

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804070



非均匀孔隙率防风抑尘网优化设计

王世杰, 宋翀芳, 雷勇刚, 景胜蓝, 秦成君, 刘治廷

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 基于均匀孔隙率抑尘网后呈现贴附涡旋贴附的流动状态, 提出将抑尘网从下到上划分为孔隙率不同的三部分, 建立非均匀孔隙率下, 露天堆场周围空气流场的数学模型. 运用 Fluent 6.3, 模拟 9 种非均匀孔隙率组合下网后的空气流动和堆面受力. 结果表明: 三层非均匀抑尘网的设置可人为引导网后空气运动的微环境; 网的上、下部孔隙率(ϵ_H, ϵ_L)不变, 中部孔隙率(ϵ_M)从 0.3 增至 0.6 时, 料堆的迎风面流场先减弱后增强, $\epsilon_M=0.4$ 时, 获最佳减速效果; 上部孔隙率从 0 增至 0.2 时, $\epsilon_H=0.1$ 时最优; 调整网下部孔隙率, $\epsilon_L=0.2$ 时最佳; 孔隙率组合 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L=0.1 : 0.4 : 0.2$ 以最大限度地虚弱迎风面受力而获最小剪切力, 与均匀空隙率($\epsilon=0.3$)网相比减小 66.1%, 与上、下两层非均匀网($\epsilon_H : \epsilon_L=0.1 : 0.3$)相比减小 31.2%, 抑尘效果最佳.

关键词: 露天堆场; 非均匀孔隙率; 防风抑尘网; 数值模拟

中图分类号: X 513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)06-0865-07

Design Optimization of Non-Uniform Porosity Porous Fences

WANG Shijie, SONG Chongfang, LEI Yonggang,
JING Shenglan, QIN Chengjun, LIU Zhiting

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the flow state of adherence-vortex-attachment after the uniform porosity, this work divides the porous fence into three parts with different porosities from the bottom to the top and a physical and mathematical model of the air flow field around the open storage yard under non-uniform porosity is established. Fluent 6.3 is used to simulate the air flow behind the porous fence and the force applied to the pile face under nine combinations of non-uniform fence with different porosity. The results show that the three-layer non-uniform fence can artificially guide the microenvironment of air movement behind the fence. The upper porosity and the lower porosity (ϵ_H, ϵ_L) are unchanged, and the central porosity (ϵ_M) increases from 0.3 to 0.6. The flow field at the windward side of the pile reduces first and then increases, and the best deceleration effect is obtained at $\epsilon_M=0.4$. When the upper porosity increases from 0 to 0.2, $\epsilon_H=0.1$ is optimal. By adjust the porosity of the lower part of the fence, $\epsilon_L=0.2$ is the best. Compared with the uniform porosity ($\epsilon=0.3$) and the two-layer non-uniform network ($\epsilon_H : \epsilon_L=0.1 : 0.3$), the force is reduced by 66.1% and 31.2% respectively when using the porosity combination of $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L=0.1 : 0.4 : 0.2$, which can maximize the weak windward face to obtain the minimum shear force and therefore shows the best fence effect.

Keywords: open storage pile; non-uniform porosity; porous fence; numerical simulation

收稿日期: 2018-04-21

通信作者: 宋翀芳(1974-), 女, 副教授, 博士, 主要从事暖通空调节能技术、空气污染控制、CFD 数值模拟在空气流动和污染物扩散的研究. E-mail: songchongfang@tyut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108295)

