

文章编号: 1000-4750(2014)04-0141-06

建筑物周边风致雪漂移的数值模拟研究

孙晓颖¹, 洪财滨^{1,2}, 武岳¹, 范峰¹

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 中国航天建设集团有限公司, 北京 100071)

摘 要: 利用计算流体力学软件 FLUENT, 基于 Euler-Euler 方法, 假定空气相和雪相均为连续相, 采用 Mixture 多相流模型对建筑物周边的风雪漂移进行了数值模拟。采用有限体积法和 SIMPLE 压力校正算法来实现非线性离散化方程的解耦和迭代求解。以防雪栏为研究对象, 通过不同湍流模型模拟其周边雪漂移的情况, 结果表明 $k\text{-}kl\text{-}\omega$ 模型能较好的模拟风雪漂移。在此基础上对立方体周围的风雪漂移进行了数值模拟, 数值模拟结果与实测结果积雪分布规律相一致, 验证了该文数值模拟方法的有效性。

关键词: 风致雪漂移; 跃移; 悬移; 数值模拟; 积雪分布

中图分类号: TU312.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.11.0839

NUMERICAL SIMULATION OF SNOW DRIFTING AROUND BUILDING MODEL

SUN Xiao-ying¹, HONG Cai-bin^{1,2}, WU Yue¹, FAN Feng¹

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. China Aerospace Construction Group Co., Ltd, Beijing 100071, China)

Abstract: Based on the Euler-Euler method, the Mixture model is used to simulate the snow drifting around a building model by means of Computational Fluid Dynamics (CFD) software FLUENT. During simulating, the Finite Volume Method and SIMPLE technology (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) have been used. Saltation as well as suspension are taken into consideration. Firstly, the snow drifting around a snow fence is simulated. Through comparing different turbulence models, it can be proved that the $k\text{-}kl\text{-}\omega$ model had good suitability and effectiveness. Then the snow drifting around a cube model is simulated. Compared with field measurements, the computational results of snow distribution are consistent with the real-scale field measurement that validates the numerical simulation effectiveness.

Key words: snow drifting; saltation; suspension; numerical simulation; snow distribution

建筑物会对周围的风场产生较大的影响, 从而使建筑周围的积雪产生重新分布, 在建筑周边可能会堆积大量的积雪, 影响建筑的正常使用功能。建筑物周边的积雪分布一直是人们关注的问题, 尤其在强降雪地区, 大面积的降雪可直接覆盖低矮房屋。

目前风致雪漂移的研究方法主要有实地观测、

试验方法及数值模拟 3 种方式^[1]。实地观测可获得最准确的资料, 但是受自然条件影响较大。风洞试验受相似准则的约束大, 且周期长, 成本高。而随着高速计算机性能的不断提高, 使得计算流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术被广泛应用在各领域之中。由于数值模拟具有成本低、周期短、易于变化各种参数等优点, CFD 数值模拟技

收稿日期: 2012-11-09; 修改日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91215302); 国家自然科学基金面上项目(50908068)

通讯作者: 孙晓颖(1975—), 女, 黑龙江人, 副教授, 博士, 从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: sxy_hit@163.com).

作者简介: 洪财滨(1988—), 男, 福建人, 工程师, 硕士, 从事大跨屋盖结构设计研究(E-mail: hongcaibin@163.com);

武岳(1972—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博导, 从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: wuyue_2000@163.com);

范峰(1971—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 博导, 从事大跨屋盖结构抗震抗冲击研究(E-mail: fanf@hit.edu.cn).

