



矿石堆场抑尘网对不同风速折减效果的数值分析

陈磊, 李松, 赵华山, 尹崇志, 刘文祎, 郭金玲

(青岛港董家口矿石码头有限公司, 山东 青岛, 266400)

摘要: 针对开放性矿石堆场在外力作用下极易造成颗粒扬尘污染的问题, 对防风抑尘网在不同来流下的风速折减效果进行研究。应用 Fluent 提供的 RNG $k-\varepsilon$ 模型对抑尘网后的流场进行数值模拟, 结合实测数据建立三维模型, 计算不同来流条件下料堆表面速度的分布情况。模拟结果表明: 1) 气流经过抑尘网孔隙梳理后, 在抑尘网后存在明显的旋涡回流区, 进而改变料堆表面空气流动结构, 有效降低料堆表面速度。2) 速度综合折减率为 23.52%。不同方向来流的情况下, 旋涡回流区覆盖堆场的面积不同。速度综合折减率具有显著差异性, 差异幅度为 7.69%~50.87%, 北西北、北东北来流衰减作用尤为显著。

关键词: 抑尘墙; 露天堆场; 紊流度; 风速折减

中图分类号: U 658.3; X 820.3; TM 7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0023-06

Numerical analysis of reduction effect of dust suppression net in ore storage yard on different wind velocities

CHEN Lei, LI Song, ZHAO Hua-shan, YIN Chong-zhi, LIU Wen-yi, GUO Jin-ling

(Qingdao Port Dongjiakou Ore Terminal Co.Ltd., Qingdao 266400, China)

Abstract: To address the problem that open ore storage yards are highly likely to cause particle dust pollution under the action of external forces, this paper investigates the wind velocity reduction effect of the windproof and dust suppression net on different incoming flows. Specifically, the paper numerically simulates the flow field behind the dust suppression net with the renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$ model provided by Fluent. Then, it builds a three-dimensional model based on measured data to calculate the velocity distribution on the stockpile surface under different incoming flows. The simulation results suggest the following conclusions: 1) After the airflow is combed by the pores of the dust suppression net, an obvious vortex backflow area emerges behind the dust suppression net. It changes the airflow structure on the stockpile surface, thereby effectively reducing the velocity on the stockpile surface. 2) The comprehensive velocity reduction rate is 23.52%. The area of the storage yard covered by the vortex backflow area varies with the direction of the incoming flow. The comprehensive velocity reduction rate differs significantly, and the difference range is 7.69%-50.87%. The attenuation of north-northwest and north-northeast incoming flows is particularly prominent.

Keywords: dust suppression wall; open storage yard; turbulence intensity; wind velocity reduction

矿石、煤炭、焦炭一般在港口露天存放, 极易发生大面积起尘现象。工矿企业露天开放性堆

放尘源在外力作用下形成的颗粒扬尘污染问题日趋严重, 已成为大气颗粒物污染的主要来源^[1-3]。

收稿日期: 2022-05-11

作者简介: 陈磊(1990—), 男, 工程师, 从事环境工程研究。

建立防风抑尘网、洒水、喷洒结壳剂等抑尘方式被证明真实有效，已经广泛应用于各大露天矿石码头^[4]。

防风抑尘网是一种疏透多孔边界，通过降低风速在网后形成扬尘庇护区，减少物料损失和大气污染^[5]。对于防风抑尘网的防尘效果，国内外学者做了大量研究。美国环保局提出了抑尘网在美国露天煤场的使用规范；潘武轩等^[6]通过露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟研究，发现孔隙率为 0.2~0.4 时防风抑尘网遮蔽效果最佳；陈凯华等^[7]对某钢铁厂露天堆料场设置挡风抑尘墙进行数值模拟研究，得出抑尘墙最佳尺寸；许栋等^[8]基于有限体积法建立不可压缩黏性流体运动的大涡模拟模型，对防风网透流风进行模拟研究，得出防风抑尘网整体空气阻力远大于单个孔口射流阻力的线性叠加，射流间的相互作用以及大尺度的分层剪切结构大大增加了流体阻力损失，这为通过优化孔口布置和网板形态节省材料提供了科学依据；李建隆等^[9]通过 CFD 模拟软件分析物料堆的表面速度分布、压力分布和湍动能变化得出抑尘墙圆形开孔时具有最佳的挡风效果。