大气中的固体颗粒是城市污染物的重要组成部分^[1-2],也是空气质量标准中的重要指标.工矿企业中,大型露天料堆形成的扬尘颗粒物已成为大气污染颗粒物的主要来源^[3-4].防风抑尘网作为一种有效的抑尘手段,已广泛应用于工程实践中^[5-7].国内外研究人员认为,孔隙率对防风抑尘网的抑尘效果影响最为显著^[8-11].凌裕泉等^[12]对沙坡头铁路北侧进行现场试验,发现当孔隙率为 0.3~0.4 时,防护效果最好. Dong 等^[13]等通过缩尺风洞模拟不同来流风速、不同孔隙率下,网后的气流结构,发现不同来流风速下平均速度场相似,网后会出现 7 个典型流动区域,随着孔隙率的增加,网后流动区域数量会减少,但气流结构会更加复杂,得出最佳孔隙度为 0.2 或 0.3. Santiago 等^[14]对比 6 种不同孔隙率对平均风速和湍流脉动的影响,得出孔隙率为 0.35 时,网后较长距离内流线平稳,防护效果最好. Huang 等^[15]研究网上部孔隙率(ϵ_u)和网下部孔隙率(ϵ_L)的 5 种组合,以 PI 值为评价指标,得出 $\epsilon_u : \epsilon_L = 0 : 0.3$ 时,保护效果最佳. 陈延国等^[16]对孔隙率为 0%,30%,40%的蝶形网和平板网的流场结构进行数值模拟,结果显示,孔隙率为 40%的蝶形网性能最优. 张立群等^[17]用计算流体动力学(CFD)数值模拟发现,网板底部孔隙率为 0.3,0.4,0.5 时,导沙效果较好. 目前,对于防风抑尘网最优孔隙率的研究多集中于均匀网,且最优孔隙率的数值不尽相同. 但对均匀网不同孔隙率下,抑尘网后料堆周围风场的微观特性研究发现,网后料堆不同高度处的风场结构和散尘特性不同. 本文基于露天堆场防风抑尘网设置后空气流动规律的不均匀性,将抑尘网设置为上、中、下不同孔隙率的形式,应用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟料堆周围空气运动规律和料堆表面剪切力特性,以期获得抑尘网的一些优化设计.

1 数值模拟

1.1 几何模型

选取风洞实验中一棱台型料堆为模拟对象,料堆尺寸参数^[18]如下:棱台下表面长 154 m,宽 51 m;棱台上表面长 113 m,宽 10 m;料堆高 17 m. 张奕君等^[19]研究表明,防风抑尘网的高度、宽度和与料堆距离的选取对网的庇护效果至关重要,当网高为料堆高 1.1~1.3 倍时,网的抑尘效果最佳. 综合经济性考虑,取网高为堆高的 1.3 倍,即 22 m;网与料堆间距在 1.0~1.5 倍堆高为最佳范围,故取间距为 1.0 倍堆高,即 17 m;网长度的选取至少与料堆下表面长度相等,故网长取 1.0 倍堆长,即 154 m. 数值模拟中,计算区域的选取对模拟结果至关重要. 堆场对周围流场的影响是以其为中心向周围扩散产生,宋翀芳等^[20-21]以料堆为中心区域,向四周逐步扩大计算区域,选取 7 种计算模型,以料堆平顶面剪切力为考查指标,发现料堆平顶面剪切力随计算区域的增加而逐渐降低,计算区域高取 7 倍堆高,长取 14 倍堆高,宽取 2 倍堆高时,剪切力变化仅为 0.04%. 因此,选取以上区域为计算区域,如图 1 所示. 图 1 中:料堆下表面中心位置为坐标原点;X 轴正向为来流方向;Y 轴正向为沿料堆高度;Z 轴正向为沿堆长方向.

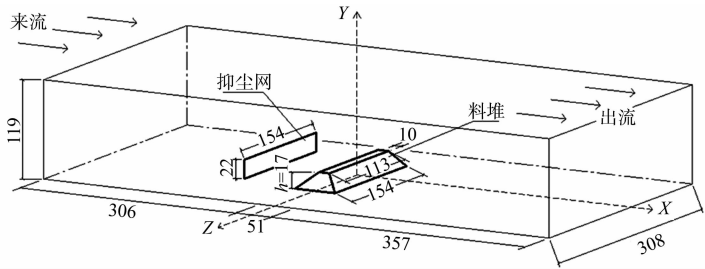


图 1 计算区域图(单位:m)

Fig.1 Computational domain (unit: m)

1.2 数学模型

露天堆场周围空气可视理想牛顿流体,密度为常数,周围无热量传递.

1) 质量守恒方程,即

$$\partial u_i / \partial x_i = 0. \tag{1}$$

2) 动量守恒方程,即

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j} \right] + S_i. \tag{2}$$

3) $k-\epsilon$ 两方程,即

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon. \tag{3}$$

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1,\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3,\epsilon} G_b) - C_{2,\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (4)$$

模拟防风网多孔介质,源项 S_i 由粘性损失和惯性损失两部分组成,即 $S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| |u_i| \right)$, $C_2 = \frac{1}{C^2} \frac{(A_p/A_f)^2 - 1}{t}$. 其中: α 为多孔介质的渗透性, $m \cdot s$; C_2 为惯性阻力因子, m^{-1} ; A_f 为网孔总面积, m^2 ; A_p 为网板总面积 m^2 ; t 为网厚度,取 0.002 m ; C 近似为 0.98 ; μ_t 为湍流粘性系数, $N \cdot S \cdot m^{-2}$.

