# 小麦气力输送流场颗粒流化特性数值模拟

夏朝阳<sup>1</sup>,李永祥<sup>1</sup>,徐雪萌<sup>1</sup>,张永宇<sup>1</sup>,姜棚仁<sup>1</sup>,王龙<sup>1</sup>,董晓淦<sup>2</sup>

(1.河南工业大学 机电工程学院,郑州 450001;

2.河南牧业经济学院 能源与智能工程学院,郑州 450046)

摘要:目的 探索仓泵式气力输送小麦颗粒时不同输送压力下罐体及引出管内颗粒的流化特性,从而得 出最佳操作压力。方法 利用 Solidworks 建立简易的等比例发送装置三维模型,采用模拟仿真软件 Fluent 对 0.25、0.3、0.35 MPa 等 3 种不同输送压力进行数值模拟,并利用 CFD-Post 进行数据后处理。结果 当 进气口压力为 0.35 MPa 时物料最先输送完毕,用时为 10 s。整体发料过程从引出管入口至出口处三者 压力分别降低了 97.1%、96.8%、98.1%,其中当进气口压力为 0.3 MPa 时,压力降低最小,能量利用率 最高。结论 输送压力越大输送速度越快,其压降也最大。考虑经济性与高效性可得,最佳进气口压力 为 0.3 MPa。

关键词:小麦颗粒;流场;气力输送;流化特性;数值模拟 中图分类号:TS211.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)13-0188-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.023

# Numerical Simulation of Particle Fluidization Characteristics of Wheat under Pneumatic Conveying Flow Field

XIA Chao-yang<sup>1</sup>, LI Yong-xiang<sup>1</sup>, XU Xue-meng<sup>1</sup>, ZHANG Yong-yu<sup>1</sup>, JIANG Peng-ren<sup>1</sup>, WANG Long<sup>1</sup>, DONG Xiao-gan<sup>2</sup>

 School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
 School of Energy and Intelligent Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the fluidization characteristics of wheat particles in tank and extraction pipe under different pressure during pneumatic conveying by warehouse pump, so as to obtain the optimal operating pressure. Solidworks was used to establish a simple three-dimensional model of the equal proportion transmission device. The simulation software Fluent was used to carry out numerical simulation of three different conveying pressure of 0.25, 0.3 and 0.35 MPa, and the data were post-processed by CFD-POST. When the air inlet pressure was 0.35 MPa, the material was transported firstly, which took 10 s. The pressure of the three parts from the inlet to the outlet of the extraction pipe was reduced by 97.1%, 96.8% and 98.1%, respectively. When the inlet pressure was 0.3 MPa, the pressure reduction was the smallest and the energy utilization was the highest. The higher the conveying pressure, the faster the conveying speed and the more the pressure drop. Considering economy and efficiency, the optimal inlet pressure is 0.3 MPa.

KEY WORDS: wheat particle; flow field; pneumatic conveying; fluidization characteristic; numerical simulation

收稿日期: 2022-06-28

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0400704)

作者简介:夏朝阳(1997—),男,硕士生,主攻粮食机械。

通信作者:张永宇(1970—),男,博士,副教授,主要研究方向为粮油食品包装工艺与装备。

气力输送在现代工业中普遍被应用于化工、冶 金、食品等领域,因其具备可布置性强、操作简单等 诸多优点而受到行业的青睐。气力输送是指在密闭管 道内利用空气的流动将粉体或颗粒状物料输送到某 一指定点的输送方式,其中空气的流动主要靠输送管 道两端的压差来实现,空气的动能直接转化为物料流 动所需的能量<sup>[1-3]</sup>。一般情况下,气力输送分为正压 式和负压式 2 种输送方式,俗称压送式和吸送式,其 中正压式由于其输送距离长、压力调节范围广、系统 适应性强等优点在行业中应用较多[4]。在正压式气力 输送中,通常有泵送式及吹送式2种方法,而泵送式 由于其输送压力高、输送量大、稳定性强及造价低等 优点受到广泛应用<sup>[5]</sup>。在仓泵式气力输送过程中,不 同的输送压力对颗粒的流化具有不同的效果,探索最 佳的输送压力从而达到节能高效的目的,对工程实践 具有重大指导意义。

