

· 港口 ·



基于 CFD 的煤炭露天堆场 煤堆起尘遮蔽效应研究*

郭家琪¹, 彭士涛², 张 红¹, 洪宁宁², 王文渊¹, 刘雨骐¹

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 交通部天津水运工程科学研究院, 水路交通环境保护技术实验室, 天津 300456)

摘要: 针对煤炭码头露天堆场内各煤堆起尘的相互影响问题, 设置不同来风角度、不同风速等工况, 利用数值模拟方法并结合美国环保署提出的排放系数公式, 定量分析堆场内已有煤堆对临近料带上不同堆垛位置煤堆的起尘影响特点, 并可视化表征不同垛位煤堆的起尘强度。结果表明, 在 0°、45°、90° 来风角度下, 最大起尘量分别为 2.08、3.70、2.60 kg。0° 和 45° 来风角度下, 起尘强度最低的位置位于下风口垛位; 90° 来风角度下, 煤堆遮蔽效应呈现对称规律。研究成果可为港口实际喷淋作业提供参考借鉴。

关键词: 煤炭堆场; 静态起尘; 遮蔽效应; 起尘强度

中图分类号: U658.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0068-07

Shelter efficacy of coal piles dusting in coal open yards based on CFD

GUO Jiaqi¹, PENG Shitao², ZHANG Hong¹, HONG Ningning², WANG Wenyuan¹, LIU Yuqi¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Laboratory of Environmental Protection in Water Transport Engineering,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: Aiming at the mutual influence of dust emissions from coal piles in an open yard of coal terminal, by setting different wind angles and wind speeds, the study uses numerical simulation methods combined with the emission factor formula proposed by United States Environmental Protection Agency (EPA) to quantitatively analyze the dust emission characteristics of existing coal piles on adjacent piles at different locations in the yard. The dust intensity of different pile positions is then visualized. The results show that under wind angles of 0°, 45°, and 90°, the maximum dust emission amounts are 2.08, 3.70, and 2.60 kg, respectively. Under wind angles of 0° and 45°, the position with the lowest dust intensity is located at the downwind pile position. At a 90° wind angle, the shielding effect of the coal piles exhibits a symmetrical pattern. The research results can provide reference for spray operation.

Keywords: coal yard; wind erosion dust; shelter efficacy; dust intensity

随着船舶大型化和全球能源需求增长, 煤炭港口吞吐量长期处于高位并呈稳步上升趋势, 但同时给港口周边区域带来粉尘污染问题。其中, 煤炭露天堆场的扬尘防治是港口环境污染治理工

作中的重要环节, 为减少起尘提出相关措施已刻不容缓。堆场起尘分为动态起尘和静态起尘。针对动态起尘, 可采取起尘部位密封^[1]、装卸机械与喷雾系统结合^[2-3]等措施。针对静态起尘, 国内

收稿日期: 2024-09-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200); 天津市科技计划项目(22YFZCSN00030)

作者简介: 郭家琪(1998—), 男, 博士研究生, 从事绿色港口建设与运营相关研究。

通信作者: 彭士涛(1979—), 男, 教授级高级工程师, 从事交通环境保护相关研究。E-mail: 1014520617@qq.com

外学者从不同方面展开了大量研究。目前的研究主要集中在:1) 单个煤堆的静态起尘规律,王宝章等^[4]、朱景韩等^[5]、丛晓春等^[6]通过风洞实验,总结出不同物料随风速、含水率等条件变化的起尘量经验公式。2) 不同煤堆形状的起尘特性,Badr等^[7]通过数值模拟研究锥形堆和平顶椭圆堆在不同风向下的绕流情况;Turpin等^[8]通过数值模拟研究不同高度对恒定体积的平顶堆粉尘扩散量的影响;Duan等^[9]研究单向风作用下单个堆的粉尘扩散特性。此外,少数学者研究平行堆放煤堆的侵蚀效果。Degio等^[10]通过数值模拟研究真实堆放的2个平行堆的风场结构,结果表明,2个平行堆布置时,迎风侧堆会产生遮蔽,使背风侧堆表面风速降低,进而起尘量减少;Cong等^[11]研究发现煤堆密集堆放的总起尘量小于单独堆放的总起尘量;而Furieri等^[12]的研究表明孤立煤堆的起尘量小于连续堆放煤堆的起尘量;Ferreira等^[13]通过风洞实验研究不同间距的2个平行堆的风流结构,发现下风向的料堆起尘量比单独堆放时大得多。

