

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.037

基于 CFD-DEM 耦合的装车站溜槽设计参数优化

陈淑云, 左迎光

(国电建投内蒙古能源有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘要:为提高装车站溜槽的物料分布均匀性,降低粉尘质量浓度,提出基于 CFD-DEM 耦合的装车站溜槽设计参数优化方法。分析装车站溜槽的工作流程,采用 CFD-DEM 耦合的方法建立装车站溜槽有限元模型;建立卸料方程、物料与溜槽、挡板的撞击方程、滑行方程和运动方程,同时结合有限元模型展开颗粒运动分析和压力流场分析;根据分析结果优化装车站溜槽物料对应的动堆积角参数、流线控制参数、物料入射角参数、挡板与物料之间的摩擦角参数,实现优化物料流、物料速度、溜槽横截面积和物料重力分布。实验结果表明:所提方法设计溜槽的物料分布均匀性高,并且粉尘质量浓度降低至 912 mg/m^3 。

关键词: CFD-DEM 耦合;装车站溜槽;颗粒运动分析;压力流场分析;参数优化

中图分类号: TH221 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)01-0180-05

Optimization of Design Parameters of Loading Station Chute Based on CFD-DEM Coupling

CHEN Shuyun, ZUO Yingguang

(SDIC Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Ordos 017209, China)

Abstract: In order to improve the material distribution uniformity and reduce the dust concentration of the chute at loading station, a design parameter optimization method for the chute at the loading station is proposed based on CFD-DEM coupling. The work flow of installing station chute is analyzed, and the finite element model of installing station chute is established by CFD-DEM coupling method. The unloading equation, the impact equation of material with chute and baffle, the sliding equation and the motion equation are established, and meanwhile, the particle motion analysis and pressure flow field analysis are carried out based on the finite element model. According to the analysis results, the parameters of dynamic stacking angle, streamline control parameter, incidence angle parameter, friction angle parameter between baffle and material corresponding to the materials installed in the station chute are optimized to realize the optimization of material flow, material speed, chute cross-sectional area and material gravity distribution. The experimental results show that the material distribution uniformity of the chute designed by the proposed method is high, and the dust mass concentration is reduced to 912 mg/m^3 .

Keywords: CFD-DEM coupling; loading station chute; particle motion analysis; pressure flow field analysis; parameter optimization

0 引言

高自动化是定量装车系统未来发展的方向,快速定量装车可以减少装卸物料所需的时间,提高工作效率。定量装车系统由多种机械设备构成,包括散装装车溜槽、缓冲仓、钢结构支撑塔架和称重仓等。带式输送机^[1]将待装物料运输到快装系统后,会在封闭的环境中缓存并称重物料,之后利用装车溜槽将定重物料运输到车厢中。优化装车站溜槽设计的相关参数,可以提高溜槽内物料分布均匀性,同时降低物料装车所需的时间。但是现阶段装车站设计溜槽装车后的物料质量分

布不均匀,并且粉尘质量浓度较高,针对该问题,相关学者进行了研究。

沈佳兴等^[2]采用 ANSYS Workbench 软件根据参数优化理论优化设计溜槽参数,并对优化后溜槽的声学性能、谐响应性和抗冲击性能展开验证。但是该方法在实际应用后其粉尘质量浓度较高。叶方平等^[3]结合 Archard 磨损模型和 Herz-Mindlin 无滑动接触模型模拟分析装载溜槽在不同工况和颗粒物料条件下磨损与应力、应变之间的变化情况,根据分析结果对溜槽展开优化。但是该方法存在物料质量分布不均匀的问题。

在上述方法的基础上,为解决其存在的问题,

第一作者简介: 陈淑云(1975—),女,河北承德人,工程师,本科,研究方向为机电自动化,798739680@qq.com。

提出基于 CFD-DEM 耦合的装车站溜槽设计参数优化方法。

1 基于 CFD-DEM 耦合的有限元模型建立

装车站系统的工作流程为:将车厢移动到指定位置,控制设计装车系统打开仓闸门,物料通过设计溜槽运输到下方的车厢内,如图 1 所示。

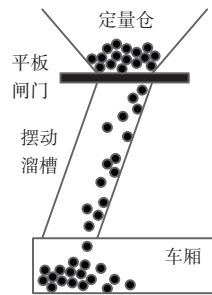


图 1 装车过程

有限元模型设计如下。

1) 设计溜槽建模,利用 Pro/E 三维设计软件设计装车站溜槽模型,将溜槽模型转变为 IGES 格式,以此满足 CFD 求解工具的求解要求^[4]。

2) CFD 仿真参数与边界条件。

装车站溜槽设计参数优化方法通过 Fluent 完成物料下落过程的模拟:

a) 装车站溜槽设计参数选用 RNG-K 模型作为湍流模型;

b) 设置溜槽进口为速度进口,与进口界面之间为垂直关系,设置风速为 0,湍流强度设置为 5%,将风量出口设置为压力出口;

c) 耦合结果可通过 SIMPLC 算法和压力基求解器共同计算得到,同时通过 QUICK 计算压力,在此基础上,采用 CFD 完成流速梯度的耦合;

d) 将上述设置的参数与 EDEM 耦合。

3) 通过下述过程设置 EDEM 边界条件和物理参数^[5-6]:

a) 确定物料颗粒模型、车辆模型和溜槽模型的相关参数,可将参数分为以下两类:第一类碰撞特性参数:滚动摩擦因数、静摩擦因数、物料间作用系数和补偿系数等;第二类物料运动特性参数:剪切模量、泊松比和密度等。

在 EDEM 中设置上述参数,根据车厢板和溜槽的材料属性,完成剪切模量、泊松比和摩擦因数等参数的设置,在溜槽舱内根据物料特征通过离散源程序设定物料及其分布规律、物性参数和粒径大小。

b) 在 EDEM 软件的物理特性选项卡中,选择 Hertz-Mindlin 接触模型作为物料之间的接触模型。

c) 将“y 向”作为重力系数方向,创建新的物料材料,记为“Coal”,将溜槽和车厢壁板的材料记为“Steel”。两种材料的属性见表 1。

表 1 材料属性

材料属性	Steel	Coal
泊松比	0.30	0.28
剪切模量/GPa	79.00	1.97
密度/(kg/m ³)	7 850	1 600

2 物料运动过程分析

1) 颗粒运动分析

物料在装车站溜槽内的运动分为以下 3 个阶段:第 1 阶段为弧形下落;第 2 阶段为碰撞反射;第 3 阶段为稳定运输。

在 $y=300\text{mm}$ 的 zx 平面中,选取 0.1 m、0.3 m 和 0.9 m 这 3 个高度的数据,分析静止空气中物料的运动规律。所设计的最优参数溜槽模型,结果如图 2 所示。

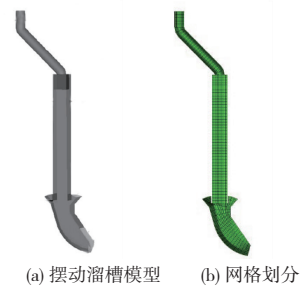


图 2 溜槽最优模型设计

根据设计的溜槽,记录不同高度下物料的平均运动速度变化情况如图 3 所示。

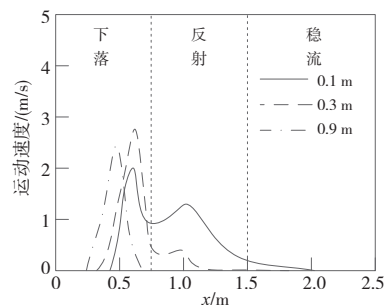


图 3 速度分布

由图 3 可知,物料在下降过程中出现 2 个速度极大值。首个速度极大值出现在羽流核心区

域,在卷吸空气的影响下物料发生扩散运动,方向为四周,物料在扩散过程中的运动速度与扩散范围直径之间呈反比;第2个速度极大值出现在物料第1次与溜槽发生碰撞时的核心区域。不同高度下,物料的质量浓度变化情况如图4所示。

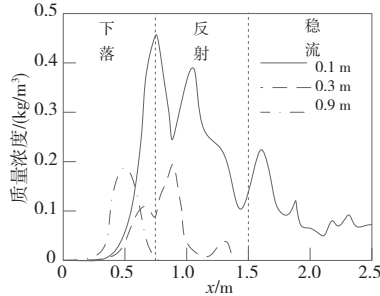


图4 质量浓度变化

分析图4可知,随着高度的增加,极值的位置逐渐向左移动,这一现象符合物料的运动规律:具有水平速度的物料在自由下落阶段呈弧形下落,下降到一定高度时与溜槽传送带发生碰撞并出现反射现象,被弹起的物料扩散范围变大,质量浓度增加,物料进入稳定运输阶段后,质量浓度基本保持不变。