采用实验方法能较好地还原发料过程,最真实可 靠地反映不同操作工况下的颗粒流化特性<sup>[6-8]</sup>。由于 仓泵式气力输送压力较大,采用实验方法较难观测 到泵体及引出管内部的颗粒流动情况,各项数据较 难测量,如引出管入口及出口处的气速、压强、颗 粒速度等。由于计算机技术的高速发展,利用数值 模拟方法能较好地模拟实验过程,从而为工程实践 提供参考依据<sup>[9-11]</sup>。

本文选取工程实践中常用的 3 种输送压力进行 模拟仿真,对比 3 种工况下相同时刻罐体内部颗粒的 体积分数,引出管入口及出口处的压力、气速、颗粒 速度等,选取出最佳操作工况。为仓泵式气力输送系 统的设计提供参考,同时为实验打下理论基础。

# 1 气力输送系统及模型介绍

气力输送系统的工作原理是利用输送管道两端 的压差将物料输送到某一指定点的输送方式,整套系 统一共包含空压机、储气罐、冷冻干燥机、仓泵罐体、 输送管道、PLC 控制柜几大部分,各部分以串联方式 连接,系统工作原理如图 1 所示。空压机将压缩空气 不断泵入储气罐,使储气罐内的压力逐渐增大,空压 机及储气罐均有泄压装置。当储气罐内的压力达到空 压机的设定压力时,空压机将会暂停工作。空气经压 缩后温度升高、湿度增大,因此储气罐连接冷冻干燥 机对压缩气体进行降温干燥处理,然后冷冻干燥机出 气口与仓泵底部进气口相连使高压气体进入仓泵内 部作为输送介质进行工作。

小麦颗粒从仓泵顶部的料斗进入仓泵罐体内部, 当物料堆积到一定位置时触发罐体内部料位计开关, 使料斗与罐体之间的进料阀门关闭从而停止进料。仓 泵进气口与罐体流化盘有一定的距离从而有利于高 压气体的扩散, 使罐体内部的小麦颗粒充分流化, 此 时打开出料阀门使高压空气携带着物料沿输送管道 向指定位置移动,直到发料完毕。当发料过程结束时, 关闭出料阀及进气阀,打开进料阀重新填充物料,如 此循环往复,实现间歇式发料。



Fig.1 Working principle of system

根据工程实际经验,选取 0.25、0.3、0.35 MPa 等 3 种不同的输送压力进行仿真模拟,在罐体内部预 存一定量的颗粒,模拟仓泵一次发料过程。仓泵简易 模型参考山东引持环保设备有限公司生产的上引沸 腾式仓泵,其产品参数如表 1 所示。

表 1 仓**泵参数** Tab.1 Parameters of warehouse pump

设备名称	容积/m <sup>3</sup>	输送压力/ MPa	输送物质	供气 方式
上引沸腾 式仓泵	0~0.3	0 ~ 0.8	粉状及颗粒 状物料	下供气

如图2所示为仓泵简易图,其中泵体直径为800mm, 进气口内径为20mm,引出管内径为100mm。高压 气体从进气口进入仓泵罐体内部,然后经流化盘后气 体扩散对仓内小麦颗粒进行流化,流化处理后的小麦 颗粒经过引出管进入输送管道,从而沿输送管道达到 指定位置。



1.进气口; 2.流化盘; 3.仓泵壁面; 4.引出管入口;
 5.引出管; 6.引出管出口。
 图 2 仓泵简易图
 Fig.2 Schematic diagram of warehouse pump

# 2 模型网格划分及仿真参数设置

### 2.1 网格划分

将三维模型导入 DesignModeler 软件,对三维模型 填充流体域,之后将模型外壳抑制,只保留流体域部分 进行计算。将流体域导入 ICEM-CFD 进行网格划分, 并定义入口、出口及壁面,整体网格为非结构化网格。 由于流化孔尺寸较小,对其进行网格加密处理,共产生 了 2 445 385 个单元,网格划分情况如图 3 所示。



