

# 环境模拟实验室中近地层风速廓线的形成研究<sup>1)</sup>

曾 波<sup>\*,2)</sup> 张鸿雁<sup>\*,3)</sup> 孟庆龙<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

<sup>†</sup>(西安交通大学生态环境与环境力学中心, 西安 710049)

**摘要** 在环境模拟实验室中利用阻尼网对实验区形成的近地层风速廓线进行了数值模拟和实验研究. 阻尼网的布置方案以变孔隙率阻尼网作为指导, 选用 30 目和 16 目定孔隙率阻尼网 4 种不同高度的混合式布置方式. 数值模拟采用 Fluent 软件, 将结构复杂的阻尼网简化为具有一定厚度的多孔介质模型, 湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  模型. 结果表明可将阻尼网作为多孔介质处理, 定孔隙率阻尼网的组合可在短实验段内形成所需近地层的风速廓线, 模拟值与实验值吻合良好.

**关键词** 阻尼网, 多孔介质, 风速廓线, 数值模拟

中图分类号: V211.73 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2012)01-031-04

## THE FORMATION OF WIND PROFILE IN ENVIRONMENT SIMULATION LABORATORY<sup>1)</sup>

ZENG Bo<sup>\*,2)</sup> ZHANG Hongyan<sup>\*,3)</sup> MENG Qinglong<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(School of Environment & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

<sup>†</sup>(The Center for Environment & Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The numerical simulation and the experimental test are used to investigate the formation of the wind profile of the neutral atmospheric surface layer by screens in the environment simulation laboratory. Taking the screen layout program with variations of porosity of screens as a guide, 30 meshes and 16 meshes with fixed porosity of screens with respective heights of four screen layer collocations are selected. The complex screens are simplified as the porous media model and the  $k-\varepsilon$  model in using the software Fluent. The results show that the screens can be simulated with the porous media and the wind profile can be formed by the compounding of fixed porosity screens in a short experimental section. The simulation results agree well with those of experiment.

**Key words** screens, porous media, wind profile, numerical simulation

### 引 言

环境模拟实验室是指人类为实现对近地层微气候环境(如:风场环境、温度环境、日光辐照环境等)的主动模拟所建立的可控实验平台. 其中,对近地层风速场的模拟是最重要的基础性工作. 由于实验室气流出口距模型实验区距离很短,因此,以往在环境风洞中模拟近地层风速场的各类方法均无法满足要求. 本文利用阻尼网的特性,针对某环境模拟

实验室中模型实验区内所需风场的特征,采用数值模拟和实验研究相结合的方法,通过对不同组合定孔隙率阻尼网的流动特性研究,给出了一种在很短距离内形成对数风速廓线的可行方法,为环境模拟实验室中近地层风速场的模拟提供了一种新方法.

### 1 物理模型

环境模拟实验室的简化物理模型如图 1 所示,

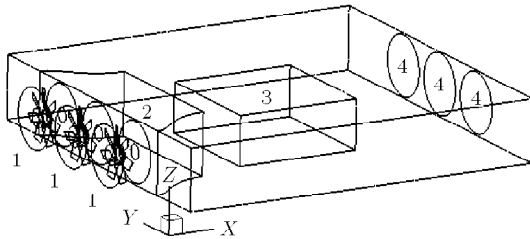
2011-05-18 收到第 1 稿, 2011-06-20 收到修改稿.

1) 陕西省教育厅专项科研计划项目(2010JK658), 国家教学质量工程(ZLGC0503)资助.

2) 曾波, 1986 年生, 男, 硕士研究生. E-mail: zengboo@163.com

3) 张鸿雁, 教授. E-mail: zhanghongyan@xauat.edu.cn

实验室的长 × 宽 × 高 = 7.37 m × 6.95 m × 1.26 m. 实验室风场的动力由三台轴流风机提供, 由于风机出口的气流具有旋转、多向、不均匀性等特点, 因此, 气流容易向四周扩散, 不易控制, 为集中风量, 风机出口安装有收缩段, 收缩段  $x$  方向长 1.40 m, 出口截面尺寸为 3.00 m × 1.26 m; 模型实验区的长 × 宽 × 高 = 2.50 m × 2.50 m × 1.00 m.



