

料仓中黄豆的流型仿真研究

陈小告¹ 伍剑宇²

(1 湘潭大学机械工程学院 湖南 湘潭 411105; 2 湘潭大学工程训练中心 湖南 湘潭 411105)

摘要: 实验测取了黄豆的含水量、表观密度、安息角以及弹性模量等物理参数,并对黄豆与黄豆、黄豆与有机玻璃之间的静摩擦系数、滚动摩擦系数和恢复系数等微观参数进行了测量。通过平面筒仓实验验证了黄豆的离散元微观作用模型的正确性。采用 Hertz-Mindlin 接触模型,分析了漏斗半角、摩擦系数、内摩擦角等对黄豆在料仓内流型的影响。结果表明:整体流系数(MFI)可作为衡量中心流、整体流以及混合流的依据,其模拟实验结果与 Jenike 料仓流型设计图一致。料仓获得整体流的比例随开口直径、内摩擦角的增大而增大;随漏斗半角、壁面摩擦系数的增大而减小。

关键词: 黄豆; 离散元; 恢复系数; 摩擦系数; 漏斗半角

1 黄豆物理力学特性实验

1.1 黄豆含水率的测定

常用的水分测量方法有很多,例如:烘箱干燥法、甲苯蒸馏法、溶剂提取法等。本实验利用烘箱干燥法在 105℃ 情况下对黄豆的含水率进行了实验。首先将黄豆用粉碎机打成粉末装入样品盒放入预热温度为 105℃ 的烘箱中进行 8h 烘干处理,待样品冷却后用精度为 0.0001g 的电子天平对其进行称重,记下读数;然后再烘 2h,冷却后称重。如此操作,直到二次测量误差小于 0.05g,则认为达到恒重。得到的实验结果,3 个试样黄豆的含水率的平均值为 11.16%。其计算公式为:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 —样品盒质量, g;

m_1 —样品盒和试样干燥前的质量, g;

m_2 —样品盒和试样干燥后的质量, g。

1.2 黄豆密度的测定

物质每单位体积内的质量称之为密度。采用排水法测取黄豆的密度,首先称取一定质量(本文选取 457g)的黄豆放在盛满一定容积水的量杯中,测量水面上升的高度,在保证黄豆不吸水的情况下迅速读出体积,并将其作为测量黄豆的体积。通过计算,得到黄豆的密度为 1299.8kg/m³。

1.3 动、静摩擦系数的测定

由能量守恒定律,黄豆在初始时刻的重力势能 U 应该等于黄豆在静止的条件下从斜面最高处滚到最低处时的动能 E_k 和摩擦力所做的功 W_f 之和。那么,滚动摩擦所造成的能量损失占总能量的比值为 C_f ,其计算公式为:

$$C_f = \frac{W_f}{U} = \frac{U - E_k}{U} \quad (2)$$

根据不同斜面倾角 θ 下的 C_f 与 $\cot \theta$ 的值,拟合出直线方程得到黄豆与黄豆的滚动摩擦系数为 0.00115,得到黄豆与有机玻璃间的滚动摩擦系数为 0.0017。

力与正压力的比值即为静摩擦系数,黄豆沿斜面开始下滑的瞬间斜面与水平面的夹角 θ 的正切值即为黄豆与斜面间的静摩擦系数,计算公式为:

$$f_s = \tan \theta = \frac{mg \sin \theta}{mg \cos \theta} \quad (3)$$

通过多次实验,取多次实验的平均值最终得到黄豆与有机玻璃间静摩擦系数值为 0.25,黄豆与黄豆的静摩擦系数值为 0.67。

1.4 恢复系数的测定

本实验通过单个颗粒的下落实验来测量颗粒与其它材料碰撞过程中的恢复系数,让颗粒从一固定高度 H 垂直落下,用高速摄像机记录该颗粒与另外一种材料碰撞后反弹的高度 H' 来测量黄豆与黄豆碰撞过程中的恢复系数,其计算公式为:

$$e = -\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{H'}{H}} \quad (4)$$