笔者根据某矿石码头露天堆场大量实测数据，通过 FLUENT 模拟软件设置抑尘墙的三维模型，利用流体计算探索抑尘墙对风流场的影响特性，结合三维模拟数值结果提出矿石码头露天堆场抑尘墙的最优化布局，为抑尘墙控制局域风场的研究提供了借鉴。

1 抑尘墙抑尘机理

当堆场来流风速 v_0 大于货物自身的起动风速时货堆起尘，反之不起尘，见图 1。就堆场而言，抑尘墙具有弱化风场和捕捉粉尘两种作用。李绍武等^[10]通过风洞试验研究发现，自然含水率下铁矿粉起尘量与风速高次方成正比；胡传新等^[11]研究表明紊流度为启动风速修正系数的主要影响条件，对煤堆的启动风速进行了修正。如图 2 所示，

当高强度、高紊流度风流 v_0 经过抑尘网后被分为两部分，即 v_{01} 、 v_{02} ，大部分风流 v_{01} 被向上排开，并在风网顶部与主风流汇集，形成高速风流区；抑尘网下部风量一方面由于抑尘的阻挡作用使其机械能减小、风速降低，另一方面下部高紊流度风通过抑尘墙孔隙梳理作用得到降低，从而形成低速风流区 v_{02} 。同时，抑尘墙的高度决定低速风流区与高速风流区附着的位置，若抑尘网高度不足，会严重影响抑尘效果。研究表明：当抑尘网高度为料堆高的 0.6~1.1 倍时，抑尘网的高度与抑尘效果成正比；当抑尘网高度为料堆高的 1.1~1.5 倍时，抑尘网高度与抑尘效果的变化逐渐平缓^[12]。

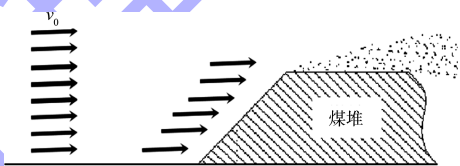


图 1 无抑尘网风流情况

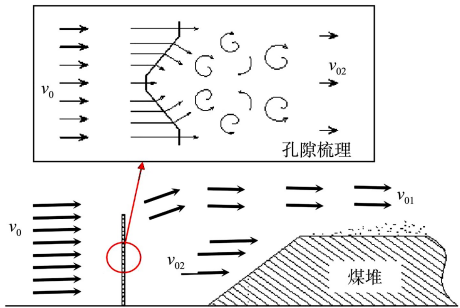


图 2 抑尘墙对风流阻挡的情况

当低速风流携带扬尘通过抑尘墙扬尘庇护区时，风速、紊流度进一步衰减，致使大部分扬尘被抑尘墙捕捉，进一步减少了物料损失和大气污染，见图 3。

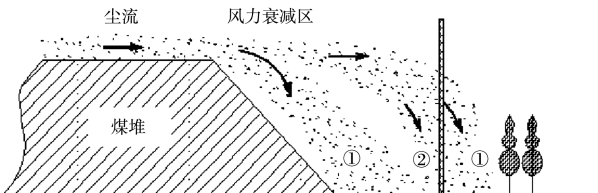


图 3 抑尘网的粉尘捕捉机理

2 风速折减的动力学模拟分析

2.1 控制方程

采用 Ansys Fluent 软件进行流体计算,应用 RNG $k-\varepsilon$ 计算模型进行数值模拟分析。相比标准 $k-\varepsilon$ 模型, RNG $k-\varepsilon$ 能更好地处理堆场抑尘网风场模拟计算。本文设计的数学模型针对某码头露天堆场实际情况,同时在误差允许的范围内做了相应的简化处理:1)视堆场周围的空气流动为不可压缩,忽略气流的震荡效果;2)气体为定常流动,不考虑大气条件下的热转换、液气交换,忽略大气状况引发气流突变现象。得出控制方程为:

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \frac{\partial(pku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_k u_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + p\varepsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{4}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

式中: x_i 、 x_j 为笛卡儿坐标; t 为时间; ρ 为空气密度; μ_{eff} 为运动黏度; μ 为动力学黏性系数; μ_t 为湍动能黏性系数; u_i 、 p 、 k 、 ε 为平均速度、静压、湍动能、湍动能耗散率; G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能; a_k 为 k 的有效普朗特数的倒数; $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.2 模型建立

为保证具体计算模型与计算边界有足够的距离,从而在不扰动气流条件下直接导出所需的平均流动和湍流条件,根据码头堆场的实际布局,设置了计算区域为 10 km×10 km×100 m 的 3D 计算空间,见图 4。图 5 中间部位为主要区域建模,包含模拟目标料堆 195 个、辅助料堆 23 个、其他建筑物 12 个。目标料堆的平均尺寸和形状见图 6。

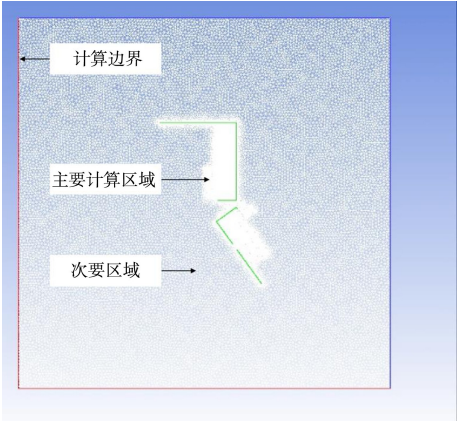


图 4 建模总体平面

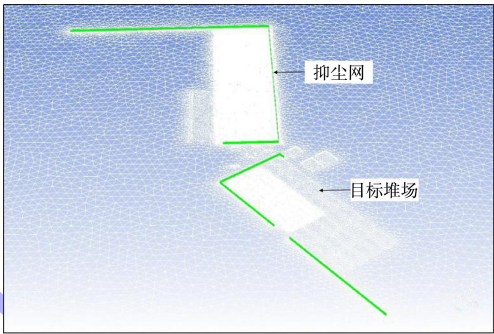


图 5 主要目标区域平面

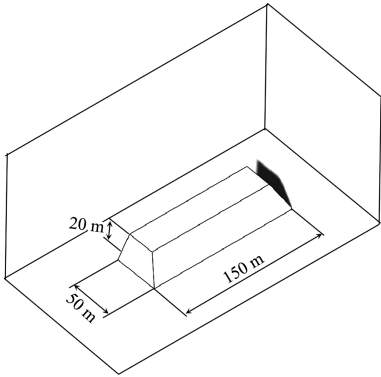


图 6 目标料堆的平均尺寸

2.3 边界条件

数值模拟边界条件见表 1,不同来流风向的计算采用旋转网格、调整入流边界条件和出流边界条件方式实现,入流边界条件通过自定义函数实现。

计算时,16 个风向的速度参照当地气象资料得出风速随高度变化的幂指数为 0.3,入流速度 u 剖面公式为:

$$u = u_0 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.3} \tag{6}$$

式中： u_0 为 10 m 高度处所对应的速度； z 为高度。

入流面湍动能表达式和湍动能耗散率表达式为：

$$k=1.5u^2\times0.1^2\left(\frac{z}{400}\right)^{-0.7}=0.994\,3u^2z^{-0.7}\quad(7)$$

$$\varepsilon=0.234\,7k^{1.5}\quad(8)$$

式中： u 为入流速度； z 为高度； k 为入流面湍动能； ε 为湍动能耗散率；其中，梯度风高度在本研究中取 400 m。

表 1 数值模拟边界条件

计算模型	RNG $k-\varepsilon$ 模型
入流边界	速度入口边界条件
出流边界	自然出口边界条件
侧向流体边界	对称边界条件
顶部流体边界	对称边界条件
建筑物、堆垛边界	无滑边界条件
地面边界	无滑边界条件
抑尘网	多孔介质

