豆堆的最大竖直压应力约为 100 kPa,所以本试验施加的法向载荷分别是:25,50,75,100 kPa。

1.4.3 试验设计 剪切盒的横向和纵向的尺寸对颗粒滑动、滚动有同样的影响,一般的,剪切盒净空最小尺寸/大豆最大颗粒粒径必须大于 10,大豆的最大颗粒粒径为 5~9 mm,所以选择剪切盒净空尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm。由于剪切速率与剪切强度紧密相关。对于粘性物体,剪切强度随剪切速率的增加而增加;对于非粘性的散粒体,剪切速率过大,可能产生籽粒间的冲击与碰撞。大豆属于非粘性散粒体,为了模拟大豆在粮仓中的真实状态,所选的剪切速率应该越小越好,所以剪切速率选择为 1.33 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[9]。

1)在法向压应力为 50 kPa、含水率为 15.23%的条件下,测定大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数,3 次重复,考察仓壁材料对摩擦系数的影响;

2)在含水率为 15.23%的条件下,测定法向压应力为 25,50,75,100 kPa 时,大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数,3 次重复,考察法向压应力对摩擦系数的影响;

3)施加的法向压应力为 50 kPa 条件下,对含水率分别为 10.62%、12.32%、13.84%、15.23%、17.02%的大豆进行剪切试验,测定大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数,3 次重复,考察大豆含水率对摩擦系数的影响。

1.5 数据分析

采用 Excel 2013 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 仓壁材料对大豆摩擦系数的影响

由图 2 可以看出,在含水率为 15.23%的条件下,大豆与不锈钢板、混凝土板和木板的摩擦系数分别是 0.400,0.453 和 0.427。由于不锈钢比较光滑,大豆与不锈钢板的摩擦系数小于混凝土板和木板。

2.2 法向压应力对大豆摩擦系数的影响

由图 3 可知,在含水率为 15.23%、法向压应力为 25~100 kPa 条件下,大豆与不锈钢板、混凝土板

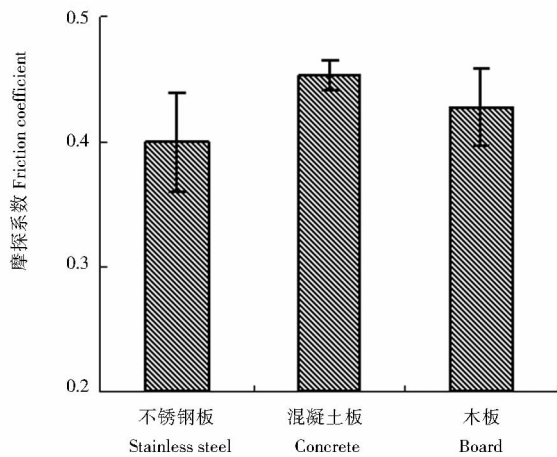


图2 大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数
Fig.2 Friction coefficient of soybean against stainless steel, concrete and board

和木板的摩擦系数变化范围是 0.317 ~ 0.413, 0.357 ~ 0.533, 0.323 ~ 0.453, 摩擦系数均随法向压应力的增加而减小。原因是随着法向压应力的增加,大豆与板之间的真实接触面积增长速度低于法向应力的增长速度。

根据结果可拟合出一元二次曲线:不锈钢板: $y = 3 \times 10^{-6}x^2 - 0.0018x + 0.4633$, $R^2 = 0.8834$;混凝土板: $y = 1.5 \times 10^{-5}x^2 - 0.0042x + 0.6235$, $R^2 = 0.9992$;木板: $y = -1.3 \times 10^{-6}x^2 - 0.0017x + 0.5008$, $R^2 = 0.9636$,其中 x 为法向压应力(kPa), $x \in [25, 100]$; y 为摩擦系数。

2.3 含水率对大豆摩擦系数的影响

由图4可知,在法向压应力为 50 kPa 时,不同含水率的大豆(10.62%、12.32%、13.84%、15.23%、17.02%)与不锈钢板、混凝土板、木板的

