

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.017

## 大跨度屋盖风致雪漂移的数值模拟研究

邳伦海<sup>1</sup>, 杨刘洋<sup>1</sup>, 李阿龙<sup>1</sup>, 黄志强<sup>2</sup>, 石 军<sup>2</sup>, 刘 海<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

**摘 要:**文章基于 Euler-Euler 方法的两相流理论, 结合 Mixture 多相流模型和  $k-k_L-\omega$  湍流模型, 对兰州市某大跨度屋盖风雪漂移运动下的荷载分布形式开展了数值模拟研究。分析不同风向角下屋盖上的积雪重分布规律, 评估了屋盖各分区在不同风向角下积雪分布系数的变化规律, 并系统研究了易产生积雪堆积区域的风速分布情况。结果表明: 在风雪漂移影响下, 屋盖积雪分布特征会发生明显改变, 呈现出非均匀分布的特点; 积雪分布系数的最大值通常位于屋盖高度差较大的区域; 风雪漂移受风速影响较为明显, 风速较大的区域积雪侵蚀现象明显, 而风速较小的区域则容易出现积雪沉积。该研究结果对于大跨度结构风致雪灾分布特征的设计和防护具有重要意义, 有助于提高建筑的安全性和稳定性。

**关键词:**大跨度屋盖; 风致雪漂移; 两相流理论; 数值模拟; 积雪分布

中图分类号: TU119.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)05-0694-09

## Numerical simulation study of wind-induced snow drift for large-span roofs

ZHI Lunhai<sup>1</sup>, YANG Liuyang<sup>1</sup>, LI Along<sup>1</sup>, HUANG Zhiqiang<sup>2</sup>, SHI Jun<sup>2</sup>, LIU Hai<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** Based on the two-phase flow theory of the Euler-Euler method, this paper combines the Mixture multiphase flow model and the  $k-k_L-\omega$  turbulence model to conduct a numerical simulation study on the load distribution of a large-span roof in Lanzhou City under wind-induced snow drift. The snow redistribution characteristics on the roof under different wind angles were analyzed, and the variation of snow distribution coefficients across different roof zones under various wind directions was evaluated. Additionally, the wind speed distribution in the area prone to snow accumulation was systematically studied. The results indicate that the snow distribution characteristics of the roof will change significantly under the influence of wind-induced snow drift, exhibiting a non-uniform distribution. The maximum value of the snow distribution coefficients is usually located in the region with a large height difference of the roof. Furthermore, the wind-induced snow drift is more significantly affected by the wind speed, and snow erosion is prominent in regions with high wind speeds, while snow deposition is more likely to occur in regions with low wind speeds. The findings are highly significant for the design and maintenance of wind-driven snow distribution characteristics of large-span structures, contributing to the enhancement of building safety and stability.

**Key words:** large-span roofs; wind-induced snow drift; two-phase flow theory; numerical simulation; snow distribution

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978230; 52278495); 安徽省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2108085J29)

作者简介: 邳伦海(1979—), 男, 山东菏泽人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: zhilunhai1979@163.com.

低温严寒地区发生强降雪时常伴随着大风的出现,风的作用会导致积雪迁移,这种现象被称为风致雪漂移。风致雪漂移会造成雪颗粒的不规则堆积,对建筑屋面产生不均匀压力,从而导致屋盖出现垮塌事故。大跨度屋盖质轻且柔,对风雪作用非常敏感,因此有必要研究风力影响下大跨度屋面上积雪的漂移和堆积现象,以合理准确地预测大跨度屋盖结构的雪荷载。

现有研究风致雪漂移的方法主要有现场实测、风洞试验及数值模拟<sup>[1]</sup>。现场实测是研究风致雪漂移最为可靠的方法。文献[2]对边长为1 m的立方体周边积雪分布进行实测,并得出了风雪漂移的空间分布。然而,现场实测受到自然条件的影响较大,难以对风雪漂移的作用机理开展全面、系统地研究。风洞试验是目前研究风致雪漂移的重要手段,但其成本较高、周期较长,并受到相似准则的约束。数值模拟方法具有成本低廉、时间周期短的优势,且便于对试验条件进行调整,同时可以对风雪耦合作用开展全尺寸、大规模的仿真模拟。近年来部分学者利用数值模拟方法对建筑物及其周边区域的风雪运动开展了研究<sup>[3-5]</sup>。文献[3]依托于两相流理论,构建了围绕防雪栅的风雪运动数值模型,并将其与实测值以及风洞试验的数据进行对比;文献[4]采用数值方法对防雪栏、风穴和丘陵周围的风雪漂移运动进行了分析;文献[6-8]基于两相流理论,将雪相视为弥漫在空气中的连续相,利用有限体积法对大型建筑结构的风雪运动进行了数值模拟,并获得了风作用下建筑结构周围积雪的不均匀分布。

本文基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟软件 Fluent,采用 C 语言编写自定义函数对其进行二次开发,利用 Mixture 多相流模型和  $k-k_L-\omega$  湍流模型对兰州市某大跨屋盖结构的风致雪漂移进行数值计算。研究了复杂大跨度结构屋盖在不同风向角下的积雪重分布、屋盖各区域积雪分布系数随风向的变化,以及积雪容易产生堆积现象区域的风速分布。

## 1 工程概况及数值模型

### 1.1 工程概况

该大跨钢结构屋盖长约 200 m、宽约 118 m、高度为 26 m,其形状呈弧面,中间有部分凸起,如图 1 所示。该建筑位于秦王川盆地,区内地势平坦开阔,起伏较小,100 a 重现期的基本风速为 23.66 m/s,基本雪压为 0.2,按照 B 类地形考虑。

