

文章编号: 1672-9897(2011)04-0050-05

# 防风网对煤堆遮风效果的风洞实验研究

张 宁<sup>1</sup>, 陈廷国<sup>1</sup>, Sang-joon Lee<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116023; 2. Department of Mechanical Eng. Center for Biofluid and Biomimic Research, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, South Korea)

**摘要:**为了考察防风网对堆场煤堆的遮风效果,进行了防风网与煤堆之间区域的流场可视化实验。使用风洞模拟大气边界层条件,并将开孔率为38.5%的防风网模型布置在煤堆模型前方。实验中采用粒子成像测速(PIV)系统测量了防风网和堆场区域的平均风速分布,并且获得了煤堆表面的摩擦风速分布,进一步估算煤堆起尘量的变化情况。实验发现,防风网可有效降低煤堆表面迎风区域的摩擦风速,而对背风面的流场分布影响较小。研究结果可为防风网的遮护作用提供一定的实验支持。

**关键词:**防风网;煤堆;PIV;摩擦风速;起尘

**中图分类号:**O355,X501

**文献标识码:**A

## Wind tunnel observation on the effect of a porous fence on shelter of a triangular coal pile

ZHANG Ning<sup>1</sup>, CHEN Ting-guo<sup>1</sup>, Sang-joon LEE<sup>2</sup>

(1. Faculty of infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116023, China; 2. Department of Mechanical Eng. Center for Biofluid and Biomimic Research, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, South Korea)

**Abstract:** To investigate the shelter effect of a porous fence on wind erosion in the coal-pile storage yard, the turbulence flow around this region was visualized experimentally. A wind fence ( $\epsilon = 38.5\%$ ) was installed in front of a two-dimensional triangular prism pile in a simulated atmospheric boundary layer (ABL). A particle image velocimetry (PIV) system was employed to visualize the instantaneous velocity of the flow around the fence and prism. The mean velocity and friction velocity around the pile were analyzed and compared with the case of no fence, and also, the quantity of dust emission released to the atmosphere was evaluated. The porous fence was found to be effective in reducing the friction velocity of the flow along the windward surface of the pile, thus abating further evolution of dust emission. The present experimental results can provide useful information to enhance the understanding of shelter effect of the wind fence.

**Key words:** porous fence; coal pile; PIV; friction velocity; dust emission

## 0 引言

露天煤炭堆场受到自然风的作用而向大气中释放细小粉尘粒子,这种风蚀起尘现象引发了较为严重的空气污染。为了有效地抑制粉尘扩散,就需要在露天堆场采取一定的防护措施。其中,防风网具有结构简单、维护方便的优点,被广泛应用于大型散货堆料场中。一般来说,防风网指具有一定开孔率的人工墙式结构,适用于沿海、干旱以及沙漠等缺少植被的地区来控制风蚀扬尘的危害<sup>[1]</sup>。防风网的作用机理是

它能够对周围风场产生一定阻力,迫使气流的能量耗散,从而在网后有限范围内形成低风速遮蔽区域<sup>[2]</sup>。长期以来,各国学者针对防风网的遮风效果和优化进行了系统的研究工作<sup>[3]</sup>。Raine<sup>[4]</sup>测量了防风网背风区的平均风速与湍流度分布,并且将尾流划分为绕流与渗流两部分。Perera<sup>[5]</sup>提出开孔率是影响防风网遮风效果的主要因素,并且当开孔率超过30%时,尾流的旋涡结构消失,遮风距离相应增加。这些研究工作多是以热线风速仪进行单点速度测量的,其布点数量较多,且难以准确描述整个流场结构的变化情况。

收稿日期: 2010-08-18; 修订日期: 2011-01-11

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200732852120)

近年来,随着流场可视化测量技术不断发展完善,便于人们进一步考察防风网的空气动力特性。Dong 等人<sup>[6-7]</sup>对防风网的流场结构进行了可视化实验,考察了开孔率对网后平均风速、湍流以及涡量的影响,具有一定工程参考意义。然而,这些研究仅考虑了平坦地势下的流场特性,对于不平坦地势的情况还缺少相应的流场结构研究。为此对带有煤堆地形条件的防风网遮风效果进行了流场可视化测量,获得了平均速度变化和沿煤堆表面的摩擦风速分布,并进行了起尘量计算,进一步分析了防风网对煤堆起尘的抑尘机理。

