

自动化与智能化技术

基于气固耦合散粮旋流输送弯管流场特性研究

尚坤, 李永祥*, 宋海豪, 徐雪萌, 贾长学

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 降低粮食颗粒输送中对弯管的磨损程度。**方法** 引入旋流输送, 设计一种侧向补气起旋装置。侧向起旋装置中心轴线与主管道中心轴线的夹角分别为 45° 、 55° 、 65° , 主管道多相流速度固定为 20 m/s, 侧向起旋装置气流速度分别为 20、30、40 m/s。基于散粮气力输送试验平台结合 Fluent 软件进行分析, 采用 CFD-DEM 对粮食颗粒在弯管内输送情况进行仿真, 并对比压降、颗粒分布、螺旋迹线等指标。**结果** 发现侧起旋装置与主管道夹角为 55° , 侧起旋装置气流速度为 30 m/s 时, 颗粒螺旋前进, 明显减小与管壁的磨损, 输送效果最优, 经试验验证, 与仿真结果一致。**结论** 文中设计的装置明显降低了粮食颗粒输送中对弯管的磨损, 运输效果良好。

关键词: 粮食颗粒; 弯管磨损; 起旋装置; CFD-DEM

中图分类号: TB48; TH22 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)05-0180-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.05.022

Field Flow Characteristics of Grain Particle Swirl Conveying Bend Based on Gas-solid Coupling

SHANG Kun, LI Yongxiang*, SONG Haihao, XU Xuemeng, JIA Changxue

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

ABSTRACT: The work aims to reduce the bend wear in the transportation of grain particles. Swirling conveying was introduced and a lateral air supplement rotation device was designed. The angle between the central axis of the lateral rotation device and the central axis of the main pipeline was 45° , 55° , and 65° , respectively. The multiphase flow velocity of the main pipeline was fixed at 20 m/s, and the airflow velocity of the lateral rotation device was 20, 30 and 40 m/s. CFD-DEM was used to simulate the transportation of grain particles in a bend, and indicators such as pressure drop, particle distribution, and spiral traces were compared. When the angle between the side rotation device and the main pipeline was 55° , and the airflow speed of the lateral rotation device was 30 m/s, the particles showed spiral forward, significantly reducing the wear on the pipe wall, and the transportation effect is the best. After experimental verification, it was consistent with the simulation results. The device designed in this paper can obviously reduce the wear on the bend during grain conveying, and has good transportation effect.

KEY WORDS: grain particle; bend wear; rotation device; CFD-DEM

根据 2022 年中国国家统计局统计, 国内粮食生产总量为 68 653 万 t, 相比 2021 年粮食生产总量增长 368 万 t, 涨幅为 0.5%^[1]。粮食生产总量的持续增

长确保了国内的粮食安全^[2], 为我国经济大发展奠定了基础。粮食产量及进出口量的增长, 同时带来了粮物流的快速增长, 散粮运输作为粮食运输的

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划 (2022YFD2100201)

*通信作者

关键环节,合适的运输方式对粮食安全起着重要作用^[3]。气力输送是粮食与环境无交互运技术^[4-5],对实现粮食的减损、绿色运输,加快推进我国粮食物流的发展有着重要意义^[6-7]。物料在气力输送过程中,在气流的吸卷携带作用下进行输送,在途经弯管时,由于物料运动方向改变,在弯管处物料与管壁会发生多次碰撞,其压力、速度产生巨大的变化,从而引起流体运动不稳定,随之会带来颗粒的破碎与管壁的磨损问题。因此充分掌握弯管的磨损机理,合理进行结构设计,选取优异的参数,对减少弯管处颗粒对管道的磨损,保持颗粒完整运输有着重要的意义。

在国外,2014 年澳大利亚学者 Li 等^[8]通过 CFD-DEM 耦合方法研究了颗粒摩擦因数和恢复系数对水平气力输送的影响。结果表明,当摩擦因数增加后,颗粒速度随之减小,而颗粒浓度及系统压降随之增加,恢复系数对颗粒速度、浓度以及系统压降影响较小。2018 年英国学者 Kotzur 等^[9]总结了一系列稀相气力输送现象,发现管道磨损与颗粒破碎密切相关;输送过程中同一颗粒会显示出不同的强度分布,破碎机理受输送条件影响;目前仍缺少预测稀相气力输送中颗粒破碎的通用方法和模型。以色列学者 Santo 等^[10-11]通过高速摄像机测量了密相气力输送系统中的颗粒速度与分布,结果表明,颗粒速度随气流速度的增大呈线性增长。伊朗学者 Bankermani 等^[12]在 2018 年对水平气力输送系统中弯管处最大磨损量及磨损速率进行研究,分别对水平入口及出口的弯管以及垂直入口与出口弯管进行数值模拟仿真分析。研究发现,水平弯管的最大磨损速率大于垂直弯管的,但垂直弯管的最大磨损量大于水平弯管的。以色列学者 Tripathi 等^[13]在 2019 年对弯管二次加速区颗粒速度进行研究,并提出了“弯曲点”的概念。研究发现,颗粒在垂直管中,低于沉降速度时无法输送;在垂直方向上,较大弯径比的颗粒速度损失最大,颗粒速度在出口处最小;进口颗粒速度及颗粒是否处于稳态决定出口颗粒速度。通过文献可知,国外学者做了大量研究,但针对弯管处结构优化及参数优化方面研究相对较少。

