



基于 CFD-DEM 的干散货堆场 动态起尘影响因素研究

朱信源^{1,2}, 郑立松¹, 季皆名², 封学军²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 港口粉尘污染源包括静态起尘和动态起尘两个方面, 现阶段利用计算流体力学(CFD)数值模拟研究港口静态起尘已取得丰硕成果, 但在动态起尘方面的研究仍处在发展阶段, 尤其是较少考虑堆取料机转速、风况等因素的影响。采用离散元法(DEM)与 CFD 相结合的方法研究港口起尘有很大前景。以江苏某干散货港区煤炭堆垛和 WUD 400/700 型号输煤斗轮机为对象, 采用 CFD-DEM 流固耦合模拟研究斗轮机作业对动态起尘的影响。结果表明, 起尘量随斗轮机转速和风速增加均呈指数增长, 建议采用转速 8~9 r/min 作业兼顾经济与环境效益; 起尘量随风向先增后减, 建议在使用传统动态起尘经验公式时增加考虑风向对起尘的影响, 并结合实测及试验数据对该公式进行适当修正。

关键词: 干散货堆场; 粉尘污染; 动态起尘; 数值模拟; CFD-DEM

中图分类号: U653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0099-09

CFD-DEM-based study on influencing factors of dynamic dust generation in dry bulk stockyards

ZHU Xinyuan^{1,2}, ZHENG Lisong¹, JI Jieming², FENG Xuejun²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The port dust pollution originates from both the static dust generation and the dynamic dust generation. While the significant progress has been made in using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations to study the static dust generation at ports, research on the dynamic dust generation is still in a development phase, with limited consideration of factors such as the stacker-reclaimer rotational speed and wind conditions. Therefore, combining the discrete element method (DEM) with CFD holds great potential for studying the dust generation at ports. We focus on coal stockpiles at a dry bulk cargo terminal in Jiangsu and the WUD 400/700 coal bucket wheel reclaimer, and use CFD-DEM coupled simulations to study the impact of reclaimer operations on the dynamic dust generation. The results show that the dust generation increases exponentially with both the reclaimer speed and the wind speed. It is recommended to operate at 8–9 r/min rotational speed to balance economic and environmental benefits. The dust generation first increases and then decreases with changes in wind direction. It is suggested that the effect of wind direction on dust generation is added as a consideration when applying traditional empirical formulas for dynamic dust emission, and to appropriately revise the formula on the basis of measured and experimental data.

Keywords: dry bulk stockyard; dust pollution; dynamic dust generation; numerical simulation; CFD-DEM

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 朱信源 (1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口航道及海岸工程水工、总体设计工作。

良好的生态环境是实现我国永续发展的内在要求,也是建设美丽中国和交通强国的重要基础,江苏省作为长三角经济区的重要一员,有着功能完善的港口群,如何在保证稳定、高速、可持续发展的同时减少港口粉尘对大气环境的污染,满足“精准治污”新要求是干散货港口管理方面面临的共同难题。港口颗粒物污染根据其来源有静态起尘及动态起尘两个方面。得益于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术在较低成本下精准分析预测颗粒混合、分离和输运的优势及不浪费试验资源和不借助实测数据的特点,静态起尘在量化研究^[1-2]、堆场布置^[3-5]和起尘影响因素研究^[6-8]方面已取得大量的成果。港口动态起尘属于典型的气固二相流问题,尽管 CFD-DEM 流固耦合技术经历了十余年的发展历程,形成了较为完备的理论基础^[9-11],在流化床模拟^[12]、旋风分离器^[13]、谷物筛分^[14]等工农业场景下被广泛应用,但与港口动态起尘的结合性研究相对较少。

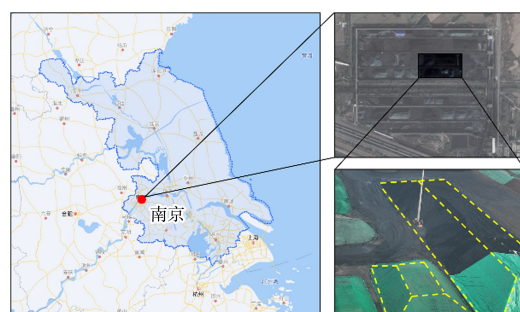
CFD-DEM 技术在起尘研究中的应用方面, Schulz^[15]建立 CFD-DEM 耦合框架,在已有粉尘扩散模型基础上集成粉尘碰撞耦合功能,模拟颗粒间及颗粒与流体间相互作用。但该研究建立在静态起尘的基础上,并未考量动态作业环境下的起尘行为。Torano 等^[16-17]通过仿真模拟研究带式输送机在横向风作用下的起尘行为,但该研究基于 CFD 法为稳态仿真,仅近似考虑了某一时刻带式输送机上物料表面的风蚀情况,并未给出颗粒的运动情况。Roberts 等^[18]通过 CFD-DEM 耦合方法,研究散货船装料时的粉尘扩散现象,分析侧风条件下船舱内的诱导气流及物料卸载时舱内的气流,提出利用颗粒物自由沉降速度评估尘云的形成和扩散。尽管其尝试了对颗粒物进行模拟,但由于计算成本过高最终放弃采用 Lagrange 法追踪离散颗粒。研究发现在不进行粉尘抑制的情况下,港口侧向风会加速粉尘的扩散。Yu 等^[19]和王馨雪^[20]均对作业形成的颗粒物进行耦合模拟并加以追踪,但前者的研究背景未综采工作面,相较港口的动态起尘而言粉尘数量少,颗粒物运动轨迹单一,

