

· 信息技术 ·



# 基于 CFD 仿真的煤炭港口堆场 垛位起尘特性研究 \*

张 红, 姜 影, 郭家琪, 王文渊, 郭子坚

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 露天堆放的煤堆是煤炭码头堆场粉尘污染的主要来源。现行港口管理中针对各煤堆除尘作业的实施多依赖经验, 未能充分考虑煤堆起尘区域的特点, 造成抑尘效果不佳或资源浪费。对考虑外界影响因素变化下的煤炭码头露天堆场散逸粉尘扩散进行定量研究, 以中国北方某煤炭出口码头堆场为例, 考虑在不同风速、多种风向入射角( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ )下的多组合试验工况, 采用计算流体力学(CFD)软件对各煤堆粉尘扩散进行数值模拟, 将具体起尘区域可视化, 并计算得到煤堆表面的粉尘扩散量。针对性分析不同位置的煤堆起尘特点, 可为相应条件下堆场除尘作业提供理论参考。

**关键词:** 煤; 露天堆场; 除尘作业; 数值模拟; 粉尘排放

中图分类号: U658.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0156-06

## Dust emission characteristics of stack in coal terminal storage yards based on CFD simulation

ZHANG Hong, JIANG Ying, GUO Jiaqi, WANG Wenyuan, GUO Zijian

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The coal piles stacked in the open yard are the main source of dust pollution in the coal terminal. The implementation of dust suppression for each coal pile in the current port management relies on experience and the characteristics of the dust generation area are not fully considered, resulting in poor dust suppression or wasted resources. Therefore, a quantitative study of fugitive dust diffusion in open yards at coal terminals considering changes in external influences is carried out in this paper. Taking a coal export terminal yard in northern China as an example, multiple combinations of experimental conditions at different wind speeds and various wind incidence angles ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) are considered. A numerical simulation of the dust diffusion in each pile is carried out using computational fluid dynamics (CFD) software to visualize the specific areas of dust emission and to calculate the amount of dust emissions on the surface of the piles. The characteristics of dust emissions from coal piles at different locations are analyzed specifically providing a theoretical reference for dust suppression operations in the corresponding yard conditions.

**Keywords:** coal; open storage yard; dust removal operation; numerical simulation; dust emission

露天堆场堆存是煤炭水路转运过程中的核心环节。而露天堆场作业机械多为封闭式, 因此露天堆放的煤堆为主要的粉尘扩散源。目前

国内外港口针对堆场采用的主要抑尘措施可归纳为: 1) 设置屏障, 降低作业区风速<sup>[1-2]</sup>; 2) 喷雾增湿<sup>[3]</sup>, 喷水控制粉尘排放是目前最有效和成

收稿日期: 2023-05-17

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200); 国家自然科学基金项目(52202386, 52272318); 国家水运安全工程技术研究中心开放基金项目(C202301)

作者简介: 张红(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口规划与港口物流。

本较低的措施之一; 3) 其他方法, 如微生物吸附抑尘等<sup>[4]</sup>。当前港口管理者针对各煤堆的除尘作业多依赖经验, 忽略了不同垛位起尘区域及扩散量的不同。因此本文结合粉尘扩散量分析不同垛位的起尘特点, 为后续精准抑尘作业的研究提供参考。

针对煤堆起尘的问题, 国内外学者采用风洞试验进行了大量研究, 总结出不同煤粉的起动速度、单堆煤起尘量与风速的关系<sup>[5]</sup>。但由于风洞试验存在缩尺效应、起动条件没有准确而严格的规定等影响因素, 各个学者的研究结果存在差别。与此同时, 目前此类研究大多只是针对单个煤堆展开的, 尚未考虑实际码头堆场为多垛位布置的情况。

目前量化表面粉尘扩散量最常用的方法为利用美国环保局提出的排放系数公式<sup>[6]</sup>。随着计算机技术的发展, 许多研究利用计算流体力学软件量化工业场地中各种形状、尺寸的煤堆的流场结构。Cong等<sup>[7]</sup>研究发现改变堆料间距可以减少粉尘排放, 但其仅说明了堆与堆之间“阴影效应”的存在, 并没有进一步讨论每个垛位受影响的程度; Duan等<sup>[8]</sup>研究单向风作用下單个煤堆的粉尘扩散特性。

