



建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering
ISSN 1673-2049, CN 61-1442/TU

《建筑科学与工程学报》网络首发论文

题目： 低层双齿大棚屋面风致积雪分布研究
作者： 聂少锋, 黄鑫, 王硕, 黄成杰
网络首发日期： 2021-08-27
引用格式： 聂少锋, 黄鑫, 王硕, 黄成杰. 低层双齿大棚屋面风致积雪分布研究. 建筑科学与工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.TU.20210827.1441.010.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

低层双齿大棚屋面风致积雪分布研究

聂少锋¹, *黄鑫¹, 王硕¹, 黄成杰²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西, 西安 710061; 2. 新力控股(集团有限公司), 江西, 南昌 310000)

摘要: 基于 *Fluent*, 选用 *Mixture* 多相流模型, 建立了风雪两相流场模型, 以研究低层双齿大棚屋面的风致积雪分布规律。为验证风雪两相流场的准确性并选择合适的湍流模型, 采用 *k-w*、*SST k-w* 和 *k-kl-w* 湍流模型分别对立方体周围积雪分布进行数值分析, 并将数值分析结果与试验结果对比分析以验证数值方法的正确性, 进而详细研究了风速、风向角、屋面坡度比和结构双齿长宽比对低层双齿大棚屋面风致积雪分布的影响。结果表明: 风雪两相流模型和 *k-kl-w* 湍流模型建立的风雪两相流场可以较好地反映低层双齿大棚屋面的积雪分布情况; 大棚屋面积雪厚度随着风速和屋面坡度比增大而减小, 但屋面坡度比的影响程度较风速与风向角的影响小; 大棚屋面积雪受侵蚀和堆积区域位置随风向角变化而变化; 大棚结构长宽比对屋面积雪分布的影响较小; 低层三齿大棚屋面和低层四齿大棚屋面的屋面积雪分布系数可参考低层双齿大棚屋面; 提出了低层双齿大棚屋面积雪不均匀分布系数, 为低层双齿大棚屋面的冬季防雪灾设计提供参考。

关键词: 低层建筑; 双齿大棚; 多相流模型; 数值分析; 风致积雪分布

中图分类号: TU375 文献标识码: A

Investigation on the distribution of wind-induced snow cover on the roof of low-rise double-tooth greenhouses

Nie Shaofeng¹, *Huang Xin¹, Wang Shuo¹, Huang Chengjie²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Shaanxi, Xi'an 710061; 2. Sinic Holdings (Group Co., Ltd.), Jiangxi, Nanchang 310000)

Abstract: Based on the *Fluent*, the *Mixture* multiphase flow model was selected, the wind and snow two-phase flow models were established to study the distribution of wind-induced snow cover on the roof of low-rise double-tooth greenhouse. To verify the accuracy of the wind and snow two-phase flow field and choose the reasonable turbulence model. The *k-w*、*SST k-w* and *k-kl-w* turbulence models were used to simulate the snow distribution around the cube. Then, the numerical results were compared with the test results to verify the correctness of the numerical models. The influence of wind speed, the wind direction, the roof slope ratio, and the length-span ratio on the distribution of wind-reduced snow cover on the roof of low-rise double-tooth greenhouses was studied in detail. The results show that the distribution of wind-reduced snow cover on the roof of the low-rise double-toothed greenhouse can be shown well through the wind and snow two-phase flow model and two-phase flow field established using *k-kl-w* turbulence model; the snow thickness on the roof of the greenhouse decreases with the increase of the wind speed and the roof slope ratio, however, the influence degree of roof slope ratio is smaller than that of wind speed and wind direction; the snow erosion and accumulation position on the roof of the greenhouse changes with the wind direction; the length-span ratio of the greenhouse structure has little effect on the distribution of snow on the roof; The snow distribution coefficient of the low-rise three-tooth greenhouse roof and the low-rise four-tooth greenhouse roof can refer to the low-rise double-tooth greenhouse roof; the uneven distribution coefficients of snow on the roof of low-rise double-tooth greenhouses were proposed, which provides a reference for winter snow disaster prevention design of the low-rise double-tooth greenhouses roof.