实际仿真难度较低;而后者则对钻井产生的岩石碎屑进行仿真,相较于港口颗粒物岩屑体积大,模拟成本和难度较低。可见,港口动态起尘在颗粒物起尘行为、粒径、硬件上的模拟需求都是极高的,长期以来受软、硬件水平的限制导致这个方面的研究不足。

本文以当前江苏沿江港区常见的堆型和斗轮取料机为背景,采用数值模拟与理论公式相结合的手段,通过使用 Fluent、EDEM 软件从斗轮转速、风力和风向入手进行数值模拟研究并提出优化建议。本文采用 CFD-DEM 流固耦合方法模拟堆场斗轮取料产生的粉尘扩散行为也是一次针对港口粉尘治理方面的突破性尝试。

1 研究对象

江苏省内河港口的吞吐量多年保持全国第一。本文根据对西坝港、太仓港、镇江港等江苏沿江干散货港区现场的调研结果,以江苏沿江干散货煤炭港区最常见的梯台形堆垛作为研究对象,见图 1。保持港口堆场总面积、总堆存体积和堆垛外形不变,并且考虑到刚开挖出的煤炭多会经过水洗筛分减少杂质,保证运输安全的同时节约运输成本,因而运抵港区堆存的煤炭多为精煤。



a) 南京西坝港



b) 苏州太仓港



图 1 沿江港区堆型调研结果

Fig. 1 Research results of pile shape in port area along river

2 基于 CFD-DEM 流固耦合的起尘模型构建

2.1 模型构建

通过查阅 GB/T 14695—2021《臂式斗轮堆取料机型式和基本参数》^[21]，本文以 WUD 400/700 型号输煤斗轮机为原型，以高度 8 m 煤炭堆垛为研究对象建立简化仿真模型。根据斗轮转速、风力、风向的不同，设置 17 组参照试验，见表 1。

表 1 各组试验的参数设置

Tab. 1 Parameter settings for each group of experiments			
试验组	风向/(°)	风速/(m·s ⁻¹)	斗轮转速/(r·min ⁻¹)
1	0	8	8
2	0	10	8
3	0	12	8
4	0	14	8
5	0	16	8
6	22.5	16	8
7	45.0	16	8
8	67.5	16	8
9	90.0	16	8
10	112.5	16	8
11	135.0	16	8
12	157.5	16	8
13	180.0	16	8
14	0	16	6
15	0	16	7
16	0	16	9
17	0	16	10

注：风速为未经过计算处理的初始风速，非速度入口的输入值。

模型尺寸及计算域设置见图 2。其中，斗轮直径设置为 6 m，轮身宽度设置为 0.6 m，共有 8 个容积约为 150 L 的铲斗沿轮周均匀分布。动态计算域被定义为 1 个直径为 8 m、厚度为 2 m 的圆柱体，斗轮设置于动态计算域柱体正中心并被完全包裹，计算域底端预留 1 m 间距设置料堆；静态计算域的长、宽、高分别为 50、30、20 m，在确保阻塞比控制在 2.5%~3.0%的前提下为节约计算成本，耦合模型入口风速设定为恒定风速。