在国内,常州大学卢洲等^[14]在 2011 年对不同弯径比的 90°弯管输送颗粒进行计算,研究发现,在水平夹角约 30°时颗粒与管壁发生碰撞,沿管壁上升一段之后抛落,随着弯径比的增大抛落点降低,柱状颗粒与球形颗粒变化趋势在输送过程中相似,球形颗粒的悬浮速度大于柱状颗粒的。中国矿业大学 Zhou 等^[15-16]在 2017—2018 年对稀相气力输送中管道结构、旋流强度、颗粒形状对颗粒破碎及弯管磨损的影响进行了研究。结果表明,弯管方向对磨损位置及最大磨损率均有影响,随着颗粒球度变化平均磨损率也随之变化;

颗粒破碎与系统能量损失呈正相关,随着弯管半径及旋流强度的增加颗粒完整性增加;水平弯管系统能量变化主要由曲率半径主导。2019 年中国矿业大学 Ji 等^[17]提出一种气流速度、颗粒质量流率、提升角等因素四向耦合法,用于计算弯管输送物料的流场。研究发现,稀相气力输送中气流速度对弯管压降影响最大;在 30°~45°存在使弯头压降最小的最佳角度;颗粒在 90°弯管内碰撞区域取决于弯径比及曲率半径,与颗粒浓度与气流速度无关。中国科技大学封凯等^[18]在 2021 年对气力输送中弯管易磨损位置和原理采用 ETC 技术结合图层模型的方法进行研究。研究发现,易磨损位置在气速较低时出现在截面圆心弯管管壁映射位置,随着气速的增大,映射位置逐渐下移,移动至一定位置时稳定于该位置;弯径比及颗粒粒径越小,磨损位置下移时的临界气流速度越小。通过文献可知,国内学者大多针对弯管最大磨损位置进行研究,或是改变流速以降低磨损,研究结果相对孤立。

在进行气力输送时,散粮颗粒对管道壁面的冲刷磨损不可避免,尤其在弯管处磨损更为严重,会对弯管结构件造成极大的损耗,众多学者通过一系列的方法来缓解弯管的磨损,如降低曲率半径、降低颗粒输送速度等,这些方法在减缓弯管磨损的同时会带来工作空间增大、输送效率降低等新的问题。改变传统弯管的结构不失为一种新的可行方法,但相关研究相对较少^[19-20]。本文将设计一种新的旋流输送装置,在弯管处引入旋流输送新方法以降低弯管磨损问题。针对弯管处引入旋流输送的方法研究在国内尚属空白。

1 材料与装置

材料选用的是河南郑州 26 号新麦。麦粒属于三轴不等颗粒^[21],麦粒长轴、中轴、短轴测量图如图 1 所示。根据表 1 中小麦的统计分析结果,在模拟时可按正态分布生成,如图 2 所示。

设计了一种旋流输送散粮试验系统,如图 3 所示。工作原理为空气压缩机压缩空气之后经过冷干机

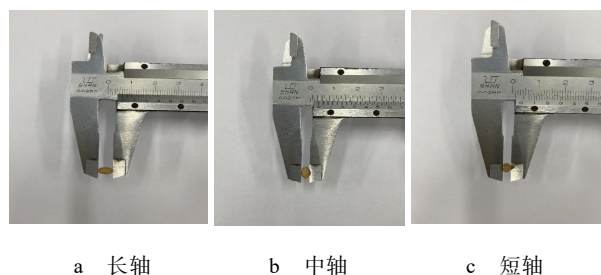


图 1 小麦三轴尺寸测量
Fig.1 Three axis dimensions of wheat

表1 小麦三轴统计分析结果
Tab.1 Three axis statistical analysis results of wheat

参数	长轴/mm	中轴/mm	短轴/mm
最大值	7.62	4	3.72
最小值	4.02	2.36	2.38
均值	6.2	3.1	2.9
标准差	0.37	0.3	0.22

