

气固分离称重料仓的设计与模拟分析

王明旭,赵子炎,陆凯凡

(河南工业大学机电工程学院,郑州450001)

摘要:针对当前通用型称重料仓工艺烦琐和设备复杂的问题,以大豆为例,运用模块化集成设计理念,采用理论分析与仿真模拟相结合的方法,设计开发了一套集卸料器与料仓于一体的气固分离称重料仓。采用Solidworks三维建模软件将设备各部分构件建模,运用计算流体力学及离散项模型对气固分离称重料仓的关键结构进行分析。结果表明,设计的气固分离称重料仓在完成称重卸料的同时可分离轻杂,简化了称重卸料过程,新增的蝶阀模块可根据料仓内的物料量动态调整进出仓过程。综上,设计的气固分离称重料仓可用于气力输送大豆的称重卸料。

关键词:气固分离;称重料仓;集成;气力输送;大豆

中图分类号:TS210.3; TS203 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2023)03-0144-05

Design and simulation analysis of gas – solid separation equipment for weighing silo

WANG Mingxu, ZHAO Ziyan, LU Kaifan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problems of the cumbersome process and complicated equipment of the current general – purpose weighing silo, taking soybean as an example, using the modular integrated design concept and the method of combining theoretical analysis and simulation, a set of gas – solid separation equipment for weighing silo integrating unloader and silo was designed and developed. The Solidworks 3D modeling software was used to model each part of the equipment. The key structure of the gas – solid separation equipment for weighing silo was analyzed by computational fluid dynamics and discrete phase model. The results showed that the designed gas – solid separation equipment for weighing silo could realize the separation of light impurities while completing weighing and discharge, and simplified weighing and discharge process. The newly added butterfly valve could dynamically adjust the process of inlet and outlet according to the amount of material in the silo. In conclusion, the designed gas – solid separation equipment for weighing silo can be used for weighing and unloading of pneumatically conveyed soybeans.

Key words: gas – solid separation; weighing silo; integration; pneumatic conveying; soybean

近年来,气力输送技术发展迅速,已广泛应用于食品、化工、建材、制药、塑料、烟草、电力等工业领

域。物料输送管道化、密闭化和自动化是现代散装物料输送技术的发展方向,而气力输送技术无疑是实现这种技术的最佳方式之一^[1-3]。将称重料仓系统与气力输送技术相结合,开发智能化、方便节能、高效的设备迫在眉睫。

在我国,随着粮食散装、散卸、散运和散存即“四散”技术日益推广,气力输送技术将在粮食加工领域得到更加广泛的推广和应用。气力输送技术的传统称重料仓具有效率高、使用方便等优点,但工作

收稿日期:2021-10-11;修回日期:2022-09-22

基金项目:河南省教育厅青年骨干教师项目(2020GGJS088);2021年河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室开放课题基金(2021KF-B02)

作者简介:王明旭(1980),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事现代化粮食机械的研究(E-mail)wmx20032002@163.com。

过程为先卸料进入缓冲仓,再由缓冲仓进入称重料仓称重,流程较长,整个系统较为烦琐,且占用空间较大^[4-5]。现阶段对气固分离料仓的研究主要针对料仓内颗粒运动情况及下料过程^[6-7],如:魏飞等^[8]利用料仓结合电磁脉冲袋,对秸秆物料的收集及杂质去除进行了研究;童聪等^[9]利用计算流体力学研究了颗粒运动在重力分级区内受系统风量的影响;周婵等^[10]采用数值模拟的方法对中心管式气固分离器中油气的气固两相流进行了模拟;王世龙^[11]针对气力式卸船,研究了散粒物料在容积式分离仓中的分离运动机制;陆海峰等^[12]研究了不同载气的气力输送对料仓内煤粉重力下料的影响;付琳等^[13]针对煤粉在料仓下料阶段出现的阻塞等问题进行了优化;Terfous等^[14]设计并研究了改进后入仓过程颗粒的分离情况,其将用于气力输送的缓冲仓去除,新增更容易集成化控制的蝶阀模块用于替代原本分离的进出仓管道,增加对料仓的动态称重,使称重仓与卸料器合并,通过这种方式实现根据料仓实时仓位动态调整,控制大豆物料进入该料仓或者不经该料仓直接运输到下一料仓,并大幅减少系统的占用空间,简化卸料称重的流程,降低物料在空气中污染变质的风险。