图 3 网格划分 Fig.3 Meshing results

### 2.2 仿真参数

### 2.2.1 边界条件及数学模型

在仿真软件内进行参数的设定,系统采用瞬态模拟,使用欧拉多相流及 K-epsilon(2eqn)模型,其余参数及边界条件的设置如表 2 所示。

 1)湍流模型。在气固两相流动过程中,流场内 部两相运动较为复杂,因此需要使用较为精确的湍流 数学模型进行计算。标准 k-ε 模型计算精度高,适用 范围广泛,是气固多相流领域使用最广泛的模型。标 准 k-ε 模型是在关于湍动能 k 的方程的基础之上,再 引入一个关于耗散率 ε 的方程,2 个方程组合便形成 了标准 k-ε 方程模型<sup>[12]</sup>。在标准 k-ε 方程中,湍动能

表 2 仿真软件参数 Tab.2 Simulation software parameters

项目	设置	
边界条件	Pressure-inlet 0.25 MPa 0.30 MPa 0.35 MPa Outlet-vent Stationary Wall	
曳力模型	Huilin-gidaspow 模型	
迭代计算	Time step size(0.001 s)           最大迭代次数(20次)	

k和耗散率 $\epsilon$ 为2个未知量,相应的输运方程见式(1)、 式(2)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$
(1)
(2)

各个分量所代表的意义及表达式如表 3 所示。

2)Gidaspow 曳力模型。在气固两相流动中,气体对固相颗粒的作用力是一种主要的力,对气固两相间的相互作用及能量传递起到非常重要的影响。 在某些层面上曳力模型的选择影响计算结果的精确度<sup>[13-14]</sup>。随着研究的不断推进,越来越多的科学家通过各种方式不断建立起适合不同场景下的曳力模型。 Gidaspow 曳力模型是 Wen-Yu 曳力模型<sup>[15]</sup>和 Ergun 曳力模型<sup>[16]</sup>的结合体,Wen-Yu 曳力模型主要适用于 次相的体积分数低于主相的体积分数的稀相流动情况,在固相浓度较高的工况下,其计算误差较大。小 麦颗粒的堆积密度为 0.52, 孔隙率为 0.48,在孔隙率 小于 0.8 的情况下,Gidaspow 曳力模型选用 Ergun 曳 力模型作为计算曳力系数,如式(3)所示。

$$\beta_{\rm gs} = 150 \frac{\varepsilon_s^2 u_{\rm g}}{\varepsilon_{\rm g}^2 d_{\rm p}^2} + 1.75 \frac{\rho_{\rm g} \varepsilon_{\rm s}}{\varepsilon_{\rm s} d_{\rm s}} |u_{\rm g} - u_{\rm s}|$$
(3)

表 3 各分量代表意义 Tab.3 Meaning represented by each component

项目	意义	表达式或常量
$G_k$	由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生率	$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$
$G_{b}$	由于浮力引起的湍动能 k 的产生率	$G_{\rm b} = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, Pr_t = 0.85, \beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$
$Y_{\rm M}$	可压湍流中脉动扩张的贡献	$Y_{\rm M} = 2\rho \varepsilon M_i^2$
$\partial k$	湍动能 k 对应的湍流普朗特数	1.0
$\sigma_arepsilon$	耗散率 <i>ε</i> 对应的湍流普朗特数	1.3

