



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201912067

中图分类号 X701

文献标识码 A

林子杰, 徐潜, 王富江, 等. 皮带通廊转载点数值模拟与除尘系统改造优化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3128-3135.

LIN Zijie, XU Qian, WANG Fujiang, et al. Numeric simulation of conveyor transfer point and optimization of dust removal system in conveyor belt corridors[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3128-3135.

皮带通廊转载点数值模拟与除尘系统改造优化

林子杰¹, 徐潜^{1,2}, 王富江¹, 贺克斌^{2,*}

1. 柏美迪康环境科技(上海)股份有限公司, 上海 200333

2. 清华大学环境学院, 北京 100084

第一作者: 林子杰(1995—), 男, 硕士, 助理工程师。研究方向: 大气污染数值模拟。E-mail: linzijie@126.com

*通信作者: 贺克斌(1962—), 男, 博士, 教授。研究方向: 大气污染与控制。E-mail: hekb@tsinghua.edu.cn

摘要 皮带转载点是皮带通廊内粉尘的主要贡献源。为研究转运溜槽处除尘器吸风口和封闭罩联用的除尘效果, 辅助优化除尘系统设计, 通过计算流体力学(CFD)技术, 借助 ANSYS Fluent 软件的有限体积数值模拟方法, 对由皮带转运溜槽排放造成的皮带通廊内粉尘浓度分布进行数值模拟分析; 考察了除尘负压值和溜槽封闭罩长度对通廊内粉尘质量浓度分布的影响, 并评估了皮带通廊对外部环境的排放贡献。模拟结果表明: 皮带通廊内粉尘排放对外部大气环境存在影响, 如未对皮带转运点进行有效治理, 粉尘排放量较大; 安装皮带封闭罩可增加除尘效率, 但增加幅度存在上限, 最大不超过除尘风量与诱导气流量的比值, 封闭罩不会改变除尘器进风量; 皮带通廊内粉尘质量浓度分布显著, 且与除尘负压及配套皮带封闭罩长度相关。综合上述结果, 转运溜槽除尘系统除尘风量应大于皮带运转时的诱导气流流量, 且封闭罩应自吸风口适当延伸。该研究结果可为皮带转载溜槽既有除尘系统优化改造设计提供有效指导, 以较低成本提升除尘效率。

关键词 皮带通廊; 负压除尘; 皮带封闭罩; 数值模拟

钢铁企业长流程工艺中, 颗粒物无组织排放严重, 年排放总量可超过 17 000 t^[1]。未经治理的皮带输送过程及皮带转运点是重要的无组织粉尘排放源。为减少对大气环境的影响, 目前的钢铁企业超低排放政策要求长流程皮带全部改建为封闭皮带通廊形式^[2]。通廊内的无组织粉尘治理方式主要以负压除尘和局部封闭为主^[3]。现实中国内大多数钢铁企业在皮带转运点处均布设了负压除尘口, 且在除尘口处安装了局部封闭罩^[4], 但部分封闭罩仅覆盖了转运点和负压除尘口区域, 未在皮带运行方向做适当延伸, 除尘效果不佳, 粉尘从封闭罩口向外排放的现象较为普遍。若要对除尘系统进行改造, 加强除尘效果, 与改造整个溜槽结构相比, 仅对封闭罩进行延伸是更经济的解决方案。另外, 皮带通廊封闭结构多采用彩钢板拼接而成, 为防止内部粉尘浓度过高造成安全隐患, 通廊顶部通常会留有通风缝隙, 使通廊内部的粉尘存在向外部扩散的途径。国内外一些学者对封闭皮带通廊转运点的粉尘弥散特性进行了计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟研究。CHEN 等^[5]构建了 6 种不同构型的皮带转运溜槽小尺寸模型, 并结合 CFD 分析预测了这些溜槽的粉尘排放情况, 验证了 CFD 可用于定量分析皮带转运溜槽的无组织排放。贾惠艳^[6]通过实验和数值模拟分析了输煤皮带转载溜槽封闭抑尘系统内部的流场和粉尘浓度分布。蒋仲安等^[7-9]

对皮带运输平巷的粉尘质量浓度分布进行了大量理论和实验研究。张大明等^[10]分析了不同风速下皮带巷道内粉尘浓度分布和底板积尘二次起尘情况。吕太等^[11]分析了煤尘皮带转载点封闭罩开口角度对除尘效果的影响并提出了封闭罩设计优建议。杨勇等^[12]针对某特定皮带转运点溜槽下方密闭罩及除尘器吸风口位置进行了数值模拟,研究其除尘器捕集效率。目前很少有研究关注皮带转接点封闭罩长度对皮带通廊粉尘浓度分布的影响,以及皮带通廊缝隙对外部环境的排放水平。在除尘器与配套封闭罩的设计改造过程中往往缺少理论分析作为参考。