术近年来被应用于研究建筑物周围的风雪运动。Alhajraf^[2]基于两相流理论,通过修改雪相浓度方程中的源项来考虑风雪漂移的跃移运动和悬移运动,建立了防雪栏周围风雪漂移的数值模型,并利用有限体积法进行求解,数值模拟结果与实测和风洞试验吻合较好。Uematsu^[3]对3种模型周围的风雪漂移进行数值模拟研究,3种模型分别为防雪栏、风穴和小山。由于Uematsu在数值模拟中考虑了风雪漂移的跃移运动和悬移运动,使得模拟结果与实地观测更为接近。

本文基于 Euler-Euler 的方法,假定空气相和雪相均为连续相,采用 Mixture 多相流模型对建筑物周边的风雪漂移进行了数值模拟,利用有限体积法和 SIMPLE 压力校正算法来实现非线性离散化方程的解耦和迭代求解。文中以防雪栏为研究对象,对几种湍流模型进行了对比分析,结果表明 $k\text{-}kl\text{-}\omega$ 模型能较好的模拟风雪漂移。在此基础上对立方体周围的风雪漂移进行了数值模拟,数值模拟结果与实测结果积雪分布规律相一致。

1 计算方法

1.1 数值模型

风致雪漂移,是指雪粒在风力作用下发生漂移、堆积的运动。如图1所示,主要包括3种运动模式:蠕移运动、跃移运动和悬移运动^[4]。由于蠕移运动所造成的雪传输量较少,因此数值建模时只考虑跃移运动和悬移运动。

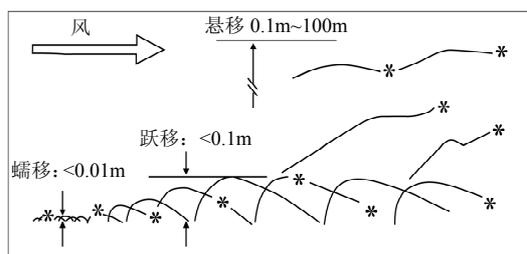


图1 风致雪漂移运动示意图(Tominaga, 2011)

Fig.1 The motion mode of snow drifting

风雪漂移属于气-固两相流问题,然而根据雪颗粒之间的作用力及雪相对空气的影响,可以把雪相当做连续的流体来处理^[5]。本文基于 Euler-Euler 方法,认为空气相和雪相均为连续相。

在 Fluent 中,共有3种 Euler-Euler 多相流模型,分别为:VOF(流体体积)模型、Mixture(混合)模型以及 Eulerian(欧拉)模型。相比 Eulerian 模型,

Mixture 模型求解的方程少,计算量小,且 Mixture 模型比 Eulerian 模型的计算稳定性好;另外 Mixture 模型较 VOF 模型,相间允许有速度滑移,且不同相可以相互穿插,因而本文选用 Mixture 模型来模拟风雪漂移的两相流,利用有限体积法来求解风雪流的控制方程^[6]。

1.2 控制方程

在 Mixture(混合)模型中,空气相和雪相共用一套连续方程和动量方程:

1) 基于质量守恒原理的连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

其中: $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^2 f_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$ 为平均质量速度; $\rho_m = \sum_{k=1}^2 f_k \rho_k$ 为空气相和雪相的混合密度。

式中 $k=1$ 时表示空气相, $k=2$ 时表示雪相,以下类似,不再重复叙述。

2) 基于牛顿第二运动定律的动量方程($N\text{-}S$ 方程):

$$\frac{\partial(\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \quad (2)$$

其中: p 为流场压力; μ_m 为空气相和雪相的混合动力粘度; $\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$ 为相对漂移速度。

对于 $N\text{-}S$ 方程,可以用直接数值模拟的方法精确地描述流体中所有尺度的湍流和流场特性的变化,但是三维的数值计算对计算机要求非常高。目前,工程上常采用对 $N\text{-}S$ 方程平均的方法来计算流体的湍流运动。

将 $N\text{-}S$ 方程逐项平均可得基于雷诺应力的时均 $N\text{-}S$ 方程,但是方程组会多出一组新的未知变量——雷诺应力 $\overline{u'_i u'_j}$, 方程不再封闭,需要引入湍流模型进行求解^[7]。