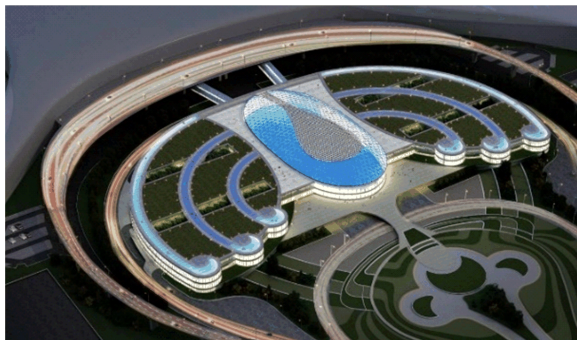


图 1 建筑效果图

### 1.2 计算模型及网格划分

大跨结构的计算模型按照实际尺寸进行 1:1 建模,并考虑了周边建筑物对流场产生的影响,计算域的整体尺寸(长×宽×高)为 7 500 m×3 500 m×300 m。根据文献[9],在流域尺寸大小与模型尺寸大小满足阻塞率低于 3%的条件时,可不用考虑计算域边界对建筑物表面风压的作用,阻塞率  $B$  计算公式为:

$$B = (A_0/A_1) \times 100\% \quad (1)$$

其中: $A_0$  为建筑物的最大迎风面积; $A_1$  为计算域的界面面积。经计算,阻塞率  $B$  小于 3%。整个计算域的网格划分使用了多面体非结构化网格,最小的网格大小为 0.1 m。增长因子为 1.2,计算流域网格总数约为  $210 \times 10^4$ 。流体域内建筑物表面网格划分如图 2 所示。

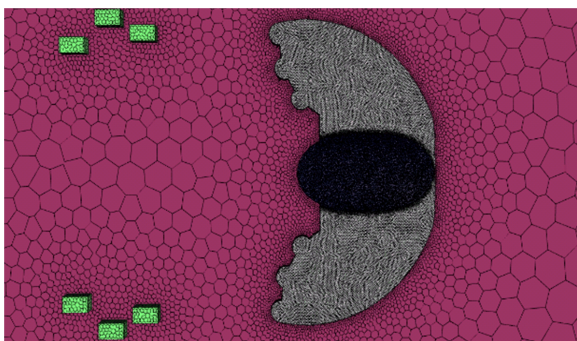


图 2 建筑表面网格

## 2 CFD 基本理论

### 2.1 数值模型

在风吹雪漂移运动过程中,雪颗粒会发生漂移、堆积等现象,随着风速的增大,雪表面的切向速度超过了一定阈值,一些雪颗粒将会从雪床上脱落并进行运动。一般来说,风雪漂移运动方式有蠕移、跃移和悬移。文献[10]研究表明,风雪漂移中蠕移运动的雪粒子所占比例很小,故本文仅

将跃移和悬移运动作为风雪飘移的主要运动模式进行模拟。风吹雪漂移运动虽然属于气-固两相流问题,但是根据雪颗粒间的作用力及其对空气相的影响,可以将雪相看作连续相进行处理,本文在 Euler-Euler 的理论基础上,将空气相与雪相都视为连续相考虑。

目前,Fluent 中的 Euler-Euler 多相流模型主要包括 Volume of Fluid 模型、Mixture 模型和 Eulerian 模型。与 Volume of Fluid 和 Eulerian 模型相比,Mixture 模型方程组数目较少,计算稳定性较好,并且可以在不同相之间进行交叉。为此,本文将 Mixture 模型应用于风雪两相流的模拟,并利用有限体积法(finite volume method, FVM)对其控制方程进行了求解。

## 2.2 控制方程

风雪两相流运动的控制方程主要由基于质量守恒定则的连续性方程、基于牛顿第二运动规律的动量方程和基于雪相的体积方程共同组成。

### 2.2.1 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (2)$$

其中: $\mathbf{v}_m = \sum_{k=1}^2 f_k \rho_k \mathbf{v}_k / \rho_m$  为混合相平均质量速度; $\rho_m = \sum_{k=1}^2 f_k \rho_k$  为混合相密度, $k=1$  代表空气相, $k=2$  代表雪相。下同。

### 2.2.2 动量方程(N-S 方程)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = & -\nabla p + \\ & \nabla [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \\ & \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_d \mathbf{v}_d \right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $p$  为流场压力; $\mu_m$  为混合相动力黏度; $\mathbf{F}$  为体积力; $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$  为相对漂移速度。

目前,采取对 N-S 方程各项进行平均的方法求解流体的湍流运动在工程上的应用最为广泛。将 N-S 方程中的每一项进行平均后,将会得到与 N-S 方程十分类似的雷诺平均方程(Reynolds-averaged navier-stokes equations, RANS),即

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_m \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_m \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\tau_{ij}$  为雷诺应力, $\tau_{ij} = -\rho_m \overline{u_i' u_j'}$ ;  $u_i$  为风速矢量分量。逐次求均后的方程不再是封闭方程,须引入适当的湍流模型方程来描述湍流特性和影响。

### 2.2.3 湍流方程

对于湍流模型引入选用  $k-k_L-\omega$  模型。该模型是一种三方方程的涡粘模型,涵盖了湍动能  $k_T$ 、层流动能  $k_L$  和逆湍流时间尺度  $\omega$  的输运方程<sup>[8]</sup>,相关方程为:

$$\begin{aligned} \frac{dk_T}{dt} = & P_{K_T} + R + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dk_L}{dt} = P_{K_L} - R - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = & C_1 \frac{\omega}{k_T} P_{K_T} + \left( \frac{C_\omega R}{f_\omega} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R + R_{NAT}) - \\ & C_2 \omega^2 + C_3 f_\omega \alpha_T f_\omega^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $D_T$ 、 $D_L$  均为扩散项; $P_{K_T}$ 、 $P_{K_L}$  分别为湍动能和层流动能的产生项; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  均为常数项; $R$  为考虑气流由层流转到湍流内波动的影响。