本研究通过有限元分析方法模拟钢铁企业运矿皮带转接点处封闭与负压除尘对常温皮带通廊内部粉尘分布的影响,并估算封闭通廊对外的粉尘排放量,发现在一定负压条件下延长转接点皮带封闭罩长度可除尘器效率,为除尘器与配套封闭罩的设计提供参考。

1 数值模拟模型概述

气流与颗粒物的耦合流动研究方法主要为欧拉-欧拉法与欧拉-拉格朗日法^[13]。本研究采用欧拉-拉格朗日法。

模拟软件采用 ANSYS Fluent。研究对象为一条长 50 m 的皮带通廊(图 1),横截面尺寸为 3 m×3 m。传送皮带宽 1.2 m,位于皮带通廊中心,传送速度为 1.2 m·s⁻¹。皮带首端设有连接上层皮带尾端的溜槽,溜槽出口设有除尘器负压收尘口。皮带通廊顶板与侧壁连接处存在 50 mm 的缝隙,除此之外通廊封闭良好,无其他与外部环境联通的区域。由于通廊内的管道、电缆、栏杆等细节设施分布情况复杂且占用空间较小,所以在建模时忽略。

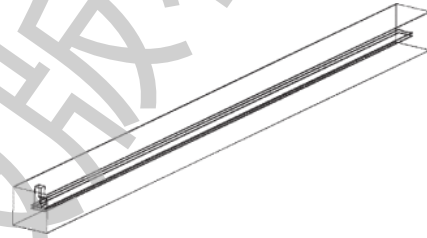


图 1 目标皮带通廊模型三维图

Fig. 1 3D map of the target conveyor belt corridor

流场模拟中湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。由于模型整体压强变化不大,所以将空气视为不可压缩流体简化计算;研究对象为常温皮带通廊,忽略温度变化对流场的影响;由于离散相体积分数量较小,因此,可以使用 ANSYS 中的 DPM 模型模拟颗粒物的污染行为^[14]。在模型设定中仅将溜槽与上层皮带的连接口作为颗粒物排放源,忽略物料在皮带运转时产生的粉尘。

空气及颗粒物入口边界设为皮带首端通廊顶部的溜槽开口。皮带转运点起尘的直接诱因为物料下落冲击时产生的诱导气流^[15-16],为模拟溜槽内的诱导气流,入口气流边界条件选择流速,大小为 1 m·s⁻¹;入口颗粒物通量为 1 mg·s⁻¹。壁面采用标准壁面函数,无滑移边界条件,颗粒相在壁面表现为完全弹性碰撞。粉尘粒径统一以 10 μm 计。

2 结果与讨论

2.1 气流在皮带通廊内的分布特征

图 2 分别为皮带通廊横截面和溜槽处在带速为 1.2 m·s⁻¹,除尘风口压强为 -500 Pa 时的空气速度云图。皮带附近的空气流速由皮带向外逐渐减小,说明通廊内的气流主要受皮带的粗糙壁面在水平运动时产生的边界层影响。皮带顶部缝隙存在向通廊外流动的气流,产生粉尘泄露的风险。

2.2 除尘器负压对通廊内气流和粉尘浓度的影响

除尘器是皮带通廊内部最主要的除尘方法,除尘器的运转状况对通廊内粉尘的总排放量有直接影响。为评估不同参数下除尘器运行效果及皮带通廊对外的粉尘排放贡献,除尘器除尘效率与皮带通廊排放系数分别由式(1)和式(2)定义。