Keywords: low-rise building; double-tooth greenhouse; multiphase flow model; numerical analysis; wind-reduced snow distribution

基金项目: 中央高校基金项目(300102289205), 陕西省建设科技项目(2014-K14), 陕西省重点研发计划项目(2021SF-519)。

作者简介:

聂少锋(1981—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事结构风工程、钢结构基本理论及其应用研究。E-mail: niesf126@126.com。

*黄鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构风工程研究。E-mail: 1307660175@qq.com。

0 引言

低层双齿大棚屋面是顶部为锯齿状的轻钢结构屋面,因其成本低,可提供较大空间,便于拆卸,在我国广大农村地区,被广泛应用于农业大棚类建筑,低层双齿大棚见图 1。在我国北方地区,由于冬季大雪,低层齿状屋面类大棚倒塌的事故时有发生,例如:2018年1月,安徽雪灾,导致安徽省多地大棚倒塌,农民一年辛劳血本无归,事故现场见图 2。



图 1 锯齿大棚
Fig.1 Sawtooth greenhouse



图 2 事故现场
Fig.2 Site of accident

为了避免雪灾引起事故,国内外学者对不同类型建筑的风致积雪分布进行了部分试验和数值分析研究。Alhajraf^[1]提出了用于风吹颗粒二维模拟和三维模拟的计算流体力学模型。赵雷等^[2]对低矮建筑积雪分布情况进行了场地实测和数值模拟,并总结了典型低矮建筑表面的积雪分布规律。Beyers^[3]使用实测数据拟合的风速剖面函数对 1:25 的建筑模型周边的积雪进行了测量,发现 $k-\epsilon$ 湍流模型对立方体模型分离区的预测不准确。Michael 等^[4]在水槽试验中利用胡桃壳颗粒模拟风力作用下雪颗粒的运动,试验结果与相关理论分析吻合度良好,证明了水槽模拟的可靠性。Ozmen 等^[5]使用不同湍流模型模拟了几种典型低层建筑模型的积雪分布情况,结果表明: $k-w$ 模型在预测平均压力系数方面,与试验结果表现出更好的一致性。王卫华等^[6]对边界层风洞中典型阶梯形屋面及双坡屋面进行了试验研究,结果表明:风向角为 0°时,阶梯形屋面积雪分布模拟结果与观测结果基本一致,而双坡屋面的背风屋面局部产生较多沉积。孙晓颖等^[7]对建筑物周边的积雪分布情况进行模拟并与试验结果进行了对比,结果表明,数值模拟结果与试验结果积雪分布规律一致。颜卫亨等^[8]对攒尖四坡屋面的积雪分布进行了数值模拟,结果表明,风向角的改变使屋面某些区域出现侵蚀状态和沉积状态的相互转化,风速和坡度对屋面整体积雪量影响较大。周暄毅等^[9-10]利用屋面滑移雪荷载模拟方法,对我国几个代表性地区的屋面

滑移雪荷载进行模拟,提出我国南北地区滑移雪荷载系数的简化计算公式。聂少锋等^[11]对低矮双坡屋面房屋的屋面风压系数以及各屋面体型系数的变化规律进行了风洞试验和数值模拟研究,但未对低层屋面的积雪分布规律进行研究。已有相关研究对屋面形式复杂的低层建筑尤其是与农业息息相关的大棚类结构涉及较少。《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)^[12](以下简称“GB 50009”)和《农业温室结构荷载规范》(GB/T 51183-2016)^[13](以下简称“GB/T 51183”)提供的屋面积雪分布系数比较简单,未对屋面进行细致分区。因此,低层双齿大棚屋面积雪分布规律的预测成为亟待解决的问题。

本文以低层双齿大棚屋面的积雪分布为主要研究对象,在验证数值分析模型正确性的基础上,采用 Fluent 软件,选用 Mixture 多相流模型研究风速、风向角、屋面坡度比、双齿长宽比对该类结构屋面风致积雪分布的影响,旨在提高低层双齿大棚屋面建筑应对冬季雪灾的能力,并为低层双齿大棚屋面结构防灾设计提供依据。

1 多相流计算方法

屋面积雪分布问题是较复杂的多相流问题,因此,选择合适的多相流模型和颗粒沉积与侵蚀计算方法至关重要。

1.1 Mixture 多相流模型控制方程

在 Fluent 提供的多相流模型中,采用 Mixture 多相流模型,该模型计算成本低,稳定性和可靠性优于其他模型,且允许速度滑移和两相穿插^[14]。Mixture 模型控制方程由连续性方程、动量方程和雪相体积分方程组成。

