

Numerical Simulation of Wind Characteristics of the Windshield under Different Sizes of the Porosity

Peng Han^{1,2}, Jianping Zhao^{1,2*}, Shengyu Li¹

¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Email: *zhaojianping@126.com

Received: Sep. 6th, 2016; accepted: Sep. 26th, 2016; published: Sep. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Through the establishment of two-dimensional incompressible unsteady flow N-S equation, we solve the N-S equation with the use of variational multiscale methods, make numerical simulation of the wind field for different porosities and aperture ventilated wind screen and study the influence of ventilated wind screen under different porosities and aperture and non-ventilated wind screen on wind field. The results show that the wind screen has great wind resistance characteristics and the wind resistance effect of ventilated wind screen with appropriate porosity is better than that of non-ventilated wind screen. At the same time, the influences of wind screen with different porosities are significantly different and the wind screens with the same porosity but different apertures also have obvious differences. Under this experiment, the porosity is 20% while the aperture is 0.5 cm and the height is 50cm. The wind screen has great wind resistance characteristics, forming about 198 cm posterior vortex length in the wind field with the height of 200 cm and the length of 500cm. The vortex length is significantly longer than that of other ventilated wind screen.

Keywords

Different Porosity Wind Screen, 2D Numerical Simulation of the Wind Field, Windproof Characteristics

*通讯作者。

透风型挡风板不同孔隙度大小防风特性的二维数值模拟

韩 鹏^{1,2}, 赵建平^{1,2*}, 李生字¹

¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐

²新疆大学, 新疆 乌鲁木齐

Email: *zhaopianping@126.com

收稿日期: 2016年9月6日; 录用日期: 2016年9月26日; 发布日期: 2016年9月29日

摘 要

本文通过建立二维非定常不可压N-S方程, 采用变分多尺度方法对N-S方程进行求解并应用freefem软件对不同孔隙度, 不同孔径的透风型挡风板在给定风场进行数值模拟。研究了不同孔隙度下, 不同孔径透风型挡风板与不设挡风板及不透型挡风板对风场的影响。结果表明, 挡风板具有较好的防风特性, 适当孔隙度的透风型挡风板较不透型防风特性好。同时不同孔隙度挡风板对风场影响差异明显, 同时相同孔隙度不同孔径挡风板也有较明显差异。在本实验意义下, 孔隙度为20%孔径为0.5 cm, 高度为50 cm挡风板具有较好的防风特性, 在高200 cm, 长为500 cm的风场中可以形成198 cm左右的板后涡流长度, 形成涡流长度明显长于其他透风型挡风板。

关键词

不同孔隙度挡风板, 风场二维数值模拟, 防风特性

1. 引言

新疆地区植被覆盖率低, 地表沙化严重。曾多次出现因大风和沙尘暴导致的火车倾覆翻车事件, 严重的影响到了铁路公路的运输安全。挡风墙(板)作为一种防风措施, 已经得到了广泛研究和工程应用。通常的挡风墙密不透风, 其总体上, 对气流有减速效应, 对下风侧汽车具有防护效应; 但同时, 在挡风墙背风侧形成了强烈涡流低速区, 在顶部出现了强烈气流加速区, 加剧了下风侧汽车受力不均衡, 反而容易引起倾覆现象。对于西部地区在强风中往往会携带沙粒, 不透风挡风墙会导致挡风墙周围出现积沙现象。长期积累会导致路面被积沙覆盖, 对车辆公路行驶形成威胁。

不少学者利用实验和数值模拟手段探讨了强侧风作用下, 不同形状、不同高度不同和不同位置的挡风墙对流场的影响及风沙情况下挡风墙会出现的一些影响。例如: 郑晓静, 马高生, 黄宁对铁路挡风墙挡风效果和积沙进行情况分析[1][2], 得出挡风墙的铁路沿线会出现积沙现象且挡风墙的高度与列车行驶的车速对积沙量均有一定影响; 曾秋兰, 李振山, 卢傅安, 王艺淋做了高速公路透风型挡风墙不同位置防风特性的数值模拟研究[3]。得出在一定条件下, 透风型挡风墙最佳的设置位置。