Fluent 自带了多种湍流模型,经过比较和研究,决定使用  $k-k_L-\omega$  模型,这是一个三方方程的涡粘模型,包括了湍动能、层流动能及逆湍流时间尺度的输运三方方程湍流模型。 $k-k_L-\omega$  模型能够更加准确地刻画边界层中从层流过渡到湍流的转捩,且在风致雪飘移时,积雪粒子从跃移运动过渡到悬移运动与从层流过渡到湍流的情况类似,因此,用该模型模拟风雪两相流是可靠的。

### 2.2.4 雪相质量浓度方程

根据文献[11]雪相质量浓度方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(f \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (f \rho_s \mathbf{v}_m) = & -\nabla \cdot (f \rho_s \mathbf{v}_d) + \\ & \sum (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\dot{m}_{qp}$  为空气相(q 相)转化为雪相(p 相)的质量;相应的  $\dot{m}_{pq}$  为雪相(p 相)转化为空气相(q 相)的质量。由于不考虑两相之间的物理转化,因此和均取为 0。

通过 FVM 方法对风雪流控制方程进行离散,利用二次逆风方法对其进行数值模拟;通过 SIMPLEC 方法对压力-速度耦合模型进行求解,并修正压力场与速度场,使数值模拟结果的残差值收敛达到  $10^{-6}$ 。

## 2.3 风致雪飘的侵蚀与沉积

在风吹雪飘过程中,壁面摩擦速度  $u_*$  与积雪面发生沉积或侵蚀现象之间的关系最为密切。当  $u_*$  大于一个阈值速度(临界摩擦速度)  $u_{*t}$  时,雪

粒子会被风吹离积雪面,导致积雪表面的侵蚀;相反,若  $u_*$  小于  $u_{*t}$ ,则会导致漂移的雪粒滞留在雪层表面,造成雪颗粒的沉积。侵蚀和沉积量的计算公式为:

$$\begin{cases} q_{\text{ero}} = A_{\text{ero}}(u_*^2 - u_{*t}^2), \\ q_{\text{dep}} = \phi_s \tau_w (u_{*t}^2 - u_*^2) / u_{*t}^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $A_{\text{ero}}$  为侵蚀常数,取  $7.0 \times 10^{-4}$ ;  $\tau_w$  为降雪速度;  $\phi_s$  为雪的质量浓度。  $\phi_s$  的计算公式为:

$$\phi_s = \rho_s f \quad (10)$$

其中:  $\rho_s$  为雪颗粒密度;  $f$  为体积分。摩擦速度的表达式<sup>[12]</sup>为:

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (11)$$

其中:  $\tau_0$  为壁面剪切应力;  $\rho$  为空气密度。

使用对数率的风速剖面公式近似计算壁面摩擦速度,即

$$u_* = u(z) \kappa / \ln(z/z_0) \quad (12)$$

其中:  $u(z)$  为  $z$  高度处的风速;  $\kappa$  为冯卡门常数,取 0.4;  $z_0$  为壁面粗糙度高度,取  $3.0 \times 10^{-5}$ 。

当积雪面发生沉积或侵蚀现象后,积雪面的高度会变化,这里统一用  $q_s$  代替  $q_{\text{ero}}$  和  $q_{\text{dep}}$ ,积雪面高度在  $\Delta t$  时间内的变化量  $\Delta h$  计算式为:

$$\Delta h = -q_s \Delta t / (\rho_s \gamma) \quad (13)$$

其中,  $\gamma$  为假定的雪相最大体积分,取值为 0.62。

### 3 数值模拟可行性验证

#### 3.1 验证模型建模

本次验证以文献[2]的风雪流实测结果研究对象,对其试验的 1 m 立方体结构建立数值模型,计算域尺寸按照文献[13]的描述取值,如图 3 所示。利用四面体非结构化网格对计算域进行全尺度的空间离散,最小网格尺寸为 0.01 m,增长因子取 1.2,网格数量为  $140 \times 10^4$ 。

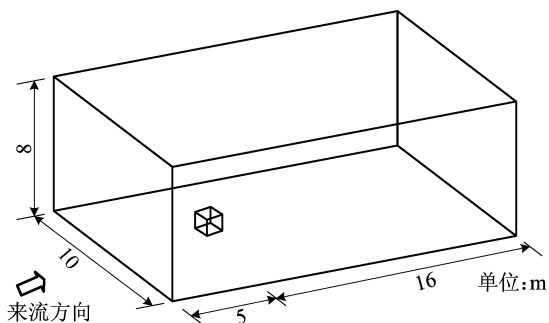


图3 计算模型及计算域示意图

#### 3.2 边界条件及计算参数

空气相边界条件:入流面使用速度入口边界条件,使用指数律来表示大气边界层风速剖面。其计算公式为:

$$u(z) = u_0 (z/z_0)^\alpha \quad (14)$$

其中:  $z_0$  和  $u_0$  分别为参考高度和参考高度处的平均风速,取值分别为 1 m 和 5 m/s;  $\alpha$  为地面粗糙度指数,取值为 0.25;对应来流的雷诺数为  $3.2 \times 10^5$ 。