(1) 连续性方程, 见式 (1),

$$\partial / \partial t(\rho_m) + \nabla(\rho_m v_m) = 0 \quad (1)$$

$$v_m = \sum_{k=1}^2 f_k \rho_k v_k / \rho_m \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 f_k \rho_k \quad (3)$$

式中, v_m 为平均质量速度; ρ_m 为空气相与雪相混合密度; $k=1$ 时表示空气相, $k=2$ 时表示雪相, f_k 为体积分, ρ_k 为密度, v_k 为速度。

(2) 动量方程, 见式 (4),

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m v_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = \\ -\nabla \cdot p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] \\ + \rho_m g + F + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, p 为流场压力; μ_m 为混合相动力粘度; F 为体积力; $v_{dr,k} = v_k - v_m$; g 为重力加速度。

(3) 雪相体积分数方程, 见式 (5),

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_s f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s f v_k) = \\ -\nabla \cdot (f \rho_s v_{dr,p}) + \sum_{q=1}^2 (m_{qp} - m_{pq}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, m_{qp} 是空气相向颗粒相转化的质量; m_{pq} 是颗粒相向空气相转化的质量。 ρ_s 为雪颗粒密度, f 为雪相体积分数, v_p 是空气相速度, v_m 为平均质量速度, $v_{dr,p} = v_p - v_m$ 。

1.2 积雪的侵蚀与沉积

积雪的侵蚀与沉积取决于雪颗粒的壁面摩擦速度 u^* 与阈值摩擦速度 u_t^* 。当 u^* 高于 u_t^* 时, 雪颗粒会在风力作用下离开积雪面, 表现为积雪侵蚀; 当 u^* 低于 u_t^* 时, 空气中的雪颗粒在积雪面堆积, 表现为积雪沉积。

侵蚀量 Q_{ero} 和沉积量 Q_{dep} ^[15] 分别见式(6)和(7):

$$Q_{ero} = A_{ero} (u_t^{*2} - u^{*2}) \quad (6)$$

$$Q_{dep} = \psi_s W_f (u^{*2} - u_t^{*2}) / u_t^{*2} \quad (7)$$

式中, A_{ero} 表示侵蚀系数, 取 7×10^{-4} ; W_f 表示雪颗粒沉降速度; ψ_s 表示雪的质量浓度, 由雪颗粒密度和雪相体积分数乘积得到; u^* 为雪颗粒的壁面摩擦速度, $u^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$, τ_0 为壁面剪切应力, ρ 为空气密度; u_t^* 为雪颗粒的阈值摩擦速度, 取 0.15m/s 。

积雪厚度见式 (8):

$$dh = Q_s dt / \rho_s R \quad (8)$$

$$Q_s = Q_{ero} + Q_{dep} \quad (9)$$

式中, ρ_s 为雪颗粒密度, 取 150kg/m^3 ; R 为颗粒堆积率, 取 0.62 。

2 低层双齿大棚结构及风雪两相流模型的建立与验证

建立低层双齿大棚结构及风雪两相流场模型, 并对其进行网格划分, 合理设置边界条件和分析参数, 并验证风雪两相流模型的正确性。

2.1 模型设计与网格划分

选用具有代表性的低层双齿大棚结构模型, 大

棚结构尺寸参考《种植塑料大棚工程技术规范》(GB/T 51057-2015)^[16]进行设计: 在大棚内部不设柱子的情况下大棚单齿跨度最大为 10m , 跨度超过 10m 的大棚内部必须设柱子; 最大长度不宜超过 80m , 否则会导致造价过高且农民劳动强度过大; 对于种植树木和具有观赏功能的大棚, 需要大棚有较高的高度, 一般为 $5\sim 10\text{m}$ 。最终设计模型长为 80m , 单齿宽度为 10m , 双齿宽度为 20m , 屋顶最大高度为 10m , 结构模型及尺寸见图 3, “GB/T 51183” 对多跨单坡屋面积雪分布系数的取值与屋面坡度有关, 根据双齿大棚屋面尺寸形式, 屋面坡度比取为 $1:2$ (屋面坡角 α 为 26.6°)。同时将屋面平均分为 $A1\sim B4$ 共 8 个区域, 屋面分区见图 4。

