

# 立方体模型周边风致积雪飘移的数值模拟

李雪峰<sup>1,2</sup>, 周昶毅<sup>1</sup>, 顾明<sup>1</sup>, 植松康<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 日本东北大学 工学部建筑系, 仙台 980-8579)

**摘要:** 基于两相流理论模拟立方体周围的积雪飘移. 采用各向异性的雷诺应力模型(RSM), 通过改进动量方程和湍流方程的源项来考虑雪的浮力和惯性力对风(空气相)的影响. 以立方体模型为研究对象, 首先将改进模型计算的表面风压分布与实测结果进行了对比, 接着把改进模型的雪飘移计算结果与未改进模型的计算结果、实测结果进行了对比. 结果显示, 改进后模型的模拟结果与实测结果更加吻合, 立方体模型周边雪颗粒的沉积侵蚀趋势表现一致. 在立方体迎风侧的前方区域及两侧气流分离区出现了明显的侵蚀, 紧靠背风侧后方区域出现了沉积.

**关键词:** 计算流体动力学; 雪飘移; 雷诺应力模型; 沉积; 侵蚀

**中图分类号:** TU 312.1

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation on Snow Drifting Around a Cube Model

LI Xuefeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Xuanyi<sup>1</sup>, GU Ming<sup>1</sup>, Uematsu Y<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan)

**Abstract:** Based on the two-phase flow theory, an improved Reynolds stress model(RSM) turbulent model is presented as to stimulate the snow drifting around a cube model. In order to represent the influence of snow particles on the wind field, extra source items are added both to the momentum equations and RSM turbulent model. Comparison of the mean wind pressure on the surface of the cube between obtained results and those through field measurements are presented as to evaluate the suitability and effectiveness. Then snow drifting results predicted by the improved model are compared with the results from the previous researches. It is found that the present results agree well with those through the field measurements, such as the trends of erosion/deposit of snow

particles around cube are similar. The simulated results show erosion appears in the windward region, as well as in the separation region at both sides. While deposition appears in the leeward region.

**Key words:** computational fluid dynamics; snow drifting; Reynolds stress model; deposit; erosion

在一些多雪的地区, 建筑物周围会出现很多积雪. 在风力的作用下, 积雪会发生复杂的飘移现象, 从而影响了人类的活动. 许多学者采用了风洞实验或现场实测来研究建筑物周围的雪飘移情况. 然而风洞实验受到实验条件和实验准则的限制, 往往要花费大量的人力物力; 现场实测则容易受到自然条件的影响, 并且实测周期较长. 因此, 计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟技术近年来被广泛应用于研究建筑物周围的雪飘移.

有关雪飘移的数值模拟始于 20 世纪 90 年代前期. 1993 年 Sato 等<sup>[1]</sup>较早地采用有限体积法对风雪运动进行了数值模拟, 利用普朗特混合长度理论模拟了湍流. 1998 年 Liston 等<sup>[2]</sup>提出了积雪迁移模型 SnowTran-3D, 模拟了定常状态下起伏地形区域(2 km × 3 km)积雪在风雪运动中的高度变化情况. 2002 年 Thiis<sup>[3]</sup>模拟了雪表面的剪切力和不同建筑周围的雪飘移, 并与实测结果进行了比较. 2004 年 Beyers 等<sup>[4]</sup>采用  $k-\epsilon$  湍流模型, 试图在数值模拟中考虑更多的影响因素, 以较准确地重现风雪运动中雪粒绕一个立方体的运动过程. 国内对风雪的研究也有较大的发展. 周昶毅等<sup>[5]</sup>详细评述了风致积雪飘移堆积效应的研究进展. 2008 年李雪峰等<sup>[6]</sup>在假定雪相和空气相单相耦合的基础上, 利用  $k-\epsilon$  湍流模型对一大跨屋盖表面的风致积雪运动进行了数

收稿日期: 2009-04-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50621062); 科技部技术支撑计划资助(2006BAJ06B05); 科技部国家重点实验室基金资助项目(SLDRCE10-B-04)

作者简介: 李雪峰(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为风工程. E-mail: foxlixuefeng@hotmail.com

顾明(1957—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为风工程. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

值模拟. 2008年周恒毅等<sup>[7]</sup>对影响屋盖表面雪压变化的主要参数(湍流模型的类型、阈值摩擦速度及来流风速、风向等)进行了细致的研究.