通过多次实验,选取最优的实验结果,实验结果取平均值。测得黄豆与黄豆的恢复系数值为 0.36;黄豆与有机玻璃间的恢复系数为 0.57。

1.5 黄豆弹性模量的测定

首先将黄豆平放在桌面上,其垂直投影即为所要测量的椭圆受力截面,用游标卡尺测量了黄豆的长轴 L (2a)、短轴 W (2b)、高 (H),因此可以算出黄豆的有效受力截面积,取值为椭圆面积的 0.75 倍,计算公式为:

$$A_{\text{有效}} = 0.75ab\pi \quad (5)$$

然后利用电子万能试验机,在保证应变 $\Delta L/L = 0.15$ 不变的情况下,对 50 颗黄豆进行了压缩试验,得到压缩载荷 F (N) 的大小,导出其弹性模量计算公式为:

$$E = (F/A) / (\Delta L/L) \quad (6)$$

得到 50 颗黄豆的弹性模量的平均值为 25.028MPa,平均绝对误差 (ΔE) 为 2.7MPa,平均相对误差 ($\Delta E/E$) 为 0.108MPa。

2 料仓物理模型建立

2.1 黄豆微观接触参数的 DEM 验证

通过对黄豆的物理力学特性参数实验,得到了黄豆在筒仓内 DEM 模型材料的微观参数。为了验证实验参数的准确性,对实验参数进行了校准。在平面有机玻璃筒仓内填满黄豆,然后匀速移动挡板,控制其开口宽度为 60mm,让

其在重力作用下自由下落，直到颗粒静止，测得的黄豆的休止角。通过多次实验取平均值的方法，得到黄豆在平面筒仓内的安息角的平均值为 27.48°。通过 DEM 模拟测得黄豆的安息角为 $\phi=27.6^\circ$ ，与实验的误差为 0.12°。在排除人不可控制的误差情况下，可以认为误差在合理范围内，因此验证了实验参数的准确性。

2.2 料仓模型的构建

料仓是由漏斗和筒仓构成的一个整体，作为一个容器它可以起到储存物料的作用。实验所用的料仓为浅仓（图 1），其模型高 $H=370\text{mm}$ ，筒仓直径 $D=300\text{mm}$ ，开口直径 D_0 分别取 50mm 和 70mm，料仓内有 G1、G2、G3 三个颗粒速度提取框，G1、G3 其长为 8mm，宽为 20mm，G2 长为 16mm，厚度为 20mm，颗粒提取框的上界为筒仓与漏斗的交界处，下界距开口的距离为 $D_0/2$ 。

漏斗半顶角分别取值为 15°、35°、55°、75°，黄豆与仓壁之间的摩擦角取值为 0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°。

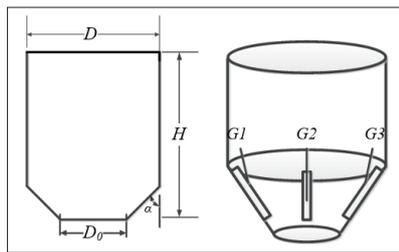


图 1 料仓模型

在黄豆的内摩擦角分别取 34° 和 30° 的情况下，通过取不同的漏斗半角，不同的颗粒与仓壁的摩擦系数和开口直径对黄豆在料仓内的流动情况进行分析，得到黄豆在料仓内的流型设计图。

2.3 料仓内流型分析

通过计算漏斗壁附近颗粒的平均速度 V_{wall} 和中心线附近的颗粒的平均速度 $V_{centerline}$ ，然后相除得到整体流系数计算公式为：

$$MFI = \frac{V_{wall}}{V_{centerline}} \quad (7)$$

其中 MFI 越接近于 1，说明墙壁附近的颗粒的速度和漏斗中心处颗粒的速度非常接近，一起流向卸料口并卸出，即呈现为整体流。Johanson 提出 $MFI=0.3$ 可以作为判断中心流和整体流的边界，当 $MFI < 0.3$ 时，筒仓物料流型为中心流，当 $MFI > 0.3$ ，筒仓物料流型为整体流。对于圆锥形料仓，保持整体流所需的最大漏斗半顶角计算公式为：

$$\alpha = \frac{1}{2}(180^\circ - \phi) - \frac{1}{2} \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - \sin \delta}{2 \sin \delta} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \phi}{\sin \delta} \right) \right] \quad (8)$$

式中： δ 为黄豆内摩擦角， ϕ 为黄豆与壁面摩擦角。

由黄豆内摩擦角和黄豆与有机玻璃之间的摩擦系数，通过公式（8）计算后得到黄豆在锥形料仓内保持整体流所需的最大半顶角为 37°。黄豆在料仓内的流型受壁面摩擦系数和漏斗半角的影响很大，壁面摩擦系数和漏斗半角越小保持整体流的趋势越大。Borg 认为，在实际的料仓设计过程中，则把实际计算出的结果减 3° 来作为设计整体流的最大漏斗半角，以避免整体流和中心流交替出现。