使用湍动能  $k$  和比耗散率(湍流时间尺度)  $\omega$  来表示流体的湍流特性,公式为:

$$\begin{cases} k = 1.5(uI)^2, \\ \omega = k^{0.5} / (0.09^{0.25} l) \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $I$  和  $l$  分别为湍流强度和湍流积分尺度。按照文献[14]对 B 类地貌的描述,表达式为:

$$I = \begin{cases} 0.23, & z < 5 \text{ m}; \\ 0.1(z/350)^{-0.20}, & 5 \text{ m} \leq z < 350 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

$$l = \begin{cases} 100, & z < 30 \text{ m}; \\ 100(z/30)^{0.5}, & 30 \text{ m} \leq z < 350 \text{ m} \end{cases} \quad (17)$$

雪相边界条件:本文对于风致雪飘运动采用了单向耦合假设,故雪相与空气相使用相同的入口速度;在设置入口边界的体积分时,因为空气相与雪相的体积分之和是 1,所以只需给出某个相的体积分,本文给出的是雪相的体积分。由于雪相在悬移层和跃移层所占体积分不同,本文采用文献[10,15]提出的经验公式:

$$f = \begin{cases} \frac{0.68}{(u_p u_* g)} u_{*t} (u_*^2 - u_{*t}^2), & z < h_{\text{sal}}; \\ \frac{0.8 \exp[-1.55(4.78 u_*^{-0.54} - z^{-0.54})]}{\rho_s}, & z \geq h_{\text{sal}} \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $g$  为重力加速度;  $u_p$  为雪相运动速度;  $h_{\text{sal}}$  为跃移层和悬移层的临界高度,参考文献[14]取  $h_{\text{sal}} = 1.6 u_*^2 / (2g)$ 。

在出口边界条件选择上,使用了压力出口的边界条件;计算域顶部和两边都使用对称边界,也就是剪应力为 0 下的自由滑动的壁面条件;建筑物表层和底面都使用了无滑移的壁面条件。当积雪面发生侵蚀现象或沉积现象后,其高度会随之变化,对其边界条件产生影响,可能影响到计算结果的精度。文献[16]中对此问题进行研究,并给出了积雪面高度变化对结果的影响极小,故本文在求解过程中没有考虑高度变化带来的精度影响。

#### 3.3 求解参数设置

本文采用 SIMPLEC 算法进行迭代,该算法

精度高但收敛较为缓慢。为了提高收敛速度,先使用 RANS 模型进行定常风场计算,待得到收敛风场后,再将其作为风雪流的初始流场进行计算。

计算参数设置参照文献[17]在研究立方体周边积雪分布模拟的有关参数:雪粒子直径  $D_s = 1.5 \times 10^{-4}$  m;雪面粗糙高度  $h_s = 3.0 \times 10^{-5}$  m;雪颗粒密度  $\rho_s = 150$  kg/m<sup>3</sup>;阈值速度  $u_{*t} = 0.15$  m/s;雪粒子沉降(降雪)速度  $w_f = 0.2$  m/s。

### 3.4 结果对比分析

本文对  $k-k_L-\omega$ 、SST  $k-\omega$  和 RNG  $k-\varepsilon$  这 3 种湍流模型的数值模拟结果与文献[2]实测结果进行对比,具体结果如图 4 和图 5 所示。图 4、图 5 中,无量纲雪深为测点处的积雪深度  $S$  与单位初始积雪深度  $S_d$  的比值。

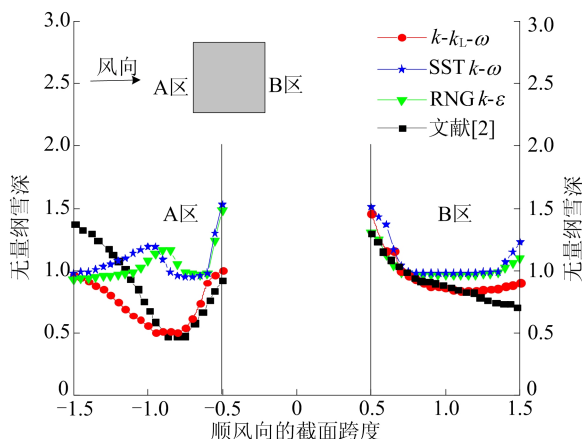


图 4 顺风向模拟结果与实测值的对比

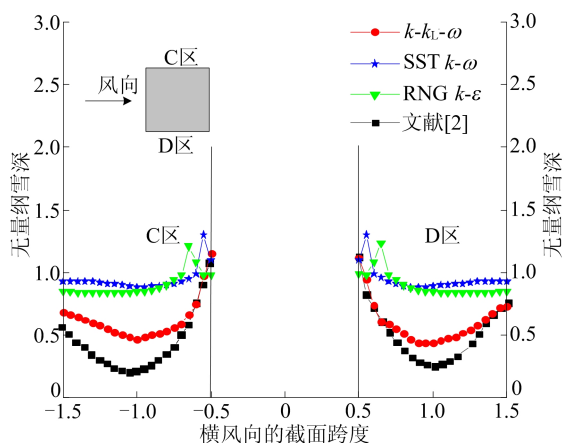


图 5 横风向模拟结果与实测值的对比

在图 4、图 5 中,利用立方体的边长  $H$  将其横坐标进行无量纲化,0 表示该立方体的中心,0.5 和 -0.5 表示立方体的表面;在使用初始雪深  $S_d$  对纵坐标进行无量纲化,1.0 表示初始雪深,大于