本文拟设计一种新型气固分离称重料仓,该设备整体采用模块化设计理念,分为输送模块、蝶阀模块、称重料仓模块,各模块之间采用法兰连接,可使装配更灵活,后期设备维修、更换零部件等工作更方便。以大豆为例,运用计算流体力学(CFD)及离散项模型(DPM)对采用 Solidworks 建模的气固分离料仓内流场及颗粒运动进行分析计算^[15-16],确保设计的可行性,以期气力输送行业的卸料称重提供借鉴。

1 气固分离称重料仓设计

1.1 整体设计

气固分离称重料仓整体结构如图1所示。物料两相流通过输送管道进行输送,利用控制系统根据实时测量的称重料仓内物料的质量判断料位,控制蝶阀的状态,实现当料仓内物料处于高位时蝶阀关闭,颗粒流经输送管道直接输送至下一料仓,当需要向该料仓内卸料时蝶阀开启,颗粒流受蝶阀阀门挡板阻碍发生流向改变,进入称重料仓后初步卸料,卸料后的含尘气流由出仓口排出,由后续过程处理。气固分离称重料仓的主要设备参数:输送管道入口内径和出口内径均75 mm,蝶阀处管形状变为直径100 mm的半圆,蝶阀直径100 mm,料仓直径400 mm,料仓高度420 mm,进出仓口间的高度差54 mm。

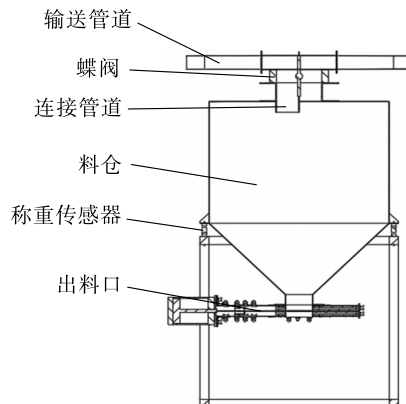


图1 气固分离称重料仓整体结构图

1.2 主要模块设计

1.2.1 输送模块

输送管道的结构见图2。输送管道的设计考虑两个方面:一方面,当蝶阀关闭时,可能存在波动压力损失,需验证含料颗粒流通过时该处压力损失不宜过大,风速不得产生较大振荡,从而保证正常通过时大豆颗粒不会沉降;另一方面,当蝶阀开启时,输送模块需与蝶阀模块在该处紧密配合阻挡颗粒流从而实现物料沉降的效果,利用重力卸料。通过将输送管道设计成与蝶阀阀门契合的方式有效降低上方管道部分的复杂程度,有利于装备的精简化设计。

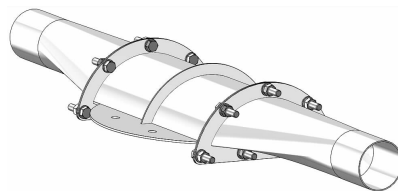


图2 输送管道结构图

1.2.2 蝶阀模块

蝶阀模块由蝶阀以及蝶阀与料仓相连处的进出仓管道组成,设计时应考虑两点:第一点,颗粒流受到蝶阀阻挡时,由于颗粒速度较大,与蝶阀碰撞后存在反弹现象,颗粒堆积产生阻塞从而影响入仓效率,另外大豆颗粒在碰撞时较容易破碎,会给后续储存以及加工带来弊端,为减少上述问题,选择在蝶板板面的不锈钢内板外设计厚度为4 mm的缓冲硅胶垫,且蝶阀口径选择大口径以降低阻塞;第二点,进出仓管道需考虑进仓段与出仓段之间高度差,若进出仓口高度差小,则会使进仓气流路径与出仓气流路径重合,从而导致部分大豆颗粒在沉降前被出仓气流带出仓,影响惯性卸料效果,使称重料仓无法准确称重,考虑大豆颗粒的重力,本次设计所取的进出仓口间的高度差为54 mm。