对于不可压缩流体, $G_b = 0$; 当主流方向与重力方向垂直时, $C_{3,\epsilon} = 0$; 系数 $C_{1,\epsilon}$, $C_{2,\epsilon}$, C_μ , σ_k 和 σ_ϵ 根据文献[22-23]分别取值为 $1.44, 1.92, 0.09, 1.0$ 和 1.3 ; 空气动力粘性系数 μ 取 $1.79 \times 10^{-5}\text{ N} \cdot S \cdot m^{-2}$.

1.3 网格的划分

对计算区域进行网格划分时,采用分区划分,用 $y = 1.5h$ (h 为料堆高度)将计算区域划分为两部分,再对网前 3 m 和堆后 1 m 作切平面划分,共得到 6 个子区域. 料堆和网所在区域为加密区域,以此区域为中心向四周进行网格划分,比例因子取 1.02 . 由此得出,网和料堆所在区域网格最密,此区域向四周网格渐渐变疏,网格划分的疏密符合流场梯度变化情况,网格划分如图 2 所示.

网格独立性考核是数值模拟的重要一步,对模型网格数量从小到大进行了 5 种划分,以料堆迎风面剪切力为判别指标进行网格独立性考核,计算结果如表 1 所示. 表 1 中: N 为网格数量; F 为迎风面剪切力.

表 1 网格独立性考核

Tab. 1 Assessment of grid independence

参数	网格 1	网格 2	网格 3	网格 4	网格 5
$N/\times 10^4$	83.045 6	92.856 4	120.148 9	155.521 8	221.786 5
F/N	53.89	53.52	53.29	53.24	53.28

由表 1 可知:网格数量从 $830\,456$ 增加到 $2\,217\,865$ 时,剪切力呈逐渐减小的趋势,且剪切力减小程度逐渐降低;网格数量从 $1\,555\,218$ 增加到 $2\,217\,865$ 时,剪切力变化率为 0.07% ,对网格进一步做加密处理不会影响模拟结果. 因此,数值模拟网格数取 $1\,555\,218$.

边界条件如下:防风抑尘网设为 Porous-Jump 边界条件;出口边界设为压力出口;入口边界条件设为速度入口,风速为 $6\text{ m} \cdot s^{-1}$;料堆表面和地面为无滑移壁面;计算区域前、后及上表面设为对称边界条件;压力、动量、湍流动能和耗散项均采用二阶迎风格式进行模拟.

1.4 数值模拟验证

对 Park 等^[24] 风洞实验的工况进行数值模拟,压力系数模拟结果和实验结果的对比,如图 3 所示. 图 3 中: C_p 为压力系数; X/B 为位置, X 是数值模拟中 x 方向的尺寸, B 是风洞实验中 x 方向的尺寸. 由图 3 可知:模拟结果和实验结果中,来流风在防风抑尘网前后的压力变化规律相同,通过数据对比发现,模拟结果和实验结果的相对误差为 6.21% ,此误差在可接受范围内,验证了 Porous-Jump 边界条件的可行性.

2 结果与讨论

2.1 非均匀防风抑尘网后料堆周围速度场

已有研究表明,均匀孔隙率抑尘网后呈现比例不同的贴附流、涡旋流、贴附流三种形态^[25]. 因此,将防风抑尘网分为上、中、下三部分,取均匀网某工况的模拟结果,迎风面前涡旋处于网高 $1/3 \sim 2/3$ 处,将三部分网高从下到上设为 $7, 7, 8\text{ m}$,各层孔隙率表示为 $\epsilon_L : \epsilon_M : \epsilon_H$. 研究结果表明,低孔隙率 ($\epsilon < 0.3$) 网后料堆上部扬尘得到明显抑制,而高孔隙率 ($\epsilon \geq 0.3$) 的抑尘作用主要体现在料堆迎风面中下部^[26].