流场计算域长 \times 宽 \times 高分别为 $800\text{m} \times 120\text{m} \times 60\text{m}$ 。大棚结构处于计算域入口 $1/3$ 处, 计算域示意图见图 5。整个流域采用非结构化网格划分, 最小网格尺寸 0.02m , 增长因子 1.2 , 整个流域网格数量约 600 万, 网格划分见图 6。

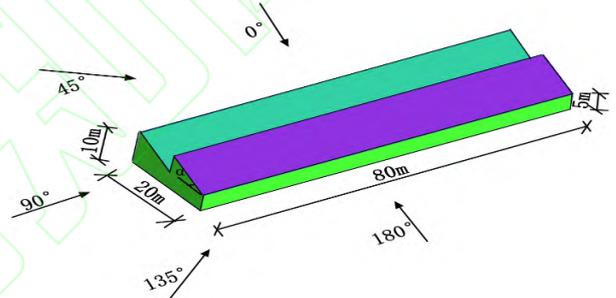


图3 低层双齿大棚结构模型及尺寸
Fig. 3 Model and dimensions of the low-rise double-tooth greenhouse roof

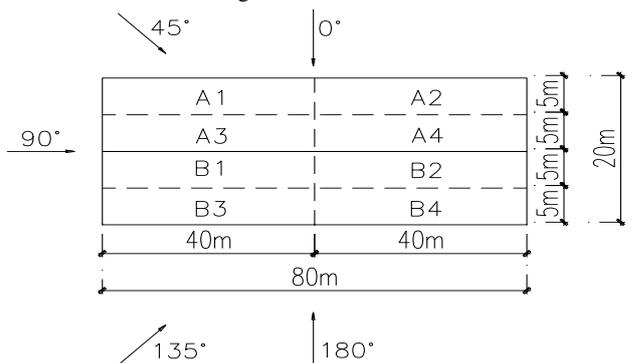


图4 屋面分区
Fig. 4 Definition of the roof zones

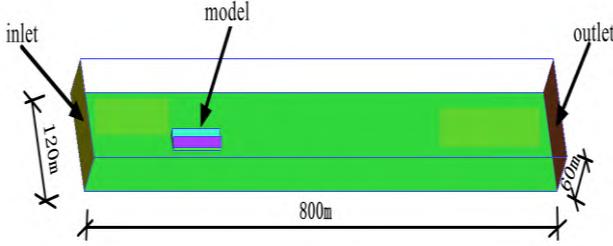


图5 计算域示意图

Fig. 5 Diagram of the computational domain

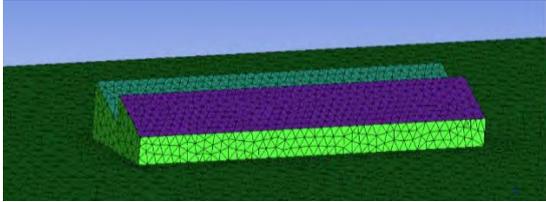


图6 模型网格划分

Fig. 6 Meshing of the model

2.2 边界条件

(1) 速度入口 (velocity inlet)

风速 $V(Z)$ 采用指数律风剖面, 见式 (10):

$$V(Z) = V_0 (Z/Z_0)^\alpha \quad (10)$$

式中, Z 为距地表高度; $V(Z)$ 为 Z 高度处风速; Z_0 为参考高度, 取 10m; V_0 为参考高度处风速; α 为地面粗糙度指数, B 类地貌时, $\alpha=0.15^{[12]}$ 。

湍流强度^[17] I 按式 (11) 计算,

$$I = \begin{cases} 0.23, & Z \leq Z_b \\ 0.1(Z/Z_G), & Z_b \leq Z \leq Z_G \end{cases} \quad (11)$$

式中, $Z_b=5m$; $Z_G=450m$ 。

湍动能 K 和耗散率 W 分别按式 (12) 和式 (13)

计算,

$$K = 1.5 [V(Z)I]^2 \quad (12)$$

$$W = K^{0.5} / 0.09^{0.25} L \quad (13)$$

式中, L 为湍流积分尺度, $Z \leq 30$ 时, $L=100$, $30 < Z \leq Z_G$ 时, $L=100(Z/30)^{0.5}$ 。