## 1 实验方案与方法

### 1.1 大气边界层模拟

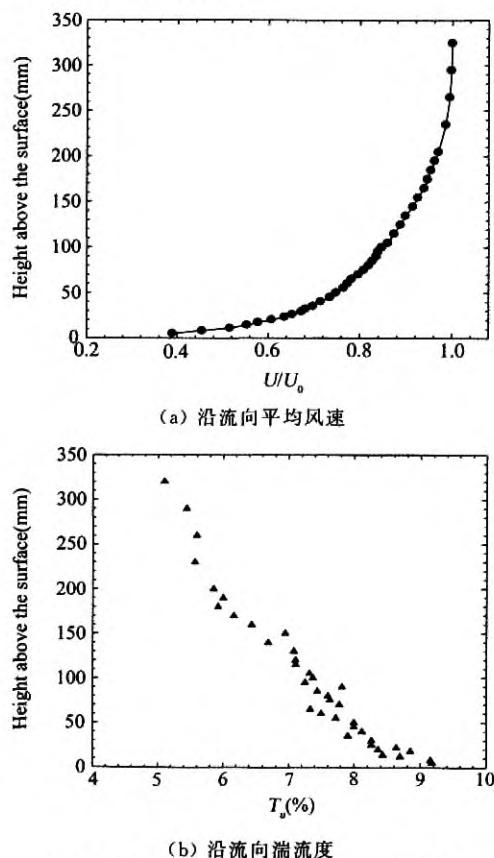


图1 测试段沿流向平均风速与湍流度剖面

Fig. 1 Mean streamwise velocity and turbulence profiles of the simulated boundary layer

实验在一座直流开口低速风洞中进行,该风洞实验段长 6.75m,实验段横截面尺寸为 0.72m×0.6m。为模拟大气边界层,在风洞实验段入口处放置人工尖劈和地表粗糙元,尖劈高度 0.28m,粗糙元布设长度 0.5m。实验中,使用热线风速仪(TSI IFA-100)测量实验段平均风速和湍流度剖面。热线仪采样频率为 3kHz,低频滤波 800Hz,每个测点采集量为 15000

个。此外,为消除测试段沿流速方向的风压梯度效应,沿洞壁设置了可调节大小的孔隙。

图1所示为实验段平均风速和湍流强度剖面。平均风速随高度呈对数分布,其表达式为:

$$\frac{U(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中, $U(z)$ 为高度  $z$  处沿流向的平均风速; $u^*$ 为地表摩擦风速; $k$ 为冯·卡门常数,取 0.4; $z_0$ 为有效粗糙高度。地表湍流度约为 10%,并且随高度  $z$  的增加而减小。

### 1.2 模型布置

图2为防风网与煤堆模型布置示意图。为保证边界层充分发展,防风网模型距离测试段入口 5.5m。该模型使用不锈钢片均匀穿孔制成,钢片厚度 0.3mm,穿孔孔径 1.4mm,板材开孔率 38.5%。Lee 等人<sup>[8-10]</sup>的研究发现该模型开孔率可以有效降低网后风速与湍流强度。实验延用了 Lee 等人的防风网模型,具体的空气动力特性可参见相关文献。防风网模型高 30mm,长 560mm,高厚比为 0.01,该值小于 0.33,保证网顶剪切层不会附着于模型表面。煤堆模型同样高 30mm,比例缩尺为 1/500,模型的剖面形状为等边三角形,底边倾角  $\theta=30^\circ$ 。

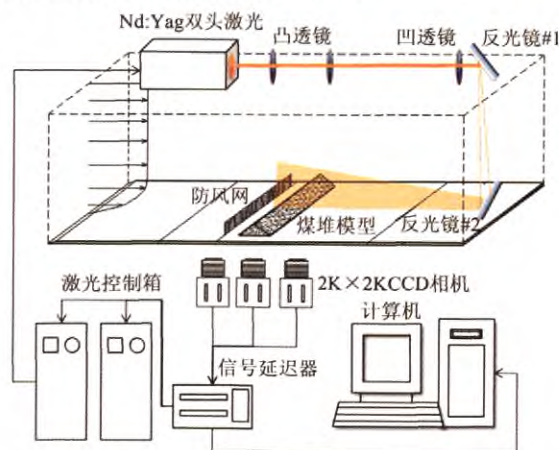


图2 实验装置设置与测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up and the measurement system