本研究主要针对透风型挡风墙对流场的影响, 建立二维非定常、不可压 Navier-Stokes 方程模型进行数值模拟。本文在采用了郑海标等不可压缩 N-S 方程变分多尺度方法[4]对方程求解进行数值模拟[5]。分别对不同孔隙度、孔隙不同孔径的挡风墙对风场的影响做比较研究。

2. 风场模拟区域与直立式透风挡风墙几何模型的建立

2.1. 计算域与挡风板模型

参照风洞试验建立模拟中使用的二维风场采用 $500\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 的矩形区域如图 1(a)所示。以挡板与地面交点的位置作为原点建立坐标轴模拟区域既为 $[0,500] \times [0,100]$ 。挡风板有厚度为 2 cm ，本研究采用 80 cm 宽的挡风板；高度为 15 cm 的木板。挡风板的孔隙度在本文二维模型中即孔隙面积占挡风板面积的比例。孔隙度有三类分别为 0% ， 10% ， 20% 。如图 1(b)，表示 5 排，每排 24 个洞孔隙度的三维情况下的挡板。 0% 孔隙度为挡板不透风。孔隙大小即每一个孔隙的直径。孔径大小三类分别直径为 0.25 cm ， 0.5 cm ， 1 cm 。如图 1(c)所示。挡风板转化为二维情况下既为若干个小方块纵向排列如图 2 所示。由于二维风场