综上所述, 已有对煤堆起尘问题的研究多局限于针对单个煤堆, 研究煤堆的起动速度及起尘量, 没有研究分析露天堆场密集煤堆的起尘特点及各垛位煤堆起尘区域的差异。因此本文以中国北方某大型煤炭码头为例, 利用Fluent软件模拟多个煤堆在不同风况的流场, 分析各垛位的侵蚀区域及粉尘扩散量特点, 指出起尘重点区域, 为具有平顶堆垛的煤炭码头除尘作业提供数据基础。

## 1 排放因子

美国环境保护局提出使用排放因子 $F_E$ 估算工业地形中堆场的粉尘排放量, 公式为:

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

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

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

式中:  $k$  为粒度乘数, 取 0.5;  $N$  是每年的扰动次数, 取 1;  $P_i$  为侵蚀潜力,  $\text{g}/\text{m}^2$ , 按式(2)计算;  $S_i$  为煤堆表面积,  $\text{m}^2$ ;  $u^*$  为煤堆表面摩擦速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_t^*$  为煤堆表面临界摩擦速度, 本文取  $0.35 \text{ m}/\text{s}$ <sup>[9-10]</sup>;  $u_{10}^+$  为  $10 \text{ m}$  高度处测得的最大风速,  $\text{m}/\text{s}$ , 根据码头附近环境监测站实际数据, 近年最大持续风速为  $10 \text{ m}/\text{s}$  左右, 风速较低时煤堆不起尘, 因此本文设置  $10$ 、 $8$ 、 $5 \text{ m}/\text{s}$  3 种风速;  $u_s$  为距离煤堆表面  $25 \text{ cm}$  处测得的风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_r$  为  $10 \text{ m}$  高度处测得的风速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

## 2 煤堆侵蚀数值模拟

本文煤堆尺寸参考中国北方某煤炭码头煤堆的实际尺寸, 平顶堆垛底部长  $150 \text{ m}$ 、宽  $48 \text{ m}$ , 高  $13.5 \text{ m}$ , 静休止角取  $35.7^\circ$ , 以  $1:300$  的比例尺对实际煤堆建模, 煤堆表面及形状不因发生侵蚀而变化。

在固定的堆场中, 不同风入射角度(风向与煤堆长轴的夹角)工况产生的风速流场有较大的不同。实际情况下环境监测站主要监测  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3 种煤码头的常见风向, 故本文研究  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3 种风向对垛位颗粒物起尘的影响。为方便后续对每个垛位的起尘特点分析, 本文对不同垛位进行编号, 编号仅表示煤堆与风向的相对位置。Turpin 等<sup>[11]</sup>指出各个面的投影面积与对应的测试段面积之比即阻塞比都不超过 2% 以保证空气动力学独立性, 因此计算域及模型编号如图 1、2 所示。

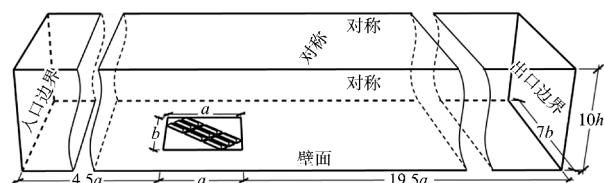


图 1 计算域

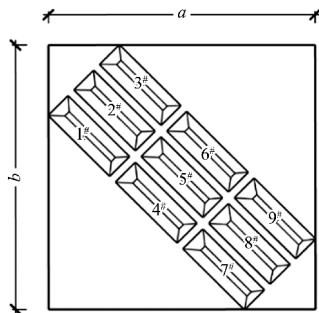


图 2 堆位编号

本文采用 ICEM 软件进行建模及网格划分，在煤堆上方边界层使用棱柱网格保证数值模拟的计算精度。关于计算域边界条件的设置，入口速度剖线采用指数曲线，公式为：

$$v = v_0 \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中： $\alpha$  为指数，取 0.16； $v_0$  为 10 m 参考高度处的平均风速，m/s； $z$  为任一高度，m； $v$  为对应高度平均风速，m/s。根据 Badr 等<sup>[12]</sup>相关研究，数值模拟中计算的归一化值与当前设定的风速无关，因此数值模拟仅针对一个风速剖面曲线进行。