$$\eta = \frac{Q_{\text{风口}}}{Q_{\text{入口}}} \quad (1)$$

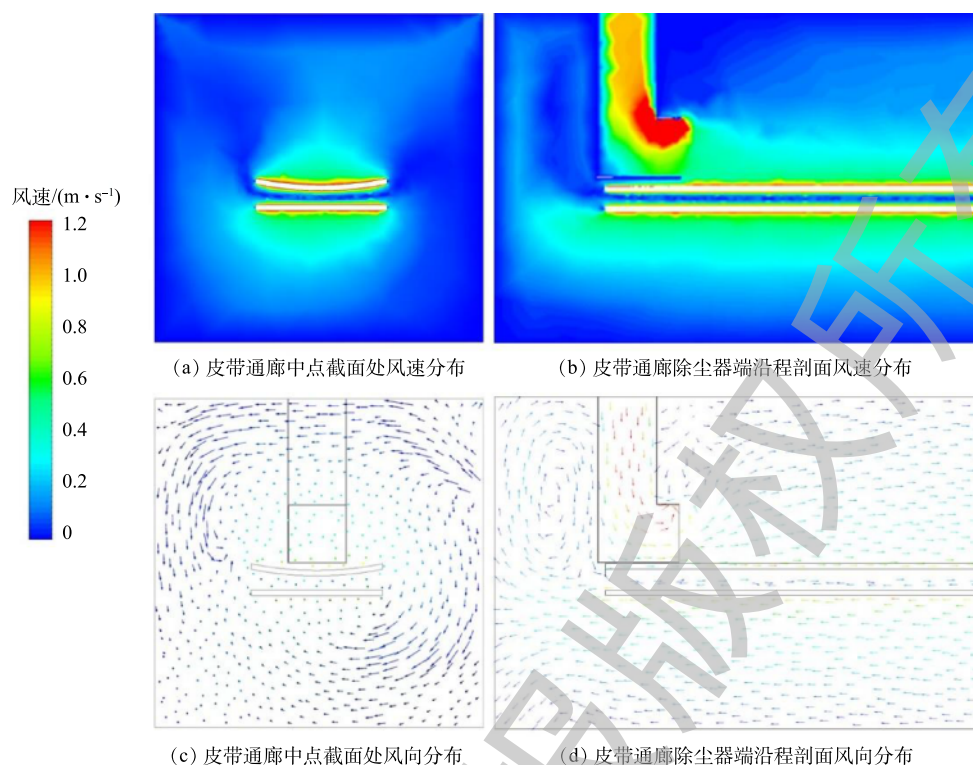


图2 皮带通廊横截面气流速度及矢量图

Fig. 2 Velocity contour and vector at cross section of belt corridor

$$F = \frac{Q_{\text{廊顶部}}}{Q_{\text{槽入口}}} \quad (2)$$

式中： η 为除尘效率； $Q_{\text{风口}}$ 为除尘器风口粉尘质量通量； $Q_{\text{入口}}$ 为溜槽入口粉尘质量通量； $Q_{\text{廊顶部}}$ 为通廊顶部缝隙粉尘质量通量； $Q_{\text{槽入口}}$ 为溜槽入口粉尘质量通量。

对除尘器风口取不同负压值进行数值模拟，结果见图3和图4。由图3可知，在低负压条件下，皮带通廊内部粉尘浓度沿皮带运行方向在一定范围内波动，无明显变化趋势。在高负压条件下，粉尘浓度由皮带机尾向皮带机头成递减趋势。高负压除尘器对通廊内部粉尘浓度有显著控制作用。由图4可知，在除尘器风口未做封闭措施时，除尘器除尘效率与负压值成正相关，通廊对外排放系数与负压值成负相关。弱负压条件下除尘效率较低，通廊内粉尘浓度高，分布范围广且浓度较为均匀。强负压可使通廊内粉尘浓度保持在较低水平。

通廊对外排放系数在弱负压时达到最大。在本皮带通廊构型和诱导气流流量下，当风口压强为-100 Pa时，排放系数高达37.6%。随着负压值升高，排放系数逐渐降低，当风口压强达到-1 000 Pa时，排放系数降低至0.98%。

2.3 不同封闭罩长度对粉尘浓度分布的影响

目前工业上常在皮带转运点除尘器风口处安装封闭罩，提高除尘器除尘效率。由图5可知，风口压强为-100、-500和-1 000 Pa时，除尘效率分别为24.0%、63.7%和90.8%。以上3种负压条件可分别代表除尘器的不同工况，其余情况可视为这3种工况间的过度。因此，选择以此3种风口压强为例，分析封闭罩长度对皮带通廊内粉尘浓度分布的影响。

当除尘器处于弱负压工况时，由于除尘效率较低，封闭罩长度对通廊内总体粉尘浓度分布的影响较小。由转运点产生的粉尘在通廊内分布较为均匀，整体环境较差，通廊内粉尘峰值浓度在 $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。