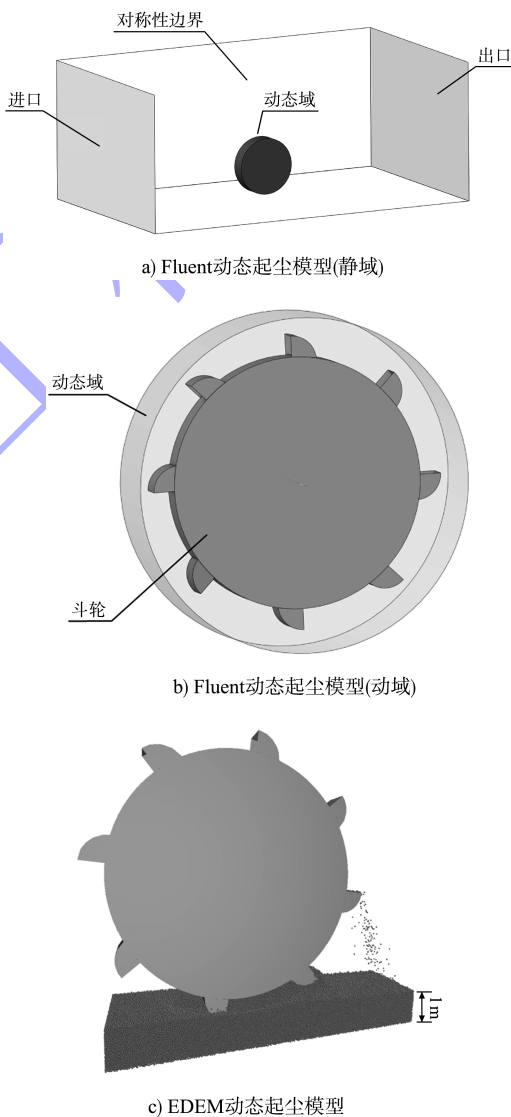


图 2 动态起尘计算域及模型构建

Fig. 2 Computational domain and model construction of dynamic dust emission model

2.2 网格设置及灵敏度分析

随着计算流体力学软件的不断更新升级，非结构化网格的使用愈加广泛，相较于结构化网格，

其在复杂区域的表现更为突出且适用于表现梯台这种不规则形状, 本文采用非结构化网格中四面体与六面体结合的方式对静态计算域进行划分: 边界层用六面体网格划分 20 层, 初始层高为 0.003 m, 满足剪切应力传输 (SST) 湍流动能-比耗散率 ($k-\omega$) 湍流模型的 Y+ 要求。动态计算域部分采用非结构化六面体网格对动态起尘模型进行划分, 不设置边界层网格。

网格划分时, 疏密程度会影响计算精度, 本文以斗轮表面最小网格尺寸为准则, 划分出 0.16、

0.18、0.20、0.22 和 0.24 m 5 种网格尺寸进行灵敏度分析, 结果见图 3。可见斗轮后 1.5~3.0 m 处各尺寸模拟结果相近, 最小尺寸为 0.16 与 0.18 m 的情况模拟风速值大于另外 3 种情况, 此外这两种网格划分方式所模拟出的风速值在 4.0~6.5 m 内一致, 因此认为 0.18 m 网格尺寸已满足计算要求。配套网格划分方案为: 静态域全局最大 1 m、局部最小 0.4 m, 设置边界层; 动态域全局最大 0.4 m、局部最小 0.18 m, 不设边界层。

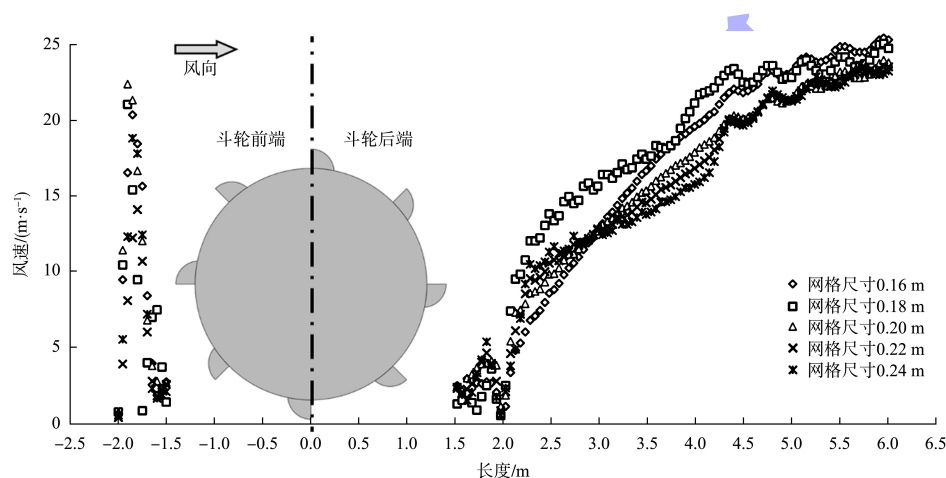


图 3 网格灵敏度分析结果
Fig. 3 Mesh sensitivity analysis results

3 动态起尘影响因素分析

3.1 起尘量的量化方法

根据模拟结果得出斗轮取料过程中的粉尘扩散情况, 在斗轮后方 (下风向处) 进行颗粒捕捉, 见图 4。捕捉域长 17 m、宽 10 m、高 6 m, 为避免堆料表面起尘行为对结果的影响, 捕捉域位于堆料上方 0.2 m。在整个模拟作业过程结束时, 仍留存在捕捉域内的颗粒为起尘颗粒, 并根据留存数量计算起尘量, 由于设置曳力放大系数, 当前粒径下留存的颗粒总质量即为起尘量。