实验中,自由风速为 8.0m/s,模型相应的雷诺数为  $1.53 \times 10^4$ 。Cermak<sup>[11]</sup>认为障碍物的迎风面雷诺数应大于  $10^5$ ,以保证流场结构不受流速限制,因此实验结果将略受风速影响。另外,实验模型高度与边界层厚度比值( $H/\delta$ )为 12.5%,保证了该值在 15% 以内<sup>[12]</sup>。

### 1.3 PIV 测速系统

实验所用 PIV 系统主要包括:脉冲激光、CCD 相机、信号延迟器、计算机、透镜组与反光镜,实验装置



见图2。激光光源采用Nd:Yag双头激光,光源强度125mJ/pulse,最大工作频率15Hz。激光光束通过若干透镜生成厚度1mm的光栅。为消除地表强光反射引起的测量误差,使用了反光镜使光臂从尾部照亮测试区。成像系统使用3台CCD相机(MEGA-PLUS ES4020),图像聚焦使用尼康85mm焦段移轴镜头。每个相机的分辨率为 $2048 \times 2048$ pixels,实际观测面积约为 $165\text{mm} \times 165\text{mm}$ 。测试中,使用信号延迟器使脉冲激光信号与相机快门同步。在8.0m/s的自由风速下,每对脉冲的时间间隔 $\Delta t$ 设为 $80\mu\text{s}$ 。图像采集速度2 pairs/s,每次最大采集量为100张,共采集8次,即可得到400个瞬态速度场。示踪粒子使用橄榄油施加高压气流吹射形成,所得示踪粒子直径约 $3\mu\text{m}$ 。由于实验在开口式风洞中进行,为了保证示踪粒子在测试段充分扩散、均匀分布,首先需使示踪粒子在扩散段随气流充分发展再进入风洞测试段。

#### 1.4 起尘量计算

为考察防风网的遮护效果,需要估算煤堆表面风蚀起尘量分布情况。使用了EPA(美国环境保护总局)推荐的方法进行粉尘粒子排放量计算<sup>[13]</sup>,对干燥煤堆受单次扰动后暴露表面的起尘量计算方法如下:

$$P = 58(u^* - u_i^*)^2 + 25(u^* - u_i^*), \quad u^* > u_i^*$$

$$P = 0, \quad u^* \leq u_i^*$$
(2)

式中: $u_i^*$ 为临界摩擦风速,该值与粉尘粒径有关,一般通过风洞实验确定; $u^*$ 为煤堆表面摩擦风速(m/s),该值可由下式计算:

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

其中, $u_{10}^+$ 为实际高度10m处的最大风速; $u_s/u_r$ 为堆料归一化表面风速系数,该系数受煤堆几何形态的影响。计算模型认为,当煤堆表面的摩擦风速超过临界

摩擦风速,该区域则会进行粉尘排放;否则摩擦风速低于临界摩擦风速,煤堆表面不起尘。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 平均速度分布

图3显示了煤堆模型距离防风网1倍网高时,煤堆周围的平均速度场变化情况。在无网遮护时,近地面气流遇到煤堆模型后逐渐抬升,地表风速不断增加,并在煤堆顶部时达到最高。气流越过堆顶后在背风区形成旋涡,致使近地表气流逆向流动,但该区域的地表风速迅速减小。可以预测,粉尘起尘行为主要发生在煤堆迎风区表面,而背风区域的风蚀程度较弱。当存在防风网遮护时,一部分气流受到网的阻挡作用向上抬升,并且跃过防风网顶部,无法与网后煤堆直接接触;而穿过网孔的渗流由于自身风速较小,对煤堆侵蚀作用明显减弱。在煤堆背风区内,流场旋涡结构并没有因防风网的存在发生明显改变。此外,设置防风网后,堆顶附近的竖向上升气流得到显著抑制,减缓了粉尘粒子在空中的扩散速度。