总体来讲,风雪运动的数值模拟方法研究在国际上尚属于初始阶段,大多数是采用单相耦合的假定,利用各向同性的  $k-\epsilon$  湍流模型进行模拟. 本文采用了能反映流动各向异性的雷诺应力模型(Reynolds stress model, RSM),通过改进方程源项,考虑了雪的浮力和惯性力对风的影响,并通过与实测结果的比较,验证了方法的有效性.

## 1 模拟雪飘的 CFD 方法

### 1.1 考虑雪颗粒惯性和浮力对空气相的影响

国内外对雪飘移的研究大多数采用单相耦合假定(即雪在空气相的作用下发生飘移,而雪的搬运、堆积过程对空气相不产生影响),并且一般利用各向同性的  $k-\epsilon$  湍流模型进行模拟<sup>[8]</sup>. 实际上,雪颗粒在空气中受到空气的作用力产生运动,雪颗粒的运动反过来会对空气的运动产生影响. 本文考察了雪颗粒的浮力和惯性力对空气运动产生的影响. 由于雪颗粒在各方向对空气产生的影响不同,本文提出采用各项异性的 RSM 湍流模型对风雪运动进行模拟,并通过改进动量方程和雷诺应力方程源项,考虑这种影响. 改进动量方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} [-\rho \overline{u_i' u_j'}] + \rho \Delta_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $u_1, u_2, u_3$  分别为速度矢量在  $x, y, z$  方向的分量,  $x_1, x_2, x_3$  分别为  $x, y, z$  向坐标;  $p$  为流体压力;  $\mu$  为流体动力粘性系数;  $\Delta_1$  表示  $x$  方向(顺风向)雪颗粒惯性对空气相的影响;  $\Delta_2$  表示  $y$  方向(水平横方向)雪颗粒惯性对空气相的影响;  $\Delta_3$  表示  $z$  方向雪颗粒由于浮力对空气相的影响.  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  的具体表达式由参考文献<sup>[9]</sup>得出,见下式:

$$\Delta_1 = -\frac{R}{S_t} u_{R,1} = -Au_{R,1} \quad (2a)$$

$$\Delta_2 = -\frac{R}{S_t} u_{R,2} = -Au_{R,2} \quad (2b)$$

$$\Delta_3 = -g \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2c)$$

式中:  $R$  为实际作用于雪颗粒上的力的系数,本文取

$$R = 1^{[9]}; S_t = \frac{\rho_s d_s^2 / 18 \mu}{\theta_0 / U_0}$$

为颗粒斯托克斯数,本文取  $S_t = 10^{[9]}$ , 其中,  $\rho_s$  为颗粒密度,  $d_s$  为颗粒直径;  $A$  为量纲一系数;  $u_{R,i}$  为雪相对空气在  $i$  方向的相对速度;  $\rho_m$  为混合相密度;  $\rho$  为空气密度;  $\Delta \rho = \rho_m - \rho$  为雪和空气混合密度与空气密度的差值,反映了浮力的影响;  $g$  为重力加速度;  $\theta_0, U_0$  分别为混合层流场的特征长度和特征速度.

### 1.2 改进的 RSM 湍流模型

针对雪相对空气相在各个方向影响的不同,对动量方程进行了不同的修正. 因此对湍流的计算不能考虑常规的各向同性的  $k-\epsilon$  湍流模型.

考虑雪相对空气相影响后,  $i$  方向脉动速度方程为

$$\frac{\partial u_i'}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} + u_k' \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i'}{\partial x_k^2} - \frac{\partial}{\partial x_k} (u_i' u_k' - \overline{u_i' u_k'}) + \Delta_i' \quad (3)$$

式中,  $\nu$  为流体运动粘性系数,  $\nu = \mu / \rho$ .

其中:

$$\Delta_1' = -Au_{R,1}' \quad (4a)$$

$$\Delta_2' = -Au_{R,2}' \quad (4b)$$

$$\Delta_3' = -g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} f' \quad (4c)$$

式中,  $f'$  为雪相所占体积组分的脉动值.