以上虽有部分研究针对煤堆之间的起尘相互作用展开,但研究中的2个平行煤堆是固定的。随着煤炭港口通过能力的持续提升,为提升堆场利用率,煤炭垛位分配将更加灵活多变,亟需研究煤堆遮蔽效应影响范围来协助港方形成绿色的垛位分配方案。本研究基于我国北方某煤炭码头堆场实际的堆存过程,研究不同风向、不同风速工况下堆场内已有煤堆对临近料带上不同堆垛位置煤堆的起尘影响。相比于风洞实验,数值模拟因其结果可视化、成本低、便捷等而广泛应用于煤堆起尘效果的研究领域。本研究利用数值模拟并结合美国环保署提出的排放系数公式,研究煤堆受遮蔽作用影响下的起尘量变化情况,以期后续考虑减少粉尘污染的精细化垛位分配方案提供参考。

1 粉尘排放因子

根据美国环保署提出的排放因子,结合侵蚀次数与侵蚀强度来量化工业地形中煤堆表面的粉

尘排放量,计算公式如下:

$$F = k \sum_{i=1}^N P_i S_i \quad (1)$$

$$\begin{cases} P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) & u^* > u_t^* \\ P = 0 & u^* \leq u_t^* \end{cases} \quad (2)$$

$$u^* = 0.1u_{10}^+ \left(\frac{u_s}{u_t} \right) \quad (3)$$

式中: F 为排放因子; k 为粒度乘数,取 0.5; N 为每年中的扰动次数,本文以发生 1 次侵蚀的起尘量为依据,重点分析垛位不同区域的起尘强度,因此扰动次数取 1; P_i 为侵蚀潜力, g/m^2 ; S_i 为煤堆表面积, m^2 ; u^* 为煤堆表面摩擦速度, m/s ; u_t^* 为煤堆表面临界摩擦速度,取 0.35 m/s ; u_{10}^+ 为 10 m 高度处测得的最大风速, m/s ; u_t 为 10 m 高度处测得的风速, m/s ; u_s 为距离煤堆表面 25 cm 处测得的风速, m/s 。

2 煤堆遮蔽效应数值模拟

2.1 模型尺度

研究模型(图 1)尺寸参考某煤炭下水码头堆场实际煤堆尺寸,规定长堆为固定堆,设置 3 种不同长度 a 进行数值模拟,即 a 分别取 70、110、150 m。移动堆受固定堆的遮蔽作用,也称遮蔽堆,长 50 m。煤堆宽度和高度均相同,分别为 48、14.5 m。遮蔽堆与固定堆平行布置,间距 15 m (2 条料带间的距离),遮蔽堆移动间隔为 30 m。根据以上尺寸分别进行建模来研究煤堆的遮蔽效应。计算域参考 Turpin 等的设置,计算域宽度为 7 倍模型宽度,长度为 25 倍模型长度,高度为 10 倍模型高度,使阻塞比小于 2%,以此保障模型与计算域边界空气动力学的独立性。

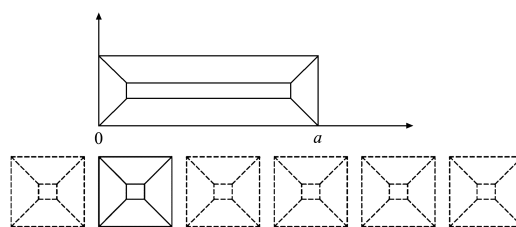


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

2.2 控制方程

模拟计算中流体流动应满足质量守恒定律和动量守恒定律,空气不可压缩且周围无质量和热量交换,控制方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + S_i + \rho F_i \quad (5)$$

湍流模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 模型:

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(G_k + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式中: x_i 为 x 坐标, x_j 为 y 坐标; u_i 为 x 方向速度分量, m/s; u_j 为 y 方向速度分量, m/s; k 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍动能耗散率, m^2/s^3 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; P 为作用于流体的压力, Pa; μ 为空气动力黏性系数, 取 $1.79 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_i 为源项; F_i 为质量力在 i 方向上的分量, N; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 和 σ_ε 为系数, 分别取 1.44、1.92、0.09、1.0 和 1.3^[14]。