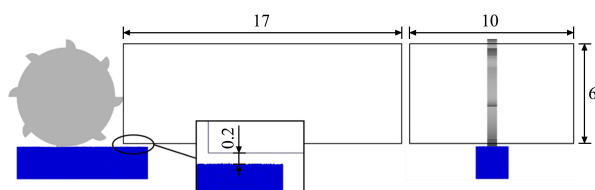


图 4 颗粒追踪区域 (单位: m)
Fig. 4 Particle tracking area (unit: m)

以斗轮转速 8 r/min 为例对起尘颗粒进行捕捉, 结果见图 5。可以看出, 在 0~3 s 的作业过程中颗粒起尘量呈现双峰 (B_1 、 B_2) 双谷 (C_1 、 C_2) 的变化趋势。在作业刚开始阶段 (A) 斗轮取料未产生粉尘, 捕捉域记录到少部分受风力作用产生的堆表面起尘颗粒。

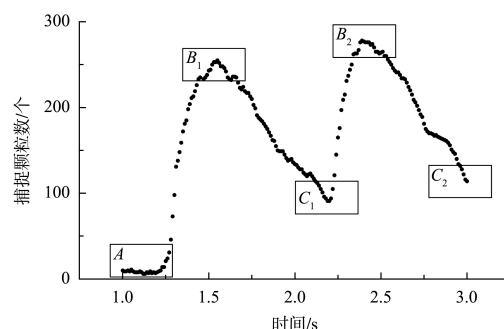


图 5 转速为 8 r/min 时斗轮起尘量
Fig. 5 Dust generation by bucket wheel at rotational speed of 8 r/min

撒料进入捕捉域前后的情况见图 6、7。其中图 6 为抓斗撒料完全进入捕捉域中, 由于该时刻的撒料较为集中, 捕捉到的颗粒数量迅速上升并达到峰值 B_1 和 B_2 ; 图 7 为第二斗撒料进入捕捉域前, 第一斗的撒料会在区域中迅速沉降, 捕捉到的颗粒数量急剧下降达到谷值 C_1 和 C_2 。可见谷值 C_1 处捕捉到的颗粒数仅为第一斗充分扩散、沉降的情况, 比实际扩散量小; 而谷值 C_2 处所捕捉的颗粒数为第一斗撒料充分扩散、沉降而第二斗为充分沉降的情况, 数值会比实际扩散量大, 因而实际的起尘量介于谷值 C_1 与 C_2 之间。为方便计算, 以两个谷值对应颗粒数的算数平均值作为斗轮动态起尘数量的模拟值。起尘过程从第一斗撒

料进入捕捉域的时刻开始计算直至模拟结束。并将上述方法所得起尘量与 JTS/T 105—2021《水运工程项目环境影响评价指南》^[22] 中动态起尘公式的计算值进行比较。该计算公式为:

$$Q = \alpha\beta \cdot \frac{He^{\omega_1(\omega_0 - \omega)} Y}{1 + e^{0.25(v_{50} - v)}} \quad (1)$$

式中: Q 为动态起尘量, kg/h; α 为货物类型调节系数; β 为作业系数, 取料作业时取 2; H 为作业物落差, m; ω_1 为水分作用系数, 取 0.40~0.45; ω_0 为水分作用效果临界值, 煤炭取 6%; ω 为货物真实含水率, %; Y 为装卸作业效率, 与转速相关, t/h; v_{50} 为作业起尘量达到最大起尘量 50% 时的风速, 取 16 m/s; v 为瞬时风速, m/s。