图4为不同位置处水平风速和竖向风速的剖面分布曲线。由图4(a)可见,近地面处的水平风速在防风网前仅略微减弱,但在网后背风区,风速分布变化明显,近地面平均风速迅速减小,与无网下的风速差值逐渐增大,其中堆顶区域的风速仅为无网时的52%。而在防风网上部的区域,网后的水平风速基本保持不变,维持原先状态。由图4(b)可见,来流竖向风速在网前有所增加,说明气流开始向上抬升。在防风网背风区,近地面的风速竖向分量开始逐渐下降,其中堆顶区域风速的竖向分量仅为无网情况的40%。可以发现,防风网能够有效地遮减煤堆迎风面区域的来流风速。在煤堆背风区域,防风网的有无对近地面风速的降低效果并不明显。

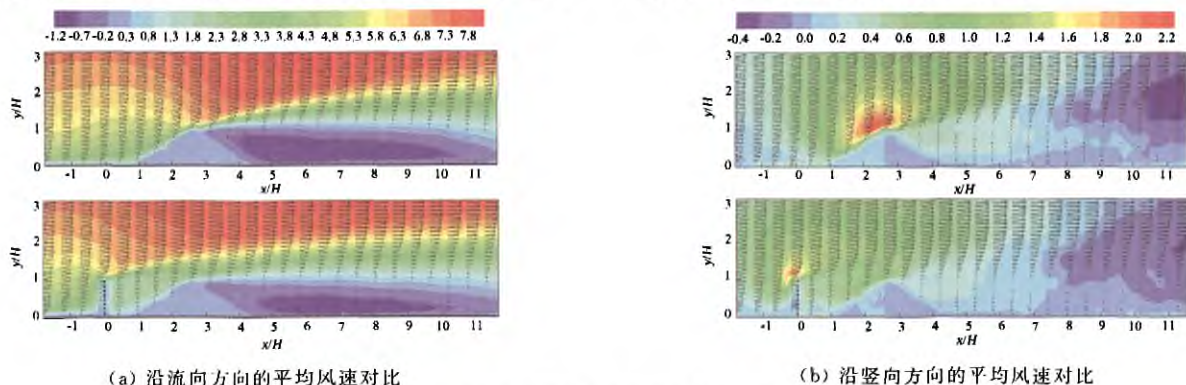


图3 有、无防风网时堆场区域的平均风速分布对比

Fig. 3 Comparison of the mean velocity field around a coal pile between with and without porous fence