2.3 参数设置

研究采用 ICEM 软件进行建模, 将模型划分为四面体网格, 在固定堆与遮蔽堆的边界层设置棱柱网格, 使煤堆表面附近网格较密, 以此保证计算精度, 见图 2。

关于计算域边界条件的设置, 入口速度剖面采用指数曲线:

$$v = v_0 \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (10)$$

式中: v 为对应高度处的平均风速, m/s; v_0 为 10 m 参考高度处的平均风速, m/s; z 为高度, m; 指数 α 取 0.16。

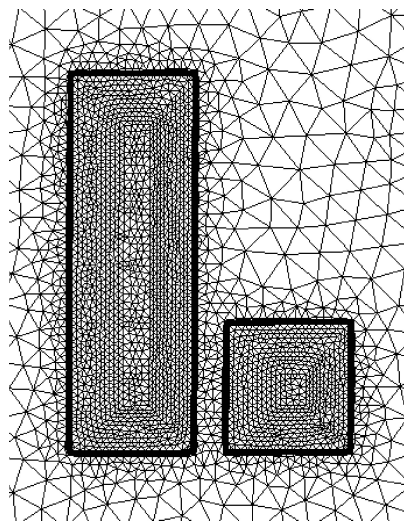


图 2 网格划分

Fig. 2 Grid division

计算域上边界及两侧设置为对称, 底面及煤堆表面设置为无滑移的粗糙壁, 底面粗糙高度为 0.05 m, 模型表面粗糙高度为 0.005 m。出口条件为充分发展出口。湍流模型采用剪应力传输模型。压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法。当残差归一化值的均方根小于 0.001 时, 认为计算结果收敛。