2) 压力流场分析

当输送带附近的空气处于静止状态时,无流动、静止。此时压力分布均匀,属于标准大气压;当输送带处于运动状态时,附近的空气受到物料运动的影响开始流动,流场此时的压力分布状态也发生改变。压力流场在输送带运行状态下的变化情况如图5所示。

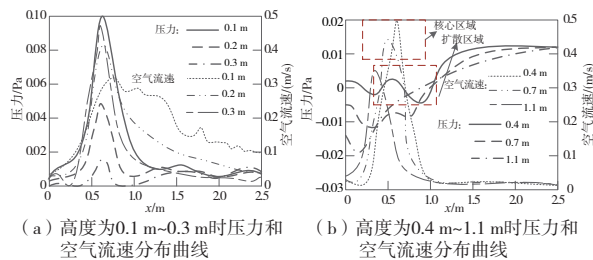


图5 压力、空气流速分布情况

分析图5可知,物料核心区域内存在最大的空气流速和最大的压力值,出现这种现象的主要原因是物料与空气在同一水平面内具有相同运动方向,空气发生运动的前提是物料流运动,物料在扩散时,物料的运动速度与空气的运动速度均不断减小。分析压力变化情况可知,压力极大值不会出现在物料的初始下降阶段,随着物料下降高度的增加,极大值出现的概率增大。

3 优化参数选取

通过上述分析结果可以选择相关优化参数如下:

1) 卸料参数分析

用 R' 表示物料表面最高处对应的曲率半径参数,其计算公式如下:

$$R' = R + \varepsilon_B + r_1(1 - \cos\sigma) \quad (1)$$

式中: ε_B 代表输送带厚度; R 代表滚筒端部对应的半径; r_1 代表堆积状态下的物料对应的曲率半径, σ 由代表物料对应的动堆积角决定。

设 v' 代表物料表面最高处对应的运行速度,不同种类物料的运行速度 v' 不同,其表达式为

$$v' = vR' / (R + \varepsilon_B + j_c) \quad (2)$$

式中: v 代表物料运动到溜槽横截面时对应的平均速度, $v = \omega \left(\frac{m_i g}{\sqrt{k}} \right) \times \left[\frac{1 + e^\omega}{1 - e^\omega} \right]$, $\omega = -2t \sqrt{\frac{kg}{m_i}}$ 。

其中, g 代表重力加速度, m_i 代表不同种类物料质量, k 代表常数, t 代表时间, ω 代表物料在给定时间内所受到的重力作用的影响因子。式(2)不同种类物料的运行速度中, j_c 代表流线控制参数,可通过下式计算得到:

$$j_c = \frac{4r_1 [\sin^3\sigma / (2\sigma - \sin 2\sigma)]}{3} - r_1 \cos\sigma \quad (3)$$

设 $R_c = R + \varepsilon_B + j_c$ 代表物料质心在原点为滚筒中心条件下的高度,设置 $L = v^2 / T_c g$ 。利用 $L = v^2 / R_c g$ 将物料的卸载分为重力式卸载和离心式卸载^[7]。

在 $L \geq 1$ 时,物料表面最高处运动轨迹 (x, y) 如下:

$$\begin{cases} x = v't \cos \chi - R' \sin \chi \\ y = -v't \cos \chi + \frac{gt^2}{2} - R' \cos \chi \end{cases} \quad (4)$$

式中 χ 代表传送带首端与 x 轴之间的夹角。

在 $L < 1$ 时,运动轨迹 (x, y) 如下:

$$\begin{cases} x = v't \cos \vartheta - R' \sin \vartheta \\ y = -v't \cos \vartheta + \frac{gt^2}{2} - R' \cos \vartheta \end{cases} \quad (5)$$