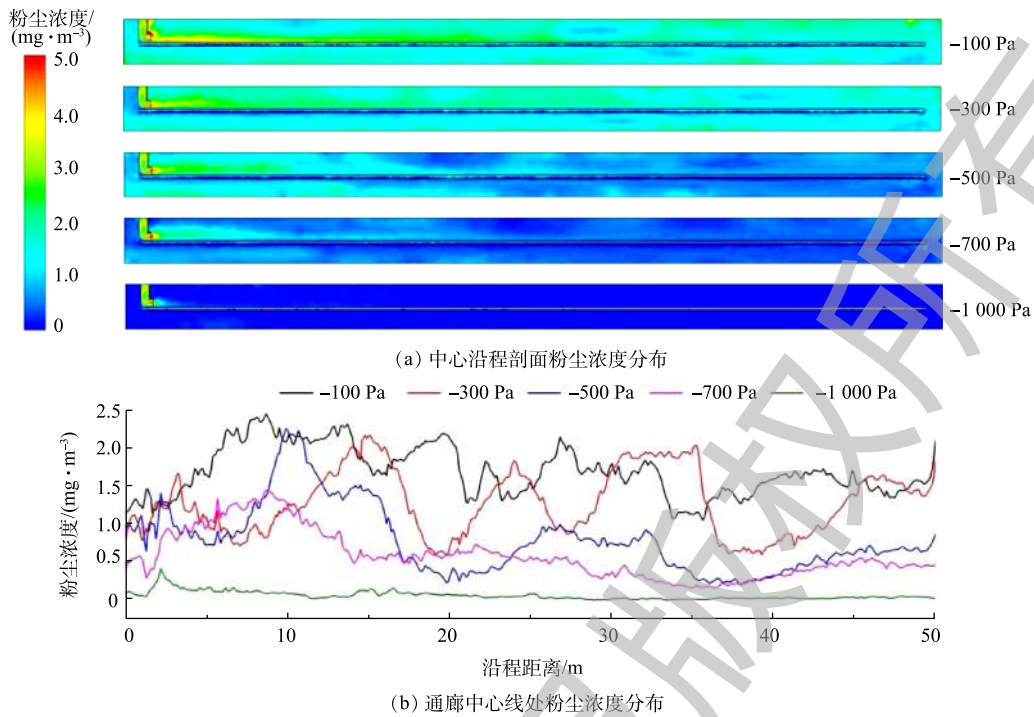


图 3 不同除尘负压皮带通廊中心沿程截面粉尘质量浓度分布

Fig. 3 Dust mass concentration distribution along the central section at different negative pressures

当除尘器处于中等负压工况时 (图 6)，封闭罩长度对粉尘浓度分布产生显著影响。通廊内粉尘浓度峰值出现在封闭罩出口后方约 5 m 处，并由此处向皮带两端递减。在较短的封闭罩条件下，出口附近的浓度峰值较高；在较长的封闭罩条件下，浓度峰值较低。

当除尘负压较高时，封闭罩长度不直接影响粉尘颗粒的在通廊内的浓度分布。溜槽出口无封闭罩时，转运点向通廊内排放少量颗粒物，对通廊内粉尘浓度分布影响较弱，仅在溜槽出口附近出现一处较低的峰值浓度。当设置了长度为 1 m 或以上长度的封闭罩时，皮带通廊内已基本不受溜槽粉尘排放的影响，对通廊沿程浓度贡献接近 0 (图 7)。

由图 8(a) 可知，在皮带转运溜槽出口处增设封闭罩以及改变封闭罩长度理论上并不会改变除尘器进风量。由图 8(b) 可知，在中高负压条件下适当延长封闭罩可以提高除尘器除尘效率。例如本皮带通廊构型下，除尘负压为 -500 Pa 时，相比未设置封闭罩的情况，设置 10 m 封闭罩可将除尘效率由 63.7% 提升至 83.3%；除尘负压为 -1 000 Pa 时，由于除尘器风量充足，在未设置封闭罩时除尘效率已超过 90%，设置 1 m 封闭罩可将除尘效率由 90.8% 提升至 96.4%，但进一步延长则无明显效果。低负压条件下由于除尘器风量过小，封闭罩可将除尘效率由 24.0% 提升至最高约 33.3%，除尘效率提升不明显。整体来看，在一定除尘负压下，封闭罩对除尘效率提升存在上限，上限不超过除尘风量与诱导气流量的比值 (图 9)，说明除尘器对粉尘无富集作用，主要以抽离高粉尘浓度空气为主要工作原理。