3 结果分析

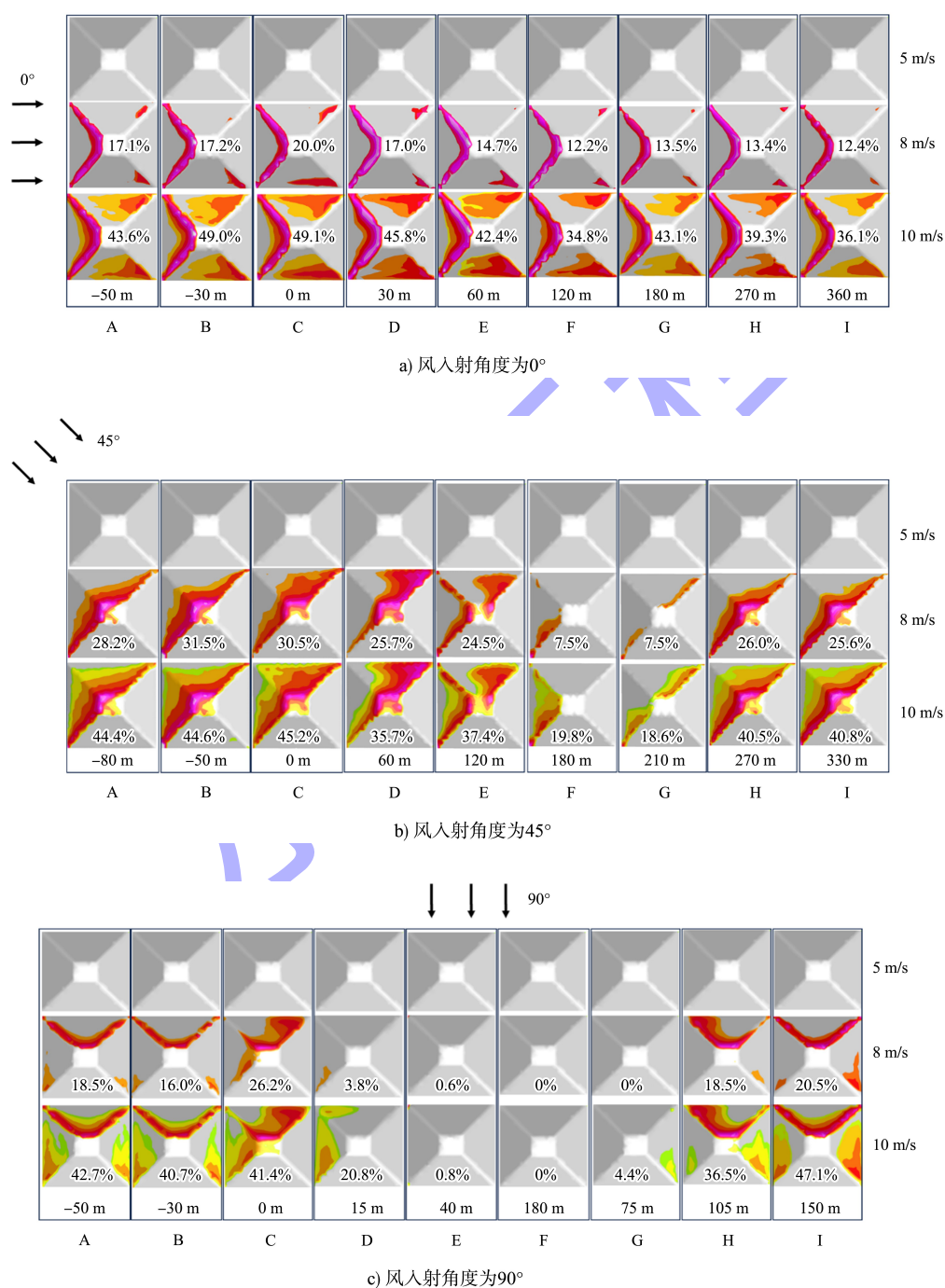
3.1 侵蚀区域

采用 Fluent 19.0 进行数值模拟计算, 经 Tecplot 软件对结果进行处理, 计算 u_s/u_r 即煤堆表面归一化速度。根据排放因子公式, 当摩擦速度大于煤颗粒的临界起动速度 (即 u^*/u_t^*) 时, 表面颗粒产生起动现象。研究设置的 3 种风速工况对应的归一化风速 u_s/u_r 分别大于 0.70、0.44、0.35 时, 煤堆表面发生静态起尘现象。截取不同风速、不同风入射角度下, 煤堆在不同坐标位置处大于临界起动归一化速度区域的云图, 见图 3。

当风入射角度为 0° 、风速为 8 m/s 时, 起尘区域集中在正对上风向区域, 随着遮蔽堆的移动, 煤堆两侧受遮蔽影响区域侵蚀变化不明显。当风速增加到 10 m/s 时, 煤堆迎风侧顶部受侵蚀区域较大, 相比于小风速工况, 两侧区域侵蚀效果明显。随着遮蔽堆向右移动, 两侧侵蚀区域范围逐

渐变变大,在相对位置为0 m(即遮蔽堆的左侧与固定堆的左侧对齐时)处,侵蚀区域占比最大,达到49.1%。此外,顶部及两侧侵蚀区域颜色加深,侵蚀强度增大。当遮蔽堆继续向右移动时,两侧侵蚀区域范围开始缩小,相对位置为120 m

时,遮蔽堆侵蚀区域显著小于之前,占比减小为34.8%。随着遮蔽堆继续向右移动,侵蚀区域范围略有增加,逐渐趋于稳定。在此工况下,不存在完全遮蔽使遮蔽堆不起尘的区域。