抑尘墙为多峰蝶形挡风板，主要是彩钢板材料组成的一种疏透多孔边界。根据 Vawinkle 等^[13]推荐的方程，通过墙的质量流量 \dot{m} 为：

$$\dot{m}=CA_f\sqrt{(2\rho\Delta p)\left[1-(A_f/A_p)^2\right]}\quad(9)$$

墙体内部损失系数为：

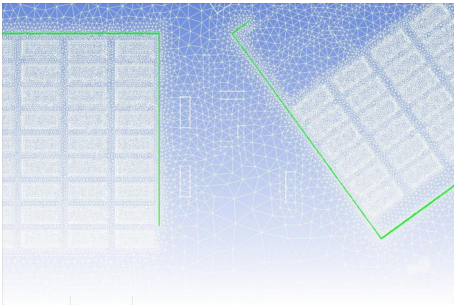
$$C_2=\frac{1}{C^2}\cdot\frac{(A_p/A_f)^2-1}{d}\quad(10)$$

式中： A_f 为开孔总面积； A_p 为墙总面积； ρ 为空气密度； C 为墙体特征系数，与开孔直径 d 和墙体厚度 D 的比及雷诺数有关，这里取值为 0.98。

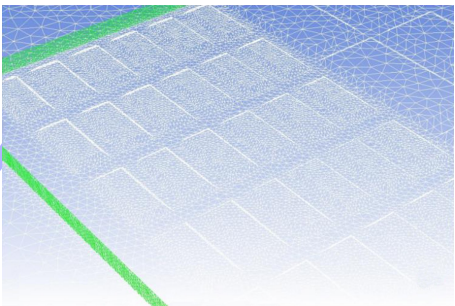
2.4 网格划分

在进行网格剖分时，采用混合网格技术，将计算区域分成主要目标区域和非主要目标区域两个部分，每个区域依据数值模拟计算需要采用不同的生成方式分别生成网格。其中，抑尘网和堆垛附近区域网格加密划分，非主要目标区域利用 TRIRD 形成稀疏三角形网格；整个模型总网格数

量为 2 296.713 2 万个，部分为六面体网格、部分为金字塔网格，网格划分见图 7。



a) 全局



b) 局部

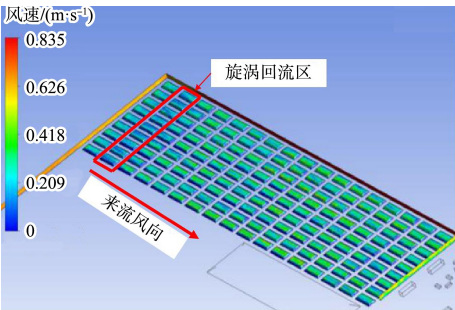
图 7 网格划分

2.5 计算工况

根据某港口实际情况，主要针对极易起尘的东、北正方向进行计算，计算风速为 10 m/s。抑尘墙的材质为彩钢瓦材质，厚度为 5 mm，压制为波浪形，高度为 23 m，开孔率为 0.35。