1.0 表示积雪面发生了积雪沉积,小于 1.0 表示积雪面受到侵蚀。

通过对本文模拟结果和文献[2]的实测数据的比较,可发现迎风面侵蚀较为严重,背风面侵蚀较少,立方体 2 个侧面都有较大程度的侵蚀,而在立方体表面附近都会有少量积雪堆积。其原因主要是由于迎风面会形成风速较大的驻涡,遭受侵蚀较为严重,而在背风面上,会产生一些较弱的背风旋涡,因此其侵蚀量较小,立方体的两侧主要受马蹄涡的影响,使风雪流的流速增大,故在两侧也发生较大侵蚀,至于在立方体表面附近的积雪沉积主要是由于立方体的阻碍导致靠近其风速减小,导致存在少量的积雪堆积。

通过比较图 5 中 3 种湍流模型的模拟值与文献[2]中的实测值,可以发现  $k-k_L-\omega$  模型的模拟结果与文献[2]中实测值符合程度更高,但还是存在些许误差,可能是由于 Mixture 模型是一种简化模型且并未考虑雪相对空气相的耦合所导致的。

可以确定的是  $k-k_L-\omega$  湍流模型在立方体近壁面处的模拟结果与实测值吻合较好,因为建筑设计人员在实际工程中更关注屋顶和周边地区的风致积雪分布,所以可以考虑使用  $k-k_L-\omega$  湍流模型。

## 4 大跨度屋盖风致雪漂移数值模拟

### 4.1 边界条件及计算参数

本次模拟速度入口的风速仍采用式(14)中的指数率风速剖面,将参考高度  $z_0$  设定为 10 m,参考高度处的风速  $u_0$  设置为 23.66 m/s。同时,其他边界条件和计算参数与前文一致。

### 4.2 计算结果分析

按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[18],屋面水平投影面上的雪荷载标准值计算公式为:

$$S_k = \mu_r S_0 \quad (19)$$

其中: $S_k$  为雪荷载标准值; $S_0$  为基本雪压,可按照规范查得; $\mu_r$  为屋面积雪分布系数。

将屋面积雪分布系数  $\mu_r$  作为本文的 CFD 计算结果的表达方式, $\mu_r > 1.0$  表示发生积雪沉积, $\mu_r < 1.0$  表示积雪受到侵蚀。

本文模拟时将正南方向定为  $0^\circ$  风向,并以逆时针方向进行旋转,每旋转  $15^\circ$  为 1 个工况,共计 24 个工况,数值模拟风向角示意图如图 6 所示。由于篇幅限制,本文只给出  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  这 3 个风

向角下的模拟结果,屋盖表面分区示意图如图7所示。

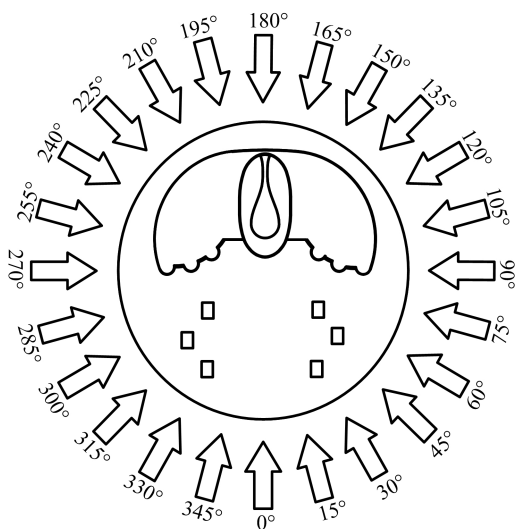


图6 风向角示意图

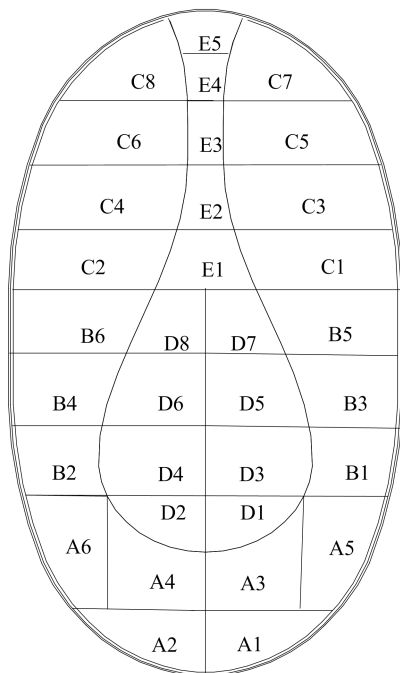


图7 屋盖表面分区示意图

0°、90°、180°风向角下该大跨度屋盖积雪分布系数云图如图8~图10所示。

从图8~图10可以看出:0°风向角下该大跨度屋盖上的风雪漂移运动主要导致积雪遭受侵蚀,尤其在A5区与A6区,其原因是这2个区域沿主体结构流动往上的风速较大,导致积雪遭受较为严重的侵蚀;而B1区至B6区与主体结构交界处存在积雪堆积,这是由于受主体结构的阻碍和气流分离后风速变小,加上屋盖高处的雪颗粒被吹落导致的。