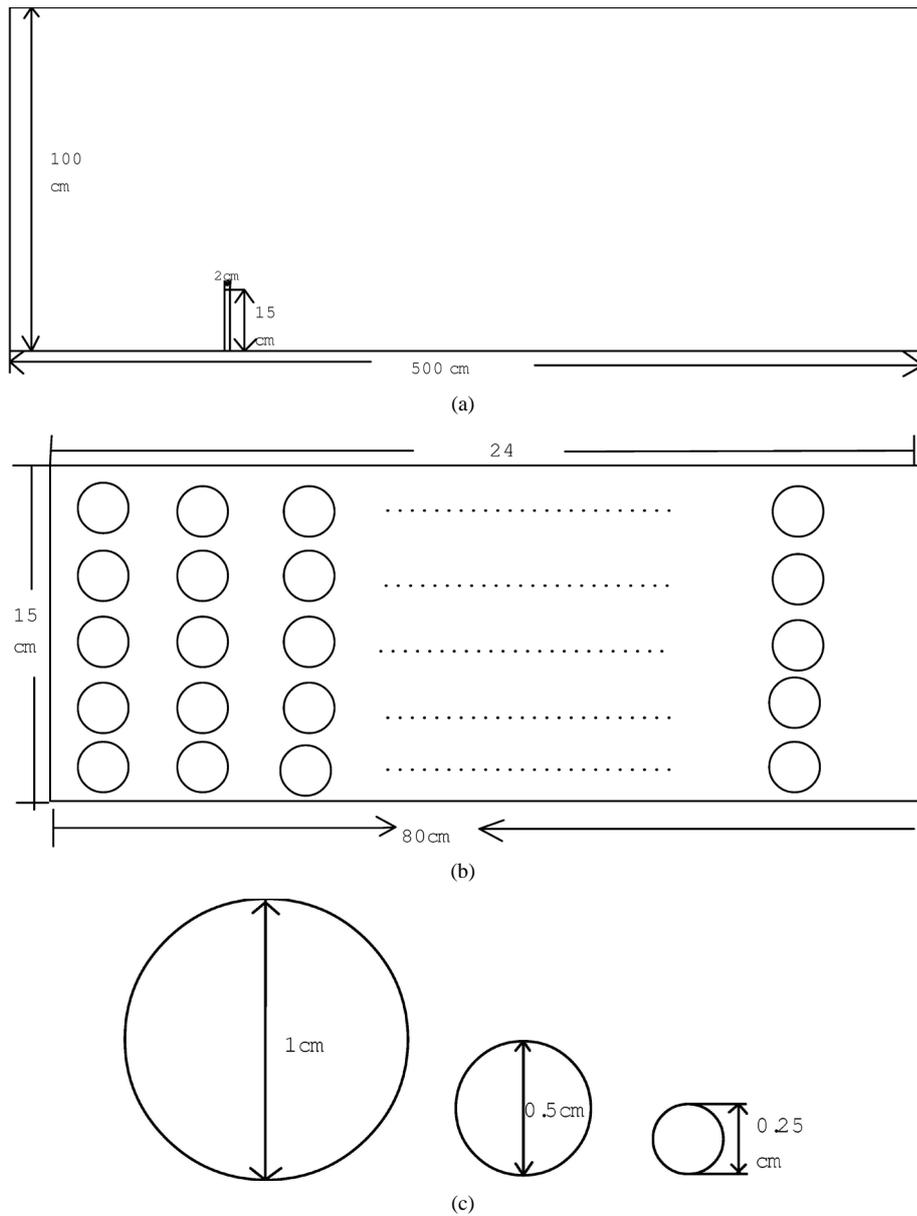


Figure 1. (a) Computational domain, (b) plan of drilling the windshield, (c) aperture

图 1. (a) 计算域, (b) 三维挡风板钻孔, (c) 孔径

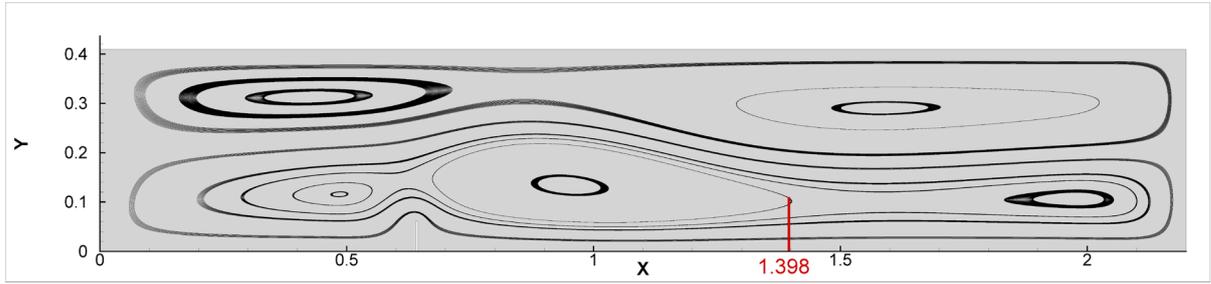


Figure 2. Flow field of a non hole wind shield
图 2. 无孔挡风板流场图

模拟基于 Shafer 和 Turek 以及 John 的数值模拟工作。本研究将原尺度进行等比例缩小将原来风场的高度 150 cm 缩小为 0.41。整体模型缩小比例关系既为 10000:41。缩小后 10% 孔隙度采用 0.25 cm 和 0.5 cm 需要的小孔数分别为 6 个和 3 个。但二维模型较三维存在差异，本模型建立时 10% 的孔隙度如果采用 1 cm 孔径需要的孔数介于 1 个与 2 个之间经计算无论采用 1 个还是 2 个均与 10% 孔隙度相差较大。所以在此孔隙度下仅做了孔径为 0.25 cm 和 0.5 cm 的模型。20% 孔隙度孔径 0.25 cm, 0.5 cm 和 1 cm 的模型需要的小孔数分别为 12 个, 6 个, 3 个。