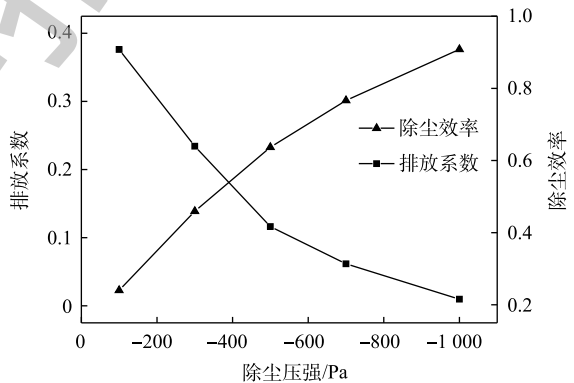


图 4 不同除尘负压除尘效率与通廊对外排放系数

Fig. 4 Dust removal efficiency and emission factor at different negative pressures

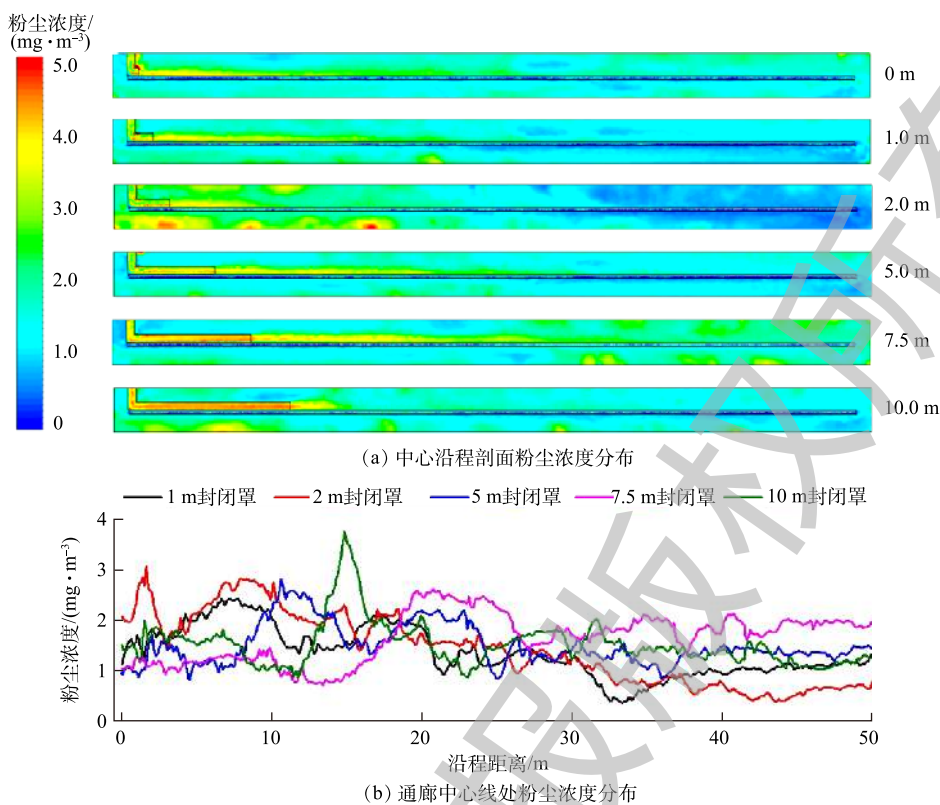


图5 -100 Pa 除尘负压条件下不同封闭罩长度粉尘浓度分布

Fig. 5 Dust mass concentration distribution at different lengths of seal cover and -100 Pa