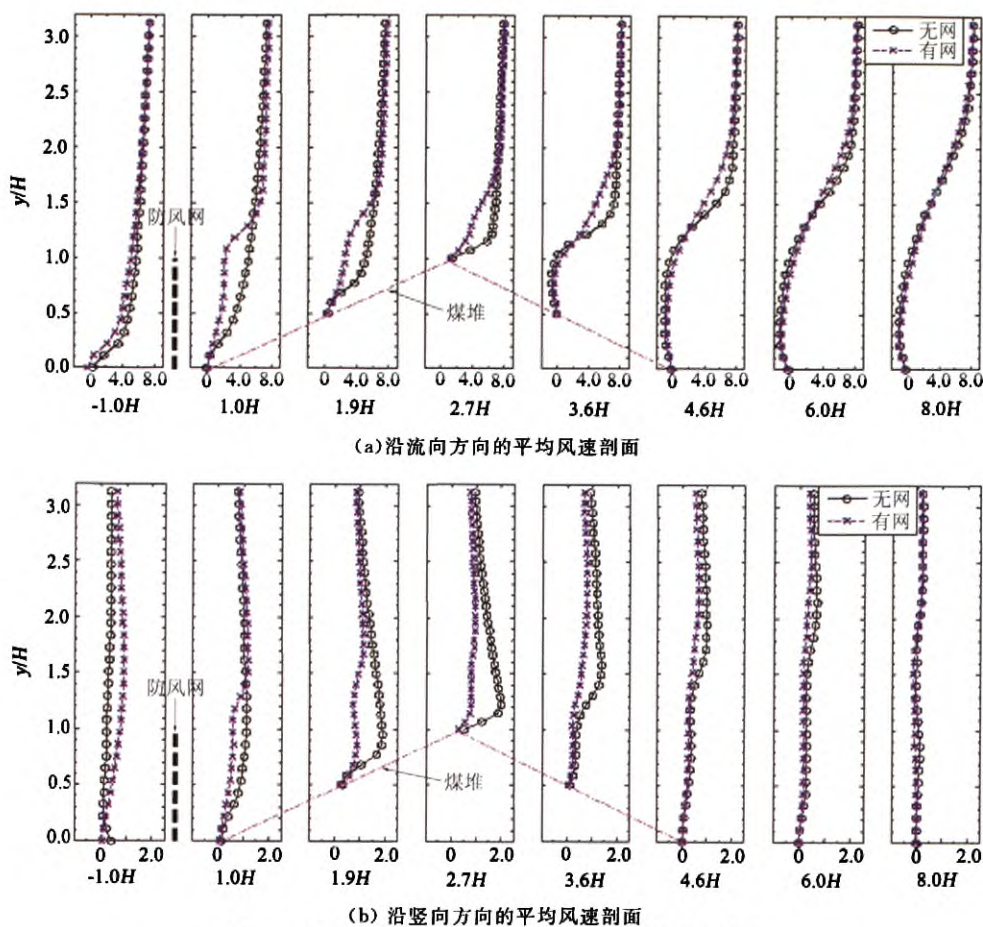


图4 无网状态与设置防风网后不同位置的平均风速剖面

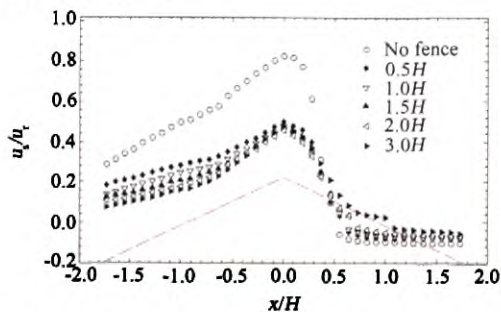
Fig. 4 Variations of mean streamwise and vertical velocity profiles

## 2.2 煤堆表面风速

Bagnold<sup>[14]</sup>认为粉尘风蚀起尘量与尘源地表区域的摩擦风速 $u^*$ 密切相关, $u^*$ 越大则起尘量也越大。由于摩擦风速无法直接测量,实际中一般使用归一化表面风速系数来衡量摩擦风速相对大小。归一化表面风速系数可表述为 $u_s/u_r$ ,其中 $u_s$ 是距离煤堆表面高度25cm处的风速值, $u_r$ 是在不受煤堆地表形态影响的远处10m高度处的风速值<sup>[15]</sup>。

图5显示了煤堆上的归一化表面风速系数 $u_s/u_r$ 分布随网—堆间距的变化情况。其中,图上 $H$ 代表网高,堆—网间距指煤堆左端部与防风网之间的距离,在3倍网高内共测定了5种间距。可以看出,设置防风网后,煤堆迎风面上的相对风速明显减小,并且在堆顶部位的降低幅度最大,达到50%左右。当改变网—堆间距时,对煤堆迎风面上的表面风速影响较小。可见,适当增加防风网与煤堆之间的距离不会显著影响防风网对煤堆的遮风效果,李建隆<sup>[16]</sup>曾指出网堆距维持在3倍网高内均具有较好的挡风效果。值得注意的是,煤堆堆脚部位的表面风速随着网—堆间距的增加反而逐渐减小,该现象与Dong等人<sup>[7]</sup>的

实验结果较为吻合。他们发现网后近地面附近的平均风速先随水平距离减小,在 $5H$ 附近降到最低,然后再随距离而逐渐增加。而在煤堆背风区域,无论是否存在防风网,其表面风速均迅速降低到负值,并逐渐趋于平稳。可见,煤堆背风区的相对表面风速受防风网的影响不明显。

图5 防风网煤堆归一化表面风速系数 $u_s/u_r$ 分布Fig. 5 Distributions of the normalized velocity  $u_s/u_r$  around the coal pile surface with and without porous fence

## 2.3 防风网抑制起尘效果

通过EPA<sup>[13]</sup>提出的起尘量计算方法,将实验获得的煤堆表面归一化风速系数 $u_s/u_r$ 换算成各风力等级下煤堆表面的摩擦风速 $u^*$ ,这里取用网—堆间