雪颗粒体积分数^[18] F 由式 (14) 计算,

$$F = \begin{cases} 0.8 \exp[-1.55(4.784u^* - 0.544 - Z^{-0.544})], & Z \leq h_s \\ 0.68u^*_i (u^*{}^2 - u^*{}_i{}^2) / U_p u^* g, & Z > h_s \end{cases} \quad (14)$$

式中, U_p 为雪相的运动速度; h_s 为跃移层的临界高度, $h_s=1.6u^*{}^2/2g$ 。

(2) 出口边界

选择完全发展的自由出口边界 (outflow)。

(3) 计算域顶面及两侧边界条件

计算域顶面及两侧边界选择指定剪切应力为零的自由滑移壁面边界 (symmetry)。地面以及建筑物壁面边界条件, 选择无滑移固体壁面边界 (wall)。

2.3 参数设置

雪颗粒粒径取 0.15mm, 下降速度为 2m/s, 密度为 150kg/m³, 雪面粗糙高度为 5×10⁻⁴m^[19]; 采用有限体积法对两相流控制方程求解, 离散格式为二阶迎风格式, 使用 coupled 算法求解压力-速度耦合方程, 收敛精度为 10⁻⁶。忽略积雪厚度变化对边界条件的影响^[14]。

2.4 数据处理

无量纲雪深 d 为实际雪深 d_1 和基本雪深 d_0 之比, 即:

$$d = d_1 / d_0 \quad (15)$$

为将数值分析结果与文献[20]试验结果进行对比分析, 取基本雪深 d_0 为 300mm。低层双齿大棚屋面风致积雪分布等值线亦即为无量纲雪深等值线。

屋面平均风致积雪分布系数 μ_r :

$$\mu_r = \sum \mu_i A_i / \sum A_i \quad (16)$$

式中, μ_i 为屋面 i 点的局部积雪分布系数, 由式 (15) 计算; A_i 为 i 点从属面积。

$$\mu_i = S / S_0 \quad (17)$$

式中, S 为雪压标准值; S_0 为基本雪压, 本文取黑龙江省哈尔滨市 50 年周期基本雪压 0.45kN/m², 积雪厚度为 300mm。

屋面积雪分布不均匀系数为各工况下屋面积雪分布系数 μ_r 的最大值, 最终得出低层双齿大棚屋面在各工况下的屋面积雪不均匀系数。

2.5 有限元模型验证

通过分析立方体周边的积雪分布情况, 并将分析结果与文献[20]的试验结果进行对比分析来验证数值分析方法的正确性。

建立立方体模型边长为 1m, 计算域为长×宽×高为 8m×10m×21m, 立方体模型位于计算域入口 1/3 处, 计算域及模型见图 7。采用非结构网格划分, 全局网格控制下的最小尺寸为 0.015m, 增长因子取 1.2, 由于 $k-w$ 湍流模型的拟合效果好于 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[5], 因此采用 $k-w$ 、 $SST k-w$ 和 $k-kl-w$ 湍流模型进行分析。立方体周边无量纲雪深数值分析结果与文献[15]试验结果对比分析见图 8。