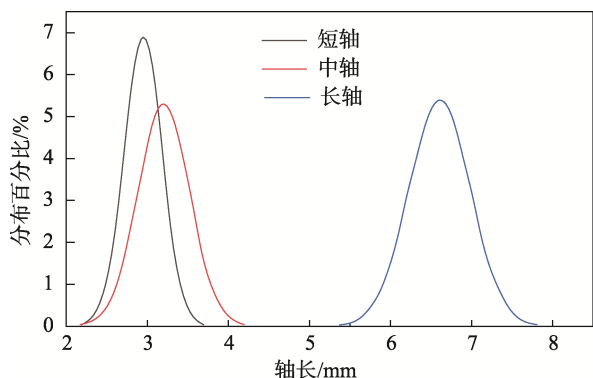
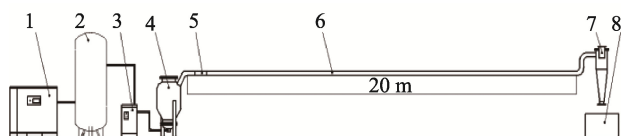


图2 麦粒轴长分布
Fig.2 Distribution of grain axis length



1.空气压缩机; 2.储气罐; 3.空气冷干机; 4.仓泵;
5.起旋装置; 6.试验管道; 7.旋风分离器; 8.料仓。

图3 散粮管道气力旋流输送试验系统
Fig.3 Schematic diagram of pneumatic cyclone conveying experimental system for bulk grain pipelines

进入仓泵, 粮食颗粒与空气在仓泵中进行充分的流化之后进入旋流试验管道, 随后进入旋风分离器, 最终粮食进入料仓。

在输送管道最大磨损弯管处设计了侧向起旋装置 (即图3中的6与7连接处的弯管位置), 管道直径为0.1 m, 侧切补气管直径为0.1 m, 内置六叶螺旋叶片, 气流沿螺旋叶片进气产生螺旋流进入主管道, 使得粮食颗粒在途经弯管时螺旋前进减少摩擦。侧向补气起旋装置中心轴夹角与主管道中心轴夹角分别为45°、55°、65°, 如图4所示。侧向补气管

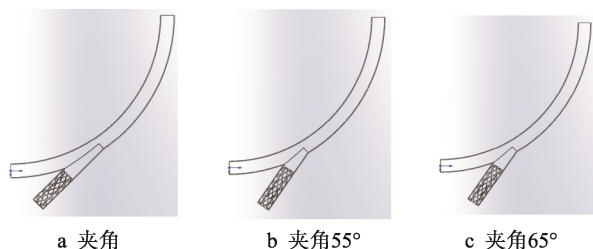


图4 不同夹角起旋装置
Fig.4 Rotation devices with different angles

起旋装置气流速度分别为20、30、40 m/s, 主管道多相流入射速度固定为20 m/s。

2 数学建模

2.1 CFD-DEM 建模

采用欧拉-拉格朗日耦合方法对系统建模来模拟粮食的气力输送过程, 将固体颗粒散粮建为离散相, 将气相建为连续相, 并计算颗粒与壁面、颗粒与颗粒的碰撞。通过相间的质量和动量来实现耦合。本文研究固相通过每个颗粒的速度、位置、线性关系来实现, 气相通过定义流场中速度、压力、轨迹来描述。用气相计算单元中的局部平均变量表示的动量守恒和质量守恒方程的求解为^[22]:

$$\frac{\partial(\rho\xi)}{\partial t} + \nabla(\partial\xi u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\xi u)}{\partial t} + \nabla(\partial\xi u) = -\xi \nabla p + \nabla(\xi \tau) + (F_D + F_L + F_M) + \xi \rho g \quad (2)$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m³; u 为气体速度, m/s; τ 为气体应力张量, N/m²; ξ 为气体的体积分数; g 为重力加速度, m/s²; p 为气体压力, N/m²; F_D 、 F_L 和 F_M 分别为阻力、升力和马格努斯力, N。

粮食颗粒的平移运动和旋转运动分别用以下方程来描述:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = G_p + F_D + F_L + F_M + F_C \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{T_p}{I_p} \quad (4)$$

式中: m_p 为颗粒质量, kg; u_p 为颗粒速度, m/s; G_p 为重力, N; I_p 为颗粒惯性矩, m⁴; ω_p 为颗粒角速度, rad/s; T_p 为颗粒表面旋转转矩, N·m; F_c 为接触力, N。

由 ERGUN S 和 WEN C Y 等模型给出的颗粒上的阻力 F_D 的计算方法为:

$$F_D = \frac{\beta V_p |u - u_p| (u - u_p)}{1 - \xi} \quad (5)$$

式中: V_p 为一个粒子的体积, m³; β 为气-固态阻力系数, 其计算方法为:

$$\beta = \begin{cases} \frac{150(1-\xi)^2 u}{\xi d_p^2} + \frac{1.75(1-\xi)\rho}{d_p} & \xi < 0.8 \\ \frac{3}{4} C_D \rho \xi^{-1.65} (1-\xi) |u - u_p| & \xi \geq 0.8 \end{cases} \quad (6)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.5 \\ \frac{24(1.0 + 0.25 Re^{0.687})}{Re} & 0.5 \leq Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (7)$$

$$Re = \frac{\xi \rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (8)$$

式中: d_p 为粒子的等效直径, m; Re 为雷诺数; C_D 为阻力系数; μ 为气体的动态黏度, kg/ms。

萨夫曼力 F_L 由式 (9) [23] 计算。

$$F_L = 1.61 C_L d_p^2 (\mu \rho)^{0.5} (u - u_p) \left| \frac{du}{dy} \right|^{0.5} \quad (9)$$