1.2.3 称重料仓模块

新型的称重料仓使用卸料器与料仓合并的一体式设计,在卸料的同时对大豆进行称重,使整个称重卸料过程得以简化,缩短了物料在缓冲仓内停留的时间,降低了物料受到污染的可能性。料仓与支架之间增设了称重传感器,可以同时实现节省空间以及实时显示质量的作用。实际使用时需注意的关键点是料仓内物料与空气混合处于流化状态,为了达到显示真实质量的目的,需预留一定的缓冲时间,在后续完善设计时应当考虑动态称重的数值显示与实际料仓内物料质量之间的关系。

2 工作原理

2.1 气相运动方程

由于颗粒流在挡板处发生了碰撞,气相作为连续介质必须考虑湍流影响,故在欧拉坐标系中采用带有旋流修正的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型来实现整体流场的回流旋转计算,其中湍动能(k)和耗散率(ε)的输送方程见式(1)和式(2)。

$$\frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t} + \nabla(\rho_g kv) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho_g \varepsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho_g \varepsilon v) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho_g C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k} \quad (2)$$

式中: ρ_g 为气相的密度; t 为时间; μ 为流体黏性系数; v 为气相流体速度矢量; G_k 为平均速度梯度带来的湍流动能; G_b 为受到浮力而产生的湍流动能; Y_M 为气相作为可压缩流体其脉动膨胀带来的影响; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 与 ε 的湍流普朗特数;模型参数 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.90$, $C_{3\varepsilon} = 1.00$,均为常数; μ_t 为湍流黏性系数, $\mu_t = \rho_g C_\mu k^2 / \varepsilon$,默认常数 $C_\mu = 0.09$ 。

理论上,只要管道中的气流速度大于颗粒的悬浮速度,就可以运输物料。当管道中存在两相流时,管道中的各种摩擦碰撞、管道中气流的不均匀分布、弯道中的材料、减速器管处的压力损失将影响物料运输。因此,在实际条件下可以正常运输的气体流速远大于悬浮速度。在设计时,输送的气流速度可以通过测试或参考相关的运输实例来确定,经验公式见式(3)。

$$v_a = a \sqrt{\rho g} + \beta L \quad (3)$$

式中: v_a 为输送气流的风速; a 为考虑被输送物料粒度的系数; ρ 为物料的松散密度; g 为重力

加速度; β 为被输送物料的特性系数; L 为输送的距离。

2.2 大豆颗粒运动方程

颗粒流中所运输的大豆的线性运动满足牛顿第二定律,大豆运动方程见式(4)。

$$m \frac{dv}{dt} = F_D + F_G + F_M \quad (4)$$

式中: v 为大豆颗粒运动速度矢量; t 为时间; m 为大豆的质量; F_D 为大豆颗粒单位质量所受曳力; F_G 为大豆所受重力; F_M 为单位马格努斯升力。颗粒碰撞产生的旋转会伴随较大的马格努斯升力,其数量级与重力接近,对颗粒轨迹影响较大,不可忽略。

当大豆颗粒与其周围气流存在相对运动时,流体会对颗粒产生曳力或阻力,本次设计的模型流场中,气流速度大于颗粒速度,气流携带颗粒形成颗粒流,气流对颗粒产生的曳力作用是颗粒水平运输中作用于大豆颗粒的最重要的力,其运动方程见式(5)。