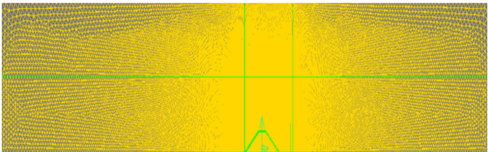


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

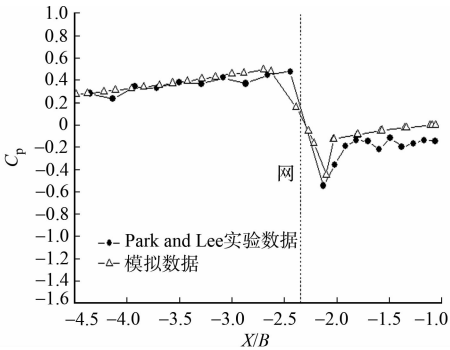


图 3 压力系数数值模拟与实验对比

Fig. 3 Comparison of numerical simulation and experimental pressure coefficient for porous fence

所以,将网上部设置较小孔隙率,以削弱来流风对迎风面上部和平顶面的动力影响;为减小近地层贴附流穿过抑尘网后对料堆迎风面下部的剪切作用,取下部孔隙率为 0.1~0.4 进行模拟.基于上部和下部孔隙率的设置范围均较小,会因其渗流风比例小而引起网后中部区域压力甚小,在垂直压差作用下形成较强的涡旋,导致迎风面物料被卷吸扬起,故中部孔隙率设置为 0.3~0.6,以通过适量的来流风.上、中、下部孔隙率设置的工况,如表 2 所示.

表 2 不同模拟工况下的孔隙率表

Tab. 2 Porosity table under different simulation conditions

模拟工况	ϵ_M	ϵ_L	ϵ_H	模拟工况	ϵ_M	ϵ_L	ϵ_H	模拟工况	ϵ_M	ϵ_L	ϵ_H
工况 1	0.3	0.2	0	工况 4	0.6	0.2	0	工况 7	0.4	0.4	0
工况 2	0.4	0.2	0	工况 5	0.4	0.1	0	工况 8	0.4	0.2	0.1
工况 3	0.5	0.2	0	工况 6	0.4	0.3	0	工况 9	0.4	0.2	0.2

对上述工况进行数值模拟,料堆周围速度矢量分布,如图 4 所示.