式中 ϑ 代表半径 R 与 y 轴的夹角。

2) 物料与溜槽、挡板的撞击分析

通过轨迹分析物料在运动过程中,与溜槽或挡板的撞击,假设发生撞击后,物料不存在弹跳现象,此时:

$$\frac{v_2}{v_1} = \cos\alpha - \sin\alpha \zeta_1 \quad (6)$$

式中: v_2 代表与溜槽面接触后,物料运动的速度;

v_1 代表与溜槽面接触前,物料运动的速度; α 由代表的物料入射角参数决定; ζ_1 代表挡板与物料之间的摩擦角参数。

3) 滑行设计参数分析

以物料微元 dm 为例,物料在运动过程中撞击半径为 r 的挡板后,以速度 v_3 沿挡板做离心运动,此时的动力学方程如下:

$$\begin{cases} M = dm v_3^2 - dm g \sin t \\ dm g \cos t - \tan \zeta_1 M = dm \frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 代表受挡板支持力; t 代表 l 与 x 轴之间的夹角。

4 装车站溜槽设计参数优化

根据上述分析,对装车站溜槽设计参数展开优化。

1) 物料对应的动堆积角参数:物料从高处落下冲击溜槽壁时产生大量的粉尘,因此,需要减小物料下降过程中对溜槽壁的冲击角度和冲击力,从而降低粉尘平均质量浓度。设置物料对应的动堆积角参数在 $15^\circ \sim 20^\circ$,以此降低粉尘的质量浓度。

2) 流线控制参数:在较高运动速度下,物料会发生磨损;在较低运动速度下,物料会粘附在溜槽中,造成溜槽堵塞,根据上述分析,将物料流线控制参数控制在 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 。

3) 物料入射角参数:根据溜槽内物料的运动速度以及输送带的输送能力,通过横截面积 S 表示物料入射角参数:

$$S = \frac{W}{3.6\rho v} \quad (8)$$

式中: W 代表输送带传送的物料总量; ρ 代表物料在溜槽中的堆积密度。

设置过流系数 C ,其计算公式如下:

$$C = \frac{S_1}{S} \quad (9)$$

式中 S_1 代表溜槽截面积。 S 、 S_1 关系如图 6 所示。 C 取 $2.5 \sim 4$ 。

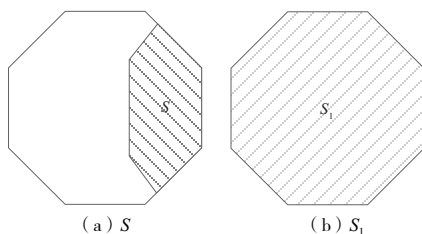


图 6 S 、 S_1 之间的关系

4) 挡板与物料之间的摩擦角参数:在重力的作用下,物料通常聚集在溜槽底板,物料运输到溜槽下游时的截面形状与溜槽截面形状类似。因此,为了避免运输皮带受物料不居中的影响,造成皮带偏移的现象,需要控制溜槽皮带与物料挡板摩擦角参数,并且可以控制物料与溜槽内运输皮带的速度相近,以此降低溜槽的能耗,提高溜槽的运行效率。

5 实验与分析

5.1 实验准备

为验证基于 CFD-DEM 耦合的装车站溜槽设计参数优化方法的有效性,需要展开相关测试。在测试过程中,引入文献[2]方法和文献[3]方法作为对比方法。通过优化前后溜槽中物料的分布情况以及粉尘浓度测试上述方法的优化效果。实验研究对象设备如图 7 所示,其参数如表 2 所示。



图 7 实验研究对象

表 2 实验研究对象设备参数

序号	名称	数值
1	型号	CG-600×500
2	规格/mm	980×1 240
3	冲程/mm	20~200
4	电机功率/kW	1.5
5	电机转速/(r/min)	1 400
6	设计次数/(次/min)	47
7	进料口尺寸/mm	600×600
8	质量/kg	613
9	最大卸物料量/(t/h)	25

