

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.003

玉米颗粒堆积特性的离散元法模拟研究

陈国强¹, 闫俊霞^{1,2,3}, 张连仁³

- (1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品制造装备重点实验室, 江苏 无锡 214122;
3. 无锡气动技术研究有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:为探究玉米颗粒形状与颗粒湿度(颗粒中水的质量分数为14.23%)对颗粒堆积形态的影响,课题组利用离散元法(discrete element method, DEM)对玉米颗粒进行了颗粒堆积模拟。采用3种不同的颗粒模型(球形、楔形和3D扫描),设置2种不同干燥度的颗粒物料群来模拟颗粒堆积。结果表明:在颗粒干燥的情况下,球形颗粒的堆积角最小,楔形颗粒与3D扫描颗粒的堆积角差别较小;颗粒在一定湿度情况下,楔形颗粒的堆积角最大,其次是球形颗粒和3D扫描颗粒。颗粒形状对颗粒堆积形态的影响要小于颗粒湿度对颗粒堆积形态的影响。

关键词:颗粒堆积;颗粒模型;湿颗粒;离散元法

中图分类号:O347.7;TH237

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)06-0011-04

Discrete Element Method Simulation of Corn Grain Stacking Characteristics

CHEN Guoqiang¹, YAN Junxia^{1,2,3}, ZHANG Lianren³

- (1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
3. Pneumatic Technical Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: To explore the influence of corn grain shape and particle humidity (with the moisture content of 14.23%) on particle packing morphology, the DEM-Discrete Element Method was used to simulate the corn grain stacking. Three different particle models (spherical, wedge and 3D scanning) were used to simulate particle packing by setting two kinds of granular material groups with different dryness. The results show that when the particles are dry, the pile angle of the spherical particles is the smallest, and the difference between the wedge-shaped particles and the 3D scanning particles is small; under certain humidity, the pile angle of the wedge-shaped particles is the largest, followed by the spherical particles and the 3D scanning particles; The effect of particle shape on particle packing morphology is less than that of particle humidity on particle packing morphology.

Keywords: particle packing; particle model; wet particle; DEM (discrete element method)

在现实生活中,颗粒系统一般以堆积的形式存在^[1]。颗粒堆积虽然是一种较为简单的颗粒系统静力学现象,但仍吸引着大批学者去探究颗粒堆中的一些规律^[2-3]。研究颗粒堆积现象对颗粒系统的其它研究方向也具有一定的科学意义和工程价值。

颗粒物料群在筛面上的运动筛分一般分为4个过程:静止、松散、分层和透筛。在颗粒入料后,以一定的

速度到达筛面并与筛面接触后,处于短暂的静止状态,并易形成颗粒物料的堆积。由此可知,颗粒物料群在筛分时,颗粒在筛面上的堆积状态对筛分进程具有很大影响,故课题组对不同形状的颗粒在干湿2种状态下形成的堆积状态进行了研究。通过分析得出不同颗粒形状对颗粒堆积状态的影响,以及相同形状的颗粒在不同湿度时对颗粒堆积状态的影响。

收稿日期:2020-03-13;修回日期:2020-05-15

基金项目:国家自然科学基金(51505188);江苏省食品制造装备重点实验室开放基金(FM-201909)。

第一作者简介:陈国强(1993),男,江苏徐州人,硕士,主要研究方向为振动筛分。通信作者:闫俊霞(1984),女,山西大同人,副教授,主要研究方向为机械动力学、颗粒系统。E-mail:yjx@jiangnan.edu.cn