式中: du/dy 为平均流量的剪切速率; C_L 为萨费曼升力系数。萨费曼升力系数为:

$$C_L = \begin{cases} (1 - 0.3314\psi^{0.5}) \exp(1 - 0.1Re_s) + 0.3314\psi^{0.5} & Re \leq 40 \\ 0.0524(\psi Re_s)^{0.5} & Re > 40 \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} Re_s = \frac{|u - u_p| d_p}{u_p} \\ Re_G = \frac{\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| d_p^2}{u_p} \\ \psi = \frac{Re_G}{Re_s} \end{cases} \quad (11)$$

马格努斯力由方程 (12) 计算 [24]。

$$F_M = \frac{1}{8} \pi \rho d_p^3 \frac{Re_s}{Re_\Omega} C_M (0.5\omega - \omega_p) (u - u_p) \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} C_M = 0.45 + \left(\frac{Re_\Omega}{Re_s} - 0.45 \right) \cdot \exp(-0.05684 Re_\Omega^{0.4} Re_s^{0.3}) \\ Re_\Omega = \frac{|0.5\omega - \omega_p| d_p^2}{u} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω 为气体的角速度, rad/s。

接触力 F_C 采用软球模型 [25] 建模, 这是一个公认的模型, 已被许多研究详细描述。

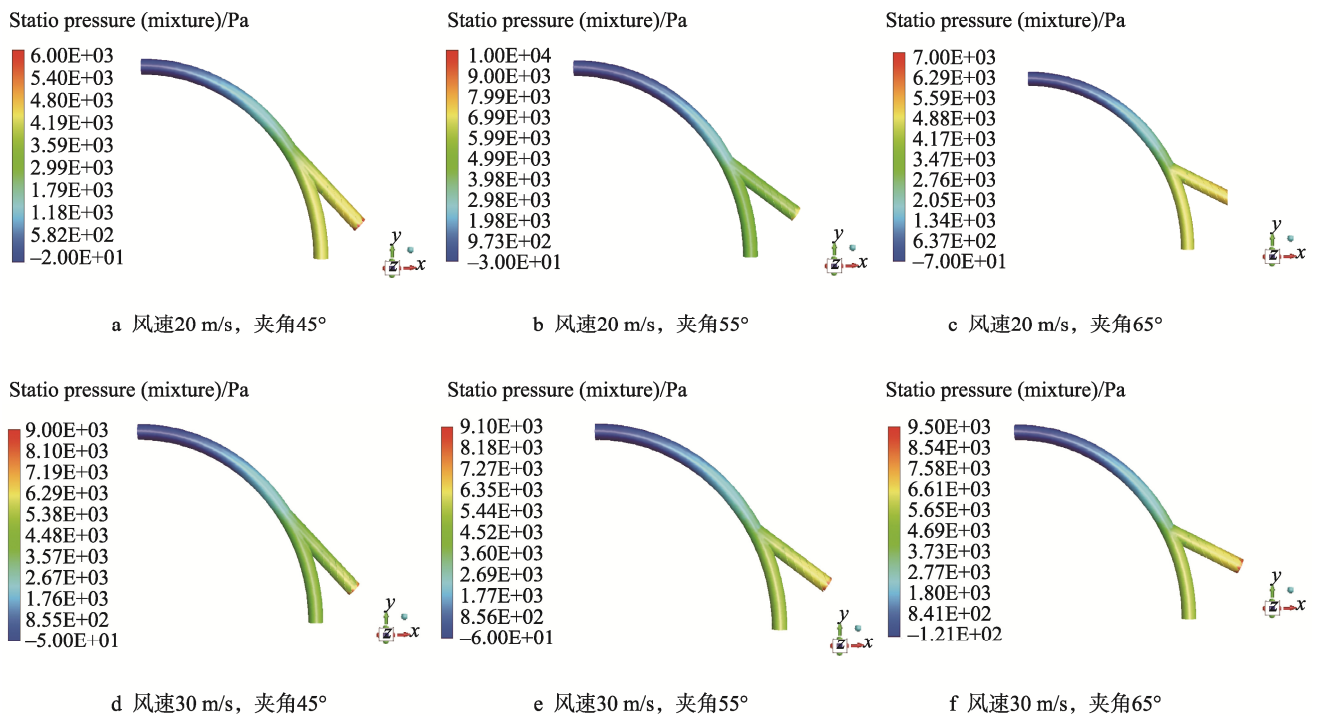
2.2 边界条件

在 CFD-DEM 耦合求解中, 采用 Eulerian-Lagrangian 双边耦合方法进行计算, 同时还采用了 Ergun 和 Wen & Yu 曳力模型、马格努斯升力模型、萨夫曼升力模型和流体引起的扭矩模型 (The Fluid-Induced Torque Model)。在 DEM 中设置计算时间步长为 $1E-5$ s, CFD 计算时间步长设置为 $1E-3$ s。设置颗粒工厂类型为 Unlimited Number, 产生速率为 0.634 kg/s。采用直径为 4 mm、密度为 1350 kg/m³、泊松比为 0.29 、剪切模量为 0.5 GPa 的球形颗粒进行离散相建模。