湍流模型种类较多,这里不做一一介绍。由于本文在对比不同湍流模型对数值模拟结果的影响后选用了 $k\text{-}kl\text{-}\omega$ 模型,因此这里只给出了 $k\text{-}kl\text{-}\omega$ 模型的介绍。

$k\text{-}kl\text{-}\omega$ 模型是一种三方程的粘涡模型,包含湍动能 k_T 的输运方程,层流动能 k_L 的输运方程和逆湍流时间尺度 w 的输运方程^[6]:

$$\begin{aligned} \frac{Dk_T}{Dt} &= P_{K_T} + R + R_{NAT} - wk_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right], \\ \frac{Dk_L}{Dt} &= P_{K_L} - R - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right), \\ \frac{Dw}{Dt} &= C_{w1} \frac{w}{k_T} P_{K_T} + \left(\frac{C_{w2} R}{f_w} - 1 \right) \frac{w}{k_T} (R + R_{NAT}) - \\ & C_{w2} w^2 + C_{w3} f_w \alpha_T f_w^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

其中： D_T 、 D_L 为扩散项； P_{K_T} 、 P_{K_L} 为湍流、层流动能产生项； C_{w1} 、 C_{w2} 、 C_{w3} 为常数项； R 为考虑气流由层流到湍流内波动的影响。

k - kl - ω 模型能有效描述边界层中由层流转变到湍流的转捩，而风致雪漂移的运动过程中，从跃移运动到悬移运动的转变，类似层流到湍流的转变，因而该模型能更好的模拟近地面的风雪流。

另外，还有一个可以写成 N - S 方程形式的雪相浓度方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_s f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s f \mathbf{v}_m) = \\ -\nabla \cdot (f \rho_s \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^2 (m_{qp} - m_{pq}) \quad (4) \end{aligned}$$

其中： m_{pq} 为雪相(p 相)转化成空气相(q 相)的质量； m_{qp} 为空气相(q 相)转化成雪相(p 相)的质量。由于不考虑雪的升华，因此 m_{pq} 和 m_{qp} 的取值都为零。

对控制微分方程进行离散时，采用有限体积法将微分方程分解成一系列关于多个变量的非线性耦合代数方程组。在运用有限体积法时，采用二阶迎风格式离散对流项，对扩散项采用具有二阶精度的中心差分格式；对于压力-速度耦合方程，采用 SIMPLE 算法实现各联立方程的解耦及压力场和速度场的校正。

1.3 积雪的侵蚀与沉积

壁面摩擦速度是风致雪漂移运动中非常重要的参数。壁面摩擦速度与壁面剪切应力直接相关，当壁面剪切应力克服雪颗粒内部作用力和重力时，雪颗粒便开始运动。壁面摩擦速度的表达式为：

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (5)$$

亦可用对数律的风速剖面公式近似计算壁面摩擦速度：

$$u_* = u(z) \kappa / \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (6)$$

式中： ρ 为空气密度； $u(z)$ 为 z 高度处的风速； κ 为冯卡门常数，取 0.4； z_0 为壁面粗糙度高度，取 0.00003m^[8]。

当摩擦速度 u_* 超过阈值速度 u_{*t} 时，雪颗粒在风力的作用下离开积雪面，积雪面发生侵蚀现象；当摩擦速度 u_* 小于阈值速度 u_{*t} 时，漂移中的雪颗粒便堆积在积雪面，发生沉积现象。侵蚀量 q_{ero} 和沉积量 q_{dep} 的表达式分别为^[9]：

$$\begin{cases} q_{ero} = A_{ero} (u_{*t}^2 - u_*^2) \\ q_{dep} = \phi_s w_f \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2} \end{cases} \quad (7)$$

其中： A_{ero} 为常系数，取 7.0×10^{-4} ； w_f 为雪的沉降速度； u_{*t} 为阈值速度； ϕ_s 为雪的质量浓度($\phi_s = \rho_s f$ ， f 为雪的体积分， ρ_s 为雪颗粒密度)。