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，粗糙高度分别为 0.050、0.005 m。出口条件为充分发展的 Outflow。湍流模型采用剪应力传输模型 (SST)  $k-\omega$  (湍流动能-耗散率)。采用 SIMPLEC 算法进行压力-速度耦合计算。当残差归一化值的均方根小于 0.001 时，认为计算结果收敛。

本文设置 5 个方案对网格的独立性进行研究，即设置 5 个计算域网格边长和煤堆表面网格边长组合为：方案 1 为 20、2 m；方案 2 为 15、3 m；方案 3 为 20、3 m；方案 4 为 20、4 m；方案 5 为 20、5 m，分别对煤堆表面 6 个点进行风速的测量，如图 3 所示，不同网格条件下的风速计算结果如图 4 所示。根据计算结果并综合考虑计算时间效率，选择方案 3 即计算域网格边长为 20 m、煤堆表面网格边长为 3 m 进行后续的模拟研究。

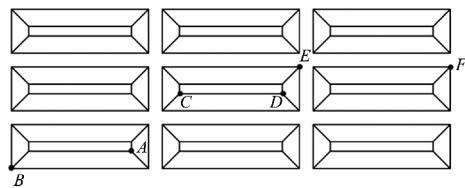


图 3 网格独立性检验点位

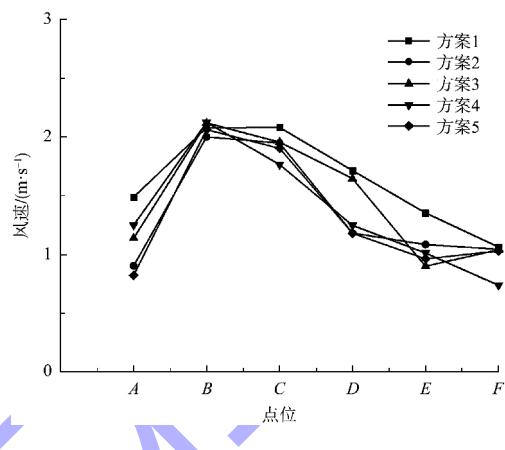
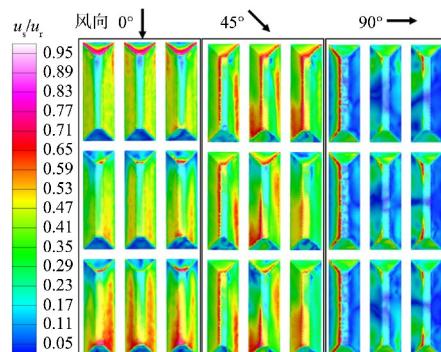


图 4 网格独立性检验结果

### 3 结果分析

在实际情况中，不同风向产生不同的气流变化，尤其是密集分布的堆场区域，煤堆后产生大小不同、位置不同的旋涡，对归一化速度的分布产生极大的影响。

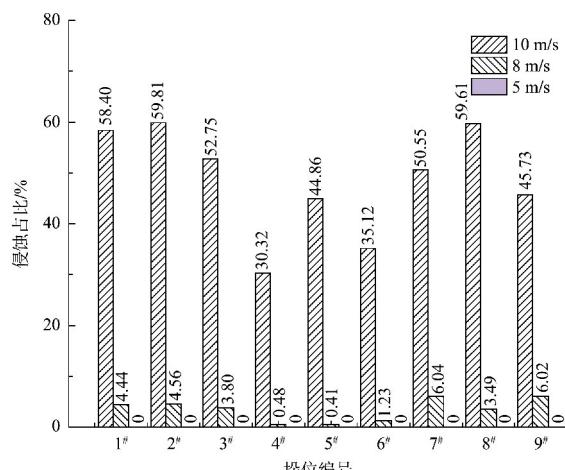
整理数值模拟结果，导出煤堆不同工况下归一化风速  $u_s/u_r$  的云图如图 5 所示。可以发现，沿斜坡向上和朝向侧面的渐进流动加速，堆顶和侧面的表面流体分离，且风速随着高度的增加而增加，最大值均出现在迎风面最高处。堆顶的气流分离导致背风面产生尾流区，剪应力较低，侵蚀不发生。