注:颜色深浅代表侵蚀强度的强弱,数字为侵蚀区域占总表面积的百分比。

图3 煤堆表面颗粒起尘区域

Fig. 3 Particle initiation areas on surface of coal pile

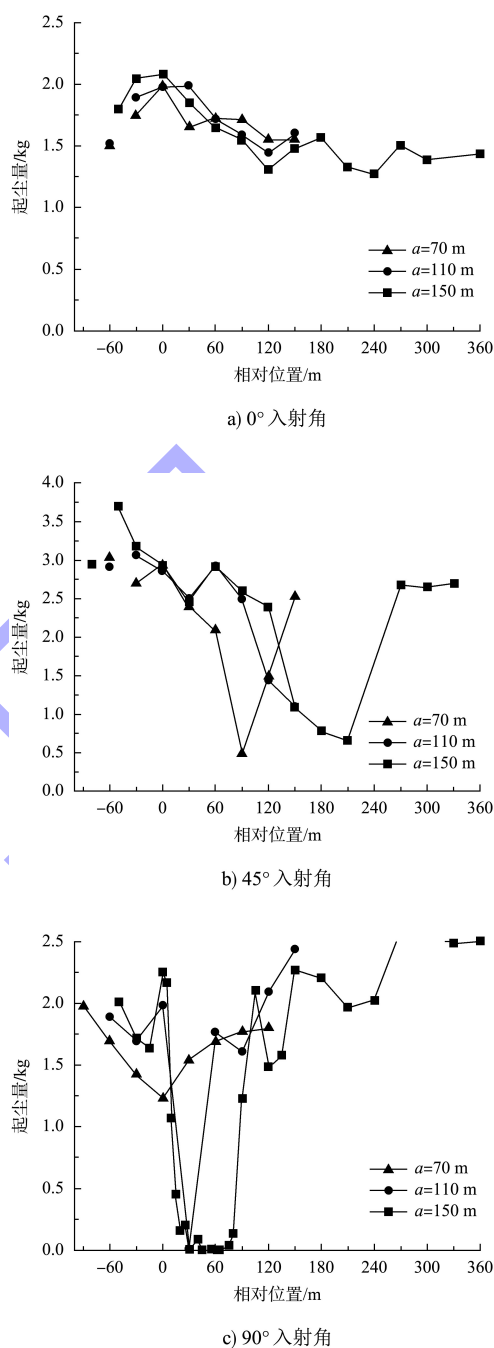
当风入射角度为 45° 、风速为 5 m/s 时,煤堆表面未有侵蚀区域。当风速增加到 8 m/s 时,垂直于来风方向的区域顶部发生较强的侵蚀,固定堆不起遮蔽作用,相对位置为 -50 m 时,侵蚀区域占比最大,达到 31.5% 。风速增加到 10 m/s 时,顶部发生起尘侵蚀区域向底部扩大,存在大面积的起尘区域,侵蚀区域占比在相对位置为 0 m 时最大,达到煤堆总表面积的 45.2% 。随着遮蔽堆向右移动,起尘侵蚀区域逐渐变小。当相对位置为 180 m 时,起尘侵蚀区域的面积大幅度减小至 19.8% ,此时处在固定堆的遮蔽区域受遮蔽作用较强。当移动到 270 m 时,起尘侵蚀区域开始增大,之后侵蚀区域范围趋于稳定,表明此时遮蔽堆离开了固定堆的遮蔽范围。

当风入射角度为 90° 、风速为 5 m/s 时,煤堆表面未有侵蚀区域。当风速增加到 8 m/s 时,侵蚀区域首先出现在迎风侧顶部且占比较小,仅为 18.5% 。当风速增加到 10 m/s ,煤堆表面存在大范围的侵蚀区域,占比增加至 42.7% 。煤堆向右移动时,两侧侵蚀区域先减小、后增大。当遮蔽堆与固定堆相对位置为 0 m 时,侵蚀区域范围最大,迎风侧大面积发生起尘现象。遮蔽堆继续向右移动,起尘区域大幅减少,且由归一化速度云图可以发现,当风入射角度为 90° 时,垛位存在完全受遮蔽的区域,在该范围内,遮蔽堆无侵蚀。当相对位置为 75 m 时,遮蔽堆右侧出现侵蚀区域,表明此时遮蔽堆处在完全遮蔽区域的边缘,继续向右移动,遮蔽效应逐渐变小直至消失。

3.2 遮蔽效应对起尘量的影响

本节重点研究固定堆对遮蔽堆的遮蔽效应特点,定量描述风速对煤堆表面起尘的影响。根据数值模拟结果,参考上述美国环保署排放因子相关公式,计算在 10 m/s 风速下、不同固定堆长度、不同风入射角度下遮蔽堆的起尘量。为更好地反映在固定堆影响下遮蔽堆的起尘强度,利用热力图对煤堆起尘强度进行表征。考虑煤炭堆场煤堆实际尺寸且不同固定堆长度下起尘强度变化规律基本一致,因此针对堆垛长度 150 m 工况下起尘