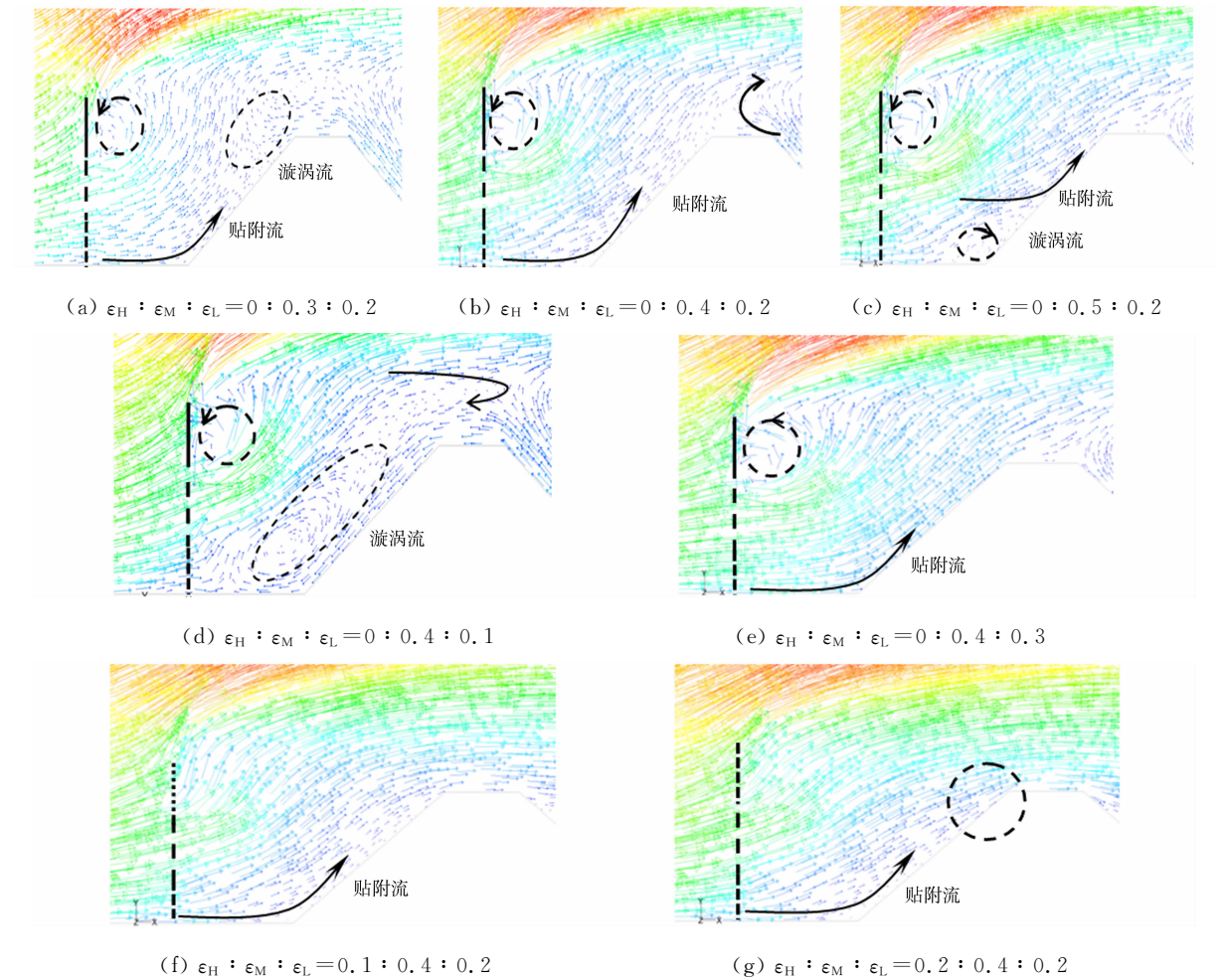


图 4 不同孔隙率组合下料堆周围速度矢量场

Fig. 4 Velocity vector fields over pile with different porosity combinations

当防风抑尘网上部孔隙率 ϵ_H 为 0,下部孔隙率 ϵ_L 为 0.2 时,料堆周围速度矢量场,如图 4(a)~(c) 所示.由于 ϵ_H 为 0,网上部无气流渗入,来流风绕过抑尘网在上部形成强剪切层,网后中、上部压差较大;较小的下部孔隙率 ϵ_L 为 0.2 时,对近地层来流风的阻碍作用较强,来流风通过网后风速骤降,在粘性力作用下,料堆迎风面中、下部形成低流速的贴附流.受网后上部压差作用,网中部渗流空气一部分在网后形成逆时针漩涡,另一部分气流沿料堆向上运动,在料堆顶部受强剪切层的作用向下游流动.中部孔隙率大小决定渗流风的比例,当 $\epsilon_M=0.3$ 时,渗流风较小,受垂直压差作用涡旋较强,随着 ϵ_M 的增加,渗流风量渐多,呈现衰减的贴附流,近壁面风速较小;当 $\epsilon_M=0.4$ 时达到最小, ϵ_M 继续增大,贴附作用渐强,强烈的剪切力会在迎风面底部产生涡旋,使散尘量增加.

当防风抑尘网上部孔隙率 ϵ_H 为 0, 中部孔隙率 ϵ_M 为 0.4 时, 料堆周围速度矢量场, 如图 4(b), (d), (e) 所示。当网下部孔隙为 0.1 时, 网后中、下部竖向压差增大, 在网后出现大尺度涡旋, 整个迎风面处于涡旋影响范围, 气流扰动较大, 抑尘效果较差; 当网下部孔隙从 0.1 增加到 0.2 时, 网后竖向压差减小, 料堆迎风面由涡旋流变为微弱贴附流, 抑尘效果较好; 当网下部孔隙率从 0.2 增加到 0.3, 0.4 时, 料堆迎风面贴附流强度增加, 气流紧贴料堆表面运动, 料堆壁面空气运动剧烈, 扬尘加剧。因此, 网下部孔隙率 ϵ_L 为 0.2 时, 料堆近壁面空气流速较小, 抑尘效果明显。

当防风抑尘网中部孔隙率为 0.4, 下部孔隙率为 0.2 时, 料堆周围速度矢量场, 如图 4(b), (f), (g) 所示。网中部和下部孔隙率不变, ϵ_H 从 0 增加到 0.1, 渗入的空气量增加, 网后竖向压差减小, 网后上部漩涡消失, 料堆迎风面和平顶面为微弱贴附流, 近壁面风速较小; 当 ϵ_H 从 0.1 增加到 0.2 时, 网中部的高速气流会到达料堆迎风面上部, 使迎风面上部和平顶面贴附流强度增加, 近壁面风速增加, 抑尘效果减弱。综合考虑防风抑尘网后气流运动规律和湍流结构, 抑尘网孔隙率为 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$ 时, 防风抑尘效果最佳。