\_

式中: $\varepsilon_s$ 为固相体积分数; $\varepsilon_g$ 为气相体积分数;  $\rho_g$ 为气相密度,kg/m<sup>3</sup>; $d_s$ 为固相颗粒直径,m; $u_s$ 固相颗粒运动速度矢量; $u_g$ 为气相速度矢量。 Huilin-Gidaspow 曳力模型是在 Gidaspow 模型的基础 上进行改进修正得到的。对固相颗粒孔隙率不大于 0.8 的部分进行了修正,修正后的公式如式(4)所示。

$$\beta_{gs} = \varphi_{gs}\beta_{gs} \left| E_{rgun} + (1 - \varphi_{gs})\beta_{gs} \right|_{Wen-Yu}$$
(4)  
 
$$\vec{x} (4) \neq, \quad \varphi_{gs} \neq \vec{x} \neq \vec{x} \neq \vec{x}$$

$$\varphi_{\rm gs} = \arctan\left[\frac{262.5(0.2 - \varepsilon_{\rm s})}{\pi}\right] + 0.5 \tag{5}$$

### 2.2.2 小麦颗粒物理参数

在 Fluent 软件内设置固相颗粒的物理性质参数, 王振华<sup>[17]</sup>利用游标卡尺直接测量小麦颗粒的三轴尺 寸,测量总数为 200 个,并取其平均值代入公式求得 小麦颗粒的当量直径;利用密度法测量小麦密度,并 将小麦装进标准正方形容器中测得其质量及体积,然 后求得小麦颗粒堆积密度。求得的小麦各项物理性质 参数如表 4 所示。

表 4 小麦物理性质参数 Tab.4 Physical property parameters of wheat

固相	平均粒径/	颗粒密度/	堆积密度/	床层
	mm	(kg·m <sup>-3</sup> )	(kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙率
小麦颗粒	3.998	1 269	649	0.484

### 2.2.3 气相物理性质参数

选取常温常压下的标准空气密度,查阅资料可得

标准空气密度各项物理性质参数如表 5 所示。

表 5 标准空气物理性质参数 Tab.5 Physical property parameters of standard air

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏度/(10 <sup>-5</sup> Pa·s)
1.225	1.789 4

# 3 结果分析

为探索不同输送压力下小麦颗粒的流化特性,将同 等时刻下颗粒体积分数、气固两相静压、气固两相速度 进行对比,分析仓泵内部的颗粒湍流水平,得出发料效 率高、速度快、平稳可靠的操作工况。由仿真结果可知, 容积为 0.3 m<sup>3</sup>的小麦颗粒 16 s 时可输送完毕,因此每隔 2 s 选取一个数据点进行对比分析。选择小麦颗粒体积分 数、气固两相静压、气固两相速度为研究对象,对比分 析小麦颗粒在同等时刻不同工况下流化特性。将 Fluent 仿真软件每隔 2 s 保存的数据文件导入 CFD-Post 中进行 数据后处理。以 y-z 轴平面为基准面建立观测面,从而 获取颗粒体积分数云图。在引出管入口平面中心处建立 观测点,测量入口处的压力、气速、颗粒速度;在距离 引出管出口 100 mm 处建立观测点,测量出口处的压力、 气速、颗粒速度,将测量数据导出保存到 Excel 表格, 打开 Origin 软件,将数据进行处理,绘制折线图。

### 3.1 颗粒体积分数

每隔 2 s 获取发料过程中的颗粒体积分数分布云 图,对比分析 3 种输送工况下同等时刻的云图,色标 轴代表颗粒体积分数。由图 4—6 可知,在气力输送



图 4 压力为 0.25 MPa 时不同时刻颗粒体积分数分布云图 Fig.4 Cloud image of particle volume fraction distribution under 0.25 MPa at different time









图 6 压力为 0.35 MPa 时不同时刻颗粒体积分数分布云图 Fig.6 Cloud image of particle volume fraction distribution under 0.35 MPa at different time