$$F_D = \frac{1}{8} \pi C_D d_p^2 \rho_g |v_g - v_p| (v_g - v_p) \quad (5)$$

式中: F_D 为大豆颗粒单位质量所受曳力; C_D 为阻力系数; d_p 为颗粒直径; ρ_g 为空气密度; v_g 为气相流体速度; v_p 为颗粒速度。

3 气固分离称重料仓关键结构模拟分析

3.1 模型求解参数设置

基于稀相输送条件,选择料气质量比20:1进行计算,求得大豆颗粒占空气体积比例为3.23%,且本次模拟的指标分离效果与颗粒的运动状态紧密相关,因此本文选取颗粒运动轨迹模型,应用Fluent软件求解所设计装置的气固两相流场。采用两相流欧拉隐式模型,为使计算结果更准确,选用湍流模型(Realizable $k-\varepsilon$ 模型)进行计算,见式(1)、式(2);在颗粒场求解中采用硬球模型、离散项模型(DPM)及拉格朗日方法分析颗粒在称重料仓中的运动状态以及轨迹规律;考虑大豆颗粒受马格努斯升力及曳力影响,其计算见式(4)和式(5);最后通过颗粒轨迹及运动状态得出结论。

数值模拟模型由流道组成,其几何尺寸取值为气固分离称重料仓的主要设备参数(见1.1)。各模拟参数取值:大豆密度 750 kg/m^3 ,大豆黏度 $1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s/m}$,空气密度 1.213 kg/m^3 ,空气黏度 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s/m}$ 。边界条件设定为入口实际风速选择10、15、20 m/s。

3.2 模型网格划分

为了便于划分网格进行CFD计算,运用

Solidworks 三维建模软件,建立两个模型:第一个是当蝶阀关闭时,只有上半部分输送管道的模型,为标准模型;第二个是当蝶阀开启时,载有物料的气流从输送管道进入料仓的整体结构,为重力分级系统的简化模型。为确保计算结果收敛以及结果准确性,采用 ICEM 软件进行分块划分结构化网格的方式,由于称重料仓部分计算区域较大,而蝶阀区域以及进出仓管道区域是重点分析区域,所以对于称重料仓网格划分尺度设定为一般尺寸,并对蝶阀区域以及进出仓管道进行适当的局部加密处理。

3.3 模拟分析

本次数值模拟分析主要针对设计中出现的需要考虑的问题而验证以下两个方面:①蝶阀关闭时,输送管道由于截面变动,对于输送物料的气流带来的影响,即物料是否会发生沉降,验证该新型设计对气流场的风速以及压力损失大小的影响;②蝶阀开启时,含料颗粒流经过蝶阀阻挡改变方向由进仓管道进入料仓,验证大豆颗粒能否受惯性作用脱离气流实现气固分离,以及验证卸料后的气流排出料仓的通顺程度。本次分析使用 Fluent 软件,采用随机轨道模型得出大豆颗粒轨迹,利用 UDF 程序添加颗粒初始状态模拟。

3.3.1 输送管道

载料气流通过输送管道,在经过蝶阀模块时为了匹配设定的蝶阀直径以及进出仓管道直径,输送管道需要改变横截面的面积,由直径 75 mm 的圆通过变径变为直径 100 mm 的半圆管道。

以初速度 20 m/s 为例,输送管道速度流线图见图 3,管道出口流速图见图 4。

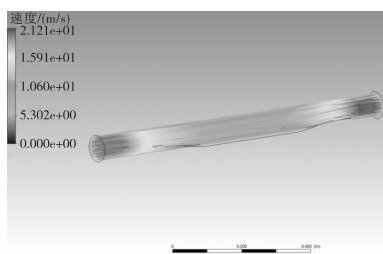


图3 输送管道速度流线图

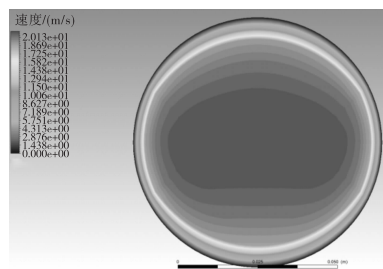


图4 管道出口流速图

由图 3 可以看出,流速在该段出现显著下降,由初速度 20 m/s 下降到 10 m/s,带入式(3)~式(5)可知,风速 10 m/s 不会出现物料沉积的现象。由图 4 可以看出,模拟采用的稀相输送模型,受截面先增大再减小带来的影响以及边界层效应,出口速度在截面上分布特征为截面中心速度略低于入口速度(设定为均布 20 m/s),出口截面纵向边界层流速略低于横向边界层流速,这意味着管道输送该处变径设计对于流速影响较小,整体输送较为稳定。在初速度 20 m/s 的条件下,输送大豆颗粒效率较高。