5.2 性能分析

1) 物料质量分布

为了精准地分析物料在溜槽中的分布情况,以中心线为基准,将溜槽分为左右两个部分,装车站溜槽优化前的物料质量分布情况如图 8 所示。

现采用基于 CFD-DEM 耦合的装车站溜槽设计参数优化方法、文献[2]方法和文献[3]方法对溜槽参数展开优化,优化后溜槽中的物料分布情况如图 9 所示。

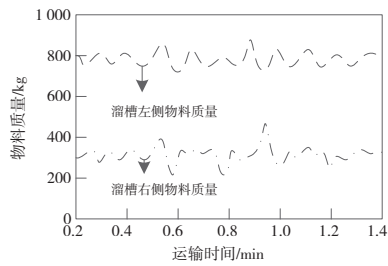


图8 优化前溜槽中物料分布情况

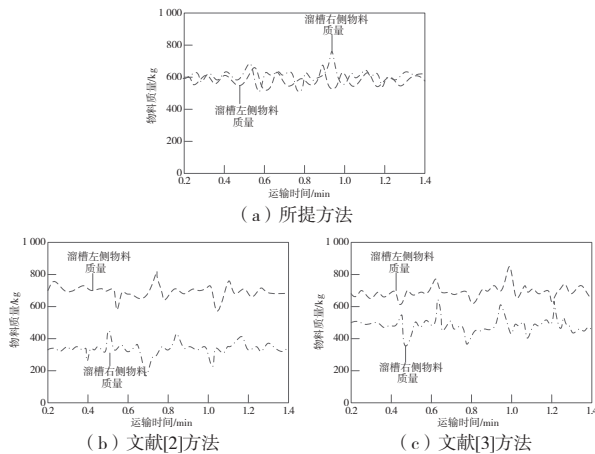


图9 不同方法优化后溜槽中物料分布情况

分析图8和图9可知,在优化前,溜槽左右两侧物料质量不均匀,左侧物料质量远远高于右侧物料质量。在应用所提方法后,溜槽中物料分布情况得到了改善,使溜槽右侧物料质量得到了提高,降低了左侧物料质量,将溜槽左右两侧物料质量均匀分布在600 kg;而文献方法在应用后,溜槽左右两侧物料之质量分布程度有一定的提升,但是远远没有达到均匀分布的程度,其中文献[3]方法较好,但是左侧物料质量仍在670 kg左右,右侧物料质量仍在500 kg左右。对比应用3种方法和优化前的物料质量分布情况可知,本文所提方法的物料质量分布最均匀。因此,该方法有效提升了物料质量分布效果。

2) 粉尘浓度

优化前后的粉尘浓度如表3所示。

表3 优化前后防尘罩内的粉尘平均质量

方法	粉尘平均质量浓度 单位:mg/m ³
优化前	1 536
所提方法	912
文献[2]方法	1 254
文献[3]方法	1 326

通过上述测试可知,采用所提方法对装车站溜槽设计参数优化后,物料在溜槽内分布均匀,且降低了物料运输过程中产生的粉尘质量浓度,所提方法的粉尘平均质量浓度降低到了912 mg/m³,而优化前、文献[2]方法和文献[3]方法的粉尘平均质量浓度分别为1 536 mg/m³、1 254 mg/m³、1 326 mg/m³。3种方法应用后,与优化前相比,粉尘平均质量浓度均得到了降低,而所提方法的降低程度最大。因此,所提方法有效降低了粉尘平均质量浓度。因为所提方法在装车站溜槽优化设计中将物料质心与溜槽质心控制一致,以此保证物料分布均匀,并且通过降低物料的冲击力量和角度,降低物料冲击溜槽壁产生的粉尘。通过上述测试验证了所提方法的有效性。

6 结语

针对目前装车站溜槽存在的物料质量分布不均等问题,提出基于CFD-DEM耦合的装车站溜槽设计参数优化方法,在溜槽有限元模型的基础上分析其运动特性,根据分析结果优化装车站溜槽设计参数,以此提高了物料在溜槽中分布的均匀性,降低了物料运输过程中产生的粉尘,助力快速装车系统的发展。

参考文献:

- [1] 王文杰. 矿用带式输送机的非线性动力学建模研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 131-134.
- [2] 沈佳兴, 徐平, 亓振, 等. 钢-泡沫铝-钢层合结构矿用溜槽减振降噪优化及其性能分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 372-378.
- [3] 叶方平, 邓宏权, 墙月张, 等. 基于FEM-DEM耦合法的转载溜槽磨损研究[J]. 机械设计, 2022, 39(9): 81-86.
- [4] 张勇, 张曦, 万云博, 等. 非结构有限体积CFD计算的网格重排序优化[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(10): 1721-1729.
- [5] 周大鹏, 马学东, 杜昱霖, 等. 喷砂工艺的EDEM-Fluent耦合模拟喷嘴结构参数的研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 192-201, 211.
- [6] 雷港, 余南辉, 范吉军, 等. 基于EDEM-Fluent耦合的米糠碎米分离装置的试验研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 76-83.
- [7] 郭壮, 郑威强, 张立萍, 等. 基于DEM-MBD固沙装备杆式物料输送机构设计与分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 169-177, 187.

收稿日期: 2023-02-02