的最后阶段,通常需要消耗大量的时间才能将罐体 内部的物料完全输送完毕。为了减少能耗,允许仓 泵罐体内部剩余些许物料,以 0.25 MPa 输送压力下 16 s时仓泵内部剩余的物料比例为结束点。由图 4—6 可知,随着时间的增长颗粒持续被输送出去,3 种输 送工况下的颗粒体积分数均逐渐减小。进气口压力 为 0.35 MPa 时用时 10 s 最先输送完毕,输送压力为 0.3 MPa 时用时 14 s 输送完毕。在3 种输送压力下, 引出管内的颗粒体积分数分布均不均匀,表现为在弯 管处颗粒体积分数较大,在直管部分较小。主要是由 于颗粒在弯管部分需要通过不断地撞击管壁改变运 动方向。在此过程中,颗粒与管壁进行碰撞及颗粒间 的相互碰撞消耗了一大部分的动能,造成速度降低从 而在弯管部分形成颗粒聚集,而在直管部分由于颗粒 无须改变运动方向故体积分数分布均匀。

### 3.2 气固两相静压

引出管入口处的压力变化如图 7 所示,在引出管 入口平面中心处建立观测点,在测量引出管入口两相 静压的同时也能反映出罐体内部的压力。由图 7 可 知,在9s之前,0.35 MPa 输送工况下引出管入口处 的压力高于输送工况为 0.25 MPa 及 0.3 MPa 的。这 是由于在此之前,其罐内颗粒剩余较多,高压气体并 未顺畅地直接从引出管流出,而要携带大量颗粒进行 发料,且由于 0.35 MPa 本身输送压力就高于其他两 者,故在 9s之前其输送压力高。9 s之后,由图 6 可 知,相同时刻下其罐内物料显著少于前两者,颗粒体 积分数较小,高压气体从引出管逸出较快,携带颗粒 变少,故其引出管入口处两相静压开始小于前两者。



Fig.7 Inlet pressure of extraction pipe

图 8 为引出管出口处压力变化,选取测量点位于 距离出口端面 100 mm 处的平面中心。由图 8 可知, 在 11 s之前, 0.35 MPa 操作压力下,其出口处的压 力高于其他两者,主要是由于其引出管内还有物料, 故出口处的压力还较高。11 s之后,在 0.25 MPa 及 0.3 MPa 输送压力下的罐体和引出管内部还有较多物 料,0.35 MPa 输送压力下的罐体及引出管内颗粒体积 分数小于上述两者,高压气体流出较快,故压力从 11 s之后就小于其余两者。其中 0.25 MPa 与 0.3 MPa 相比,这 2 种输送工况在 16 s时,因为罐体及引出管 内颗粒还有些许剩余,颗粒体积分数分布相差不大。所以在 0.3 MPa 输送工况下的引出管出口处压力高于 0.25 MPa 输送工况下的。



由图 7、图 8 数据可知,从引出管入口至引出管 出口压降较大,而且无论是引出管入口还是出口处 的压力都呈现出整体下降趋势。进气口内径小于引 出管内径,高压气体扩散较快,其次随着发料的进 行,罐体内部颗粒的体积分数逐渐减小,导致进入 罐体内部的高压气体能从引出管顺畅流出,导致引 出管入口处压力远大于出口处压力,且压力整体都 呈现出下降的趋势。

将3种输送工况下对应时刻的压力代入式(6)。

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{8} \frac{P_{\lambda \Box} - P_{\Box \Box}}{P_{\lambda \Box}}}{8} \tag{6}$$

可得输送压力为 0.25、0.3、0.35 MPa 时从引出 管入口处至出口处,压力分别降低了 97.1%、96.8%、 98.1%,在 0.3 MPa 输送压力下压力降低最小。

### 3.3 气固两相速度

分析引出管入口及出口处的气固两相速度变化 情况,通过不同时刻的引出管入口处的颗粒速度能够 预测仓泵罐体内部颗粒的湍流水平,从而能得到同时 兼顾稳定性及高效性的输送工况。

#### 3.3.1 气相速度

图 9 为引出管入口处气相速度的变化情况。由图 9 中数据可知, 0.35 MPa 的输送工况下, 10 s 之前气

速在合理范围内波动,而在 10 s 之后,由于其仓泵罐 体内部物料即将输送完毕,高压气体扩散较快,故出 口处气速逐渐增大。在 0.25 MPa 及 0.3 MPa 的输送 工况下,14 s 之后引出管入口气速才有显著增大的趋 势,主要是此两者输送压力相对较小从而发料过程较 慢,故导致入口处气速较小。