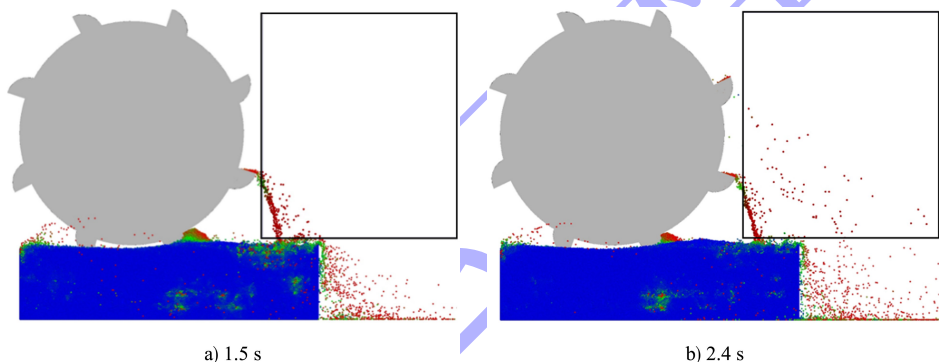


图 6 撒料进入捕捉域的情况
Fig. 6 Situation of particle entering into tracking area

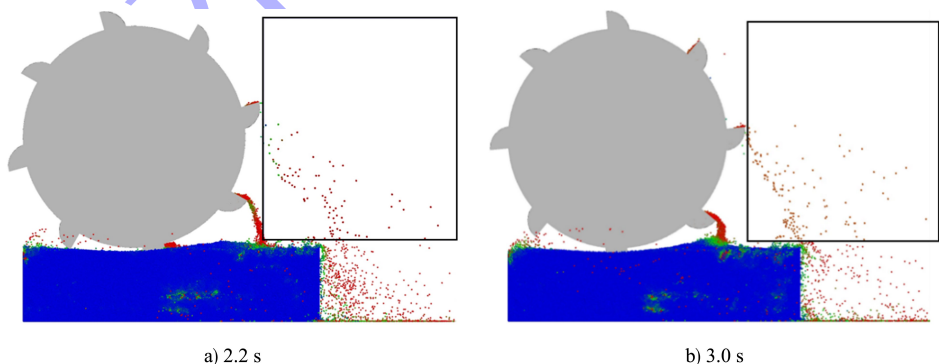


图 7 撒料在捕捉域中扩散情况
Fig. 7 Spreading situation of particle in tracking area

3.2 转速对起尘量的影响

各转速下的模拟起尘量值及计算起尘量见表 2。采用式(1)进行计算, 其中含水率取最优含水率 8%, 作业落差为 9 m(堆垛高 8 m, 斗轮转动抬高

约 1 m 后产生撒料)。可以看出, 模拟值与计算值在同一数量级内, 在转速 7 和 8 r/min 情况下两者结果相近, 误差绝对值在 20% 以内。

表 2 不同转速下的起尘量

Tab. 2 Dust generation under different rotational speed			
斗轮转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	计算起尘量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	模拟起尘量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差 绝对值/%
6	1.93	0.98	49.22
7	2.25	1.86	17.33
8	2.57	2.76	7.39
9	2.89	3.77	30.45
10	3.21	6.70	108.72

两种方法所得的转速-起尘量拟合图见图 8。可以看出,模拟起尘量随转速的增加呈现指数型增加,指数约为 3.8。由于斗轮转速在式(1)中仅与装卸作业效率 Y 相关,而计算起尘量是 Y 的一次函数,故计算起尘量与转速呈线性关系,但随着转速增大,轮周负压区域扩大导致的起尘量增加及抓斗惯性对颗粒的抬升作用等复杂情况将无法通过简单的线性关系满足,这也导致计算起尘量在转速较低时偏高,而转速较高时又明显偏低。本文认为式(1)应对装卸作业效率进行详细解释,并根据不同作业工艺给出修正系数。

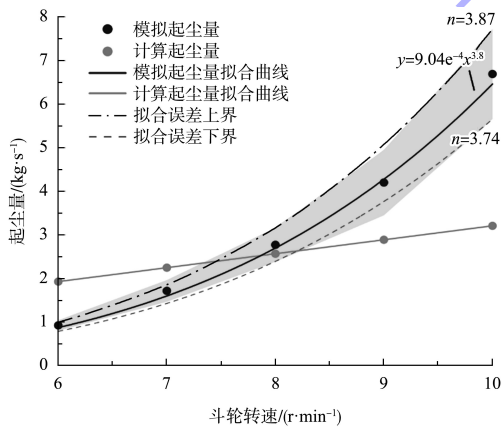


图 8 两种方法得出的转速-起尘量拟合图
Fig. 8 Fitting graph of rotational speed-dust generations
obtained by two methods

3.3 风速对起尘量的影响

由于并没有明确对斗轮作业时转速进行规定,本文认为应当尽量控制转速在 6~8 r/min 这样一个较小的区间,避免因转速过高造成的起尘量激增,故在转速为 8 r/min 的前提下对不同风力时取料产生的动态起尘进行研究,模拟与计算起尘量的比较结果见表 3。可以看出,模拟所得起尘量均高于

计算值,可能的原因是斗轮旋转增强了轮周负压,带动轮周流体,促进颗粒物的起尘行为。

表 3 转速为 8 r/min 时不同风速下的起尘量

Tab. 3 Dust generation at rotational speed of 8 r/min under different wind speed			
风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	计算起尘量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	模拟起尘量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差 绝对值/%
8	0.61	1.27	108.20
10	0.94	1.57	67.02
12	1.38	1.84	33.33
14	1.94	2.18	12.37
16	2.57	2.76	7.39