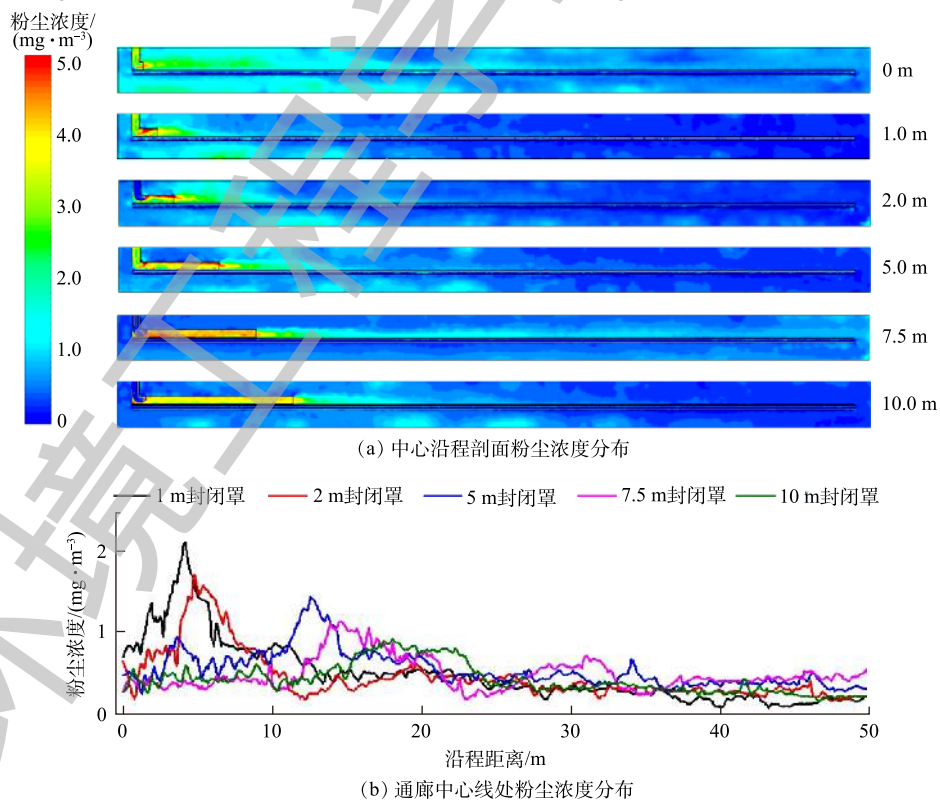


图6 -500 Pa 除尘负压条件下不同封闭罩长度粉尘浓度分布

Fig. 6 Dust mass concentration distribution at different lengths of seal cover and -500 Pa

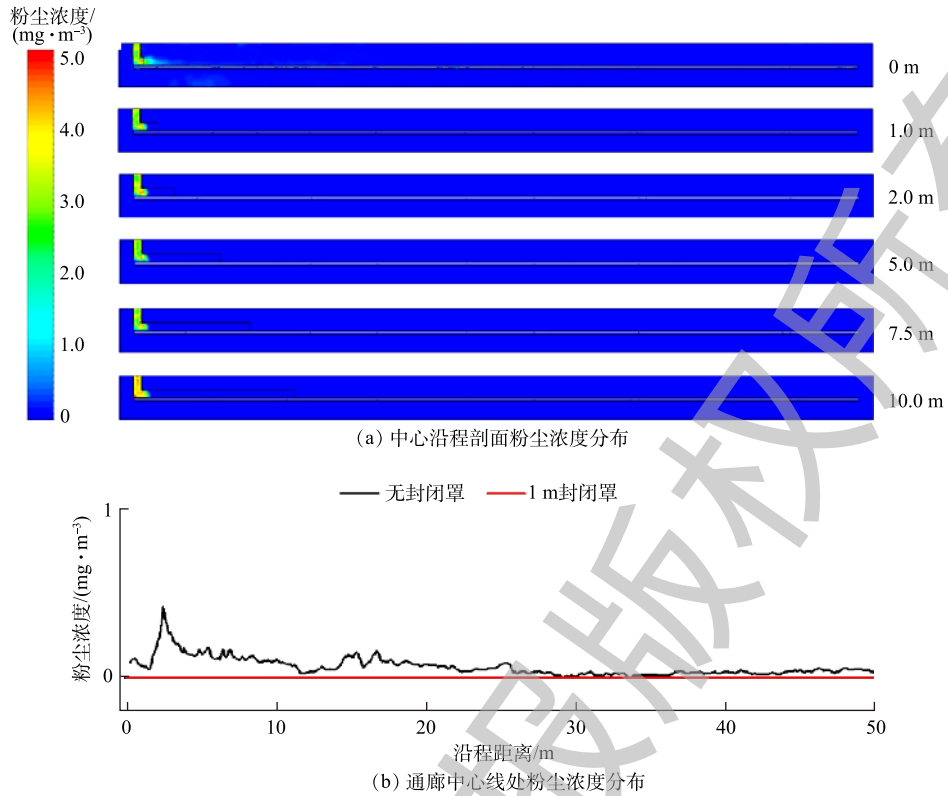


图 7 -1 000 Pa 除尘负压条件下不同封闭罩长度粉尘浓度分布

Fig. 7 Dust mass concentration distribution at different lengths of seal cover and -1 000 Pa