图 10 为引出管出口处气相速度变化情况,在 0.35 MPa 输送工况下,10 s之前出口处气速在缓慢 增加,10 s之后由于颗粒物料即将输送完毕,并且高 压气体经引出管逐渐膨胀,导致出口处气速增大较 快。在 0.3 MPa 输送工况下,用时14 s时物料被输送 完毕,在此之前气速缓慢波动,而14 s之后气速增大 的趋势明显。相同时刻下,引出管出口处的气速小于 入口处的,气固动能完成了相互的转化导致入口处的 气相速度高于出口处的。



图 10 引出管出口气速 Fig.10 Outlet speed of extraction pipe

### 3.3.2 固相速度

图 11 为不同输送工况下引出管入口处颗粒速度

变化情况。由图 11 可知,在 0.35 MPa 输送工况下, 在 12 s之前颗粒速度先经历一个先微微上升后下降 的趋势;在 12 s之后由于物料即将输送完毕,仓内剩 余颗粒较少,高压气体在引出管处膨胀较快,进而将 气体的动能转化为颗粒的动能,导致在 0.35 MPa 输 送工况下最后时刻引出管入口处颗粒速度阶跃式增 大。由于颗粒速度过高,导致颗粒与管壁之间及颗粒 之间碰撞较为激烈,动能损耗较大,从而造成最后时 刻引出管出口处的颗粒速度小于入口处。



extraction pipe

由图 11、图 12 可知,在 0.25 MPa 及 0.3 MPa 的 输送工况下,在相同的时刻,引出管出口处的颗粒速 度大于入口处的。主要是由于高压气体携带物料颗粒 沿引出管运动,虽然经历 2 处弯管及颗粒间的碰撞损 耗了一部分动能,但是气速始终高于颗粒速度,故颗 粒一直处于加速的过程中,从而出口处颗粒的速度高 于入口处颗粒的速度。 第44卷 第13期

## 4 结语

本文对 3 种不同输送工况下的仓泵式气力输送 小麦颗粒进行了仿真模拟,分析比较了相同时刻下仓 泵罐体及引出管内颗粒的体积分数、引出管入口及出 口处的气固两相速度,得出如下结论。

1)在其他条件相同时,设置进气口压力分别为0.35、0.3、0.25 MPa,当进气口压力为0.35 MPa 时,物料最先被发料完毕,表明进气口压力越大发 料越快。

2)随着时间的增长,由于罐体内部物料逐渐减 少,引出管入口及出口处的气固两相静压整体呈现出 下降趋势,且当输送压力过高或过低时,都有可能造 成压力损失较大,增加生产成本造成浪费。其中进气 口压力为 0.3 MPa 时,压力损失最小。

3)相同时刻下,引出管入口处的气相速度高于 出口处的气相速度,而引出管入口处的颗粒速度小于 出口处的颗粒速度,气固两相动能完成了相互转化。

#### 参考文献:

[1] 黄标. 气力输送[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 13-15.

HUANG Biao. Pneumatic Transport[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1984: 13-15.

- [2] 刘宗明,段广彬,赵军. 低速高能效的浓相气力输送 技术[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(5): 36-40.
  LIU Zong-ming, DUAN Guang-bin, ZHAO Jun. Low Speed High Efficiency Dense Phase Pneumatic Conveying[J]. China Powder Science and Technology, 2005, 11(5): 36-40.
- [3] 赵军, 胡寿根, 刘宗明, 等. 密相气固两相流管道气 力输送的阻力特性[J]. 发电设备, 2005, 19(1): 1-6.
  ZHAO Jun, HU Shou-gen, LIU Zong-ming, et al. Resistance Characteristics of Dense Phase Gas-Solid Two Phase Flow in Pipes[J]. Power Equipment, 2005, 19(1): 1-6.
- [4] 赵峥,李文平.浓相正压气力输送流动特性研究和系 统选择[J].中国电力,2007,40(11):78-81.
  ZHAO Zheng, LI Wen-ping. Research on Flow Characteristics of Positive Dense Phase Pneumatic Conveyance and System Selection[J]. Electric Power, 2007, 40(11):78-81.
- [5] 王祥通.正压气力输送水泥给料稳定性研究[D].济南: 济南大学, 2015: 18-19.