强度热力图的相关结果进行展示,见图 4。



注:风向及相对位置均为相对值。

图 4 10 m/s 风速下遮蔽堆起尘量

Fig. 4 Dust generation amount of a shielding pile under a wind speed of 10 m/s

当风以 0° 入射时,起尘量计算最大值为 2.08 kg ,最小值为 1.27 kg 。遮蔽堆从最左侧开始移动时,起尘量逐渐增大,最大值出现在遮蔽堆与固定堆相对位置为 0 m 时,即左端与固定堆左端对齐时。之后,随着遮蔽堆逐渐向左移动,起尘量逐渐减少,当

移动到相对位置为 120 m 时,起尘量相对稳定,之后起尘量均在 1.5 kg 以下,起尘强度最低。因此,在 0°工况下,固定堆左侧 30 m 范围内起尘强度最大,上风向区域及固定堆正后方大部分区域起尘强度次之,下风向区域起尘量最低。

当风以 45°入射时,遮蔽堆起尘量变化幅度较大,起尘量最大值为 3.70 kg,最小值为 0.66 kg。遮蔽堆在最左侧时,由于处于上风向位置且无遮挡,起尘量最大。最小值出现在相对位置为 210 m 时,在 210 m 左侧,起尘量略有波动,总体为大幅下降趋势,在 210 m 右侧,遮蔽堆起尘量大幅增加,在 270 m 处增至 2.68 kg,遮蔽堆再向右移动,起尘量基本保持不变,遮蔽效应消失。因此,在 45°工况下,起尘强度热力图较为对称,在 90 m 之前不受遮蔽作用;随着相对位置增大,起尘强度略有降低,存在小范围的起尘量低于 1.5 kg 区域,之后再次增加,并稳定在 2.5 kg 以上。

当风以 90°入射时,遮蔽堆起尘量变化较大且存在较为明显的对称规律。遮蔽堆起尘量最大值为 2.60 kg,最小值为 0,固定堆后方存在完全被遮挡的区域且范围较大。因此在 90°工况下,起尘强度热力图以固定堆中线为轴对称,对称轴两侧起尘强度最低,起尘量低于 1.50 kg;在固定堆边缘位置处,起尘强度增大;固定堆范围外垛位不受遮蔽作用,起尘量在 2.00~2.50 kg。

4 结论

1) 本文采用数值模拟的方法,研究固定堆影响下遮蔽堆在不同位置的起尘变化情况。数值模拟结果处理输出表面归一化速度云图,分析随着煤堆位置的变化遮蔽堆起尘量的变化情况。利用排放因子公式计算遮蔽堆不同工况下的起尘量,对不同工况下的垛位起尘强度进行可视化划分。

2) 通过数值模拟得出,不同风入射角度下,固定堆形成的遮蔽区域不同。0°入射时,总体起尘强度较小,起尘强度最高的区域在上风口边缘对齐附近,起尘强度最低的区域位于下风口处垛位;45°入射时,总体起尘强度最高,遮蔽范围位

于下风口较短的垛位范围;90°入射时,遮蔽堆与固定堆的相对位置一致,起尘量以固定堆中点为对称轴存在对称现象,固定堆后方存在完全遮蔽的区域。

3) 基于研究结论,根据作业任务安排和未来规划期内的风向预报情况,在堆场作业组织安排时考虑堆的遮蔽效应。当来风方向与垛位长轴平行为主时,考虑将新进入堆场的煤堆分配在已堆放的固定堆下风口处;当来风方向与垛位长轴垂直为主时,考虑将新进入堆场的煤堆分配在固定堆后方中间位置的垛位;当来风斜向入射时,考虑将新进入堆场的煤堆分配在固定堆尾部垛位,在保障堆场作业组织正常进行的前提下,可减少堆场静态起尘量,推动干散货码头的绿色发展。

参考文献:

- [1] 韩桂波,薛永华,张春意,等.大宗散货港口煤炭翻车作业抑尘措施效率实测研究[J].交通节能与环保,2023,19(5):42-45.
HAN G B, XUE Y H, ZHANG C Y, et al. Experimental study on the efficiency of dust suppression measures for coal dumping operations in bulk cargo ports[J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2023, 19(5): 42-45.
- [2] 罗福均.斗轮堆取料机洒水抑尘系统优化[J].现代制造技术与装备,2023,59(10):109-111.
LUO F J. Optimization of watering and dust suppression system for bucket wheel stacker reclaimer [J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2023, 59(10): 109-111.
- [3] 沈小军.桥式抓斗卸船机抑尘系统改造方案[J].港口装卸,2022(4):6-9.
SHEN X J. Modification scheme of dust suppression system for bridge grab ship unloader[J]. Port operation, 2022(4): 6-9.
- [4] 王宝章,齐鸣,徐铀,等.煤炭装卸、堆放起尘规律及煤尘扩散规律的研究[J].交通环保,1986(S1):1-10.
WANG B Z, QI M, XU Y, et al. Study on the law of dust raising and coal dust diffusion in coal loading, unloading and stacking[J]. Environmental protection in transportation, 1986(S1): 1-10.