2.2. 网格划分

采用以上计算区域，利用 `freefem` 软件，采用自定义方式对计算域进行网格划分，得到非结构化网格。在靠近挡风板区域对网格进行加密，远离挡风板区域网格适当稀疏。有利于减少运算量，提高运算效率又不改变实际运算所得的研究情况。构建计算域网格划分所得参数如表 1。

3. 计算方法

利用 `freefem` 软件对计算域进行网格剖分在挡风板附近进行了网格的加密以使得在更加精确计算挡风板前后的变化所以计算量会比较大。基于郑海标教授的工作利用 `freefem` 验证变分多尺度得到的好的结果，变分多尺度方法有利于提高计算效率。所以本文采用变分多尺度方法对计算域进行数值模拟。

采用二维非定常不可压缩 N-S 方程：

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t - \nu \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} & \text{in } \Omega \times (0, T) \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 & \text{in } \Omega \times (0, T) \\ \mathbf{u} = 0 & \text{in } \partial\Omega \times (0, T) \\ \int_{\Omega} p(x) dx = 0 & \text{in } \Omega \times (0, T) \end{cases} \quad (1.1)$$

基于郑海标的两局部高斯的变分多尺度方法[4]对二维非定常不可压缩 N-S 方程进行求解。令 $t^n = n\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$, 以及 $T = N\Delta t$ 。给定 $(u_h^n, p_h^n) \in (\mathbf{X}_h, M_h)$, 求解满足

$$\begin{aligned} & \left(\frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{\Delta t}, v_h \right) + \nu \left(\nabla \left(\frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{2} \right), \nabla v_h \right) + b \left(\frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{2}, \frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{2}, v_h \right) \\ & - (p_h^{n+1}, \nabla \cdot v_h) + G(\nabla u_h^{n+1/2}, \nabla v_h) = ((f^{n+1/2}), v_h), \quad \forall v_h \in \mathbf{X}_h \\ & (q_h, \nabla \cdot u_h^{n+1}) = 0, \quad \forall q_h \in M_h \end{aligned}$$

时间步长 Δt , 空间步长 h , 时间上采用 Crank-Nicolson 离散，有二阶精度，稳定项的投影进行显示处理如下：

Table 1. The number of nodes and the number of grid cells in the computational domain
表 1. 计算域节点数与网格数

	不透风型挡风板	孔隙度为 10% 孔径为 0.25	孔隙度为 10% 孔径为 0.5
节点数	9886	37,702	32,617
网格数	19,111	174,594	16,936
	孔隙度为 20% 孔径为 0.25	孔隙度为 20% 孔径为 0.5	孔隙度为 20% 孔径为 1
节点数	44,505	53,626	23,840
网格数	203,399	245,058	110,992

$$G(u_h^{n+1/2}, v_h) = \nu_T \sum_{\Omega_e \in \tau_h} \left\{ \int_{\Omega_e, k} \nabla u_h^{n+1} \nabla v_h \, dx - \int_{\Omega_e, l} \nabla u_h^n \nabla v_h \, dx \right\}$$

基于 Shader 和 Turek [5] 以及 John [6] 的工作, 该模型将结合其模拟采用的风场尺寸大小。模型计算区域 Ω 如图 1(a) 所示。

入流和出流速度条件如下:

$$u_1(0, y, t) = u_1(2.2, y, t) = \frac{6}{0.41^2} \sin\left(\frac{\pi t}{8}\right) y(0.41 - y),$$

$$u_2(0, y, t) = u_2(2.2, y, t) = 0.$$

其它边界赋予无滑动边界条件。给定运动粘性系数 $\nu = 0.001$ 和外力 $f = 0$ 。基于入流速度 $u(t)$, 平均速度为 $U(t) = \sin(\pi t/8)$, 最大速度为 $U_{\max} = 1.0$ 以及挡风板宽度为 $L = 0.02$, 则对应的雷诺数为 1000。