同理可得到  $j$  方向脉动速度方程. 把  $i$  方向脉动速度方程与  $u_j'$  的乘积和  $j$  方向脉动速度方程与  $u_i'$  的乘积相加, 取时均值, 得到考虑了颗粒惯性和浮力的雷诺应力模型:

$$\frac{D u_i' u_j'}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[ C_k \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_l} + \nu \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_l} \right] + P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon - C_1 \frac{\epsilon}{k} \left( \overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + \Delta_{ij} \quad (5)$$

式中:  $\frac{D}{Dt}$  为物质导数;  $\overline{u_i' u_j'}$  为雷诺应力;  $k$  为湍动能;  $\epsilon$  为耗散率;  $P_{ij}$  为应力产生项,  $P_{ij} = -\left( \overline{u_i' u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right)$ ;  $\delta_{ij}$  为 Kronecker delta 符号;  $C_k, C_1$  为模型常数;  $\Delta_{ij}$  为雪颗粒浮力和惯性力对湍流的影响, 具体表达式如下:

$$\Delta_{11} = -2A \overline{u_{R1}' u_1'} \quad (6a)$$

$$\Delta_{22} = -2A \overline{u'_{R2} u'_2} \quad (6b)$$

$$\Delta_{33} = -2g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \overline{f' u'_3} \quad (6c)$$

$$\Delta_{12} = -A \overline{u'_{R1} u'_2} - A \overline{u'_{R2} u'_1} \quad (6d)$$

$$\Delta_{13} = -A \overline{u'_{R1} u'_3} - g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \overline{f' u'_1} \quad (6e)$$

$$\Delta_{23} = -A \overline{u'_{R2} u'_3} - g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \overline{f' u'_2} \quad (6f)$$

式中:  $\overline{f' u'_j}$  根据湍流扩散理论, 表达如下:

$$\overline{f' u'_j} = -\frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial f}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:  $f$  为单位体积里雪相所占的组分;  $\nu_t$  为空气相的涡粘系数, 体现了空气相对雪相的影响;  $\sigma_s$  为模型常数,  $\sigma_s$  取为 1.

根据两相飘移流理论<sup>[10]</sup>, 雪相的体积组分可表达为

$$f = V_s / V_m \quad (8)$$

式中:  $V_m$  为混合相的总体积;  $V_s$  为雪相所占体积.

混合相的密度可表达为

$$\rho_m = f\rho_s + (1-f)\rho \quad (9)$$

雪相和空气相之间的相对速度可表达为

$$\mathbf{u}_R = \mathbf{u} - \mathbf{u}_s = c_f(1-f)f \frac{\Delta \mathbf{p}}{\rho_m} \quad (10)$$

式中:  $c_f$  为雪相和空间相之间作用力系数(根据文献<sup>[10]</sup>本文取  $c_f = 0.06 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $\Delta \mathbf{p}$  为压力梯度.

### 1.3 雪相的控制方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial(\rho_s f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s f u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial \rho_s f}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} [-\rho_s f u_{Ri}] \quad (11)$$

式中,  $u_{Ri}$  为雪相对空气的运动速度, 采用式(10)计算得到, 其脉动量  $u'_{Ri} = 0$ .

为了与 Oikawa 的实测<sup>[11-12]</sup> 进行对比, 本文参数根据 Oikawa 的实测进行取值. 故本文  $\rho_s$  取为  $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $u_{Ri}$  取为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 1.4 壁面上雪的沉积与侵蚀

壁面上的雪是否发生侵蚀或沉积由近壁面的摩擦速度(风速)决定. 当摩擦速度  $u_*$  超过阈值速度  $u_{*t}$ , 壁面上的雪被风刮起进入计算域, 发生侵蚀; 当摩擦速度  $u_*$  低于阈值速度  $u_{*t}$ , 飘移至壁面上方的雪离开计算域, 沉积在壁面. 壁面上雪侵蚀流量  $q_{\text{ero}}$  (当摩擦速度  $u_*$  高于阈值速度  $u_{*t}$  时)及雪沉积流量  $q_{\text{dep}}$  (当摩擦速度  $u_*$  低于阈值速度  $u_{*t}$  时)的