3.3.2 重力分级系统

载料气流通过蝶阀挡板时,气流受到挡板的阻碍会向下运动,从进仓口进入料仓后,气流会形成涡流,受出仓口负压的影响,气流会向出仓口汇集,由于气流方向发生反转且流速过快,气流路线可看作圆弧,在相同情况下,大豆颗粒由于质量较大其惯性以及所受重力远大于气体以及轻型杂质,大豆颗粒从气流中脱离,受重力作用产生下降分级,大豆颗粒落入料仓底部,同时颗粒流中掺杂的轻型杂质随气流进入排气管道,从而进行后续除杂步骤。

气流从进仓口进入料仓,从出仓口排出。分别采用初速度 10、15、20 m/s 的气流模拟,从进仓管道输送进料仓。10、15、20 m/s 入仓模拟图分别见图 5、图 6、图 7,20 m/s 入仓局部放大图见图 8。

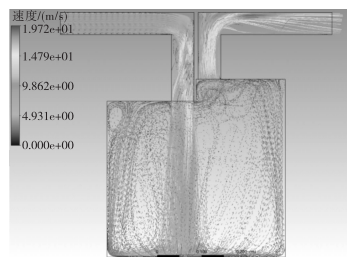


图5 10 m/s 入仓模拟图

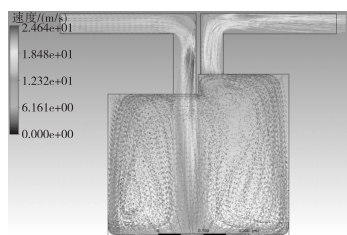


图6 15 m/s 入仓模拟图

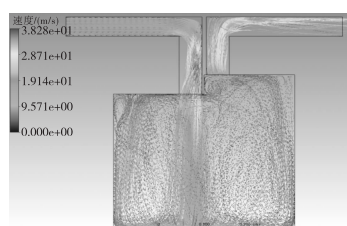


图7 20 m/s 入仓模拟图

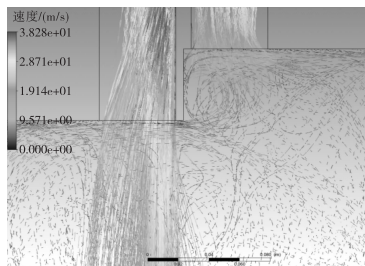


图8 20 m/s 入仓局部放大图

从图5~图7可知,随着入仓气流初速度增大,料仓内部气流不稳定性增加,会使物料颗粒处于不稳定运动之中,这意味着随着初速度增加,料仓进行称重所需要的稳定时间变长,但其稳定时间相较于