壁面积雪的厚度会随着积雪的侵蚀或沉积发生变化。用 q_s 代替 q_{dep} 或 q_{ero} ，则 dt 时间内积雪厚度的改变量为^[10]：

$$dh = -\frac{q_s}{\rho_s \gamma} dt \quad (8)$$

其中： ρ_s 为雪颗粒的密度； γ 为积雪的最大体积分，取 0.62。

受风的影响，积雪面高度会时刻变化，这必然会使计算域的边界产生变化，从而影响计算结果。而李雪峰(2011)^[11]在对二维台阶式屋盖模型采用动态网格技术模拟积雪面高度变化的结论中指出，积雪面变化的影响不到 0.1%。另外，三维动态网格对计算机性能的要求非常高，因此本文未考虑积雪面变化对计算域的影响。

2 风致雪漂移的数值模拟

2.1 算例 1

1) 计算模型。

本算例来源于 Uematsu (1991)^[3]引用 Takeuchi (1989)的实测结果，因为防雪栏在长度方向较长，可以作为二维模型看待。如图 2 所示，防雪栏的尺寸为高×宽=3.41m×0.1m。根据防雪栏结构的特点，计算域上游宽度为 40m，下游宽度为 100m，高度为 40m。整个计算域采用结构化网格进行空间离散，最小网格尺寸为 0.1m，单元总数 242748。收敛标准设定无量纲均方根残差 10^{-6} 。湍流模型分别选用 RSM 模型、标准 k - ε 模型、SST k - ω 模型和 k - kl - ω 模型。

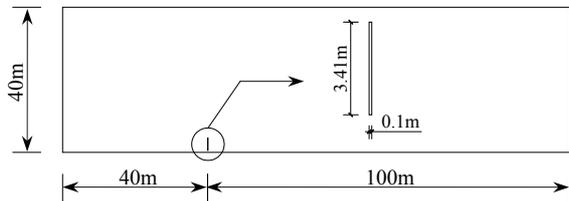


图 2 计算模型及计算域示意图

Fig.2 Sketch of model and computational region

2) 边界条件。

空气相边界条件：文献[3]中 Uematsu 并没有给定初始条件，这里取入口的风速为 10m/s。

来流湍流特性通过直接给定湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 值的方式来定义：

$$k = \frac{3}{2}(V(z) \cdot I)^2, \quad \varepsilon = \frac{1}{l} \cdot 0.09^{3/4} k^{3/2} \quad (9)$$

式中： l 是湍流特征尺度； I 为湍流强度，我国现行荷载规范没有给出 I 的明确定义，本文对 B 类地貌的模拟参考日本规范第 II 类地貌取值^[12]：

$$I = \begin{cases} 0.31, & z \leq z_b \\ 0.1(z/z_G)^{-\alpha-0.05}, & z_b \leq z \leq z_G \end{cases} \quad (10)$$

式中， $z_b = 5\text{m}$ ， $z_G = 350\text{m}$ ， $\alpha = 0.16$ 。

雪相边界条件：受空气相的影响，雪相入口的速度也为 10m/s。而雪相的入口浓度在跃移层和悬移层内则有不一样的浓度^[13-14]：

$$f = \begin{cases} \frac{0.68}{u_p u_* g} u_{*t} (u_*^2 - u_{*t}^2), & h_s < z \\ 0.8 \exp[-1.55(4.78u_*^{-0.544} - z^{-0.544})] / \rho_s, & z \leq h_s \end{cases} \quad (11)$$