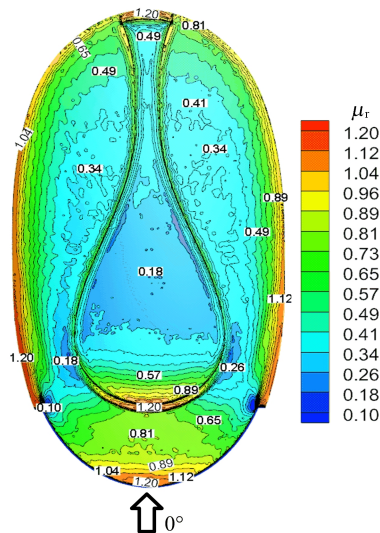


图8 0°风向角屋盖积雪分布系数云图

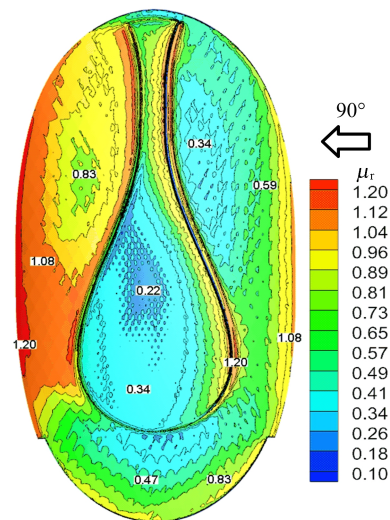


图9 90°风向角屋盖积雪分布系数云图

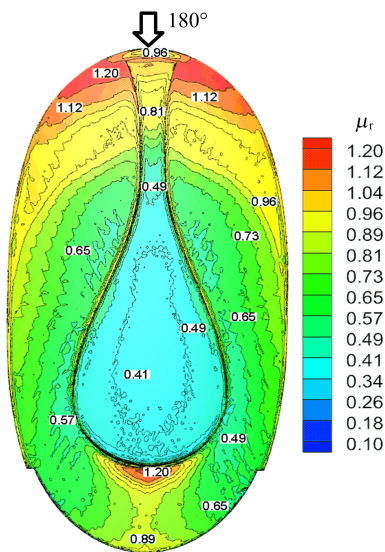


图10 180°风向角屋盖积雪分布系数云图

此外,A3区、A4区与D区交界处由于D区、E区高度比A区、B区、C区高度高约1 m,存在对前方来流的阻挡作用,故A3区、A4区内存在积雪堆积,A1区、A2区的堆积主要由于风雪流产生分离现象,且分离区靠近屋面处的风速较低,故会产生积雪堆积现象;D1区、D2区的积雪堆积原因与A1区、A2区相同;至于E5区存在积雪堆积,是由于高度差存在导致在其背部产生涡旋,涡旋处风速较小,造成积雪堆积现象,与上述提到的立方体实验现象相吻合。

在 $90^\circ$ 风向角下,除了B1区、B3区、B5区与D区和主体结构的交界处由于受高度变化的影响存在少量积雪堆积外,其他迎风面均呈现侵蚀现象;而在背风区,由于风雪流在经过D区、E区时发生分离,加之有雪颗粒由D区、E区被吹落且D区高度较高,因此B2区、B4区、B6区存在较大面积的积雪堆积现象。

在 $180^\circ$ 风向角下,由于屋盖呈弧面向中间凸起的形状,故高度越高处风速越大,侵蚀量随之增加。背风区A3、A4区的积雪沉积现象与 $0^\circ$ 风向角下E5区存在积雪堆积的原理相似。而在C7、C8区域,由于屋盖高度高于主体结构,来流受到阻碍作用,导致存在积雪沉积现象。

屋面各分区在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 风向角范围内积雪分布系数随风向角的变化情况如图11所示。

由图11a可知:A1~A6区在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 风向角范围内积雪分布系数总体上变化幅度较小,大致在0.6~1.2之间;但在 $0^\circ$ 风向角范围下,所有区域最大积雪分布系数均达到1.2,故而在结构设计时应当引起重视。由图11b可知,B1~B6分区的积雪分布系数随风向角改变的变化趋势大致相同,处于0.6~1.2之间。然而在 $90^\circ$ 风向角范围下,各个分区的最大积雪分布系数均大于1。由图11c可知,C1~C8区的积雪分布系数随风向角从 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的变化呈现出逐渐增加的趋势,维持0.6~1.2之间。由图11d可知,D1~D8区的积雪分布系数随着风向角的改变呈现出较大波动,结构设计时当充分考虑各风向角下该区的积雪分布系数。由图11e可知,除了E1区所在位置较特殊,导致其积雪分布系数变化情况为先减小再增大,最大值为1.2,其他区域均为先增加再减小。可以发现积雪分布系数最大值主要出现在屋盖与主体结构交界处,A区、B区、C区分别与D区和E区交界处, $90^\circ$ 风向角下的B2、B4、B6区,因为结构为对称结构,所以A区、B区、C区设计

应当按其中积雪分布系数最大值取值。

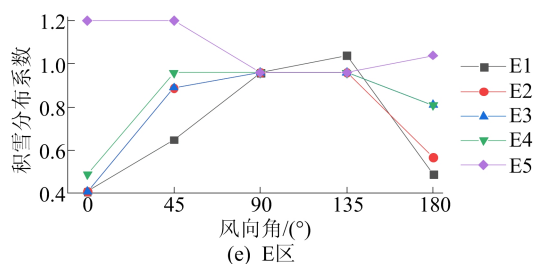
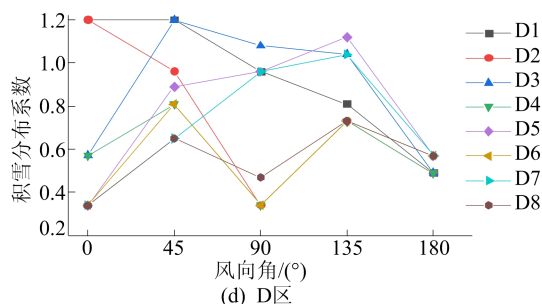
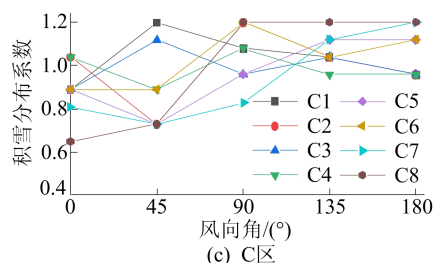
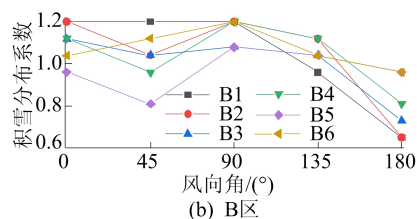
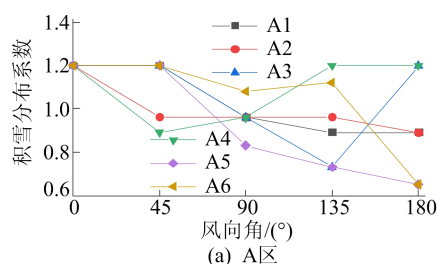