1 轴流风机, 2 收缩段, 3 模型实验区, 4 出口

图 1 环境模拟实验室简单示意图

在实验区内需要模拟近地层中性风结构, 即实现平稳、分布均匀、一定紊流度的对数型风速廓线流场<sup>[1]</sup>, 但由于收缩段出口距模型实验区距离较短, 不可能用变间距平板格栅、尖劈和粗糙元组合等风洞中常用的手段来实现, 因而采用在收缩段出口加装阻尼网的形式, 以使模型实验区的流场分布能符合近地层的要求。

阻尼网(俗称筛网), 是指由金属丝或塑料丝编制而成的网状物. 在温室大棚中, 为防止鸟类和昆虫进入, 通常的做法是在通风口处安装阻尼网<sup>[2]</sup>; 造纸工艺中, 为从稀纸浆悬浮液中得到厚度均匀的纤维毡, 一般在造纸机的成型部安装阻尼网<sup>[3]</sup>; 风洞实验中, 为将气流中的大涡旋分割为小涡旋而形成均匀流动, 一般在风洞入口设置阻尼网. 阻尼网被越来越多地应用到许多领域, 但由于它在质量、动量和热量传递方面增加了额外的阻力, 因而当流体通过阻尼网时其原有的流动特征会改变. Koo 和 James<sup>[4]</sup> 提出气流在通过低孔隙率的阻尼网时, 气流的两方面属性被改变, 一是气流的静压减小; 二是气流的流向被扭转以垂直通过阻尼网. Miguel<sup>[5]</sup> 根据阻尼网压降实验提出, 阻尼网网孔不同的几何形状几乎不会影响下游气流的流动特征。

## 2 数值计算方法

本文采用 CFD 软件 Fluent 进行数值模拟计算。

(1) 对 N-S 控制方程采用有限体积法进行离散, 离散格式均为二阶; 迭代计算精度为  $10^{-5}$ . 忽略空气与阻尼网之间的黏性摩擦热量, 即忽略能量方程。

将结构复杂的较薄阻尼网简化为具有一定厚度的多孔介质<sup>[4]</sup>模型; 湍流模型为标准  $k-\epsilon$  模型。

(2) 采用分区进行混合网格的划分, 由于多孔介质不易过厚, 却又是影响气体流动的主要部位, 故在此区域进行网格加密并进行网格无关性验证, 最终确定网格总数为 1 001 852, 其中结构化网格为 484 120, 非结构化网格为 517 732. 由图 2 看出, 在速度梯度变化较大的多孔介质区域和模型实验区划分了较密的网格, 而在其他影响流动较弱的区域划分了较疏的网格, 这样的处理方式可以在保证数值结果精度的条件下有效降低对计算机配置的要求。

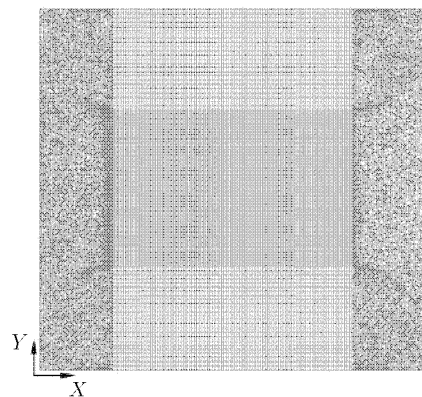


图 2  $z = 0.63$  m 截面网格

(3) 入口边界设定为速度入口, 并分别导入 3 台风机出口截面速度 profile, 平均流速均为 0.90 m/s; 出口设定为压力出口, 边界静压值为 0; 入口、出口湍流特性均采用湍流强度和水利直径的定义方法。

(4) 阻尼网处理为各向异性的多孔介质, 其厚度为 0.1 m,  $y, z$  两个方向的阻力系数为  $x$  方向阻力系数的 1000 倍。

## 3 多孔介质模型在 CFD 软件中的实现

在数值计算中, 本文将阻尼网作为多孔介质处理, 因为阻尼网本身已经很薄, 其厚度只有  $10^{-4}$  的数量级, 而实验室的外形尺寸则有  $10^1$  的数量级, 两者之间相差  $10^5$  倍. 因此, 若直接对阻尼网进行网格划分则至少需要小于  $10^{-4}$  数量级的网格单元, 这样无疑会大大增加网格单元的总数, 使得数值模拟变得既不经济又不省时. 为解决这一问题, 人为将阻尼网看作是具有一定厚度的多孔介质, 并找出阻尼网和多孔介质相应参数的关系式, 通过模拟多孔介质来达到研究阻尼网的目的. 简化的基本原理是保证气流通过阻尼网的压降与通过多孔介质的压降相等。

1997 年, Miguel 等 [6] 分析了气流通过多孔介质的压降方程, 提出对于稳态、不可压缩流体通过阻尼网的压降可用 Forchheimer 方程表达

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_1 = \left(\frac{\mu}{K_1}u + \rho\left(\frac{Y_1}{K_1^{0.5}}\right)|u|u\right) \quad (1)$$

$$K_1 = 3.44 \times 10^{-9}\varepsilon^{1.6} \quad (2)$$

$$Y_1 = 4.3 \times 10^{-2}\varepsilon^{-2.13} \quad (3)$$

其中,  $K_1$ ,  $Y_1$  和  $\varepsilon$  分别表示阻尼网的渗透率、惯性因子和孔隙率.