赵啦啦等^[4]在研究中指出颗粒的形状对颗粒堆积具有一定的影响,但湿颗粒之间的液桥力对颗粒堆积的影响要大于颗粒形状对颗粒堆积的影响;杨福绅等^[5]指出颗粒间作用力受到颗粒形状、颗粒材料特性等的影响;王蕴嘉等^[6]研究了颗粒大小对颗粒堆积过程中颗粒之间间隙的影响;王立军等^[7]探究了不同颗粒形状的玉米颗粒对滚动摩擦因数和颗粒堆基底接触力的影响;刘源等^[8]研究了颗粒间摩擦因数对颗粒堆积底部接触分布力的影响;Carlevaro 等^[9]研究了颗粒堆积过程中颗粒之间的力链形成以及成拱机理;Gan 等^[10]也在研究中指出颗粒长径比对圆柱填料结构的影响。

上述研究者对颗粒之间的作用力以及颗粒堆积特性进行了研究,虽然考虑了颗粒形状的影响,但颗粒形状多采用简化模型。因此,课题组借助 3D 扫描技术来获得颗粒的真实轮廓,利用软件 EDEM 的 API 功能来实现颗粒模型的自动填充,使模拟仿真的颗粒形状更接近真实的玉米颗粒形状,从而获得更加接近实际工况的模拟仿真数据。

1 颗粒模型

如图 1 所示,课题组把德美亚一号玉米颗粒简化为 3 种颗粒模型:球形颗粒、楔形颗粒和 3D 扫描形颗粒。将 3 种类型的颗粒进行颗粒堆积的模拟仿真。

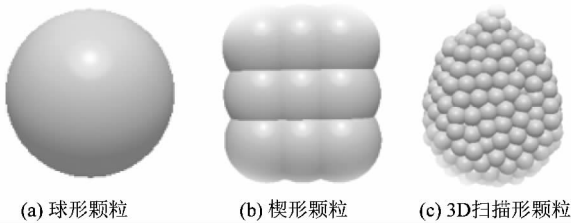


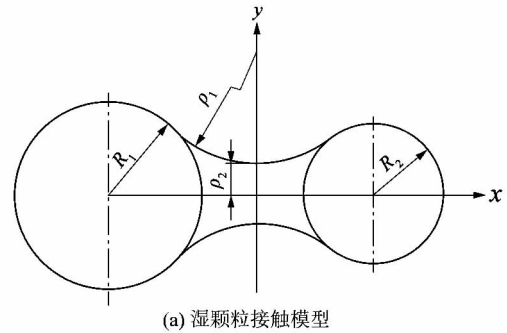
图 1 3 种颗粒模型

Figure 1 Three particle models

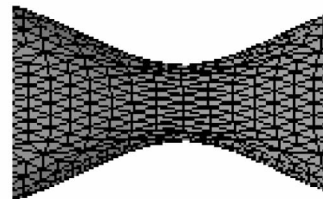
2 颗粒间接触模型

考虑模拟湿颗粒接触碰撞时,颗粒之间会发生团聚现象,故课题组采用适用于农作物含湿物料的 JKR Cohesion (Hertz-Mindlin with JKR) 接触模型。考虑到模拟对象为直径 10 mm 的宏观颗粒系统,颗粒间的液桥力大于颗粒间的范德华力,而静电力一般在干燥的微观颗粒系统里有显著作用,因此课题组在采用 JKR 接触模型时,范德华力和静电力均可忽略不计,使玉米湿颗粒发生黏结团聚的力以液桥力为主。湿颗粒在相互接触时会因为其外在水分而形成液桥力,课题组以静态时 2 球型颗粒的接触为研究对象,静态液桥力由

表面张力 F_s 和静水压 F_p 组成^[11]。在此我们忽略液桥自身重力对静态液桥力的影响,那么静态液桥力就会满足 Laplace 方程。如图 2 所示,2 个湿球颗粒之间形成了液桥。



(a) 湿颗粒接触模型



(b) Surface evolver 接触模型

图 2 湿颗粒的液桥力

Figure 2 Liquid bridge force of wet particles

液桥毛细管压力为

$$P = \left[\frac{y''}{(1+y')^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{y(1+y')^{\frac{1}{2}}} \right] \sigma. \quad (1)$$