图 5 不同风入射角度下  $u_s/u_r$  云图

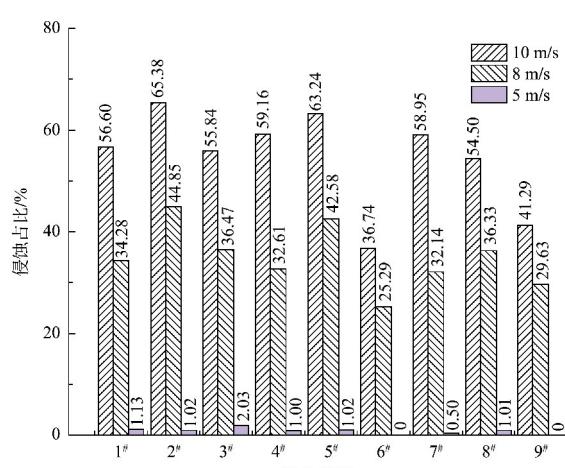
### 3.1 侵蚀区域分析

根据排放因子公式, 当摩擦速度大于煤颗粒的临界摩擦速度(即 $u^* > u_{t^*}$ )时, 表面颗粒才会产生起动现象。3种风速工况对应的归一化风速 $u_s/u_r$ 分别大于0.35、0.44、0.70时, 煤堆表面颗粒起动扩散。输出数值模拟计算的结果, 各个煤堆上可侵蚀区域的百分比见图6。不同入射角度下, 煤堆表面的侵蚀现象随风速增大的变化情况见图7。

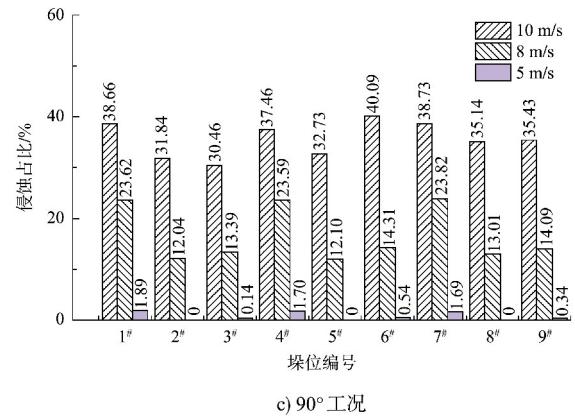
在风入射角度为0°时, 8 m/s风速下煤堆表面出现侵蚀现象。随着风速增大, 迎风侧前端被侵蚀区域面积增大, 靠近风源的煤堆除背风面及顶面几乎全部存在粉尘扩散现象, 起动区域占比均在50%以上, 后排垛位的煤堆两侧出现大面积的起尘区域。值得注意的是, 下风口垛位被侵蚀区域位于煤堆的后半段, 且内侧侵蚀强度更大。背风侧不存在起尘现象。