对于该模型, 我们将计算下列参数:

$$\Delta p(t) = p(t; 0.64, 0.08) - p(t; 0.66, 0.08)$$

拉力 $c_d(t)$ 和升力 $c_l(t)$:

$$c_d(t) = \frac{2}{\rho L U_{\max}^2} \int_S \left(\rho \nu \frac{\partial u_{t_s}(t)}{\partial \mathbf{n}} n_y - p(t) n_x \right) S$$

$$c_l(t) = -\frac{2}{\rho L U_{\max}^2} \int_S \left(\rho \nu \frac{\partial u_{t_s}(t)}{\partial \mathbf{n}} n_x + p(t) n_y \right) S$$

其中, 流体密度 $\rho = 1.0$, $\mathbf{n} = (n_x, n_y)^T$ 是 S 上的外法向向量, $\mathbf{t}_s = (n_y, -n_x)^T$ 是切向向量, u_{t_s} 是切向速度。

4. 模拟结果与分析

为了研究透风型挡风板不同孔隙度对风场的影响, 模拟结果给出了雷诺数为 $Re = 1000$, $T = 8$ 时, 孔隙度为 0% 以及孔隙度为 10% 和 20% 的两类风场流线图。如图 3~图 4 所示, 孔隙度为 10% 的挡风板孔径分别为 0.25 cm, 0.5 cm 的风场流线图; 如图 5~图 7 所示, 孔隙度为 20% 的挡风板孔径分别为 0.25 cm, 0.5 cm, 1 cm 的风场流线图。作为对照本文给出了不透风挡风板的风场流线图。根据不同孔隙度透风型挡风板与不透风型挡风板比较, 可以看出不同挡板对风场影响均会出现不同大小的涡旋区。部分透风型挡风板模拟结果形成的风场涡旋区会较不透风型挡风板长但部分会较短。孔隙度为 10% 的挡风板中孔径为 0.25 cm 的挡风板形成的涡旋较长。