3 数值结果及分析

以北风来流工况为例，图 8 为堆场有、无网条件下的风速流场情况；图 9 为有、无网情况下相同断面的堆场料堆表面风速轮廓对比曲线。



a) 北风有网

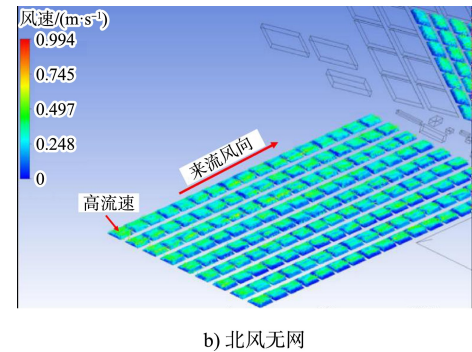
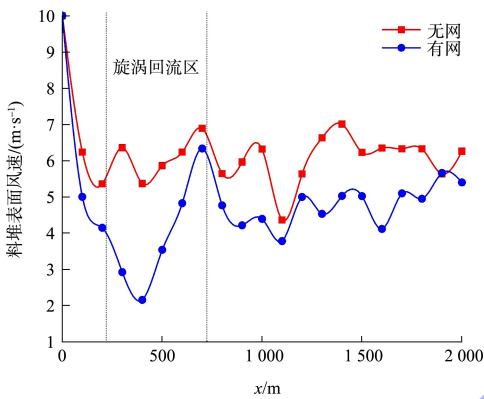


图 8 料堆面风速



注：抑尘墙为 0 点， x 为来流方向沿空气流动方向增大距离。

图 9 料堆表面风速轮廓对比曲线

通过对比两种情况下料流顶部流速分布、料堆表面风速轮廓曲线可以看出：无防风抑尘网时料堆表面流速明显大于有网情况，来流风速直接作用料堆表面，表面物料易受风的影响出现剥离现象，造成起尘。在设置防风抑尘网后，受网的阻挡和孔隙梳理作用影响，近地面的风速场发生显著变化，高流速货垛个数显著降低，计算统计得出此工况条件下风速折减率为 22.7%。

从图 8、9 可见，在有抑尘网的情况下， x 轴 200~720 m 处料堆表面风速发生了显著跃迁，表面风速明显低于其余料堆。其原因是：气流穿过防风抑尘墙后，由于墙的阻挡和孔隙梳理作用，使得气流在墙后发生跳跃，形成一个明显的旋涡回流区，该区域内气流具有低速、负压的特性，可以防止料堆飞扬。

在东风来流的情况下，有网的风速折减率为 11.7%，与北风来流的情况相比，风速折减率具有显著差异性。图 10 为来流有网条件下堆垛表面

风速情况，货垛表面空气流速沿着来流方向呈先递减后递增的趋势，中间垛位的表面流速低于两侧流速。图 11 为图 10 中断面位置料堆表面风速轮廓曲线，可以看出：风速轮廓曲线呈浴盆形，在 50~210 m 风速最低且风速较为均匀，210 m 之后风速呈递增态势。主要原因是：来流风速受防风抑尘墙阻挡和梳理作用后风速降低，并在 50~210 m 形成旋涡回流区，有效减少了料堆表面风速。与北风来流相比，在东风的情况下 x 轴受风面明显增大，就单一截面来看，旋涡回流区绝对覆盖面积仅为北风来流的 47%，由此可见综合风速折减效果与旋涡回流区覆盖堆场面积正相关。