计算公式分别为

$$q_{\text{ero}} = A_{\text{ero}}(u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (12)$$

$$q_{\text{dep}} = Cw_f \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2} \quad (13)$$

式中:  $A_{\text{ero}}$  为常系数, 取  $7.0 \times 10^{-4}$ ;  $C$  为近壁面网格中单位体积里雪相的质量浓度,  $C = f\rho_s$ , 在求解雪相控制方程的基础上获得;  $w_f$  为雪的下沉速度; 摩擦速度  $u_* = u(z)\kappa / \ln\left(\frac{z}{z_s}\right)$ , 其中  $\kappa$  为 von Karman 常数, 取 0.4,  $z_s$  为积雪面的地面粗糙度, 取为 0.000 5 m.

积雪深度的改变量  $\Delta h$  的表达式如下:

$$\Delta h = \frac{q}{\rho_s \Delta x \Delta y} \quad (14)$$

$$q = \begin{cases} q_{\text{ero}}, & u_* > u_{*t} \\ q_{\text{dep}}, & u_* < u_{*t} \end{cases} \quad (15)$$

积雪深度改变量与雪流量和雪的密度有关. 在求解空气相控制方程的基础上, 计算式(11), 进而获得流域内雪相所占组分的分布.

## 2 立方体周边风致积雪飘移的数值模拟模型

### 2.1 几何建模及网格划分

本文考察边长为  $b = 1 \text{ m}$  的立方体模型. 计算区域长  $\times$  宽  $\times$  高选为  $22b \times 6b \times 6b$  (其中  $b = 1 \text{ m}$  为立方体长度). 网格剖分时采用结构化网格, 靠近壁面采用边界层网格最小网格尺寸为 0.01 m, 网格增长因子为 1.06, 量纲一距离  $y^+ = \Delta y u_* / \nu$  为 100 左右, 在合理范围内 ( $\Delta y$  表示沿壁面法线方向到壁面的距离). 网格总数为 120 万左右. 网格划分见图 1.

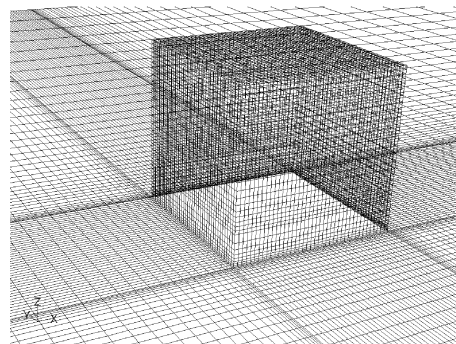


图1 计算网格划分

Fig.1 Calculation mesh

## 2.2 边界条件的设定和计算参数的选取

入流面:采用速度入流边界条件.大气边界层风速剖面按指数分布模拟,  $\bar{u}/u_0 = (z/z_0)^\alpha$ . 其中,  $u_0$  为  $z_0$  高度处风速,  $\bar{u}$  为平均风速,  $\alpha$  为风速剖面指数. 为了与 Oikawa 的实测数据<sup>[11-12]</sup>进行对比, 式中  $z_0$  取为立方体顶面的高度 1 m; 立方体高度处风速  $u_0$  为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\alpha$  取为 0.25, 对应的来流雷诺数  $Re = 3.2 \times 10^5$ .

计算中在入流面处以直接给出湍流强度的方式给定入流面的湍流参数. 因我国建筑荷载规范中没有给出湍流强度分布规定, 故湍流强度剖面参考日本建筑协会提出的《房屋荷载建议》<sup>[13]</sup> 中有关紊流度剖面的公式来确定.

出流面:由于出流接近完全发展, 采用完全发展出流边界条件.

流域顶部和两侧:采用自由滑移的壁面. 立方体表面和地面:采用无滑移的壁面条件.

以均方根残差等于  $10^{-7}$  为迭代计算的收敛标准, 采用二阶离散格式进行求解.

计算参数参考 Oikawa 的实测<sup>[4,8]</sup>. 雪降速度  $w_f$  取为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 雪粒直径  $d_s$  取为  $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ ; 雪密度

$\rho_s$  取为  $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 雪面粗糙高度  $h_s$  取为  $3.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ ; 阈值摩擦速度  $u_{*t}$  取为  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 3 计算结果及分析

### 3.1 无积雪时风压比较

Silsoe 研究院<sup>[14]</sup>在空旷地区建造了边长 6 m 的立方体, 立方体表面的中线上布置测点, 测量其压力值和周围的风速值, 用来研究钝体周围的压力场和速度场. 建筑物表面的风压分布与周围的风速场存在一定的关系, 而建筑物近表面的风速场主要决定了积雪迁移的结果.