式中： g 为重力加速度； u_p 为雪相运动速度； h_s 为跃移层和悬移层的临界高度。

出口边界条件：采用压力出口的边界条件。

流体域顶部和两侧：自由滑移的壁面条件。

建筑物表面和地面：无滑移的壁面条件。

3) 计算结果分析。

根据上述的计算方法，本文通过不同湍流模型模拟了防雪栏周边的风雪漂移。

防雪栏周围的积雪分布如图 3 所示，通过与实测结果的对比发现：

1) 在防雪栏前方，气流受外界干扰较小，因此 4 种湍流模型的积雪的沉积与实测结果吻合的较为理想。

2) 在防雪栏后方，4 种湍流模型的模拟结果相差较大，积雪面的峰值均比实测结果远离防雪栏。这主要是由于 Takeuchi 实测的防雪栏具有 14% 的孔

隙率，而本文在建模中并没有考虑这一因素，另外数值模拟的入口风速采用均匀流，而实测中风速和风向都是在不断变化的，两者差异较大。

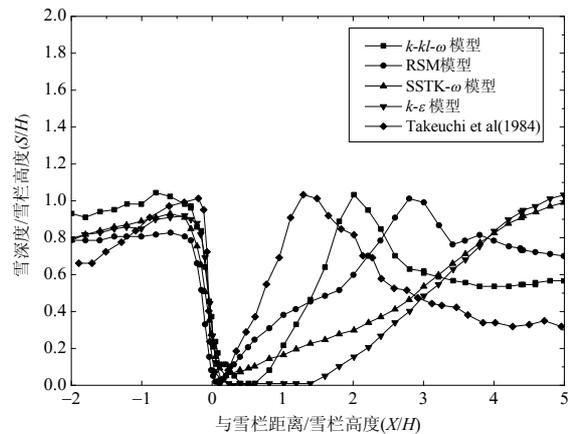


图 3 模拟结果与实测值的对比

Fig.3 Comparison of the simulated and measured snow distribution around the snow fence

3) 通过对比 4 种湍流模型的数值模拟结果，可以发现：标准 $k-\varepsilon$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型在防雪栏背面区域出现了过大的侵蚀，RSM 模型在迎风面和背风面则出现过小的侵蚀， $k-kl-\omega$ 模型模拟结果优于前三者，因此认为 $k-kl-\omega$ 模型能较好模拟风雪两相流的湍流。

2.2 算例 2

1) 计算模型。

本算例来源于 Oikawa(2003)^[14] 的实测试验。立方体的边长 1m，根据立方体结构的特点，计算域如图 4 所示。整个计算域采用非结构化网格进行空间离散，最小网格尺寸为 0.02m，单元总数 424702。雪颗粒沉降速度取 0.2m/s，雪粒直径取 $1.5 \times 10^{-4}\text{m}$ ，雪密度取 $150\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，雪面粗糙高度取 $3.0\text{m} \times 10^{-5}\text{m}$ ，阈值速度为 0.15m/s。两相流模型为 Mixture 模型，湍流模型为 $k-kl-\omega$ 模型。收敛标准设定无量纲均方根残差 10^{-6} ，采用二阶离散格式进行求解。

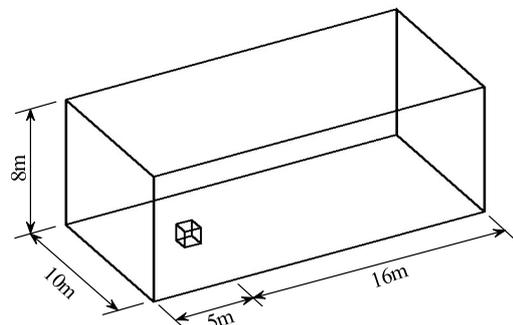


图 4 计算模型及计算域示意图

Fig.4 Sketch of model and computational region

2) 边界条件。

入口风速以 $v(z) = v_0(z/z_0)^\alpha$ 的形式给出，其中 α 取值为 0.25，参考高度 z_0 取立方体的高度 1m，参考高度处风速 v_0 取为 5m/s。其余参数与 2.1 节一致。

3) 计算结果分析。

i) 侵蚀、沉积规律分析。

立方体周围的积雪分布如图 5 所示，横坐标采用立方体边长量纲一化，0 代表立方体中截面中心，0.5 代表立方体表面；纵坐标为无量纲雪深，小于 1 代表侵蚀，大于 1 代表沉积。可以看出：立方体迎风区发生较大的侵蚀，背风区侵蚀量则较少，立方体横风向的两侧则发生较大的侵蚀，而立方体四周靠近壁面处有少量积雪沉积。