通过离散元软件 EDEM 模拟得到的料仓流型等值线图，其中黑实线代表 Jenike 理论公式得到料仓获得整体流所需满足的最大临界值。它以临界值 ($MFI=0.3$) 作为判断整体流和中心流的边界条件，在黑实线的左下角其流型为整体流 ($MFI>0.3$)，右上角为中心流 ($MFI<0.3$)。根据实验得到的 MFI 与漏斗半顶角和壁面摩擦系数的关系可以看出颜色深的地方在图形的左下角，说明其流型为整体流；颜色浅的地方在右上角，说明其流型为中心流。由数值实验得到的图形可看出其等值线图的趋势和 Jenike 理论设计图是一致的，但模拟实验得到的整体流与中心流的边界与 Jenike 理论得到的边界并不完全一样，只有一部分整体流的范围与 Jenike 理论范围相同。其原因可能是本实验所用到的颗粒为黄豆，其形状为非球形，没有充分考虑颗粒在流动过程中颗粒的旋转运动对流动造成的影响，所以导致了实验结果的不同。

料仓流型随漏斗开口直径的变化即在等值线图（图 2）的左下角为整体流，在其右上角为中心流；开口为 50mm 的料仓其 $MFI=0.3$ 曲线的上界的壁面摩擦角为 20.5° 比开口直径为 70mm 的壁面摩擦角 24° 小；开口直径为 50mm 的 $MFI=0.3$ 曲线的下界的壁面摩擦角为 9.5° 比开口直径为 70mm 的壁面摩擦角 6.8° 大。根据梯形面积公式可知，开口直径小的整体流所占比例比开口直径大的整体流比例小，开口越大越容易获得整体流；当漏斗半角较小，其整体流所占比例越大，其整体流比例随着漏斗半角的增大而减小，随着壁面摩擦角的增大而减小。

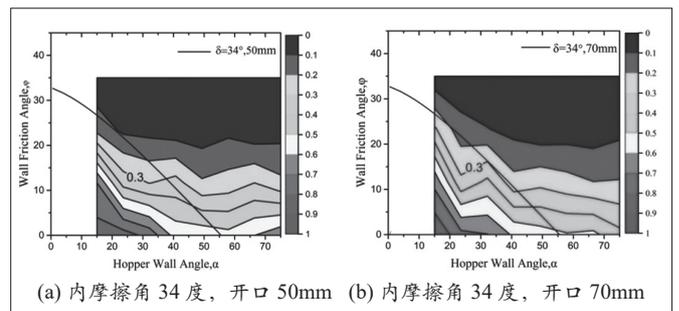


图 2 料仓流型随开口直径的变化

3 结语

本文通过对黄豆物理力学特性参数进行了测定与分析，并对实验参数进行了标定，验证了参数的准确性，得到了以下结论：

- (1) 在 MFI 值为 0.3 的等值线图的下部分为整体流，上部分为中心流。
- (2) 在料仓卸料过程中，卸料流型与开口直径、内摩擦角、壁面摩擦角以及漏斗半角有关。
- (3) 整体流所占的比例随开口直径、内摩擦角的增大而增大；随漏斗半角、壁面摩擦系数的增大而减小。

基金项目：2020 年产学研合作协同育人项目“《互换性与测量技术》虚拟实验教学项目设计”（202002148013）

（下转第 80 页）

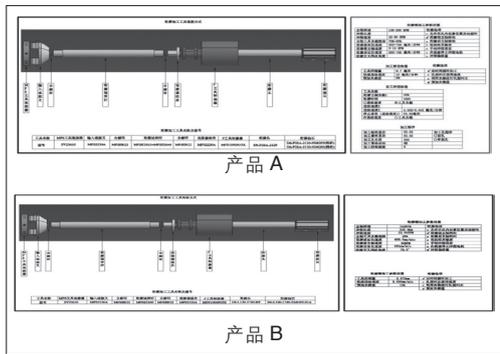


图 3 珩磨工序标准化加工工艺

艺文件的统一性，促使成组技术的推广，形成标准作业，标准加工单元的运行。使用标准化工艺文件，其产品过程控制会更加

稳定，加工过程趋于一致，提高加工质量。下图展示了两种类似产品的的标准化工艺。

3.2.2 夹具标准化

标准化的夹具可以实现快速换装，减少停机等待时间，提高设备利用率，加快零件的产出。公司在立式珩磨设备制造立柱，在立柱上安装夹具，制作标准化的夹具降低了零件准备过程，提高了准备效率。工作台立柱与标准化的系列夹具。