距为  $1.0H$  的实验结果。为简化计算,假定起尘粒子粒径均匀,其临界摩擦风速为  $0.35\text{m/s}$ ,煤堆物料经过一次扰动后,在不同风力等级下的起尘量见表1。从表中发现,防风网对煤堆的抑尘效果较为明显。即使在极端情况下,风力达到12级,防风网对网后煤堆起尘量的抑制效率仍能达到75%以上。可见,防风网具有较好的挡风作用,可以有效地控制露天煤炭堆场的粉尘排放量。

表1 煤堆计算起尘量

Table 1 Dust emission from the coal pile

风力等级	风速 (m/s)	煤堆起尘量( $\text{g/m}^2$ )		遮护效率 (%)
		无防风网	设置防风网	
4级	6	28.71	0.00	100.00
5级	9	162.99	6.53	96.00
6级	12	393.11	41.93	89.33
7级	15	714.51	104.65	85.35
8级	18	1121.40	196.54	82.47
9级	21	1613.65	314.51	80.51
10级	27	2854.25	626.04	78.07
11级	31	3871.01	888.75	77.04
12级	35	5039.54	1194.24	76.30

### 3 结论

(1)气流遇到煤堆后逐渐抬升,风速不断增加,最后越过堆顶在背风区形成旋涡。旋涡致使气流在煤堆背风区沿地表逆向流动,地表摩擦风速也迅速减小。设置防风网后,煤堆迎风面区域的平均风速显著降低,但在煤堆背风区域内,防风网的降风效果并不明显。

(2)煤堆表面的风蚀程度与归一化表面风速系数有关。在无遮护情况下,该系数沿煤堆表面上逐渐增加,并且在堆顶区域达到最大值,约为0.8。设置防风网后,煤堆迎风面的归一化表面风速系数明显降低,在堆顶位置仅有0.4,约为无网遮护时的50%。而在煤堆背风区域,煤堆的表面风速系数受防风网的影响不明显。

(3)在水平间距3倍网高范围内,改变网一堆间距不会对煤堆表面的风速系数产生较大变化,即防风网对煤堆的遮风效果受网一堆间距的影响较小。

(4)通过对煤堆起尘量的估算发现,防风网对煤堆的抑尘效果较为明显,在较大风力等级时的抑尘效率仍可达到75%以上。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG N, KANG J H, LEE S J. Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles [J]. *Geomorphology*, 2010, 120: 224-232.
- [2] NABIL A Z. Sand accumulation around porous fences

[J]. *Environmental Modelling & Software*, 1997, 12-2-3: 113-134.

- [3] UCAR T, HALL F. Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review [J]. *Pest Management Science*, 2001, 57: 663-675.
- [4] RAINE J K, STEVENSON D C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1977, 159-180.
- [5] PERERA, M A E S. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981(8): 93-104.
- [6] DONG Z B, LUO W, QIAN G Q. A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fence [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146: 82-93.
- [7] DONG Z B, LUO W Y, QIAN G Q, et al. A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 193-207.
- [8] LEE S J, KIM H B. Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 77-78: 521-530.
- [9] LEE S J, KIM H B. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80: 311-326.
- [10] KIM H B, LEE S J. Hole diameter effect on flow characteristics of wake behind porous fences having the same porosity [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2001, 28: 449-464.
- [11] CERMAK J E. Advances in physical modeling for wind engineering [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, 113 (5): 737-756.
- [12] WHITE B R. Two-phase measurements of saltating turbulent boundary layer flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, (8): 459-473.
- [13] Update of fugitive dust emission factors in AP-42 section 11.2-wind erosion [R], MRI No. 8985-K, Kansas City, Midwest Research Institute, 1988.
- [14] BAGNOLD R. The physics of blown sand and desert dunes [M]. London: Methuen and Co, 1941.
- [15] TURPIN C, HARION J L. Numerical modeling of flow structure over various flat-topped stockpiles height: implication on dust emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 5579-5587.
- [16] 李建隆, 董纪鹏, 陈光辉, 等. 防风抑尘网开孔形式对场的影响[J]. *环境工程学报*, 2009, 09-1725-04.

#### 作者简介:



张宁(1981-),男,辽宁大连人,博士研究生。研究方向:结构力学与风工程。通讯地址:大连理工大学综合实验3号楼527室。联系电话:15524800876; 0411-84708515-15; E-mail: johning@live.cn。导师电子邮箱: ctg@dl.cn。