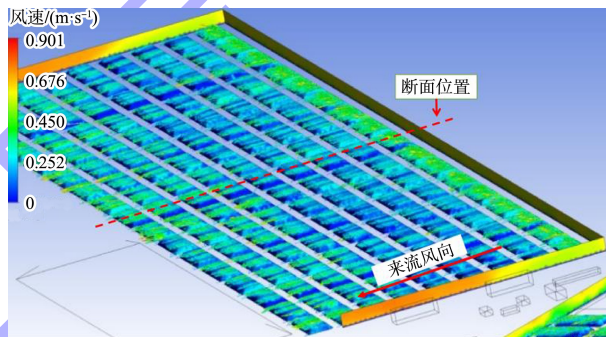


图 10 东风有网情况料堆面风速

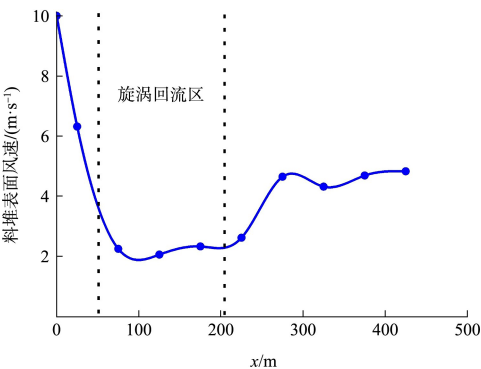


图 11 料堆表面风速轮廓曲线

同等条件下各个方向无网和有网条件下风速折减效果见表 2。根据测算，在码头的自然条件下，防风抑尘墙建设对北西北 (NWN)、北东北 (NNE) 来风具有较强的衰减作用，折减率分别为 43.28%、50.87%；对南东南 (SSE) 的折减率最差，为 8.15%；综合风速折减率为 23.52%。由此看出，在不同来流风向上，防风抑尘网工程的风速折减率存在较为明显的差别。

从实际情况来看,抑尘网能较大程度削弱目标堆场区域的风速、降低堆场粉尘无组织排放,但是在不同来流情况下,影响风速折减率的因素还有很多,包括堆场和抑尘网的布置走向、堆场形状、防风网的整体布置、防风网高度等。在下一步的研究中有必要基于速度矢量场对料堆表面散尘规律进行深入分析。

表 2 各来流方向风速折减率

来流风向	风速折减率/%	来流风向	风速折减率/%
N	22.60	S	34.63
NNE	50.87	SSW	13.45
NE	7.69	SW	15.03
SSE	8.15	WSW	15.53
E	11.02	W	28.84
ESE	17.10	WNW	8.15
SE	22.89	NW	17.66
ENE	27.04	NWN	43.28

4 结 论

- 1) 设置防风抑尘墙可以较大程度地削弱目标堆场区域的风速,堆场风速综合折减率为 23.52%,显著降低了堆场粉尘无组织排放。
- 2) 由于防风抑尘墙的阻挡和孔隙梳理作用,气流在墙后形成明显的旋涡回流区,该区域面积的大小与抑尘效果显著正相关。
- 3) 在该堆场自然条件下,防风抑尘墙建设对北西北(NWN)、北东北(NNE)来风具有较强的衰减作用。

参考文献:

[1] 宋翀芳,彭林,白慧玲,等.露天堆场防风抑尘网的动力

学数值模拟[J].环境科学研究,2014,27(7):775-781.

[2] 黄玉虎,曲松,宋光武,等.扬尘源粒度组成筛分方法比较[J].环境科学研究,2013,26(5):522-526.

[3] 张利文,白志鹏,郭光焕,等.开放源对环境空气质量影响的评估技术与实例[J].环境科学研究,2006(3):18-23.

[4] 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.

[5] 许栋,张博曦,及春宁,等.防风网扬尘庇护区湍流流场模拟数值边界条件[J].环境工程学报,2018,12(10):2825-2832.

[6] 潘武轩,宋翀芳,何鸿展.露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟[J].环境工程学报,2015,9(9):4440-4446.

[7] 陈凯华,宋存义,李强.钢铁厂露天堆料场挡风抑尘墙效果的数值模拟[J].环境工程学报,2008(3):403-407.

[8] 许栋,申振东,高喜峰,等.防风网透流风空气动力学特性大涡数值模拟研究[J].计算力学学报,2015,32(4):530-536.

[9] 李建隆,董纪鹏,陈光辉,等.防风抑尘网开孔形式对流场的影响[J].环境工程学报,2009,3(9):1725-1728.

[10] 李绍武,李文善,雷鹏,等.港口散货堆场铁矿粉起尘风洞试验研究[J].水道港口,2016,37(5):558-562.

[11] 胡传新,白景峰,薛永华.紊流度对煤炭颗粒起动和来流风速影响研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(1):189-194.

[12] 段振亚,石文梅,郑文娟,等.防风网抑尘机理研究及工程应用进展[J].石油化工设备,2010,39(3):40-44.

[13] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www. sygc. com. cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部