a) 0°工况



b) 45°工况



c) 90°工况

图6 煤堆表面可侵蚀区域面积占比

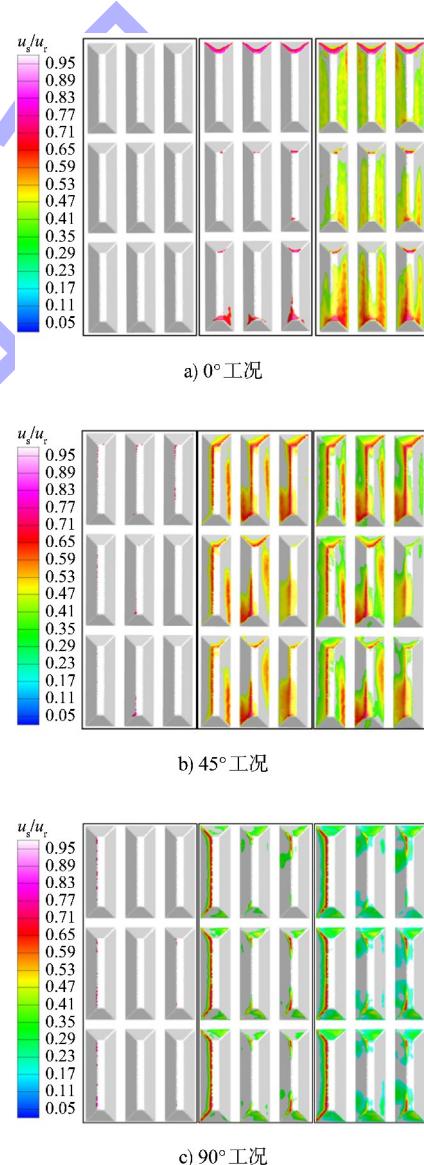


图7 煤堆表面可侵蚀区域随风速增大变化

在风入射角度为45°时, 有一条明显的与来风方向垂直的起尘区域。在这个入射角度下, 流场

不对称，随着风速的增大，煤堆下游区域背风面产生较大的旋涡，使煤堆的背风侧也存在大面积的被侵蚀区域，且位于底部与地面接触处，归一化风速最大值为 0.98，具有极大的侵蚀势。在此风入射角度工况下，煤堆起尘区域占比较大。

当风入射角度为 90° 时，迎风面面积较大，煤堆长边受遮蔽作用较强，起尘主要集中在顶面及短边侧面。随着风速的增大，侵蚀强度逐渐增大，区

域扩散到与两侧的交界面处。当风速增大到 10 m/s，迎风面两侧出现大面积侵蚀区域，起尘区域面积占比最大为 40.0%。

### 3.2 起尘特点分析

将结果整合到排放因子  $F_E$  公式中，研究不同垛位的粉尘排放量。3 种入射角度，不同风速工况下，平顶垛位在一年中发生一次扰动所产生的粉尘排放量见表 1。

表 1 不同工况下各个垛位粉尘排放量计算结果

风向/ (°)	风速/ (m·s⁻¹)	每个垛位排放量/g									排放 总量/g
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	
0	10	2 820	3 072	2 591	1 013	1 596	1 531	3 183	3 613	2 895	22 315
	8	387	467	326	14	12	63	125	33	191	1 618
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	10	11 582	15 268	13 856	11 130	13 559	6 320	10 563	11 843	9 014	103 136
	8	3 858	5 309	5 124	3 574	4 431	1 672	3 255	3 955	2 960	34 138
	5	33	15	56	19	22	0	8	30	0	183
90	10	8 838	3 234	3 750	8 650	3 774	4 985	8 868	3 592	4 456	50 147
	8	3 104	451	741	3 013	785	1 261	3 107	562	995	14 019
	5	61	0	2	49	0	12	58	0	8	190

#### 3.2.1 总粉尘扩散量

由表 1 可以看出，风速增大会极大程度上增大粉尘排放量，在风入射角度固定为 0° 时这种增大现象尤其明显，当风速增加到 10 m/s 时，垛位总粉尘扩散量达到了 22.3 kg，为 8 m/s 风速下的 13.8 倍。但总体仍比其他风向工况的低。当风速为 5 m/s 时，各种风入射角度工况下粉尘扩散量极少。

粉尘排放量与入射角度为非线性关系。在这 3 种风向工况下，粉尘扩散量最多的为 45°，在风速为 10 m/s 时，起尘量达到了 103.1 kg。不同风速对于风入射角度变化导致的粉尘扩散量产生的贡献不同。当风速为 10 m/s 时，风入射角度为 0° 工况下 9 个煤堆粉尘扩散总量为 22.3 kg；45° 工况下粉尘扩散总量为 103.1 kg，大约为 0° 工况下的 4.6 倍；90° 工况下粉尘扩散总量为 50.1 kg，为 0° 工况的 2.2 倍。而在风速为 8 m/s 时，这个倍数分别为 20 和 9。

#### 3.2.2 分垛位起尘特点分析

与总粉尘扩散量变化规律类似，风速增大会

使各个垛位粉尘扩散量增大。当风速为 5 m/s 时，各堆垛起尘量趋近于 0。此外，10 和 8 m/s 风速下垛位起尘规律类似，只是量不同。因此后续只讨论 10 m/s 风速不同风入射角度工况下不同垛位的起尘特点。10 m/s 风速下各垛位粉尘扩散量如图 8 所示。