图 11 屋面各区积雪分布系数随风向角的变化

该大跨度结构屋盖在各风向角下部分积雪沉积区的风速分布如图12所示。从图12可以看出,由于存在高度差,风雪流在较高处的表面发生分离,在较低处形成背风涡旋,且涡旋处风速较小,导致了积雪沉积现象。因此,在这些区域内,雪荷载相对标准值提高较多,而其他风速较大的区域则呈现出侵蚀现象。对于存在高度差的屋盖结构,由于风对雪的漂移作用,较高屋面的雪被吹

落在较低屋面上,在低处形成局部较大的沉积雪荷载。而本文所研究屋盖的积雪分布系数在不同

风向角下变化较大,因此在结构设计时应当充分考虑该屋盖结构对雪荷载的敏感性。

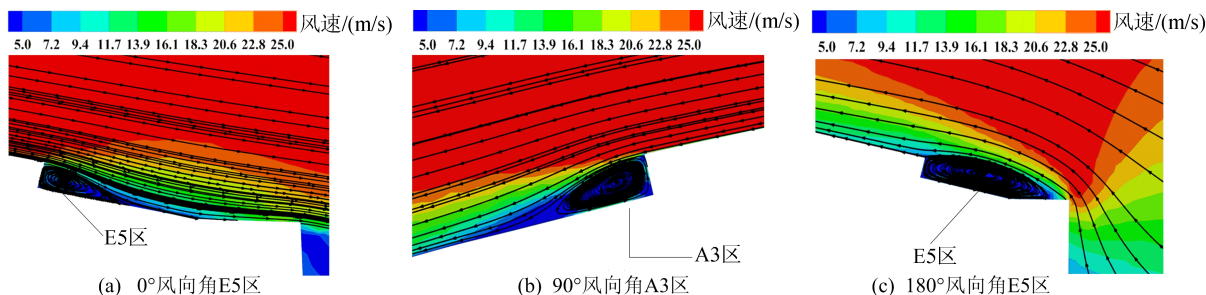


图12 各风向角下部分积雪沉积区域风速分布

### 4.3 与规范对比

我国现行建筑结构荷载规范<sup>[18]</sup>在屋面积雪不均匀分布方面增加了对带天窗的坡屋面的规定,该规范指出:积雪在天窗两侧均有分布,且分布系数均取1.1;天窗以上的屋面积雪分布系数取为0.8。本文将90°风向角下数值模拟结果与规范进行对比,结果如图13所示。

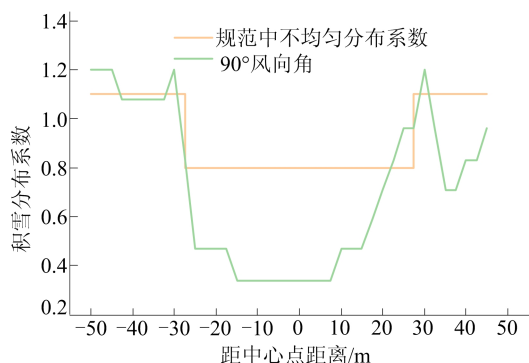


图13 数值模拟结果与规范值对比

由图13可知:数值模拟结果与规范相比,屋面与天窗交界处偏大;天窗上部区域规范积雪分布系数为0.8,而数值模拟结果较小,仅为0.3~0.5;迎风面的坡屋面规范取值为1.1,而数值模拟结果则表现出较多侵蚀,仅在气流受天窗阻挡时存在积雪分布系数为1.2的积雪沉积;在坡屋面背风面与主体结构及天窗交界处存在积雪分布,数值模拟结果中积雪分布系数为1.2,而规范仍是1.1。造成这些差异的原因是该大跨度屋盖带有天窗且形状不规则,相较于典型的带天窗坡屋面更为复杂,且仅对比了90°风向角下的积雪分布系数,故在迎风面数值模拟结果为侵蚀。参考我国规范设计时大跨度屋面时,需综合考虑各区域的积雪分布情况,特别在天窗附近和屋盖与主体结构

交界处。但在大多数积雪侵蚀区域,数值模拟结果通常偏小,特别在天窗以上的区域差异较大,对于大跨度屋面,我国规范给出的凹字形分布形式积雪分布系数在最低值取值时过于保守。

## 5 结 论

1) 在风雪运动后,该大跨度屋盖结构屋面的雪荷载会发生变化,雪颗粒会由高速区域漂移至低速区域,导致屋面雪荷载的不均匀分布。

2) 在不同风向角下,大跨度屋盖结构的屋面表面会出现大面积的侵蚀现象,且存在高度差的区域容易出现积雪沉积。该类型区域的最大积雪分布系数达到1.2。因此,在大跨度屋盖结构的抗风雪设计中,应当引起足够的重视。