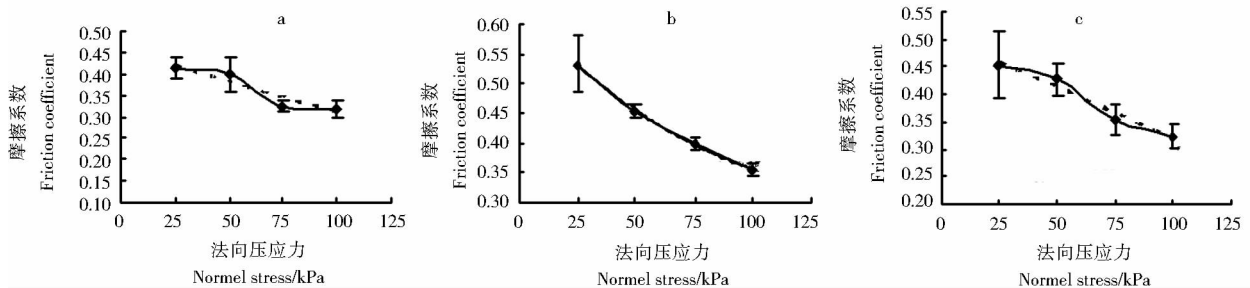


图3 法向压应力对大豆与不锈钢板(a)、混凝土板(b)、木板(c)的摩擦系数的影响曲线(含水率 15.23%)
Fig.3 Relationship between normal stress and friction coefficient of soybean against stainless steel(a), concrete(b) and board(c, Moisture content is 15.23%)

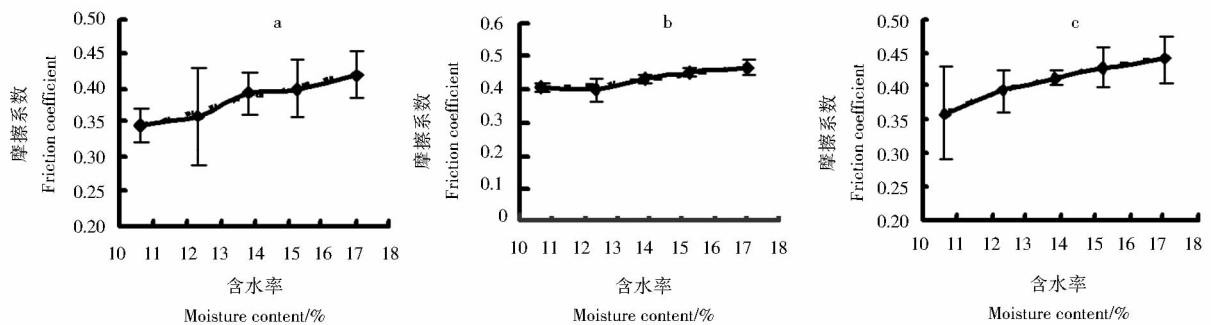


图4 含水率对大豆与不锈钢板(a)、混凝土板(b)和木板(c)的摩擦系数的影响曲线(法向压应力 50 kPa)
Fig.4 Relationship between moisture content and friction coefficient of soybean against stainless steel(a), concrete(b) and board(c, Normal stress is 50 kPa)

摩擦系数变化范围是 0.347 ~ 0.420, 0.407 ~ 0.467, 0.360 ~ 0.440, 摩擦系数均随大豆含水率的增大而增大。这一方面可能是含水率增大,大豆颗粒塑性增加,受载后变形较大,大豆籽粒与材料表面真实接触面积增大;另一方面,当含水率增大,大豆与板之间的粘附作用也增大,使得切向剪切力增大,摩擦系数增大。

根据试验结果拟合出一元二次曲线:不锈钢板: $y = -0.0003x^2 + 0.0203x + 0.1634$, $R^2 = 0.9689$;混凝土板: $y = 0.0008x^2 - 0.0104x + 0.4251$, $R^2 = 0.9044$;木板: $y = -0.0013x^2 +$

$0.0474x + 0.0003$, $R^2 = 0.9992$;其中 x 为含水率(%), $x \in [10.62 \sim 17.02]$; y 为摩擦系数。

3 结 论

在相同含水率和法向压应力条件下,大豆与混凝土板摩擦系数最大,与木板的摩擦系数次之,与不锈钢板的摩擦系数最小。在法向压应力 25 ~ 100 kPa,含水率(10.63% ~ 17.02%)条件下,大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数的范围分

(下转第 794 页)

各叶片区域统计功能,实现了各预定位置叶片区域的独立统计,为后续幼苗生长发育预测提供了准确的数据基础,达到预期要完成的工作。该算法的优点在统计小连通区域的同时,也得到了每个连通区域的面积即像素点数,能够一次完成各叶片区域的统计和区域数量的累积。