2.2 非均匀抑尘网后料堆表面动力特性

影响露天堆场散尘的因素很复杂, 从剪切力角度, 可以分辨绕流和水平贴附流的区别, 更加准确地反映防风网的防护特性。在料堆各表面中, 迎风面的扬尘最为严重, 因此, 抑制迎风面的扬尘显得尤为重要。不同孔隙率组合下, 料堆迎风面受力情况, 如图 5 所示。图 5 中: $F_{\text{迎风}}$ 为迎风面剪切力。

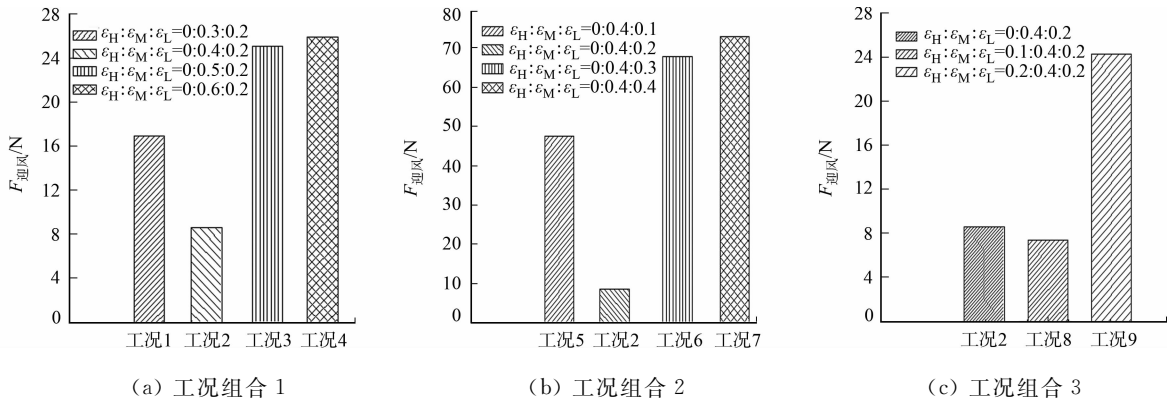


图 5 不同孔隙率组合下料堆迎风面剪切力

Fig. 5 Shear force distribution on surfaces of pile with different porosity combinations

由图 5(a) 可知: 网上部和下部孔隙率分别为 0 和 0.2 时, 网中部孔隙率从 0.3 增加到 0.6, 料堆迎风面剪切力呈先减小再增大的趋势; 当 ϵ_M 为 0.4 时, 剪切力较 ϵ_M 为 0.3 时减小了 49.3%, 较 ϵ_M 为 0.5 时减小了 65.7%。因此, 网中部孔隙率 ϵ_M 为 0.4, 即工况 2 时, 料堆迎风面为微弱贴附流, 近壁面风速小, 料堆迎风面剪切力最小, 为 8.6 N。

依据上述结论, 确定网中部孔隙率为 0.4, 保持上部孔隙率为 0 不变, 料堆迎风面的受力情况, 如图 5(b) 所示。当网下部孔隙率 ϵ_L 从 0.1 增加到 0.4 时, 料堆迎风面剪切力呈现先减小再增大的趋势; 当 ϵ_L 为 0.2 时, 剪切力较 ϵ_L 为 0.1, 减小了 81.9%, 较 ϵ_M 为 0.3 时减小了 87.3%。因此, 网中部孔隙率 ϵ_M 为 0.2, 即工况 2 时, 料堆迎风面剪切力最小。

确定网中部孔隙率为 0.4, 下部孔隙率为 0.2 时, 料堆迎风面受力情况, 如图 5(c) 所示。当网上部孔隙率 ϵ_H 从 0 增加到 0.2 时, 料堆迎风面剪切力呈先减小再增大的趋势; 当 ϵ_H 为 0.1 时, 剪切力较 ϵ_H 为 0 时减小了 13.9%, 较 ϵ_H 为 0.2 时减小了 69.5%。因此, 网上部孔隙率 ϵ_H 为 0.1, 即工况 8 时, 料堆迎风面剪切力最小, 为 7.4 N。综上所述, 工况 8 时, 料堆迎风面剪切力最小, 料堆迎风面抑尘效果最佳, 剪切力的变化趋势也与前述流动形态相吻合。

9 种工况料堆各表面剪切力绝对值之和 (F_{tot}), 如图 6 所示。由图 6 可知: 工况 8 时, 各表面剪切力绝对值之和最小, 整体抑尘效果最好; 工况 2 和工况 3 时, 各表面剪切力绝对值之和较工况 8 相差不大, 抑尘效果较好。

为了进一步量化三层非均匀网的抑尘效果, 以最优工况 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$ 与均匀网最

优孔隙率 0.3 和两层非均匀网最优工况 $\epsilon_H : \epsilon_L = 0.1 : 0.3$ 进行对比,结果如表 3 所示.表 3 中: F 为剪切力.