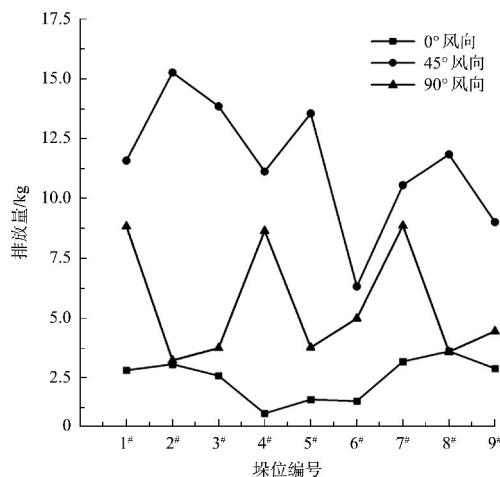


图 8 10 m/s 时不同风向工况各垛位粉尘扩散量

位于上风向位置处垛位不受其他堆垛的遮蔽作用，直接受来流的侵蚀，起尘量较高。位于下

风向的垛位受复杂的涡流影响较大, 起尘规律较为复杂。当入射风向为0°时, 迎风面面积较小, 各个垛位之间粉尘排放量的差距不大。 $1^{\#}$ ~ $3^{\#}$ 垛位在上风地带的边缘位置, 因此起尘量较大。中间3个垛位由于前排垛位的遮蔽作用, 起尘量大幅下降, 为第1排垛位的36%。当风向角为45°时, 迎风面积最大, 各个煤堆的起尘量均最大, 且不同垛位之间粉尘排放量的差距较明显。存在直接暴露面的垛位起尘量较大。起尘量最大的为 $2^{\#}$ 垛位, 1次扰动的起尘量可达15.3 kg。 $6^{\#}$ 垛位在此风向下处于下风向且处于中间位置, 两侧都存在遮挡, 因此起尘量最少。当风向角为90°时, $1^{\#}$ 、 $4^{\#}$ 、 $7^{\#}$ 垛位在上风口, 前面无遮挡, 3个堆起尘量接近且此量最大。

#### 4 结论

1) 本文利用流体力学计算软件模拟堆场中不同风条件下密集堆放的煤堆表面的流场结构。将煤堆表面归一化速度可视化分析不同工况下煤堆起尘区域, 结果代入排放因子公式定量分析不同垛位煤堆的起尘特点。

2) 从粉尘扩散量的角度考虑, 0°工况下不同垛位起尘量由多到少依次为下风口垛位、迎风侧垛位、中间遮蔽垛位。90°工况下迎风侧煤堆起尘量最多, 其他位置煤堆相差不大, 可减少到最大值的40%左右。当风斜向入射时, 两侧都存在遮挡的煤堆起尘量最大, 远超其他工况。

3) 从提高抑尘效率的角度考虑, 当来风方向为0°或90°时, 抑尘作业须重点考虑最前排堆场的迎风面、中间排垛位的顶部、下风口煤堆后方顶部, 当风速较大时, 还需要注意堆的侧面。当来风方向与煤堆轴线成其他夹角时, 重点注意迎风面尤其是其顶部, 此外还需要注意底部尤其是与地面的交界处。

#### 参考文献:

- [1] DONG G, CHEN T, REN C, et al. Wind tunnel investigation of wind reduction effect under porous fences protection[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2023, 232: 105250.
- [2] 陈磊, 李松, 赵华山, 等. 矿石堆场抑尘网对不同风速折减效果的数值分析[J]. 水运工程, 2023(2): 23-28.
- [3] 王洪宾, 马光辉, 汪大春, 等. 煤炭堆场智能水幕系统洒水设计与应用[J]. 水运工程, 2022(2): 83-86, 105.
- [4] ZHANG M, ZHAO Y Y, HU X M, et al. Study on the adsorption and dust suppression mechanism of urease-producing bacteria on coal dust [J]. Powder technology, 2022, 409: 117801.
- [5] 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.
- [6] United States Environmental Protection Agency. AP-42: compilation of air emissions factors [R]. Kansas City: Midwest Research Institute, 2006.
- [7] 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.
- [8] 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: 47182-47195.
- [9] FURIERI B, SANTOS J M, RUSSEIL S, et al. Aeolian erosion of storage piles yards: contribution of the surrounding areas [J]. Environmental fluid mechanics, 2014, 14(1): 51-67.
- [10] TURPIN C, HARION J L. Effect of the topography of an industrial site on dust emissions from open storage yards [J]. Environmental fluid mechanics, 2010, 10: 677-690.
- [11] 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.
- [12] BADR T, HARION J L. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions [J]. Atmospheric environment, 2007, 41(2): 360-368.

(本文编辑 王璁)