式中: P 为液桥毛细管压力, N; y 为坐标系中 y 轴上的值, mm; σ 为液体表面张力, N/m。

根据式(1)难以得到解析解,因此对静态液桥力的计算采用环形近似法来求解,其公式如下:

$$\begin{cases} F_s = 2\pi\rho_2\sigma; \\ F_p = P\pi\rho_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

$$F_p = P\pi\rho_2^2. \quad (3)$$

可得静态液桥力:

$$F = \pi\sigma\rho_2 \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1}. \quad (4)$$

式中: F_s 为表面张力, N; F_p 为静压力, N; ρ_1, ρ_2 分别为液桥的最大和最小曲率半径。

3 数值模拟设定及分析

3.1 参数标定

文中采用的颗粒模型为德美亚一号玉米颗粒,料斗高度为 200 mm,其入口与出口处的半径分别为 100 和 30 mm,出料口处距离底面方盘为 200 mm,设置生成颗粒总数为 2 000 个,颗粒物理参数^[12]如表 1~2 所示,仿真模型如图 3 所示。

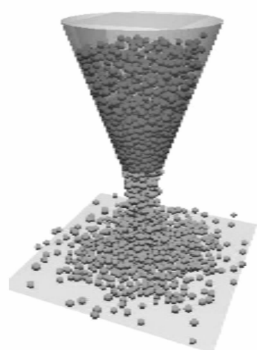


图3 仿真模型

Figure 3 Simulation model

表1 材料特性

Table 1 Material properties

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)
玉米颗粒	0.40	0.137	1 154
盒体(镀锌钢)	0.28	81.000	7 850

表2 接触属性参数

Table 2 Contact property parameters

接触属性	静摩擦因数	碰撞恢复系数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.342	0.284	0.045 4
颗粒-盒体	0.467	0.615	0.031 7

由图3可以看出,颗粒在料斗内下落的过程中与料斗内壁发生碰撞,从而使得颗粒在出料口处聚集且形成颗粒流而流出料斗。当颗粒到达底面时,颗粒与底面发生碰撞并且产生能量损耗,多次碰撞后颗粒会停留在底面上;后面到达底面的颗粒会与底面原有的颗粒发生碰撞且消耗能量,颗粒与颗粒之间不断地发生碰撞,位于颗粒堆边缘的颗粒,会在颗粒相互碰撞的过程中散落在颗粒堆的基底周围;当颗粒之间的碰撞力较小时,颗粒可能会在摩擦力的作用下由颗粒堆的上部滚到颗粒堆的下部,如果颗粒之间的碰撞较大时,颗粒可能会散落到颗粒堆的周围,并不参与颗粒堆的形成。最终颗粒物料群发生多次碰撞后均会停留在底面或者其它颗粒上部,从而形成颗粒堆积,颗粒堆与底面的夹角即为颗粒堆积角。

3.2 颗粒形状和颗粒湿度对颗粒堆积的影响

如图4所示,图4(a)、4(b)是球形颗粒在不同颗粒湿度情况下的颗粒堆积;图4(c)、4(d)是楔形颗粒在不同颗粒湿度情况下的颗粒堆积;图4(e)、4(f)是3D扫描颗粒在不同颗粒湿度情况下的颗粒堆积。从图4无法清楚地辨别各个堆积角的差别,为了更加准确地分析颗粒形状和颗粒湿度对颗粒堆积形态的影