由表 3 可知:三层非均匀网迎风面、背风面剪切力在 3 种工况中最小,迎风面剪切力相较于两层非均匀网减小了 80.6%,较均匀网减少了 89.6%;背风面剪切力较两层非均匀网减少了 19.2%,较均匀网减小了 23.3%;但平顶面剪切力较两层非均匀网略有增加,较均匀网减小了.在抑制料堆整体扬尘上,三层非均匀网效果最佳,各表面剪切力绝对值总和较两层非均匀网减少了 31.2%,较均匀网减小了 66.1%.从上述分析可知,与均匀孔隙率 0.3,两层非均匀孔隙率 $\epsilon_H : \epsilon_L = 0.1 : 0.3$ 相比,三层非均匀孔隙率 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$ 的抑尘效果最出众.

表 3 不同孔隙率下料堆各表面剪切力值
Tab.3 Shear force values on each surface of pile

工况	F/N			
	迎风面	平顶面	背风面	各表面总和
$\epsilon = 0.3$	71.18	86.22	31.82	189.22
$\epsilon_H : \epsilon_L = 0.1 : 0.3$	38.08	24.90	30.20	93.18
$\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$	7.40	32.32	24.40	64.12

3 结论

- 1) 孔隙率大小决定着料堆周围流场及表面受力.三层非均匀抑尘网的设置可以充分利用不同孔隙率下渗流风与绕流风的比例,人为创造料堆周围风场环境,获得料堆表面最弱受力.
- 2) 网上部和网下部孔隙率不变, ϵ_M 从 0.3 增加到 0.6 时,料堆迎风面由贴附漩涡流变为贴附流,再由贴附流变为漩涡贴附流的混合流动,当 ϵ_M 为 0.4 时气流扰动较小;网上部和网中部孔隙率不变, ϵ_L 从 0.1 增加到 0.2 时,料堆迎风面由漩涡流变为微弱贴附流, ϵ_L 为 0.2 时扰动最小;网中部和下部孔隙率不变, ϵ_H 从 0 增加到 0.2 时,料堆上部表面气流运动先减弱,在 ϵ_H 为 0.1 气流运动达到最小.综合流场规律,得到孔隙率组合 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$ 的抑尘效果最佳.
- 3) 比较三层非均匀网最优工况($\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$)、两层非均匀网最优工况($\epsilon_H : \epsilon_L = 0.1 : 0.3$)和均匀网最优工况($\epsilon = 0.3$)各表面的受力情况.结果表明:三层非均匀网可大幅减小料堆迎风面扬尘,迎风面剪切力较两层非均匀网减小了 80.6%,较均匀网减少了 89.6%;各表面剪切力绝对值总和和较两层非均匀网减少了 31.2%,较均匀网减小了 66.1%;综合受力特性,孔隙率组合 $\epsilon_H : \epsilon_M : \epsilon_L = 0.1 : 0.4 : 0.2$ 时,抑尘效果最佳.

参考文献:

[1] 杨周.城市大气颗粒物地球化学特征与来源研究:以成都市、贵阳市为例[D].北京:中国科学院大学,2015.

[2] 文宇博,杨忠芳,夏学齐,等.黑龙江省松嫩平原南部大气颗粒物地球化学特征及来源解析[J].现代地质,2010,24(4):807-815. DOI:10.3969/j.issn.1000-8527.2010.04.022.

[3] 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. DOI:10.13198/j.res.2013.05.61.huangyh.010.

[4] 冯鑫媛,王式功,程一帆,等.中国北方中西部沙尘暴气候特征[J].中国沙漠,2010,30(2):394-399.

[5] LEES J,PARK C W. The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,84(1):101-118. DOI:10.1016/S0167-6105(99)00046-X.

[6] 孙昌峰,陈光辉,范军领,等.防风抑尘网研究进展[J].化工进展,2011,30(4):871-877. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2011.04.035.