3.2.3 工具标准化

珩磨工序使用的工具是由一个系统连接组成的，使用标准接口的工具在更换加工零件时，更换最少的工具即可达到换装目的。使用标准化的工具能保证工具装夹的可靠性，稳定性，保证加工的稳定性和一致性。

3.3 持续改善

珩磨工序加工出不合格品是非常大的浪费，不符合精益思想，要及时的进行改善。对于产生的不合格品处理会占用大量的资源，这些资源的使用对于创造经济效益是没有一点益处的。同时，随着加工技术的发展，新的珩磨工具和材料不断研发出来，也会对加工的零件由一定的促进作用，要及时的应用，持续改善，推进质量和产量的提升。

3.4 在岗培训，多能工的培养

培养多能工，尤其是操作珩磨设备的人员，必须掌握零件的装夹、夹具更换、工具安装、程序设置、样件调试、零件检测几项技能。根据珩磨加工的特点，选定本班组几人作为培训目标，进过培训期，几人达到了预期的培训目标，多能工培训考核表见表 1。

达到操作要求的操作者可认为其具有操作珩磨设备的资格，可有意安排其在珩磨加工岗位进行生产，进行岗位轮换，这样有利于提高操作人员的工作情绪和积极性，使操作人员在精神上和体力上都不会感觉到疲劳，并且通过这样的调换，改善人际关系，增加知识储备，有利于提高操作人员的责任感。

3.5 改变作业方式

公司在操作人员配置上一般采用定员制，即对于某个设备，即使产量减少了，也会配备相同数量的作业人员操作这些设备。但是航空产品的特点就是多品种，少批量，生产量的变化比较频繁。因此，无论是生产量增加或者是减少，根据生产量的多少调配操作人员都是十分重要的。精益生产就是这种思想，打破原有的定员制，当产量减少时减少操作人员，当产量

增多时增加操作人员。

4 结语

精益生产综合了大量生产方式和单件生产方式的优点，实行拉动

式准时生产，以人为本，充分调动人员的积极性，充分发挥人员的主观能动性，培养一专多能，不断提高工作技能，有效配置企业生产资源，降低企业的生产成本。少投入，多产出正是精益生产方式的优越之处，要提高有增值价值的劳动，消除无用的劳动，减少浪费。经过认真执行上述措施后，珩磨加工的加工效率、加工稳定性、产品质量、设备产能等情况都得到了明显的改善，从原来的瓶颈设备恢复成为正产需求设备。

珩磨加工生产的精益生产方式的尝试和研究取得成功，主要有以下几方面的经验。

(1) 充分分析了珩磨生产的特点和特性，有针对性的进行了工艺改进和生产准备保障，奠定了零件稳定产出的基础，并且持续进行提质增效的活动，不断的优化珩磨加工的加工质量和效率。

(2) 深入贯彻精益生产的主旨思想，从多方面来降低生产成本，消除浪费，提高效率，拉动零件顺利产出。

(3) 培养员工一专多能，充分发挥员工的主观能动性，提高员工的热情和积极性，让员工掌握了技能，主动发挥自身的创造力。

(4) 利用看板等有效的管理手段，使得生产作业的物流与信息流充分吻合，提高了作业现场的管理能力和管控能力。

参考文献：

[1] 王世清, 深孔加工技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003. [2] 刘树华, 实精益生产 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. [3] 张武, 现代工业企业管理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.

(上接第 78 页)

参考文献：

[1] 张大英, 许启镗, 王树明, 等. 筒仓动态卸料过程侧压力模拟与验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(05): 272-278. [2] Yin W, YONG L, JIN Y.O. Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation, Powder Technology, Volume 257, 2014, Pages 181-190. [3] 周剑萍, 杜泽鹏. 湿颗粒材料筒仓卸料过程的离散元模拟 [J]. 重庆大学学报, 2020, 43(06): 58-64. [4] 原方, 刘海林, 程远浩, 杜乾. 深浅仓卸料压力离散元数值模拟研究 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2020, 41(01): 117-123. [5] 张丰尧, 刘克瑾, 王世豪. 基于离散单元法的大豆力学特性研究 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2019, 40(06): 94-99.

作者简介: 陈小告 (1981-) 男, 汉族, 湖南郴州人, 硕士, 实验师, 研究方向为数字化设计与制造; 通讯作者: 伍剑宇 (1992-) 男, 汉族, 湖南娄底人, 硕士, 实验师, 主要从事机械装备设计研究。