3 结果与讨论

3.1 最优夹角选取

压降作为系统稳定性的重要评价指标, 当设计或改进现有的装备时, 该指标需要重点考虑。根据研究可知, 气力输送风速一般为 $20 \sim 40$ m/s, 在同一风速下, 将侧起旋装置与主管道的夹角分别设置为 45° 、 55° 、 65° 。分析对比侧起旋装置与主管道衔接处, 弯管即将进入直管处的压降, 对比发现同等条件下, 压降均出现先增后降的趋势, 侧起旋装置与主管道的夹角为 55° 时压降最大, 说明瞬时能耗高, 能量转化率更高, 输送效果更好。同一风速下不同角度压力云图如图 5 所示, 静压降拟合曲线如图 6 所示。



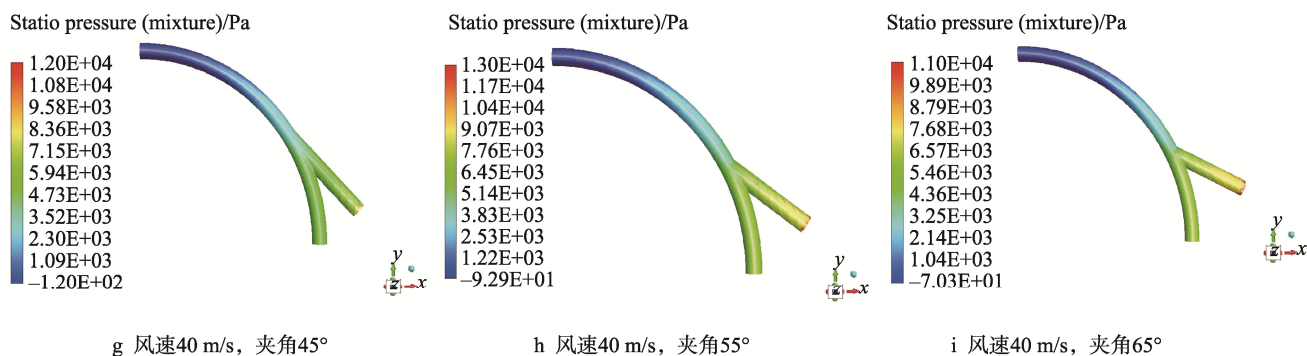


图5 同一风速下不同角度压力云图

Fig.5 Cloud chart of pressure at different angles under the same wind speed

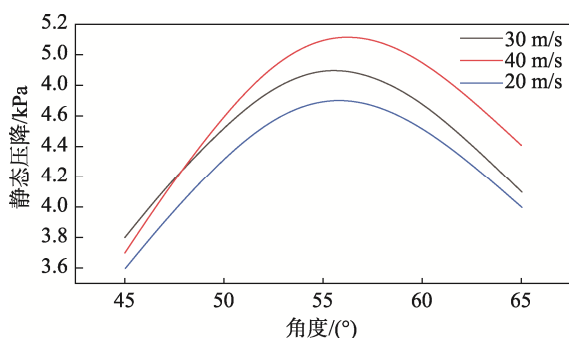


Fig.6 Static pressure drop fitting curve

3.2 最佳风速选取

根据研究可知,多相流的迹线图是反映一个混合流优劣的重要指标,因此通过设置不同参数形成一个矩阵以选取最佳风速参数。在夹角为45°的前提下,分别设置风速为20、30、40 m/s。在夹角为55°和65°