3) 大跨度屋盖结构在不同风向角下,各区域积雪分布系数会发生变化显著,不同风向角下同一区域的侵蚀和沉积状况会出现反转。因此,在进行结构设计时,需充分考虑到风向角对不同区域雪荷载的影响,确保结构的抗风雪能力。

4) 研究发现风速对积雪侵蚀和沉积的影响显著。高速区域积雪侵蚀严重,而低速区域则容易导致大量积雪堆积。该研究对于大跨度屋盖结构的抗风雪设计具有指导意义,需要充分考虑风速对积雪侵蚀和沉积的影响,在结构设计阶段进行合理预测和调整。

## [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.
- [2] OIKAWA S, TOMABECHI T. Formation processes of the deposition and erosion of snow around a model building[J]. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, 2003, 65(3): 207-218.

- [3] BEYERS J H M, SUNDSB P A, HARMS T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(9): 725-747.
- [4] UEMATSU T, NAKATA T, TAKEUCHI K, et al. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 20(1): 65-73.
- [5] THIES T K. Comparison of numerical simulations and full-scale measurements of snowdrifts around buildings[J]. *Wind and Structures An International Journal*, 2000, 3(2): 073.
- [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): 109-112.
- [7] 洪财滨. 典型形式大跨度屋盖风致雪漂移的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 周恒毅, 胡学富, 顾明. 考虑摩擦速度修正的风致积雪重分布模拟方法研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(10): 19-25.
- [9] 张建, 李波, 单文娜, 等. 波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(3): 111-117.
- [10] POMEROY J W, MALE D H. Steady-state suspension of snow[J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 136 (1/2/3/4): 275-301.
- [11] 黄鑫. 弧形大跨结构屋面风致积雪分布数值研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [12] 张天歌, 周恒毅, 顾明. 不同护栏透风率下桥面雪飘移的数值模拟[J]. *工程力学*, 2023, 40(3): 36-43.
- [13] 孙晓颖, 洪财滨, 武岳, 等. 建筑物周边风致雪漂移的数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 141-146.
- [14] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendation for loads on building: AIJ-GBV 2004[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 15-40.
- [15] POMEROY J W, GRAY D M. Saltation of snow[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1583-1594.
- [16] 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.
- [17] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHINO H, et al. CFD prediction of snowdrift around a cubic building model [C]//The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006). Yokohama: [s. n.], 2006: 941-944.
- [18] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 30-64.

(责任编辑 吴 亮)

## (上接第 693 页)

- [12] 田大雨. 烟草细胞壁多糖结构和含量的二维核磁共振波谱分析研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [13] GUERRA A, MENDONÇA R, FERRAZ A, et al. Structural characterization of lignin during Pinus taeda wood treatment with ceriporiopsis subvermispora[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(7): 4073-4078.
- [14] KOUL B, YAKOUB M, SHAH M P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability[J]. *Environ Res*, 2022, 206: 112285.
- [15] WANG S R, LIN H Z, RU B, et al. Comparison of the pyrolysis behavior of pyrolytic lignin and milled wood lignin by using TG-FTIR analysis[J]. *J Anal Appl Pyrol*, 2014, 108: 78-85.
- [16] 张浩楠, 赵瑾, 徐栋梁, 等. 二维核磁谱对木质素酚与磨木木质素结构的对照解析[J]. *纤维素科学与技术*, 2018, 26(4): 9-18.
- [17] BÄHRLE C, CUSTODIS V, JESCHKE G, et al. In situ observation of radicals and molecular products during lignin pyrolysis[J]. *Chemosuschem*, 2014, 7(7): 2022-2029.
- [18] SUN D, WANG B, WANG H M, et al. Structural elucidation of tobacco stalk lignin isolated by different integrated processes[J]. *Ind Crop Prod*, 2019, 140: 9.
- [19] TIAN W W, XU F, XING S J, et al. Comprehensive study on the thermal decomposition process of waste tobacco leaves and stems to investigate their bioenergy potential; kinetic, thermodynamic, and biochar analysis[J]. *Thermochemica Acta*, 2023, 723: 179473.
- [20] LIU C, HU J, ZHANG H Y, et al. Thermal conversion of lignin to phenols: relevance between chemical structure and pyrolysis behaviors[J]. *Fuel*, 2016, 182: 864-870.
- [21] GUO Y Z, ZHOU J H, WEN J L, et al. Structural transformations of triploid of Carr. lignin during auto-catalyzed ethanol organosolv pretreatment[J]. *Ind Crop Prod*, 2015, 76: 522-529.
- [22] ANCA-COUCÉ A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis[J]. *Prog Energ Combust*, 2016, 53: 41-79.
- [23] RÄISÄNEN U, PITKÄNEN I, HALTTUNEN H, et al. Formation of the main degradation compounds from arabinose, xylose, mannose and arabinitol during pyrolysis[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2003, 72(2): 481-488.
- [24] HU J, SHEN D K, XIAO R, et al. Free-radical analysis on thermochemical transformation of lignin to phenolic compounds[J]. *Energ Fuel*, 2013, 27(1): 285-293.
- [25] GUO G F, ZHANG K, LIU C X, et al. Comparative investigation on thermal decomposition of powdered and pelletized biomasses: thermal conversion characteristics and apparent kinetics[J]. *Bioresource Technol*, 2020, 301: 12273.

(责任编辑 闫杏丽)