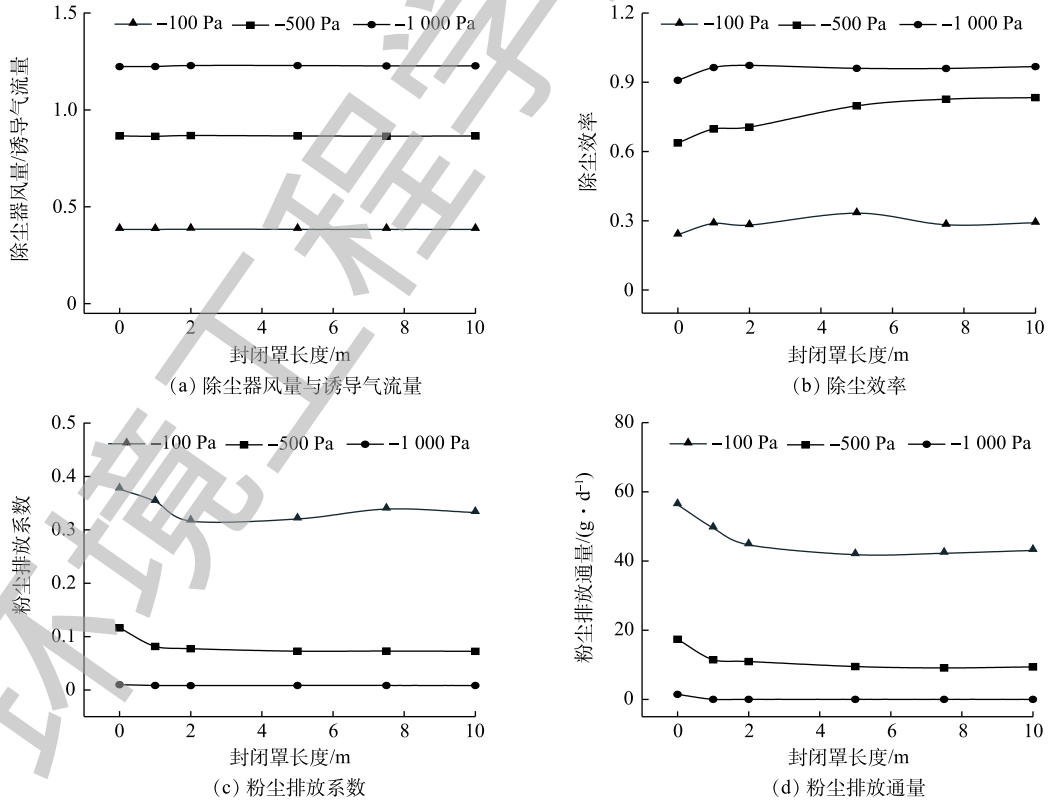


图 8 不同封闭罩长度条件下除尘效果相关参数的变化

Fig. 8 Charge of dust removal related factors at different lengths of seal cover

由图 8(c) 和图 8(d) 可知, 封闭罩对减少皮带通廊排放系数有显著效果。风口压强为 -500 Pa 条件下每日可减少约 8.3 g 粉尘排放, 占未设置封闭罩时排放量的 48%; 风口压强为 -100 Pa 条件下每日可减少约 14.6 g 粉尘排放, 占未设置封闭罩时排放量的 28%。

在满足原有除尘效果的前提下, 适当延长封闭罩可减小除尘风量, 降低除尘器能耗。

3 结论

1) 皮带通廊内粉尘排放对外部大气环境存在影响, 如未对皮带转运点进行有效治理, 粉尘排放量较大。

2) 除尘风压一定时, 安装皮带封闭罩会增加除尘效率, 但增加幅度存在上限, 最大不超过除尘风量与诱导气流量的比值。封闭罩不会改变除尘器进风量, 影响能耗。

3) 皮带通廊内粉尘浓度分布显著, 且与除尘负压及配套皮带封闭罩长度相关。当除尘负压较弱时, 无法有效排出转运溜槽内的高浓度粉尘颗粒, 通廊内粉尘分布较为均匀。当除尘负压适中时, 除尘效果与溜槽出口封闭罩长度有关。通廊内部粉尘浓度成单峰分布, 峰值出现在封闭罩出口附近, 且封闭罩长度越长出口浓度越低。除尘负压较强时, 溜槽内大部分粉尘已经吸入除尘管道, 仅需在风口设置较短的封闭罩即可组织粉尘向通廊内排放。该研究可为皮带转接溜槽除尘设施的设计提供有效指导意见, 以提升除尘效率。