本研究不完善之处是当幼苗发育成长至叶片粘连较多时,会导致误统计,造成最后幼苗发育监测计算的不准确,在未来的研究中可以尝试采用监视镜头位置调整或人工干预等方法进行改善,以提高连通区域统计的准确率。

3 结 论

本研究利用图像处理技术对自动测量幼苗叶片生长发育状况的可行性进行了研究,并对系统中各步骤的关键算法进行了实现。结果表明本文所采用的方法能够较好地检测到幼苗叶片区域,准确地进行叶片区域像素点数量统计,为幼苗生长状况提供了有效数据。本研究为农业科研人员提供了一种新的自动化监测作物幼苗生长势的方法,促进了利用信息化手段推进现代农业建设的进程,是农业现代化研究中自动化测量技术的又一新的探索和尝试。

(上接第 789 页)

别为 0.317~0.420,0.357~0.533,0.323~0.453。在相同含水率的条件下,法向压应力增大,大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数减小。在相同法向压应力条件下,含水率增大,大豆与不锈钢板、混凝土板、木板的摩擦系数增大。

参考文献

- [1] 程绪铎,陆琳琳.大豆内摩擦角的测定与实验研究[J].粮食储藏,2010(5):12-15. (Cheng X D, Lu L L. Measurement and experiment on internal friction angle of soybean[J]. Grain Storage, 2010(5):12-15.)
- [2] Dutta S K, Nema V K, Bhardwaj R K. Physical properties of grains [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1988, 39: 259-268.
- [3] Edward A. Physical properties of bambara groundnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47: 321-326.
- [4] 张桂花,汤楚宙,熊远福,等.包衣稻种物理特性的测定及其应用[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(1):68-70.

参考文献

- [1] Kacira M, Ling P P. Design and development of an auto-mated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(4): 989-996.
- [2] 李长缨.利用计算机视觉技术实现对温室植物生长的无损监测[J].农业工程学报,2003,19(3):140-143. (Li C Y. Realization of greenhouse plant growth nondestructive monitoring [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 140-143.)
- [3] 闫磊,刘芷宁.一种粘连谷物图像分割及杂质识别算法开发[J].吉林农业科学,2012,37(4):72-76. (Yan L, Liu Z N. An adhesion grain image segmentation and impurity recognition algorithm development [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2012, 37(4): 72-76.)
- [4] 朱威,韩巨峰.基于噪声点多级检测的自适应中值滤波算法[J].光电工程,2013,40(10):63-69. (Zhu W, Han J F. Multi-stage detection of noise points based on adaptive median filter algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(10): 63-69.)
- [5] 陈柏生.一种二值图像连通区域标记的新方法[J].计算机工程与应用,2006,42(25):50-51. (Chen B S. A new method of binary image connected region marking [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(25): 50-51.)
- [6] 王丹民,孙庆文.棒材自动计数系统的开发[J].制造业自动化,2011,33(7):69-72. (Wang D M, Sun Q W. Development of automatic counting system of steel [J]. Manufacture Automation, 2011, 33(7): 69-72.)

(Zhang G H, Tang C Z, Xiong Y F, et al. Determination and application of physical properties of coated rice seed [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2004, 30(1): 68-70.)

- [5] Sacilik K, Ozturk Q, Keskin R. Some physical properties of hemp seed [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2): 191-198.
- [6] Karimi M, Kheiralipour K, Tabatabaefar A, et al. The effect of moisture content on physical properties of wheat [J]. Journal of Nutrition, 2009, 8(1): 90-95.
- [7] 许启铿,王录民.测定粮食内摩擦角的直剪仪研制[J].山西建筑,2007,33(14):81-82. (Xu Q Q, Wang L M. A direct shear apparatus development for grain internal friction angle measurement [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(14): 81-82.)
- [8] Suthar S H, Das S K. Some physical properties of karingda [Citrus canatus (thumb) mans] seeds [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 65(1): 15-22.
- [9] 安蓉蓉,曹阳,程绪铎,等.稻谷内摩擦角的测定与实验研究[J].粮食储藏,2009,38(3):31-33. (An R R, Cao Y, Cheng X D, et al. Measurement and experiment study internal friction angle of paddy [J]. Grain Storage, 2009, 38(3): 31-33.)