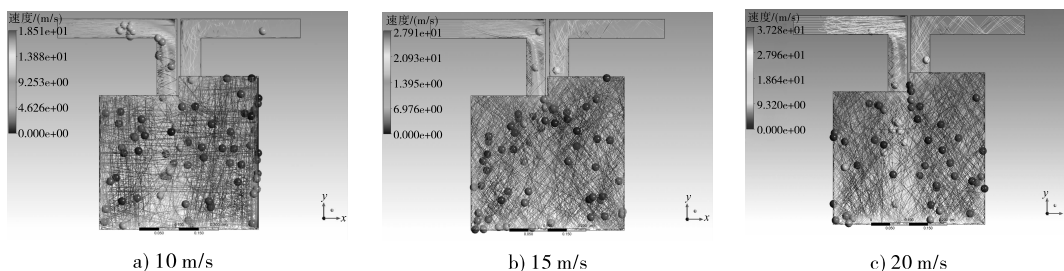


图9 不同初速度颗粒路径图

4 结论

传统称重料仓先卸料,转入缓冲仓,再进入称重料仓称重,工艺烦琐,设备复杂。针对此问题,运用了模块化集成设计理念,采用理论分析与仿真模拟相结合的方法,设计了集卸料器与料仓于一体的新型称重料仓,对设备各部分构件建模并进行分析与优化,运用计算流体力学(CFD)及离散项模型(DPM)对气固分离称重料仓的关键结构进行了分析。结果表明,该装置输送模块当蝶阀关闭时对流场带来的影响不会造成物料沉降阻塞管道的现象,蝶阀开启时称重卸料和分离轻杂效果明显,同时集成化的设计理念可有效节省整个输送系统的占用空间。本研究将为粮食加工、物料输送相关技术进步与革新提供理论支持和解决方案。

参考文献:

- [1] 李书国. 气力输送粮食颗粒机械损伤问题的研究[J]. 粮食与饲料工业, 1995(12):34-40.
- [2] 李国防, 钱东平, 李树春. 粮食气力输送能耗问题的试验研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(5):16-18.
- [3] 李水莲, 杨伟, 杨宏胜. 粮食气力输送中有关问题探讨[J]. 粮油加工:电子版, 2010(8):79-82.
- [4] 杨磊, 田素芳. 脉冲式气力输送装置在小麦粉压运中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2010(11):8-10.
- [5] 张德高, 陆永光, 谢焕雄. 农业颗粒物料气力输送技术概况与发展[J]. 食品工业, 2016, 37(10):200-203.
- [6] 翟志轩, 熊丽敏, 苏文献. 料仓卸料流动特性及结构强度数值模拟研究[J]. 化工设备与管道, 2021, 58(2):35-42.
- [7] 田经焯, 邱生祥, 潘仁湖, 等. 料仓中堆积物料密度变化的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2016(7):3-6.
- [8] 魏飞, 张林海, 侯书林. 秸秆物料除杂及气力输送系统的设计[J]. 农机化研究, 2013(8):86-89.
- [9] 童聪, 李双跃, 綦海军, 等. 立磨系统风量对物料重力分级影响模拟分析[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(3):321-326, 331.
- [10] 周婵, 卢春喜, 严超宇. 一种新型气固分离器内两相流动的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(3):375-380.
- [11] 王世龙. 散粒物料在气固分离过程中的运动模型及数值仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [12] 陆海峰, 郭晓镭, 陶顺龙, 等. 不同载气供料对煤粉料仓下料的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(9):3383-3388.
- [13] 付琳, 陆海峰, 郭晓镭, 等. 煤粉通气料仓的优化设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(3):297-303.
- [14] TERFOUS A, HAZZAB A, GHENAIM A. Predicting the drag coefficient and settling velocity of spherical particles[J]. Powder Technol, 2013, 239:12-20.
- [15] 杜俊, 胡国明, 方自强, 等. 弯管稀相气力输送 CFD-DEM 法数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4):134-139.
- [16] XIAO Y W, HAN Y L, JIA F G, et al. Experimental study of granular flow transition near the outlet in a flat-bottomed silo[J]. Biosyst Eng, 2020, 202:16-27.

传统入仓称重方式仍有大幅缩短,入仓效率大幅提高。由图8可知,在54 mm高度差下,从进仓管道排出的气流进入料仓的速度较高,直接进入出仓管道的气流速度较低。

3.3.3 颗粒路径模拟

根据大豆颗粒实际数据设定了模拟颗粒的参数,分别选取10、15、20 m/s的初速度,将颗粒路径与相应的气流轨迹图相对比,结果见图9。由图9可以看出,在气流的作用下,随着气流的拖曳作用,大豆颗粒在称重料仓内部作无规则慢速运动,在10、15、20 m/s的初速度条件下,大豆颗粒均可实现沉降,符合理论计算所得的规律。