本文首先采用标准  $k-\epsilon$  模型和 RSM 模型模拟了立方体的风压分布, 将模拟结果与 Silsoe 实测值进行了对比, 用以证实本文积雪飘移计算结果的精度. 比较结果以体型系数给出, 具体见图 2.

从图中可以看出:①总体来说, 数值模拟结果与实验结果的趋势一致;②与标准  $k-\epsilon$  模型相比, RSM 模型数值模拟的结果与实测值更加吻合;③两个模型在近地面的区域模拟结果比实测值偏大, 这一定程度上是由于采用壁面函数处理近壁面流场造成的.

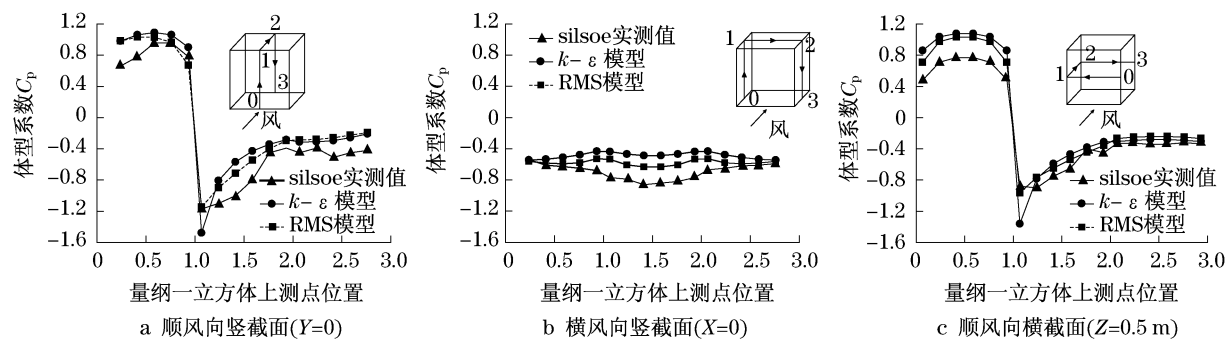


图2 体型系数比较图

Fig.2 Comparison of pressure coefficients

### 3.2 CFD与实测的雪飘移结果比较

计算中没有考虑雪的深度变化对风场的影响, 采用定常计算. 为了与实测结果<sup>[11-12]</sup>进行对比, 计算时立方体顶面高度处 ( $z_0 = 1 \text{ m}$ ) 风速取为  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风速剖面按指数分布模拟,  $\bar{u}/u_0 = (z/z_0)^\alpha$ ,  $\alpha$  取为 0.25.

图3给出了立方体中截面CFD数值模拟结果与实测值的比较. 图中横坐标为离立方体中截面中心的距离(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; 纵坐标为积雪深度(采用雪的初始深度  $H_s$  进行量纲一化, 小于1代表

侵蚀; 大于1代表沉积). 比较采用的实测值为 Oikawa<sup>[11-12]</sup>2000年1月份在日本札幌市郊区进行的实测结果. 实测中采用的立方体方块边长为 1 m, 将其放置在  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的板床上, 记录每次降雪和风作用过后积雪的深度.

顺风向方向, 气流在立方体的前缘发生分离绕流. 立方体迎风 A 区域, 改进的 RSM 模拟结果与实测值更加吻合. 远离立方体的地方发生沉积, 靠近立方体的地方发生侵蚀; 在离立方体中心  $0.8H$  (图中坐标为  $-0.8H$ ) 的地方, 侵蚀达到最大(此时积雪深度为 0.5). 在该区域, 标准  $k-\epsilon$  模型由于没有考虑

颗粒对气流湍流的影响,平均风速较小,没有侵蚀出现.标准  $k-\epsilon$  模型模拟结果显示,在离立方体中心  $0.55H$  的地方,沉积和侵蚀达到平衡,积雪深度不随时间发生变化.立方体背风 B 区域,随着离立方体的距离增加,雪颗粒先沉积后侵蚀.改进 RSM 的模拟结果显示,离立方体中心  $0.55H$  的地方,沉积量达

到最大值(此时积雪深度为  $1.5$ );当离立方体中心的距离增加到  $0.65H$  的时候,雪飘移状态由沉积转为侵蚀;离立方体中心  $1.6H$  的地方,侵蚀量达到最大,积雪深度为  $0.8$ .与实测值相比,数值模拟的侵蚀量偏小,这一定程度可能是由于没有考虑雪颗粒碰撞引起的跃移飘移量.