对两种方法得到的起尘量进行拟合,结果见图 9。由于风廓线的指数函数特性,图中计算起尘量随风速呈指数型增长,同时模拟值也随风速呈指数型增长,与计算值的变化趋势一致。因此尽管模拟值偏高,但整体而言是具有可靠性的。分析表 2、3 数据可以发现,在不同风速下的最大起尘量模拟值约是最小值的 2 倍,而在转速影响下,最大模拟值达到了最小值的 6.8 倍。由此可推断出转速对起尘量的影响大于风速对其的影响,所以在堆场作业时应优先关注斗轮取料时作业速率,以期达到港区粉尘“源头治理”的效果。

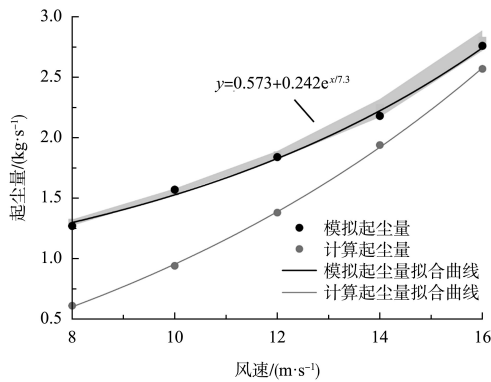


图 9 两种方法得到的起尘量拟合图
Fig. 9 Fitting graph of wind speed-dust
generation obtained by two methods

3.4 风向对起尘量的影响

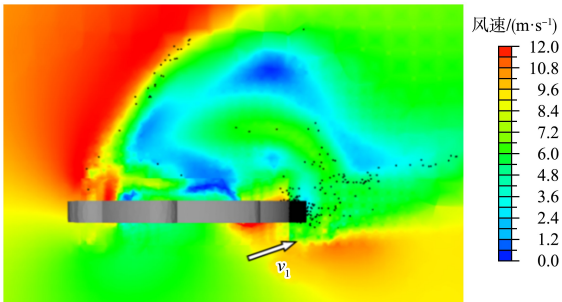
采用同样方法对不同风向下斗轮取料的动态起尘量进行计算,并与计算起尘量进行比较,结果见表 4。可以看出,随风向增大起尘量呈现先增后减的趋势。

表 4 转速为 8 r/min 时不同风向的起尘量
Tab. 4 Dust generation at rotational speed
of 8 r/min under different wind direction

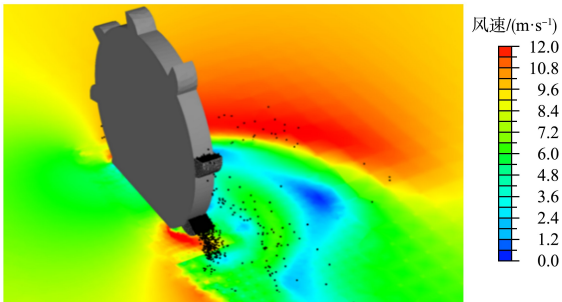
入射风向/ (°)	模拟起尘量/ (kg·s ⁻¹)	计算起尘量/ (kg·s ⁻¹)	误差 绝对值/%
0	2.76	2.57	7.39
22.5	3.01	2.57	17.12
45.0	4.35	2.57	69.26
67.5	6.35	2.57	147.08
90.0	7.59	2.57	195.33
112.5	6.20	2.57	141.25
135.0	5.24	2.57	103.89
157.5	4.52	2.57	75.88
180.0	4.12	2.57	60.31

风向呈 90°垂直入射时起尘量最大为 7.59 kg/s，且入射风向成钝角情况的整体起尘量大于锐角情况，以 45°、90°及 135°入射风向某一时刻的速度云图为例，见图 10，对上述变化趋势加以解释。当风向以某一角度入射时斗轮均会对后方区域起到一定的遮蔽效果，且斜向入射(图 10a)、e))时斗轮对后方遮蔽的效果优于垂向入射的情况(图 10c))；进一步比较两种斜向入射的情况可以看出，45°入射时风需要先绕过斗轮前端才能接触煤炭颗粒并带动颗粒起尘，与 135°入射时直接接触颗粒的风速 v_2 相比，风速 v_1 受到斗轮阻挡而有所损耗，故造成的起尘量相对较小。同时斗轮取料形成的落料会对来流风形成一定的阻挡作用，90°和 135°入射时来流风几乎直接作用于料束，落料的阻挡作用较弱；而风向 45°入射时落料起到了遮蔽效果，使起尘量较小且扩散范围不大(图 10a))。因而在港区布置时应尽可能避免斗轮与入射风成直角，尽量保证一个较小的角度且作业安排在下风向进行。