WANG Xiang-tong. Study on Feeding Stability of Positive Pressure Pneumatic Conveying Cement[D].Jinan: University of Jinan, 2015: 18-19.

- [6] 周甲伟,巴涵,郭小乐,等.密相气力输送弯管压降 分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(3): 85-89.
  ZHOU Jia-wei, BA Han, GUO Xiao-le, et al. Pressure Drop Analysis of Bend in Dense Phase Pneumatic Conveying[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(3): 85-89.
- [7] 林珊. 基于 PLC 的气力输送控制技术[D]. 福州: 福州 大学, 2016: 20-21.
  LIN Shan. Pneumatic Conveying Control Technology based on PLC[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016: 20-21.
- [8] 连学通. 气力输送系统及其设备的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009: 40-43.
   LIAN Xue-tong. Research on Pneumatic Conveying System and Its Equipment[D].Hefei: Hefei University of Technology, 2009: 40-43.
- [9] 王燕丰. 典型气力输送给料装置内部气固两相流动特 性数值研究[D]. 天津:河北工业大学, 2018: 31-33.
   WANG Yan-feng. Numerical Study on Gas-solid Two-phase Flow Characteristics in Typical Pneumatic Conveying Feeder[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018: 31-33.
- [10] 陈隆,崔豫泓,刘羽,等. 仓泵流态化浓相输灰数值 模拟[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(4): 11-14.
  CHEN Long, CUI Yu-hong, LIU Yu, et al. Numerical Simulation of Dense Phase Pneumatic Conveying for Fluidizing Transporter[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 11-14.
- [11] 刘强,段广彬,王勇,等.上引流态化气力输送仓泵 发料过程的数值模拟[J].济南大学学报(自然科学版), 2013,27(3):298-302.
  LIU Qiang, DUAN Guang-bin, WANG Yong, et al. Numerical Simulation of Sending Process of Upward Fluidization Silo Pump in Pneumatic Conveying[J].

Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2013, 27(3): 298-302.

[12] 冯新粮. 一种低比转速离心水泵叶轮的改进设计[D].
天津: 天津理工大学, 2010: 60-63.
FENG Xin-liang. Improved Design of a Centrifugal
Pump Impeller with Low Specific Speed[D].Tianjin:

Tianjin University of Technology, 2010: 60-63.

[13] 林亮成,郑忠,陈伟,等.不同曳力模型对鼓泡床内 气固两相流的模拟研究[J].化学反应工程与工艺, 2010,26(5):390-398.

LIN Liang-cheng, ZHENG Zhong, CHEN Wei, et al. A Simulation Study of Gas-Solid Two Phase Flow in a Bubbling Fluidized Bed with Various Drag Force Models[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2010, 26(5): 390-398.

[14] 武恒,金亚丹,康守国. 气固流化床 CFD 模拟曳力模型的选用及验证[C]// Ansys 中国技术大会, 2014.
 WU Heng, JIN Ya-dan, Kang Shou-guo. Selection and Verification of CFD Drag Model for Gas-solid Fluidized Bed

Simulation[C]// China Technology Conference, 2014.

- [15] WEN C Y, YU Y H. A generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity[J]. Aiche Journal, 1966, 12(1): 12-15.
- [16] ERGUN S. Fluid Flow through Packed Columns[J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 1952, 48(2): 89-94.
- [17] 王振华. 仓储粮堆湿热传递过程的数值模拟与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 13-18.
  WANG Zhen-hua. Numerical Simulation and Experimental Study on Moisture and Heat Transfer Process of Storage Grain Stack[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 13-18.

责任编辑:曾钰婵