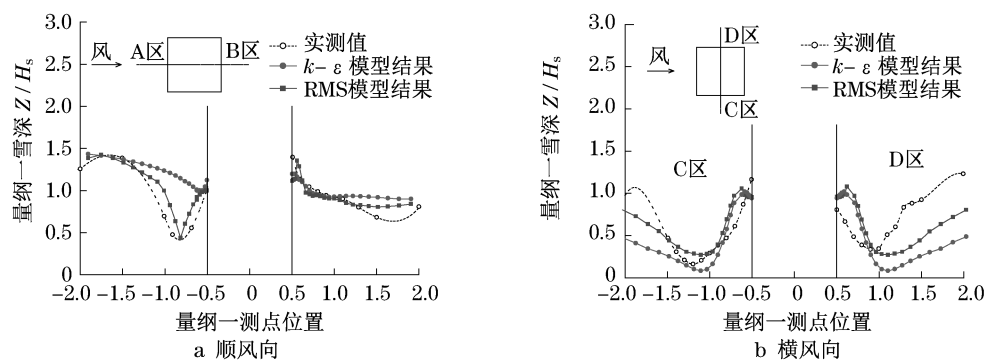


图3 积雪深度比较图

Fig.3 Comparison of snow depths

横风向方向,气流沿立方体两侧分离绕流.数值模拟结果与实测值在趋势上一致,靠近立方体壁面的地方有少部分沉积;随着离立方体的距离增加,发生侵蚀.侵蚀区域正好处于气流的分离区,风速较高,故发生侵蚀.改进雷诺应力模型的模拟结果,在离立方体中心约  $1.15H$  的地方,侵蚀达到最大值,积雪深度为  $0.4$ .从图中看出,实测值存在一定的不对称性,这主要是由于在实测过程中,来流风向并不

是一直保持不变.

图4给出了立方体周围积雪深度分布的实测值和数值模拟结果.图中显示改进 RSM 模型模拟结果在侵蚀和沉积趋势上与实测结果表现一致.在立方体迎风区域出现侵蚀;背风区域出现沉积;立方体两侧,处于气流分离区,也出现了侵蚀.标准  $k-\epsilon$  模型模拟结果在立方体迎风区域没有侵蚀出现;在其他区域,与实测值在侵蚀和沉积趋势上一致.

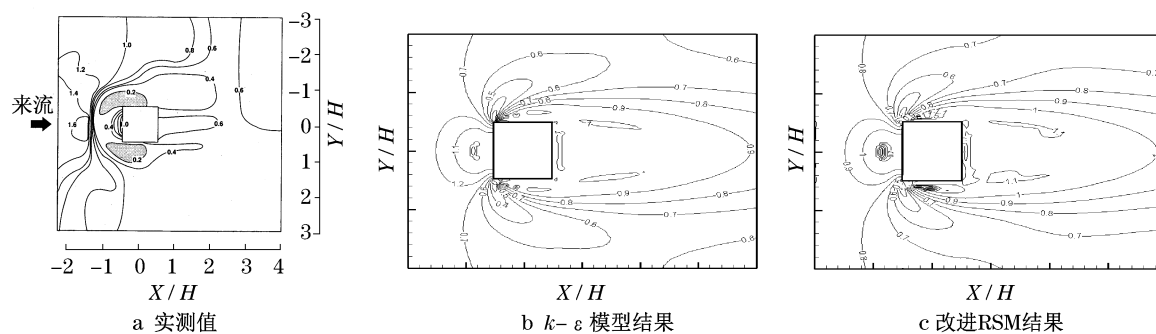


图4 积雪深度分布图

Fig.4 Distribution of snow depths

图中数值模拟结果与实测值存在一定的差别,主要是由于数值模拟的条件比较理想,而在实测中来流风向并不是一直保持不变,并不能达到数值模拟的理想状态.值得注意的是,雷诺应力模型是直接对湍流脉动应力建立微分方程,属于各向异性湍流模型,具有较高精度,但仍属于高雷诺数模型.在固体壁面附近,由于分子粘性的影响,仍需采用壁面函

数法,故数值模拟的结果在紧贴壁面的地方与实测值相差较大.