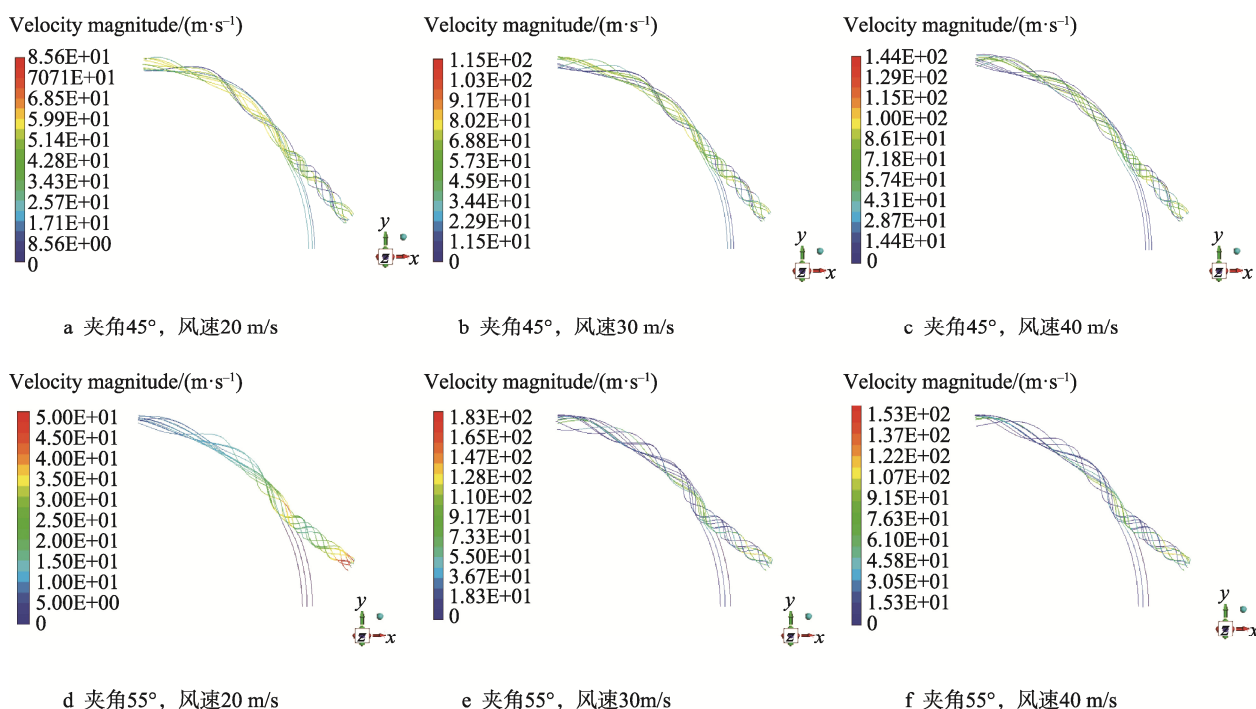
的前提下,同样设置风速分别为20、30、40 m/s。经过对比迹线图发现,在3种不同角度下风速为30 m/s螺旋迹线图均为最优,螺旋距适中,疏密程度均匀。图7为不同参数的螺旋迹线图。

通过上述仿真对比发现,夹角为55°、风速为30 m/s为侧补气起旋装置的最优参数。

3.3 颗粒分布

利用上述仿真最优结果对侧向补气起旋装置进行参数设置并进行仿真,与普通弯管进行对比,结果发现普通弯管中颗粒紧贴管壁滑动,具有较大的摩擦,发现侧向补气起旋装置在参数设置为最优时,颗粒均匀螺旋前进,明显减少与管壁的磨损,效果突出。不同装置效果对比如图8所示。