[7] CONG Xiaochun,CAO Shiqing,CHEN Zhilong,et al. Impact of the installation scenario of porous fences on wind-

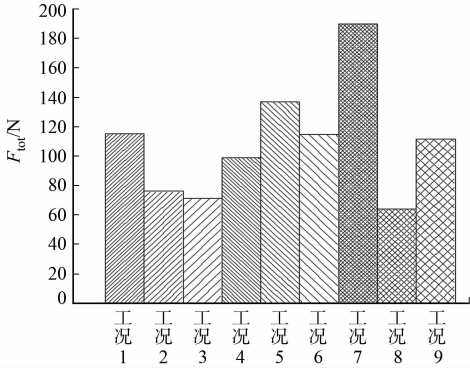


图 6 不同孔隙率组合下料堆各表面剪切力之和
Fig.6 Shear force sum on surfaces of pile with different porosity combinations

- blown particle emission in open coal yards[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(30): 5247-5253. DOI: 10. 1016/j. atmosenv. 2011. 07. 005.
- [8] DONG Zhibao, LUO Wanyin, QIAN Guangqiang, *et al.* A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind up-right porous wind fences[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 193-207. DOI: 10. 1016/j. jaridenv. 2009. 03. 015.
- [9] MOHAMED A M I, ALAMELDEIN A, SAIF A. Numerical study of aeolian sand particles behavior behind constant and variable porosity wind fences[C]//Eleventh International Conference of Fluid Dynamics. Alexandria: ICFD11, 2013: 1-11.
- [10] SHI Xiaofei, XI Ping, WU Jianjun. A lattice Boltzmann-Saltation model and its simulation of aeolian saltation at porous fences[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2015, 29(1/2): 1-20. DOI: 10. 1007/s00162-014-0338-1.
- [11] TIAN Lihui, WU Wangyang, ZHANG Dengshan, *et al.* Characteristics of erosion and deposition of straw checker-board barriers in alpine sandy land[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 573-584. DOI: 10. 1007/s12665-015-4059-6.
- [12] 凌裕泉, 金炯, 邹本功, 等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用: 以沙坡头地区为例[J]. *中国沙漠*, 1984, 4(3): 16-25.
- [13] DONG Zhibao, LUO Wanyi, QIAN Guangqiang, *et al.* Evaluating the optimal porosity of fences for reducing wind erosion[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2011(1): 1-12. DOI: 10. 3724/SP. J. 1226. 2011. 00001.
- [14] SANTIAGO J L, MARTIN F, CUERVA A, *et al.* Experimental and numerical study of wind flow behind wind-breaks[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(30): 6406-6420. DOI: 10. 1016/j. atmosenv. 2007. 01. 014.
- [15] HUANG Longming, CHAN H C, LEE J T. A numerical study on flow around nonuniform porous fences[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 2012(1/2): 203-222. DOI: 10. 1155/2012/268371.
- [16] 陈廷国, 马思明. 不同截面形式防风网流场的 3D 数值仿真[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(1): 258-263. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-9348. 2014. 01. 058.
- [17] 张立群, 许振海, 董捷, 等. 防风抑尘网应用于沙漠铁路风沙防治的数值分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(5): 957-963. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-7029. 2017. 05. 011.
- [18] 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.
- [19] 张奕君, 邹声华, 黄寿元. 露天料场防风抑尘网作用效果数值模拟研究[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(4): 61-64. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1212. 2011. 04. 016.
- [20] 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. DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2014. 07. 14.
- [21] 宋翀芳, 彭林, 白慧玲, 等. 露天堆场防风抑尘网后湍流结构及抑尘效率的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(7): 1690-1695.
- [22] LAUNDER B, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1990, 3(2): 269-289. DOI: 10. 1016/0045-7825(74)90029-2.
- [23] FAROUK B, GUCERI S I. Laminar and turbulent natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1982, 104(4): 631-636. DOI: 10. 1115/1. 3245178.
- [24] PARK C W, LEE S J. Experimental study on surface pressure and flow structure around a triangular prism located behind a porous fence[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1/2): 165-184. DOI: 10. 1016/S0167-6105(02)00343-4.
- [25] 潘武轩, 何鸿展, 宋翀芳, 等. 露天堆场防风抑尘网临界孔隙率的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1638-1644. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2015. 06. 005.
- [26] 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. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2016. 06. 014.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)