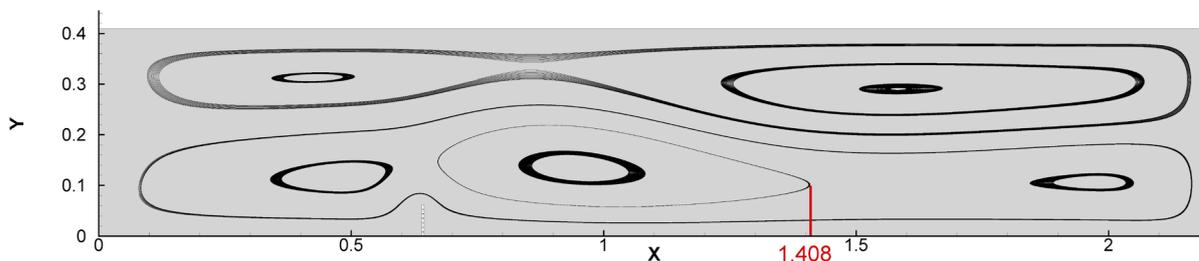


Figure 3. Flow field map with porosity of 10% and pore size of 0.25 cm

图 3. 孔隙度为 10%、孔径为 0.25 cm 流场

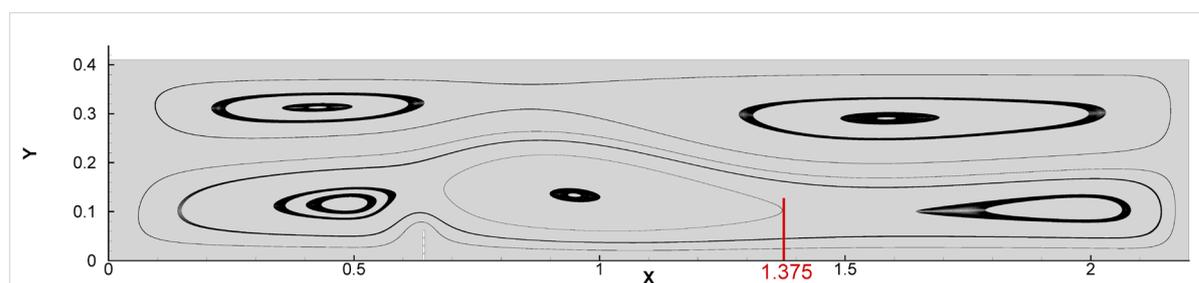


Figure 4. Flow field map with porosity of 10% and pore size of 0.5 cm

图 4. 孔隙度为 10%、孔径为 0.5 cm 流场

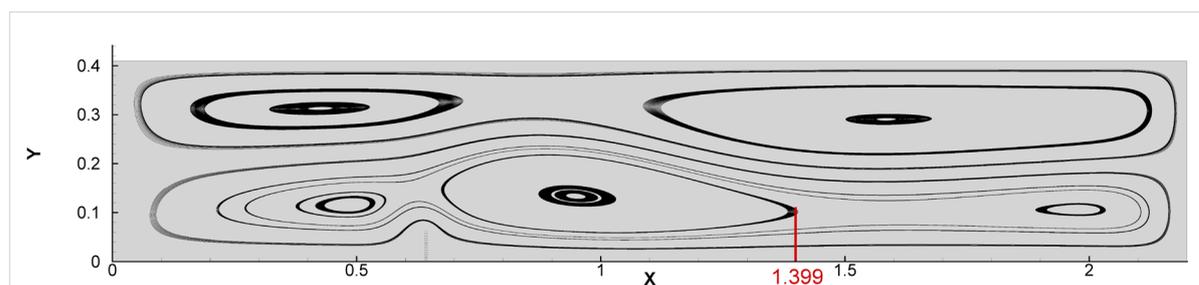


Figure 5. Flow field map with porosity of 20% and pore size of 0.25 cm

图 5. 孔隙度为 20%、孔径为 0.25 cm 流场

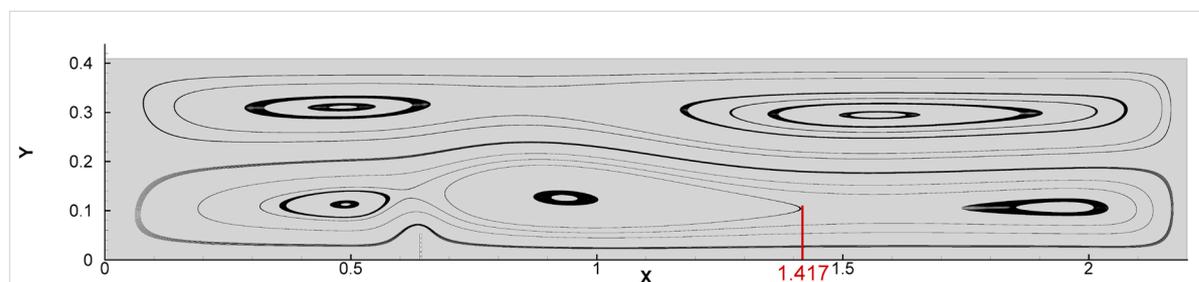


Figure 6. Flow field map with porosity of 20% and pore size of 0.5 cm

图 6. 孔隙度为 20%、孔径为 0.5 cm 流场

孔隙度为 20% 的挡风板中孔径为 0.5 cm 的挡风板板后涡旋较长，也是模拟结果中形成的最长涡旋。孔隙度为 20% 的挡风板我们由图 5~图 7 所示，会发现不同孔径的挡风板形成的涡流大小差异较为明显。孔径为 0.5 cm 的挡风板形成的板后涡流大小明显较孔径为 0.25 cm 和 1 cm 的挡风板形成的涡流长。在本