通过上述仿真,分析输送系统的压力云图与静压降,得出夹角为55°时最优。通过分析螺旋迹线图,得出风速为30 m/s时最优,后经二次仿真验证,验证效果明显。



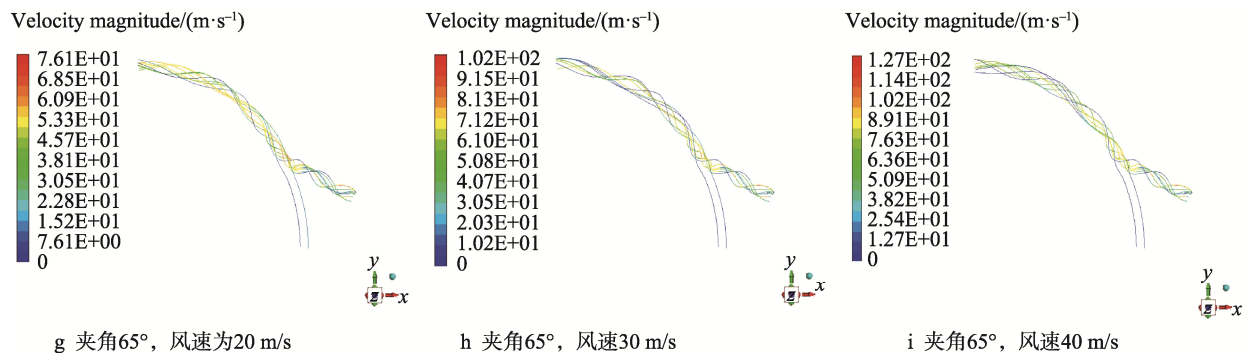


图 7 不同参数的螺旋迹线图
Fig.7 Spiral trace plots with different parameters

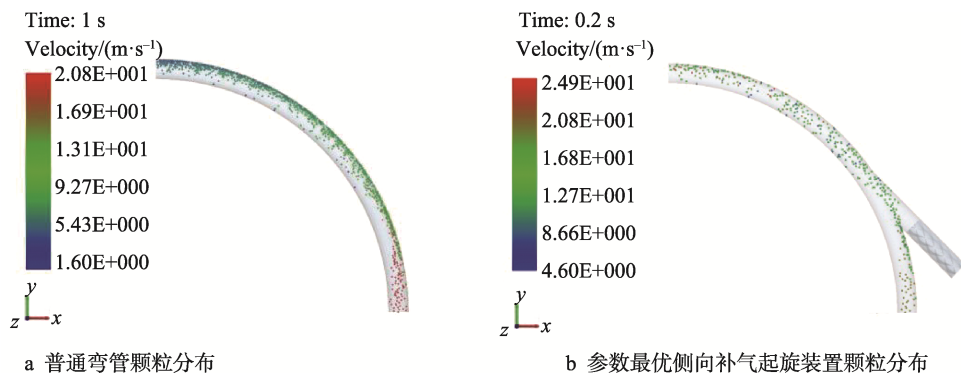


图 8 不同装置效果对比
Fig.8 Comparison of effects of different devices

4 试验验证

搭建试验台验证 CFD-DEM 的准确性, 采用 3D 打印技术打印了夹角为 55°的侧向补气起旋装置, 如图 9 所示。

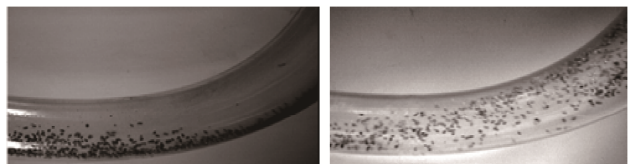
试验平台搭建如图 10 所示, 空压型号为 BK22-8ZG, 储气罐选用安诺能源科技公司 21540300

批次产品, 空气干燥机选用浙江开山净化设备公司 SAD-3SF 产品, 仓泵选用山东延续压力容器有限公司 XY202108100 产品。工作原理为压缩机压缩空气进入储气罐, 储气罐内空气经干燥机进入仓泵为粮食输出提供动力。

分别对普通弯管与侧向补气起旋装置弯管进行测试, 并用高速摄像机抓拍, 结果如图 11 所示。



图 9 3D 打印侧向补气起旋装置
Fig.9 3D printing lateral air supplement rotation device



a 普通弯管颗粒分布
b 侧向补气起旋装置弯管颗粒分布

图 11 不同弯管颗粒分布
Fig.11 Particle distribution in different bends

从图 11 中可以清晰地看出侧补气起旋装置在夹角为 55°, 风速为 30 m/s 的条件下, 与普通弯管对比发现粮食颗粒分布明显优于普通弯管, 颗粒在侧向补气起旋弯管中螺旋分散前进, 能明显减少与管壁的磨损。试验结果与仿真结果一致。

5 结语

本文通过对侧向补气起旋装置进行 CFD-DEM

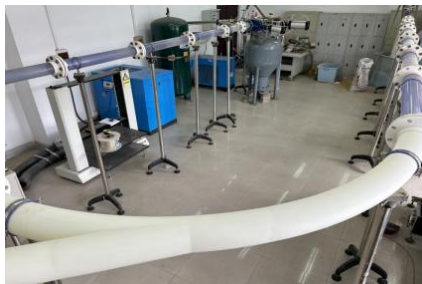


图 10 试验平台搭建
Fig.10 Construction of experimental platform

仿真, 并进行试验验证, 得出以下结论。当采用气力输送粮食时, 针对弯管处磨损问题, 提出了一种在弯管处增加侧向补气起旋装置。采用 CFD-DE 进行仿真, 通过压力、迹线图、颗粒分布等指标, 发现侧向补气起旋装置中心轴夹角与主管道中心轴夹角为 55° 、风速为 30 m/s 时, 颗粒在弯管处螺旋前进, 能有效地解决弯管处磨损问题。最终通过了试验验证, 与仿真结果一致。

参考文献:

- [1] 国家统计局: 国家统计局关于 2022 年粮食产量数据的公告[EB/OL](2022-12-12). http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202212/t20221212_1890928.html.
National Bureau of Statistics: Announcement of the National Bureau of Statistics on Grain Production Data for 2022[EB/OL](2022-12-12). http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202212/t20221212_1890928.html.
- [2] 孙多鑫, 赵贵宾, 刘祎鸿, 等. 关于组建县属国有农场保障国家粮食安全的思考[J]. 甘肃农业, 2022(12): 22-26.
SUN D X, ZHAO G B, LIU Y H, et al. Thoughts on Establishing County-Owned State-Owned Farms to Ensure National Food Security[J]. Gansu Agriculture, 2022(12): 22-26.
- [3] 刘杰. 运能释放条件下铁路既有繁忙干线货运产品布局规划理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LIU J. Study on the Theory and Method of Freight Product Layout Planning of Existing Busy Trunk Lines under the Condition of Capacity Release[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [4] 程克勤. 气力输送装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
CHENG K Q. Pneumatic Conveying Device[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [5] 余洲生. 气力输送及其应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
YU Z S. Pneumatic Conveying and Its Application[M]. Beijing: China Communications Press, 1989.
- [6] 刘冬林. 绿色物流的制度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
LIU D L. Research on the System of Green Logistics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [7] 赵会永. 粮食颗粒流动特性的试验研究与数值模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
ZHAO H Y. Experimental Study and Numerical Simulation of Grain Particle Flow Characteristics[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [8] LI K, KUANG S B, PAN R H, et al. Numerical Study of Horizontal Pneumatic Conveying: Effect of Material Properties[J]. Powder Technology, 2014, 251: 15-24.
- [9] KOTZUR B A, BERRY R J, ZIGAN S, et al. Particle Attrition Mechanisms, Their Characterisation, and Application to Horizontal Lean Phase Pneumatic Conveying Systems: A Review[J]. Powder Technology, 2018, 334: 76-105.
- [10] SANTO N, PORTNIKOV D, ESHEL I, et al. Experimental Study on Particle Steady State Velocity Distribution in Horizontal Dilute Phase Pneumatic Conveying[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 187: 354-366.
- [11] SANTO N, PORTNIKOV D, TRIPATHI N, et al. Experimental Study on the Particle Velocity Development Profile and Acceleration Length in Horizontal Dilute Phase Pneumatic Conveying Systems[J]. Powder Technology, 2018, 339(1): 368-376.
- [12] BANAKERMANI M R, NADERAN H, SAFFAR-AVVAL M. An Investigation of Erosion Prediction for 15 to 90 Elbows by Numerical Simulation of Gas-Solid Flow[J]. Powder Technology, 2018, 334: 9-26.
- [13] TRIPATHI N M, SANTO N, LEVY A, et al. Experimental Analysis of Velocity Reduction in Bends Related to Vertical Pipes in Dilute Phase Pneumatic Conveying[J]. Powder Technology, 2019, 345: 190-202.
- [14] 卢洲, 刘雪东, 潘兵. 基于 CFD-DEM 方法的柱状颗粒在弯管中输送过程的数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(5): 65-69.
LU Z, LIU X D, PAN B. Numerical Simulation of Cylindrical Particles Conveying in Curved Ducts Using CFD-DEM Coupled Approach[J]. China Powder Science and Technology, 2011, 17(5): 65-69.
- [15] ZHOU J, LIU Y, LIU S, et al. Effects of Particle Shape and Swirling Intensity on Elbow Erosion in Dilute-Phase Pneumatic Conveying[J]. Wear, 2017, 380/381: 66-77.
- [16] ZHOU J, LIU Y, DU C, et al. Numerical Study of Coarse Coal Particle Breakage in Pneumatic Conveying[J]. Particuology, 2018(3): 204-214.
- [17] JI Y, LIU S Y. Effect of Secondary Flow on Gas-Solid Flow Regimes in Lifting Elbows[J]. Powder Technology, 2019, 352: 397-412.
- [18] 封凯, 聂伟, 陈凤官, 等. 气力输送系统中弯管的易磨损位置及其机理分析[J]. 化学反应工程与工艺, 2021, 37(2): 106-112.
FENG K, NIE W, CHEN F G, et al. Positioning the Ero-

- sion Wear of Bend Pipes in the Pneumatic Conveying System[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2021, 37(2): 106-112.
- [19] 李志华, 刘艳青, 焦雷, 等. 基于优化炭黑密相气力输送系统的设计[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 41-44.
LI Z H, LIU Y Q, JIAO L, et al. Design of Optimizing the Dense Pneumatic Conveying System for Carbon Black[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(2): 41-44.
- [20] 王巍, 管清亮, 张建胜. 加压粉煤气力输送试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(2): 277-281.
WANG W, GUAN Q L, ZHANG J S. Experimental Study of Dense-Phase Pneumatic Conveying of Pulverized Coal at Elevated Pressures[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(2): 277-281.
- [21] FAN L S, ZHU C. Principle of Gas-Solid Two-Phase Flow Upper/(US)[M]. Beijing: Science Press, 2018: 3-4.
- [22] CHU K W, WANG B, XU D L, et al. CFD-DEM Simulation of the Gas-Solid Flow in a Cyclone Separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66: 834-847.
- [23] JI Y, LIU S Y, LI J P. Experimental and Numerical Studies on Dense-Phase Pneumatic Conveying of Spraying Material in Venturi[J]. Powder Technology, 2018, 339: 419-433.
- [24] LI J P, ZHOU F, YANG D L, et al. Effect of Swirling Flow on Large Coal Particle Pneumatic Conveying[J]. Powder Technology, 2020(362): 745-758.
- [25] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Geotechnique, 1979(29): 47-65.