参考文献

- [1] 郭健, 刘善军, 黄宪江. 某钢铁企业颗粒物无组织排放核算与监测对比分析[J]. 环境保护科学, 2017, 53(3): 14-18.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见 [EB/OL]. [2019-12-01]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html, 2019.
- [3] 王立立, 王鸿林. 燃煤电厂输煤皮带转运点的防尘措施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 43-46.
- [4] 张东升, 杜长龙. 皮带输送机中抑尘罩的设计和使用[J]. 洁净煤技术, 2005(3): 95-96.
- [5] CHEN X L, WHEELER C A, DONOHUE T J, et al. Evaluation of dust emissions from conveyor transfer chutes using experimental and CFD simulation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 110-111: 101-108.
- [6] 贾惠艳. 皮带输煤系统转载点粉尘析出逸散规律及数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- [7] 蒋仲安, 陈举师, 牛伟, 等. 皮带运输巷道粉尘质量浓度分布规律的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(9): 3-7.
- [8] 蒋仲安, 陈举师, 王晶晶, 等. 胶带输送巷道粉尘运动规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 659-663.
- [9] 王晓珍, 蒋仲安, 王善文, 等. 煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 386-390.
- [10] 张大明, 马云东. 巷道内皮带输煤系统粉尘运移规律数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(2): 168-172.
- [11] 吕太, 车晟, 郭澄昆, 等. 输煤皮带转载点密闭罩流场模拟与结构优化[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7): 2667-2672.
- [12] 杨勇, 沈恒根, 石朋波, 等. 皮带转运点密闭罩下部空间及吸风口数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(5): 87-90.
- [13] SANJOSE M, SENONER J M, JAEGLE F, et al. Fuel injection model for Euler-Euler and Euler-Lagrange large-eddy

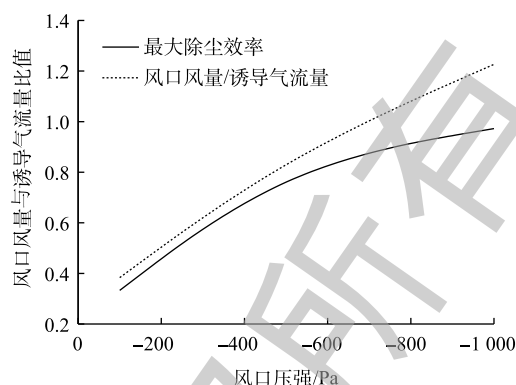


图 9 最大除尘效率与风口风量的关系

Fig. 9 Relationship between maximum dust removal efficiency and vacuum air flow rate

simulations of an evaporating spray inside an aeronautical combustor[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5): 514-529.

[14] 罗昔联, 顾兆林. 基于DPM模型的街谷内颗粒物扩散特性研究[J]. 中国科学院大学学报, 2007, 24(5): 578-583.

[15] 李小川, 王启立, 刘硕, 等. 溜槽转运过程中落料诱导气流的影响因素[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2015, 20(5): 683-689.

[16] 李强. 基于诱导气流动力学分析的皮带落煤扬尘规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.

(本文编辑: 郑晓梅)

Numeric simulation of conveyor transfer point and optimization of dust removal system in conveyor belt corridors

LIN Zijie¹, XU Qian^{1,2}, WANG Fujiang¹, HE Kebin^{2,*}

1. BioMintec Environmental Technology (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 200333, China

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Corresponding author, E-mail: hekb@tsinghua.edu.cn

Abstract Conveyor transfer point is the main source of dust in conveyor belt corridors. In order to study dust removal effect of the joint technology of dust collector suction outlet and seal cover at transfer chute and to assist modification of dust removal system design, finite volume method CFD analysis was used through ANSYS Fluent software to conduct numeric simulation of the dust concentration distribution in conveyor belt corridors originated from the emission from belt transfer chute. The effects of vacuum pressure and seal cover length on dust mass concentration in conveyor belt corridors were investigated, and the emission of conveyor belt corridors to outer environment was also assessed. The result showed that dust emission from conveyor belt corridors would have negative effect on the environment if without proper control measures. Installation of seal cover at the chute outlet could improve dust removal efficiency. Maximum dust removal efficiency could not exceed the ratio of in-pipe air flow rate to induced air flow rate. The seal cover didn't change the air consumption of duster. Dust mass concentration distribution in conveyor belt corridors was associated with vacuum pressure and seal cover length. For designing duster, induced air flow rate should be considered and the seal cover should be appropriately extended from duster vent. This study can provide guidance for dust control design of conveyor transfer chute at a lower cost.

Keywords conveyor belt corridor; negative pressure duster; seal cover; numeric simulation