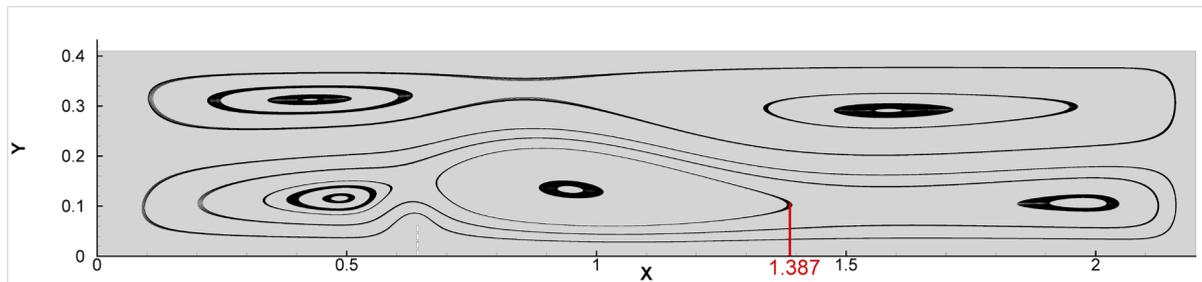


Figure 7. Flow field map with porosity of 20% and pore size of 1 cm

图 7. 孔隙度为 20%、孔径为 1 cm 流场

实验意义下, 孔隙度为 20% 孔径为 0.5 cm, 高度为 50 cm 挡风板具有较好的放风特性, 在高 200 cm, 长为 500 cm 的风场中可以形成 198 cm 左右的板后涡流长度所以在 20% 孔隙度下 0.5 cm 的孔径具有更好的挡风效果。结合两种孔隙度进行比较我们可以得出在本实验意义下孔隙度为 20% 孔径为 0.5 cm 的挡风板具有较好的挡风效果。另外我们会发现除板后涡流外, 挡风板前方也会出现涡流, 但在本实验中并未发现明显差异。

结合实际考虑, 可以得到不同孔隙度的挡风板前后风速均会较初始风速减小, 增大孔隙度会有利于减速区的增加。同时适当的孔隙度也会有利于风沙的通过, 减少板前积沙现象。但可以想象孔隙度太大将趋于空场现象所以必将导致挡风板挡风效果下降。

5. 结论

本文通过对不同孔径的挡风板防风特性的研究, 给出了不同孔隙度下不同孔径的挡风板在风场中的防风特性的数值模拟结果。分析得出透风型挡风板有效的降低了来流风速。同时孔隙度的增加会增加板后风场涡流的大小。孔隙度为 20% 孔径为 0.5 cm 的挡风板防风特性最好。但由于实验的限制本文采用的实验梯度不足, 未能给出更高孔隙度挡风板的模拟结果。但二维仅是给三维以参照。跟准确的结果会有待三维模拟的给出同时模拟结果也给实验以借鉴意义, 风洞实验可以继续再增加孔隙度的大小进行实验以寻找实际中的最佳孔隙度。

基金项目

本文由中国博士后面基金资助(No. 2014M562487), 同时感谢审稿人及编辑对本文提出宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 罗万银, 董志宝, 钱广强, 等. 自立阻沙栏流场特征的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 200-205.
- [2] 郑晓静, 马高生, 黄宁. 铁路挡风墙挡风效果和积沙情况分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 21-27.
- [3] 曾秋兰, 李振山, 卢傅安, 王艺淋. 高速公路透风型挡风墙不同位置防风特性的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1543-1549.
- [4] 郑海标. 不可压缩 Navier-Stokes 方程变分多尺度方法研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学数学系, 2011.
- [5] Shafer, M. and Turek, S. (1996) Benchmark Computations of Laminar Flow Around Cylinder. *Flow Simulation with High-Performance Computers II*, 48, 547-566. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-89849-4_39
- [6] John, V. (2004) Reference Values for Drag and Lift of a Two-Dimensional Time-Dependent Flow around the Cylinder. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 44, 777-788. <http://dx.doi.org/10.1002/flid.679>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ijfd@hanspub.org