响,故借助软件 EDEM 的后处理模块做出图5所示的折线图。

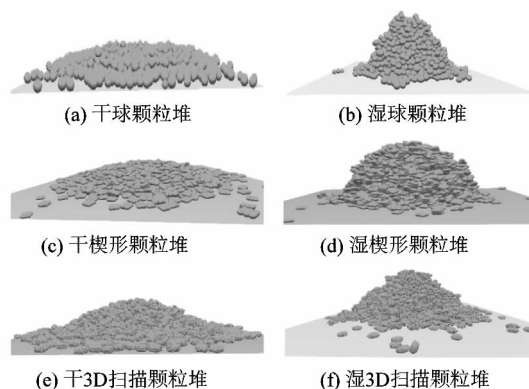


图4 不同颗粒系统形成的颗粒堆

Figure 4 Particle pile formed by different particle systems

由图5可知,对于干燥的颗粒,球形颗粒堆积角为 5.5° ,楔形颗粒的堆积角与3D扫描颗粒的堆积角相差不大,分别为 17.43° 和 19.08° ,3者中球形颗粒堆积角最小。当颗粒处于一定湿度状态时,3D扫描颗粒堆积角为 43.92° ,楔形颗粒的堆积角与球形颗粒的堆积角分别为 48.41° 和 44.44° ,均比3D扫描颗粒堆积角大,但3者之间的差别不大。

当颗粒处于干燥状态时,颗粒从料斗出料口处下落,球形颗粒在开始形成堆积时运动简单,而非球形颗粒运动相对复杂,但是球形颗粒在形成颗粒堆积的过程中,球形颗粒的空隙填充率较高,颗粒的自锁性差,且在运动时各向同性,对颗粒堆的形态影响较小;而对于非球形颗粒在形成颗粒堆的过程中,颗粒具有良好的自锁性,颗粒转动困难,对颗粒堆的形态影响也较大。当颗粒具有一定湿度时,相互接触的颗粒之间会存在液桥力,液桥力的存在会使颗粒下落过程中容易形成颗粒堆积的形态,也会增加颗粒堆形态的稳定性,从图5可知,3种模型的湿颗粒堆积角均大于干燥状态下的颗粒堆积角。

综上可知,颗粒形状以及颗粒之间的湿度对颗粒物料群的堆积角均有影响,但是颗粒物料群的湿度对堆积角的影响大于颗粒形状对堆积角的影响。因为湿颗粒之间会产生液桥力,使得颗粒物料群的堆积角急剧增加。

如图6所示,为了方便观察颗粒之间形成的力链,在软件 EDEM 后处理模块中隐藏了颗粒模型,图中只显示了颗粒之间形成的力链。从上文可知楔形颗粒的堆积角、球形颗粒的堆积角和3D扫描颗粒的堆积角是

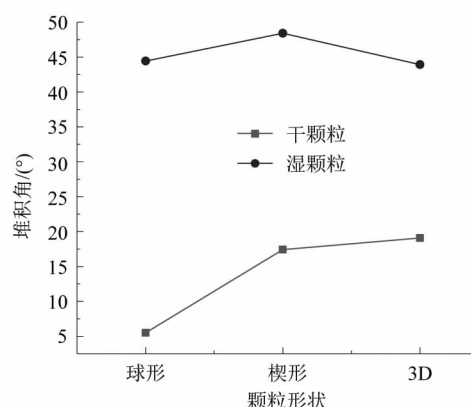


图5 3种不同颗粒模型在干湿两种状态下的堆积角

Figure 5 Pile angles of three different particle models under dry and wet states

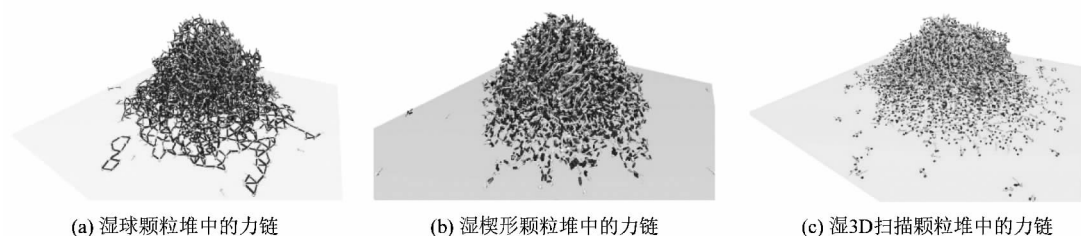


图6 颗粒堆中颗粒接触矢量图

Figure 6 Particle contact vector diagram in particle pile

4 结语

课题组利用离散元法研究了不同形状的颗粒模型在干湿2种状态下对颗粒堆积的影响,可以得出以下结论:

1) 相同形状的颗粒模型在不同的湿度状态下具有不同的堆积形态;颗粒在干燥状态下,楔形颗粒与3D扫描颗粒的堆积角相差不多,而球形颗粒的堆积角就相对较小;颗粒在一定湿度下,楔形颗粒的堆积角、球形颗粒的堆积角和3D扫描颗粒的堆积角是依次递减。

2) 大多数学者多用简化模型进行颗粒堆积的模拟研究,但简化模型与真实颗粒形状之间存在一定误差,本研究的3D扫描模型与真实颗粒形状相近,在模拟中填充而成的3D颗粒模型影响模拟的进度,需要更好的模型构建方法来提高模拟精度与效率。

3) 研究不同形状颗粒模型和不同湿度颗粒模型对颗粒堆积形态的影响,可以为筛分技术和筛分设备的研究提供一定的依据。

参考文献:

[1] LI Yuanyuan, XIA Wei, ZHOU Zhaoyao, et al. Simulation of random mixed packing of different density particles[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(2): 024601.

依次递减,由于3种颗粒模型的结构差别,楔形颗粒的表面较为平整,楔形颗粒在相互接触的时候,其接触面积相对于球形颗粒与3D扫描颗粒较大;而3D扫描模型是基于对真实颗粒的扫描得出的模型,颗粒表面凹凸不平,两端大小差距较大,使得3D扫描颗粒之间的接触面积较小,从而3D扫描颗粒之间形成的力链较短、较少;球形颗粒的接触即为典型的球接触方式。从图6可以看出球形颗粒与楔形颗粒堆中的接触力链较为密集,3D扫描颗粒之间形成的力链相对稀疏。从而可知,简化模型(球形、楔形)颗粒在湿颗粒堆积过程中更具有黏聚性,3D扫描颗粒模型更接近真实颗粒模型,而3D扫描颗粒在湿堆积过程中展现的黏聚性小于简化模型颗粒在湿颗粒堆积过程中的黏聚性。由此得出:颗粒模型的选择在模拟仿真过程中对结果有很大影响。

[2] WITTMER J P, CLAUDIN P, CATES M E, et al. An explanation for the central stress minimum in sand piles [J]. Nature, 1996, 382 (6589): 336-338.

[3] GENG J F, LONGHI E C, BEHRINGER R P, et al. Memory in two-dimensional heap experiments [J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2001, 64(6): 060301.

[4] 赵啦啦, 赵跃民, 刘初升. 湿颗粒堆力学特性的离散元法模拟研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(3): 1-9.

[5] 杨福绅. 液桥力对微细颗粒物堆积结构的影响研究 [C]//中国化工学会. 2015年中国化工学会年会论文集. 北京: 中国化工学会, 2015: 2027.

[6] 王蕴嘉, 宋二祥. 堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析 [J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2416-2426.

[7] 王立军, 赵惠君, 武振超, 等. 颗粒滚动摩擦系数对颗粒堆内部受力的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(3): 65-72.

[8] 刘源, 徐同桐, 赵宪锋. 粒间摩擦对含有点缺陷的二维颗粒堆积体底部力链的影响 [J]. 力学与实践, 2019(3): 308-313.

[9] CARLEVARO C M, PUGNALONI L A. Arches and contact forces in a granular pile [J]. European Physical Journal E, 2012, 35(6): 9721.

[10] GAN Jjieqing, YU Aibing. DEM simulation of the packing of cylindrical particles [J]. Granular Matter, 2020, 22(1): 22.

[11] 曹婷, 毛奕霖, 徐春晖. 湿颗粒离散元法静态液桥力计算公式的比较 [C]. 北京力学学会第19届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2013: 385-386.

[12] 周文秀. 玉米籽粒的物理力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 22-43.