在 Fluent 中, 多孔介质模型的计算原理是在流体流动控制方程里的动量方程中加上额外的动量源项. 附加的动量源项一般由两部分组成, 一部分是黏性损失项, 另一部分是惯性损失项. 对于简单的均匀多孔介质而言, 可由方程 (4) 表示

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha}v_i + C_2\frac{1}{2}\rho|v|v_i \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  和  $C_2$  分别表示多孔介质的渗透率和惯性阻力系数.

在数值模拟中, 将阻尼网作为多孔介质处理后, 方程 (1) 可变为

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_2 = \left(\frac{\mu}{K_1}u + \rho\left(\frac{Y_1}{K_1^{0.5}}\right)|u|u\right)\frac{d}{\Delta x} \quad (5)$$

比较方程 (4) 和方程 (5) 可知:

渗透率

$$\alpha = K_1\frac{\Delta x}{d} \quad (6)$$

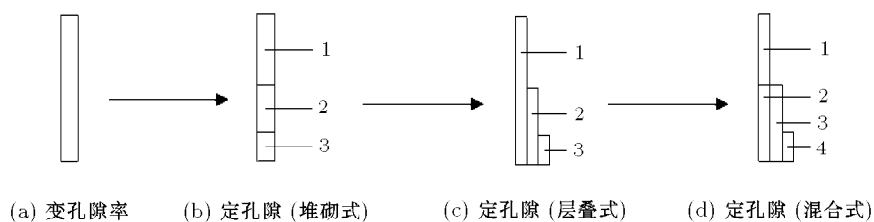


图 3 阻尼网布置方案演化过程

由于市场中所能提供的仅为定孔隙率 (均匀目数) 的阻尼网, 因而变孔隙率的阻尼网只起指导作用, 不能应用于现场实测中. 为此, 根据孔隙率随高度变化曲线斜率的大小将变孔隙率阻尼网用定孔隙率阻尼网代替 (如图 3(b) 堆砌式), 但代替后在阻尼网下游实现光滑的风速廓线时, 实验段长度会有所增加, 其大小与变孔隙率阻尼网在高度方向上的分割份数有关, 分割份数越多, 实验段越短, 反之亦

惯性阻力系数

$$C_2 = \frac{2Y_1}{K_1^{0.5}}\frac{d}{\Delta x} \quad (7)$$

其中,  $d$  为阻尼网厚度,  $\Delta x$  表示多孔介质的厚度. 从式 (6),(7) 可以看出, 阻尼网在简化为多孔介质的过程中,  $\Delta x$  可以任意选取, 理论上不影响数值模拟结果, 但由于在薄厚多孔介质中, 划分的网格单元尺寸大小不同, 一定程度上会影响结果的精度, 因此, 建议多孔介质厚度尽量取薄.

## 4 结果分析

### 4.1 阻尼网布置方案确定

人工形成近地层风速廓线被动方法的原理是在来流截面不同高度处产生不同程度的阻塞, 但是定孔隙率阻尼网对气流的阻塞作用各部分相同, 因此, 仅用一张定孔隙率的阻尼网是不可能实现风速廓线的. 为解决这个问题, 最直接的方法就是在收缩段出口不同高度布置不同阻力的阻尼网, 使得不同高度处产生不同程度阻塞. 有关阻尼网的布置方案, 采用数值模拟方法进行确定, 基本思想是采用变孔隙率的阻尼网来实现风速廓线, 并以此为依据进行定孔隙率阻尼网的选择, 具体过程如图 3 所示. 其中, 图 3(a) 中阻尼网孔隙率随高度变化的函数为

$$\varepsilon = -0.6059z^4 + 1.9127z^3 - 2.25z^2 + 1.2722z + 0.2505 \quad (8)$$

然. 但是堆砌式的布置方式在进行现场实测时, 容易在阻尼网连接处造成漏风, 影响测量结果, 为此将其改为图 3(c) 的层叠式, 它虽然解决了漏风问题, 但此种布置应用现有阻尼网会造成下部阻力过大, 无法实现期望的风速廓线. 综合考虑市场中所能提供的阻尼网、实验段长度大小以及阻尼网布置的便捷性、可行性, 最终确定阻尼网的布置方案为图 3(d) 的混合式, 阻尼网具体参数见表 1.