- [5] 朱景韩, 程树军, 杨慧慈, 等. 煤堆垛起尘风速的试验研究[J]. 交通环保, 1986(S1): 71-74.
ZHU J H, CHENG S J, YANG H C, et al. Experimental study on wind speed of coal stacking dust [J]. Environmental protection in transportation, 1986 (S1): 71-74.
- [6] 丛晓春, 陈志龙, 詹水芬. 露天煤场静态起尘量的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 849-853.
CONG X C, CHEN Z L, ZHAN S F. Experimental study of static dust emission from a coal pile in the open air yard[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6): 849-853.
- [7] BADR T, HARION J L. Numerical modelling of flow over stockpiles: implications on dust emissions[J]. Atmospheric environment, 2005, 39(30): 5576-5584.
- [8] TURPIN C, HARION J L. Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: implications on dust emissions [J]. Atmospheric environment, 2009, 43(35): 5579-5587.
- [9] DUAN Z Y, WANG Y, JIAO Q H, et al. Local dispersion characteristics of dust in large open-air piles under the action of one-way wind [J]. Environmental science and pollution research, 2021, 28(34): 47182-47195.
- [10] DIEGO I, PELEGRY A, TORNO S, et al. Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles[J]. Applied mathematical modelling, 2009, 33(7): 3197-3207.
- [11] CONG X C, YANG S L, CAO S Q, et al. Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard [J]. Applied mathematical modelling, 2012, 36(11): 5482-5491.
- [12] FURIERI B, RUSSEIL S, HARION J L, et al. Comparative analysis of dust emissions: isolated stockpile vs two nearby stockpiles[C]//International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution. Southampton: WIT Press, 2012: 285-294.
- [13] FERREIRA A D, FINO M R M. A wind tunnel study of wind erosion and profile reshaping of transverse sand piles in tandem [J]. Geomorphology, 2012, 139/140: 230-241.
- [14] 何鸿展, 宋翀芳, 潘武轩, 等. 基于 CFD 的防风抑尘网非均匀孔隙率的优化研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1697-1704.
HE H Z, SONG C F, PAN W X, et al. Non-uniform porosity design optimization based on CFD simulation for porous fences [J]. China environmental science, 2016, 36(6): 1697-1704.
- (本文编辑 王传瑜)
- ~~~~~
- (上接第 50 页)
- [11] OLIVER W C, PHARR G M J. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. Journal of materials research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [12] PHARR G M, BOLSHAKOV A. Understanding nanoindentation unloading curves [J]. Journal of materials research, 2002, 17(10): 2660-2671.
- [13] YU B, YANG L F, WU M, et al. Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures [J]. Construction and building materials, 2014, 54: 385-401.
- [14] 刘国强, 张东方, 陈昊翔, 等. 2304 双相不锈钢钢筋在混凝土孔隙模拟液中的电化学腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 204-212.
LIU G Q, ZHANG D F, CHEN H X, et al. Electrochemical corrosion behavior of 2304 duplex stainless steel in a simulated pore solution in reinforced concrete serving in marine environment [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(1): 204-212.
- [15] XU G, LIU L, BAO H, et al. Mechanical properties of steel corrosion products in reinforced concrete [J]. Materials and structures, 2017, 50: 1-10.
- [16] CHEN F J, LI C Q, BAJI H, et al. Quantification of non-uniform distribution and growth of corrosion products at steel-concrete interface [J]. Construction and building materials, 2020, 237: 117610.
- [17] 王新伟. 纳米压痕仪的校准及标物的研制[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
WANG X W. Calibration of nanoindentation instrument and research of the standard substance [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- (本文编辑 王璁)