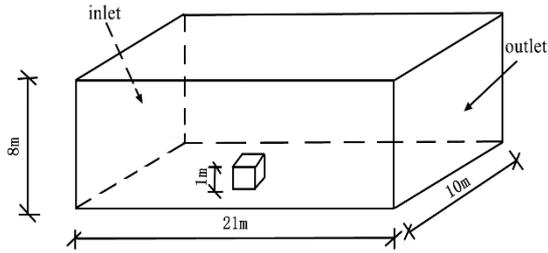


图7 计算域及模型示意图

Fig. 7 Diagram of calculation domain and model

由图8可知, 试验结果在立方体模型迎风区积雪侵蚀严重, 在距离立方体模型中心 $-0.9H$ 时, 积雪侵蚀量最大。原因是迎风面风压大, 形成较大涡旋, 积雪被风带走较多; 背风面为风吸力, 负压绝对值较小, 形成涡旋小, 风对积雪侵蚀少。立方体模型中心 $0.5H$ 到 $1.5H$ 范围内, 离背风面越远, 积雪被侵蚀量越大。在 $-0.9H$ 处, $k-w$ 模型、 $k-kl-w$ 模型、 $SST k-w$ 模型和试验结果的无量纲雪深分别是0.9、0.6、0.7和0.4。分析结果表明: 各湍流模型分析得到的屋面风致积雪分布系数与试验结果趋势相同, 但整体比试验值偏大, 导致与试验结果差异的原因可能是 *Mixture* 模型是简化的欧拉模型, 采用单相耦合假设, 忽略了雪颗粒对空气的作用。对比 $k-w$ 模型、 $k-kl-w$ 模型和 $SST k-w$ 模型, $k-kl-w$ 模型与试验结果最为接近, 吻合良好, 具有良好的计算精度, 可用于低层双齿大棚屋面的风致积雪分布研究。

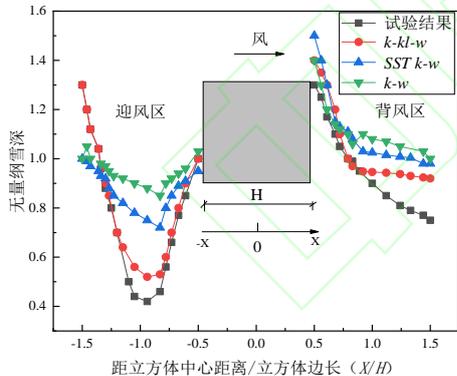


图8 数值分析结果与试验结果对比分析

Fig. 8 Comparison of the numerical results and test results

3 低层双齿大棚屋面风致积雪分布影响因素分析

分析不同风速、风向角、屋面坡度比和结构双齿长宽比对低层双齿大棚屋面风致积雪分布的影响。

3.1 风向角和风速的影响

风向角取为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° 五种,

风速分为 5m/s 、 9m/s 和 13m/s 三种。屋面坡度比为 $1:2$ 。不同风向角和风速下低层双齿大棚屋面风致积雪分布主要结果见图9。

由图9可知:

(1) 5m/s 风速工况下

0° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.92\sim 1.1$; A3和A4区域屋面积雪发生堆积, 屋面积雪分布系数为 1.1 ; B1和B2区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.92 。 45° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.89\sim 1$; A3和B1区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1 ; A4区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.89 。 90° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.93\sim 1.1$ 。A3和A4区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数最大值为 1.1 ; A1和B3区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.93 。 135° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.8\sim 1.1$; A3区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1.1 ; B3区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.8 。 180° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.71\sim 1.1$; A3和A4区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1.1 ; B4区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.71 。

(2) 9m/s 风速工况下

0° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.8\sim 1$; A3和A4区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1 ; A2区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.75 。 45° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.65\sim 0.95$; A3区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1 ; A2和A4区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.65 。 90° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.84\sim 0.95$, A3和A4区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.95 ; A1和B4区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.84 。 135° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.75\sim 0.96$; A3区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.96 ; B3区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.75 。 180° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为 $0.7\sim 0.98$; A3和A4区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.98 ; B1区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.7 。

(3) 13m/s 风速工况下

0° 风向角下, 屋面积雪分布系数等值线范围为

0.7~0.9; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.9; B1 和 B2 区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.7。**45°风向角下**, 屋面积雪分布系数等值线范围为 0.6~0.9; A3 区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.9; A2 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系

数为 0.6。**90°风向角下**, 屋面积雪分布系数等值线范围为 0.6~0.9; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 0.9; A1 和 B1 区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.7。**135°风向角下**, 屋