## 4 结语

本文对通用流体软件 fluent 进行了二次开发,利用改进的各向异性 RSM 湍流模型,模拟了立方体

周围雪飘移堆积的情况. 结果显示, 数值模拟结果与实测值, 侵蚀沉积趋势一致, 改进雷诺应力模型的模拟结果更接近实测值. 在立方体的四周都出现了侵蚀. 迎风区域的侵蚀范围较小, 最大侵蚀时积雪深度为 0.5 左右; 两侧区域的侵蚀量较大, 侵蚀范围也较广, 最大侵蚀时积雪深度为 0.4; 背风区域的侵蚀相对较小, 积雪深度为 0.8 左右. 与 Oikawa 实测值相比, 数值模拟的侵蚀量偏小, 这一定程度是由于没有考虑雪颗粒的碰撞引起的流量. 同时要指出的是: (1) 模型中一些参数的选取还需要进一步的考察. 如: 雪相对空气相的速度; 斯托克斯数和量纲一数  $A$  的取法等. (2) RSM 模型作为一种较精确的湍流模型, 需要较多的计算机资源, 并不一定能应用于实际一些复杂的工程中, 但可以作为一种研究雪飘移的手段. (3) RSM 模型属于高雷诺数模型, 对壁面低雷诺数区域采用了壁面函数法, 故数值模拟的结果在紧贴壁面的地方与实测值相差较大, 模型仍需进一步改进.

#### 参考文献:

- [1] Sato T, Uematsu T, Nakata T, et al. Three dimensional numerical simulation of snowdrift [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46-47: 741.
- [2] Liston G E, Sturm M. A snow transport model for complex terrain[J]. Journal of Glaciology, 1998, 44(148): 498.
- [3] Thiis T K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(6): 829.
- [4] 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(18): 725.
- [5] 周恒毅, 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.  
ZHOU Xuanyi, GU Ming. Simulation of the wind-induced snowdrift: state of the art[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 5.
- [6] 李雪峰, 周恒毅, 顾明. 北京南站屋面雪荷载分布研究 [J]. 建筑结构, 2008, 38(5): 109.  
LI Xuefeng, ZHOU Xuanyi, GU Ming. Study on snow loads on the roof of Beijing South Station[J]. Building Structure, 2008, 38(5): 109.
- [7] 周恒毅, 顾明, 李雪峰. 大跨度屋盖表面风致雪压分布规律研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 7.  
ZHOU Xuanyi, GU Ming, LI Xuefeng. Study on wind-induced snow pressure on large-span roof [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 7.
- [8] Okaze T, Mochida A, Tominaga Y, et al. Modeling of drifting snow development in a boundary layer and its effect on wind field [C] // 6th Snow Engineering Conference. Whistler: [s. n. ], 2008: 1-26.
- [9] Yang Y, Chung J N, Troutt T R, et al. The influence of particles on the spatial stability of two-phase mixing layers[J]. Physics of Fluids A, 1990, 2: 1839.
- [10] Sundsbo P A. Numerical simulations of wind deflection fins to control snow accumulation in building steps[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76: 543.
- [11] Oikawa S, Tomabeche T, Ishihara T. One-day observations of snowdrifts around a model cube [J]. Journal of Snow Engineering, 1999, 15(4): 283.
- [12] Oikawa S, Tomabeche T. Formation processes of the deposition and erosion of snow around a model building[J]. Seppyo, 2003, 65(3): 207.
- [13] 日本建筑协会(AIJ). 房屋荷载建议[S]. 东京: 日本建筑协会, 1995.  
Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1995.
- [14] Richards P J, Hoxey R P, Short L J. Wind pressures on a 6 m cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14-15): 1553.