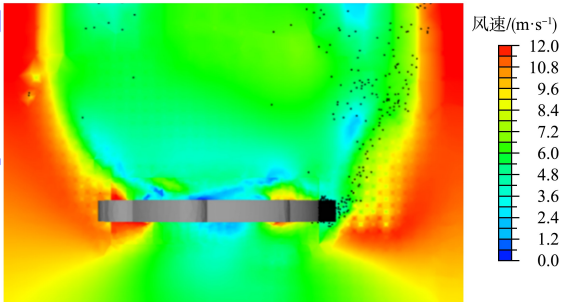
根据 3.2 和 3.3 节可知，通过 CFD-DEM 耦合所得的起尘量在风速 16 m/s、转速 8 r/min 时与计算值基本一致，误差仅为 7.39%。在此基础上，本文发现不同风向模拟所得起尘量差距过大，与计算起尘量产生较大误差，在 90°入射时误差达到最大，接近 200%，这是不妥的。本文认为式(1)存在一个较大的缺陷，即缺少考虑风向影响的校准系数，导致大多数情况下的计算结果失真，并建议后续在实测数据的支持下对该公式进行修正。



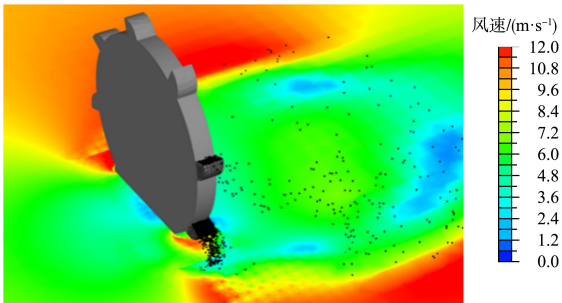
a) 风向45°，俯视



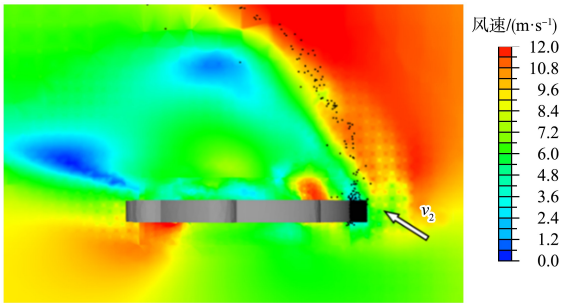
b) 风向45°，侧视



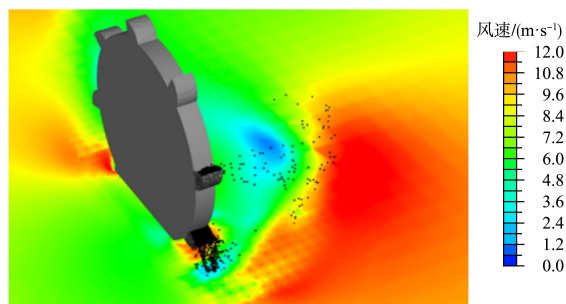
c) 风向90°，俯视



d) 风向90°，侧视



e) 风向135°，俯视



f) 风向135°, 侧视

图 10 不同风向下切面风速云图

Fig. 10 Cross-section wind speed cloud map under different wind direction

4 结论

1) 本文提出一种基于 CFD-DEM 的港区动态起尘量的量化方法, 并与传统经验公式进行比较, 验证了该方法的可行性。

2) 起尘量随斗轮转速呈指数型增长。转速 8 r/min 时拟合结果与公式计算结果误差较小, 为 7.39%。且该转速兼顾环境因素与经济效益, 认为其是最优转速。同时本文认为经验公式忽视了取料方式对起尘的影响, 导致计算起尘量呈线性增长, 与实际不符, 建议结合实测数据细化作业方式系数。

3) 起尘量随风速增大呈指数型增加。不同风力下起尘量最大值约为最小值 2 倍, 远小于不同转速下两者的比值 (6.8 倍), 故本文认为风力的影响远小于作业方式, 因此堆场作业时应优先关注斗轮取料时作业速率, 以期达到港区粉尘“源头治理”的效果。

4) 风向对起尘的影响较为复杂, 一般来说呈抛物线变化。由于传统经验公式未考虑风向的影响, 同风速下垂直入射风向产生的起尘量与计算结果误差达到 200%。本文认为经验公式忽视了风向的影响, 建议结合实测数据修正经验公式。

参考文献:

- [1] BADR T, HARION J L. Numerical modelling of flow over stockpiles: implications on dust emissions[J]. Atmospheric environment, 2005, 39(30): 5576-5584.
- [2] BADR T, HARION J L. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions [J]. Atmospheric environment, 2007, 41(2): 360-368.
- [3] 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.
- [4] CONG X C, DU H B, PENG S T, et al. Field measurements of shelter efficacy for installed wind fences in the open coal yard[J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2013, 117: 18-24.
- [5] NOVAK L, BIZJAN B, PRAZNIKAR J, et al. Numerical modeling of dust lifting from a complex-geometry industrial stockpile [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 61(11): 621-631.
- [6] DE MORAIS C L, FERREIRA M C S, SANTOS J M, et al. Influence of non-erodible particles with multimodal size distribution on aeolian erosion of storage piles of granular materials [J]. Environmental fluid mechanics, 2018, 19: 583-599.
- [7] FERREIRA M C S, FURIERI B, SANTOS J M, et al. An experimental and numerical study of the aeolian erosion of isolated and successive piles [J]. Environmental fluid mechanics, 2020, 20: 123-134.
- [8] FERREIRA M C S, FURIERI B, DE MORAIS C L, et al. Experimental and numerical investigation of building effects on wind erosion of a granular material stockpile [J]. Environmental science and pollution research, 2020, 27: 36013-36026.
- [9] KLOSS C, GONIVA C, HAGER A, et al. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM[J]. Progress in computational fluid dynamics, 2012, 12(2/3): 140-152.
- [10] AKBARZADEH V, HRYMAK A N. Coupled CFD-DEM of particle-laden flows in a turning flow with a moving wall[J]. Computers & chemical engineering, 2016, 86: 184-191.
- [11] WANG Z K, TENG Y J, LIU M B. A semi-resolved CFD-DEM approach for particulate flows with kernel based approximation and Hilbert curve based searching strategy[J]. Journal of computational physics, 2019, 384: 151-169.
- [12] TSUJI Y, KAWAGUCHI T, TANAKA T. Discrete particle

- simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. Powder technology, 1993, 77(1): 79-87.
- [13] 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(5): 834-847.
- [14] EL-EMAM M A, ZHOU L, SHI W D, et al. Theories and applications of CFD-DEM coupling approach for granular flow: a review[J]. Archives of computational methods in engineering, 2021, 28: 4979-5020.
- [15] SCHULZ D, SCHWINDT N, SCHMIDT E, et al. Investigation of the dust release from bulk material undergoing various mechanical processes using a coupled DEM/CFD approach[J]. Powder technology, 2019, 355: 37-56.
- [16] TORAÑO J A, RODRIGUEZ R, DIEGO I, et al. Influence of pile shape on wind erosion CFD emission simulation[J]. Applied mathematical modelling, 2007, 31(11): 2487-2502.
- [17] TORAÑO J A, TORNÓ S, ALVAREZ-FERNANDEZ I. Simultaneous evaluation of wind flow and dust emissions from conveyor belts using computational fluid dynamics (CFD) modelling and experimental measurements [J]. Powder technology, 2020, 373: 310-322.
- [18] ROBERTS J, ANDREWS L, WYPYCH P. Analysis of dust dispersion in the loading of a bulk carrier ship using CFD and DEM[J]. Particulate science and technology, 2022, 40(3): 346-354.
- [19] YU H M, CHENG W M, WU L R, et al. Mechanisms of dust diffuse pollution under forced-exhaust ventilation in fully-mechanized excavation faces by CFD-DEM [J]. Powder technology, 2017, 317: 31-47.
- [20] 王馨雪. 基于CFD-DEM方法对井筒内岩屑运移规律的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- WANG X X. Numerical simulation on transportation behavior of cuttings in a horizontal well based on CFD-DEM approach [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [21] 臂式斗轮堆取料机型式和基本参数: GB/T 14695—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Bucket wheel stacker reclaimer-type and basic parameters: GB/T 14695-2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [22] 水运工程建设项目环境影响评价指南: JTS/T 105—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- Specifications for environmental impact assessment of port and waterway engineering: JTS/T 105-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- (本文编辑 王璁)
-
- (上接第75页)
- [7] 港口工程荷载规范: JTS 144-1-2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- Load code for harbor engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [8] 杜陆晔. 框架码头结构二维和三维计算对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 170-171.
- DU L Y. Comparative analysis of 2D and 3D calculations of frame wharf structures [J]. China water transport (the second half of the month), 2018, 18(1): 170-171.
- [9] 陈孝建. 水平集中力在高桩框架码头排架中的分配系数研究[J]. 港工技术, 2022, 59(1): 31-34.
- CHEN X J. Research on distribution coefficient of horizontal force acting on bents of piled frame berth[J]. Port engineering technology, 2022, 59(1): 31-34.
- [10] 赵冲久, 熊洪峰, 刘现鹏. 船舶撞击力在高桩码头排架中的分配研究[J]. 水道港口, 2010, 31(2): 132-137.
- ZHAO C J, XIONG H F, LIU X P. Ship impact force distribution research of pier bent in high-piled wharf[J]. Journal of waterway and harbor, 2010, 31(2): 132-137.
- [11] 徐凤娇. 水平力在高桩码头排架中的分配研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- XU F J. Study on Distribution of horizontal force in the bents of high-pile wharf [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- (本文编辑 王璁)