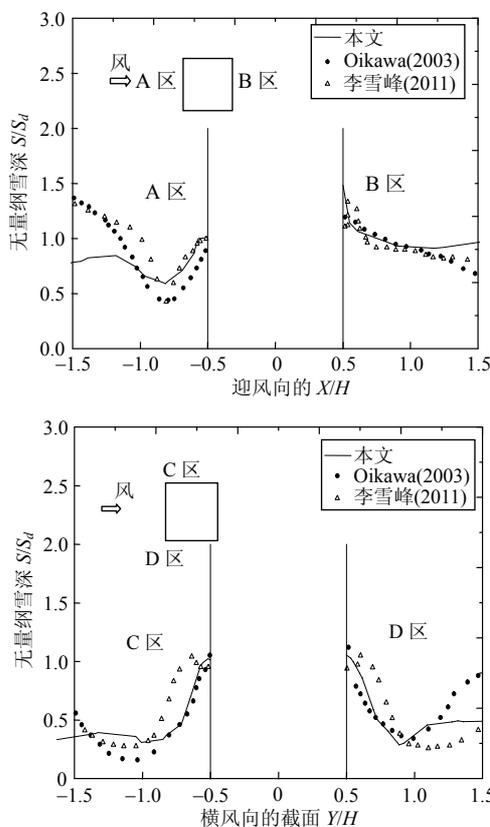
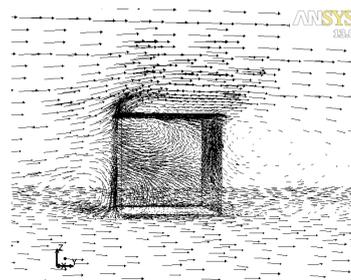


图 5 模拟结果与实测值的对比

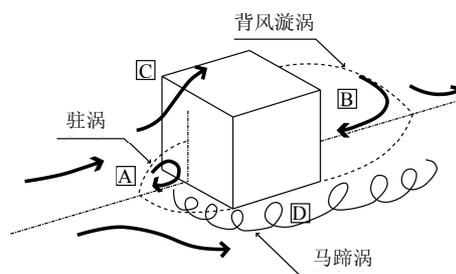
Fig.5 Comparison of the simulated and measured snow around the cube

究其原因，主要是立方体周围风雪流的影响。如图 6 所示，在立方体的迎风面中心(A 区)，风雪流形成驻涡，驻涡的形成的区域风速大，使得顺风向靠近立方体壁面处的雪发生较大的侵蚀；在立方体的背风区(B 区)，风雪流出现较大的背风涡流，该涡的强度较小，故背风区积雪的侵蚀量较小；在立方体的两侧(C 区和 D 区)，积雪面则主要受马蹄

涡的影响，使得风雪流速度变大，故该区域发生较大的侵蚀。另外，由于立方体对来流的阻挡作用，使得靠近立方体处的风速减少，故靠近立方体四周靠近壁面的区域会有少量积雪堆积。



(a) 立方体周围的流场矢量图



(b) 流场简化图

图 6 立方体周围的风雪流流场及简化图

Fig.6 Flow pattern around the cube and simplified diagram

ii) 结果对比分析。

通过与文献[14]的实测结果、文献[9]的数值模拟结果的对比发现：

① 顺风向方向，积雪的分布规律跟实测规律基本吻合。迎风面靠近立方体的区域发生了较大的侵蚀，侵蚀最大的区域发生在离立方体中心处 0.75H，H 指立方体的高度。侵蚀最小的区域则发生在 1.25H 处，而实测试验和文献[11]的数值模拟结果则发生在 1.5H 的地方。背风面受背风涡流的影响，亦发生侵蚀，侵蚀最大的区域发生在离立方体中心处 1.4H 处，而实测试验和文献[11]的数值模拟则分别发生在 1.5H 和 0.55H 的地方。这可能是由于 Mixture 模型过于简化，同时 $k-k_l-\omega$ 湍流模型没有考虑风雪漂移各向异性的影响。而文献[11]虽然考虑了雪颗粒重力、浮力和气动阻力对空气运动的影响，在迎风区域与实测结果吻合较好，但是在背风区有较大的差别。