表1 阻尼网参数及其应用高程

阻尼网	目数	孔隙率	丝径 / $\times 10^{-4}m$	高度 / m
1	30	0.417	3.00	0.70~1.26
2	30	0.496	2.5	0~0.70
3	30	0.496	2.5	0~0.70
4	16	0.469	5.0	0~0.25

4.2 实验与模拟结果比较

在进行实验测量时，实验室采用3台额定转速均为960rpm的YT35G(B)-11.2的轴流风机同时进行送风，阻尼网布置方案采用数值模拟所确定的图3(d)的混合式。风速测量采用 DANTEC 公司生产的 MiniCTA 热线风速仪，探头型号为 55R49。在实验区测点水平面分布如图4所示，z向测点的分布是由地面起，依次取0.15m, 0.20m, 0.30m, 0.45m, 0.67m, 1.00m, 6层共150个测点。

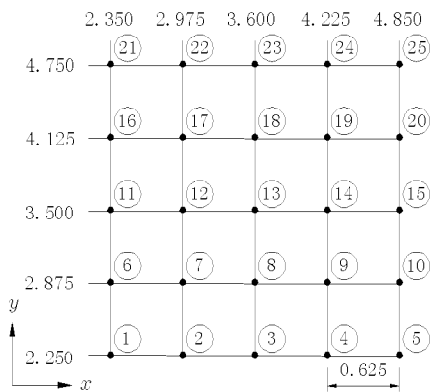


图4 测点水平面投影分布(单位: m)

为反映模型实验区内气流的分布特征，在1~5号和11~15号测点所在铅垂线上绘制风速廓线图，图5给出了铅垂线13的数值模拟与实验值。可以看出，风速廓线的模拟值与实测值分布趋势一致，其拟合为指数线(近地层对数风廓线)。在风速廓线下部，模拟值与实测值偏差较大，引起此种偏差的原因可能由于实验测量时阻尼网层与层之间存有间隙，造成阻力过大所致。另外，由于定孔隙率阻尼网的组合会造成阻尼网截面沿高度方向上阻力的不均匀性，也可致模拟值与实验值存在偏差。

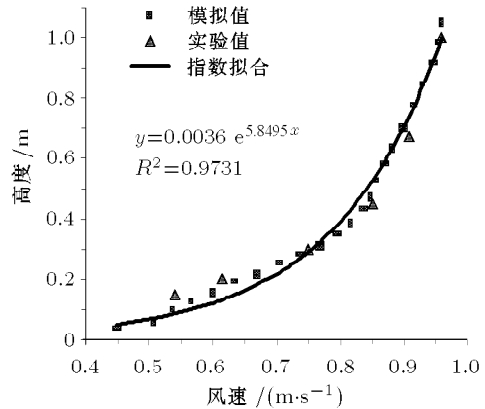


图5 铅垂线13上风速廓线

5 结论

(1) 在数值模拟中，可将阻尼网作为多孔介质进行处理，为保证数值模拟结果的精度，多孔介质区域应尽量取薄。

(2) 以变孔隙率阻尼网为指导，选用16日和30目定孔隙率阻尼网的混合式(图5(d))布置，在短实验段内可形成风速廓线，模拟与实验的风速廓线吻合较好。

参考文献

- 1 王元, 张鸿雁, 近地层与风沙现象相似参数的研究. 中国沙漠, 1994, 14(1): 10-16 (Wang Yuan, Zhang Hongyan. The study on similarity parameters of the atmospheric surface layer and phenomena of drift sand. *Desert Research*, 1994, 14(1): 10-16 (in Chinese))
- 2 Fatnassi H, Boulard T, Bouirden L. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118: 97-111
- 3 Green SI, Wang ZS, Waung T, et al. Simulation of the flow through woven fabrics. *Computers & Fluids*, 2008, 37: 1148-1156
- 4 Teitel M, Dvorkin D, Haim Y, et al. Comparison of measured and simulated flow through screens: Effects of screen inclination and porosity. *Biosystems Engineering*, 2009, 104: 404-416
- 5 Miguel AF. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations. *Energy and Buildings*, 1998, 28(2): 63-69
- 6 Teitel M. Using computational fluid dynamics simulations to determine pressure drops on woven screens. *Biosystems Engineering*, 2009 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.10.005

(责任编辑: 刘俊丽)