② 横风向方向，积雪分布规律与实测值在趋势上一致，积雪受马蹄涡的影响，风速较高，除靠近壁面处有少量沉积外，主要发生侵蚀。侵蚀最大的地方发生在 1.0H 处，而实测值侵蚀最大的地方左

侧为 1.4H 处, 右侧为 1.0H 处; 文献[11]的模拟结果最大侵蚀地方则为 1.15H 处。实测值存在一定的不对称性, 可见实测过程中来流风向并不是一直保持不变, 这可能是数值模拟结果与实测产生差别的原因。

③ 对比几种湍流模型的结果, 发现采用 $k-k\ell-\omega$ 湍流模型所得的结果与在靠近立方体壁面处模拟的结果与实测值吻合较好, 而远离立方体的地方则误差较大。而在实际建筑中, 人们更关注的是靠近建筑物周边及建筑物表面的积雪分布, 因此选用 $k-k\ell-\omega$ 湍流模型是可行的。

3 结论

(1) 本文基于 Euler-Euler 的方法, 利用 Mixture 多相流模型模拟风雪流, 通过对 Fluent 的二次开发建立了风雪漂移的数值模型。

(2) 通过不同湍流模型模拟防雪栏周边的风雪漂移, 可以看出: $k-k\ell-\omega$ 模型模拟结果优于 RSM 模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型。

(3) 立方体迎风面的积雪受驻涡的影响发生较大的侵蚀, 背风面受背风旋涡的影响亦发生侵蚀, 横风向则受马蹄涡的影响, 发生较大的侵蚀, 且侵蚀范围广。数值模拟结果与实测的积雪分布规律相一致。

参考文献:

- [1] 周晖毅, 顾明. 风致积雪漂移堆积效应的研究进展[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 5—10.
Zhou Xuanyi, Gu Ming. Simulation of the wind-induced snowdrift: State of the art [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 5—10. (in Chinese)
- [2] Alhajraf S. Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences [J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19: 163—170.
- [3] Uematsu T, Nakata T, Takeuchi K, et al. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift [J]. Cold Regions Science and Technology, 1991, 20(1): 65—73.
- [4] Tominaga Yoshihide, Tsubasa Okaze, Akashi Mochida. CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach [J]. Building and Environment, 2011, 46: 899—910.
- [5] Bintanja R. Snowdrift suspension and atmospheric turbulence. Part I: Theoretical background and model description [J]. Springer Netherlands, 2000, 95: 343—368.
- [6] Ansys Inc. Ansys Fluent 14.0: Theory Guide [M]. 2011.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 113—142.
Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis-the theory and application of the CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 113—142. (in Chinese)
- [8] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 40—63.
Zhang Xiangting. Engineering calculation manual of wind-resistant design [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1998: 40—63. (in Chinese)
- [9] Beyers J H M, Sundsbo P A, Harms T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(9): 725—747.
- [10] Beyers M, Waechter B. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2008, 96(10/11): 1603—1615.
- [11] 李雪峰. 风致建筑屋盖表面及其周边积雪分布研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
Li Xuefeng. Research on snow drifting on building roof and around building [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [12] Pomeroy J W, Gray D M. Saltation of snow [J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1583—1594.
- [13] Pomeroy J W, Male D H. Steady-state suspension of snow [J]. Journal of Hydrology, 1992, 136(1/2/3/4): 275—301.
- [14] Oikawa S, Tomabechi T. Formation processes of the deposition and erosion of snow around a model building [J]. Seppyo, 2003, 65(3): 207—218.