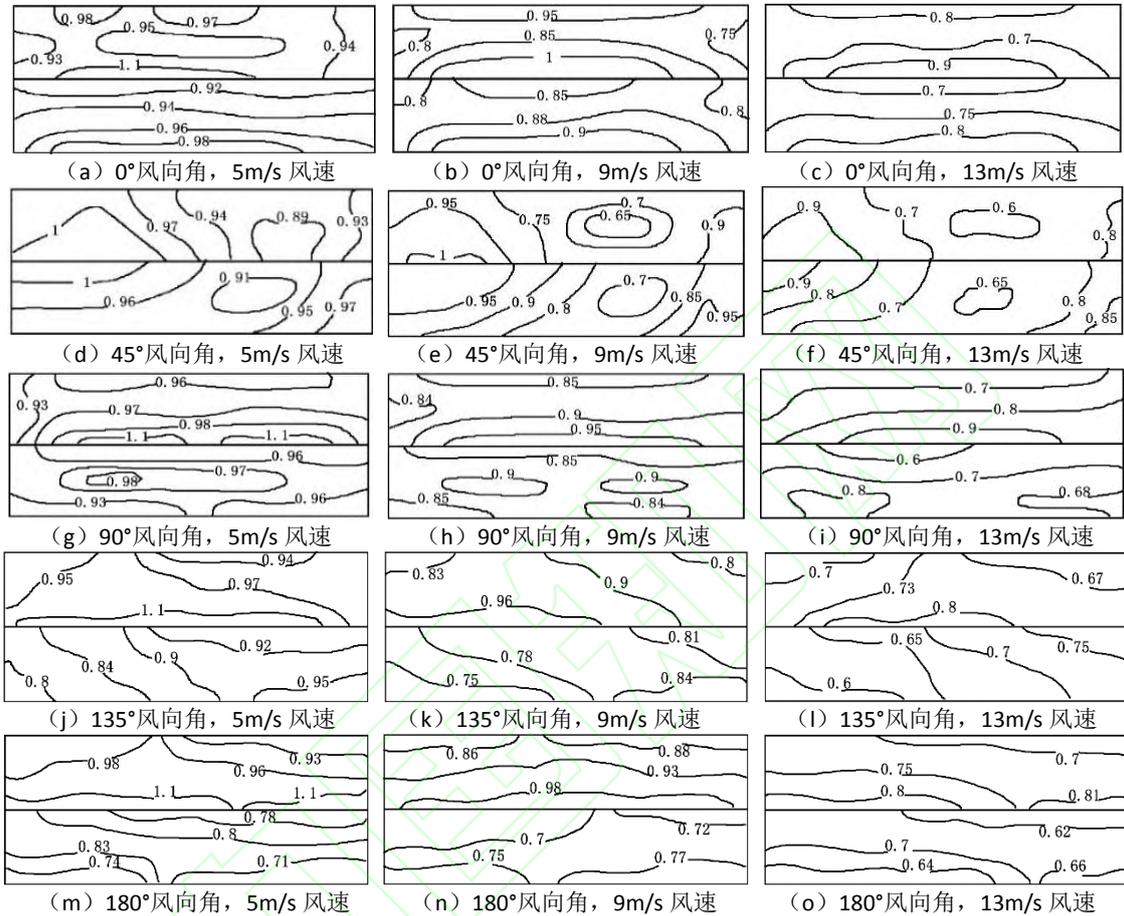


图 9 不同风向角和风速下屋面积雪分布系数等值线

Fig. 9 Snow distribution contours of roof under different wind direction and wind speed

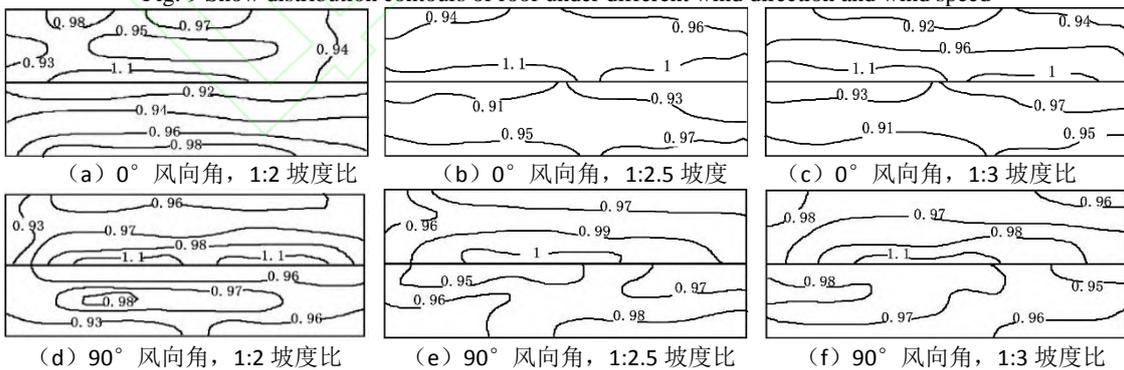
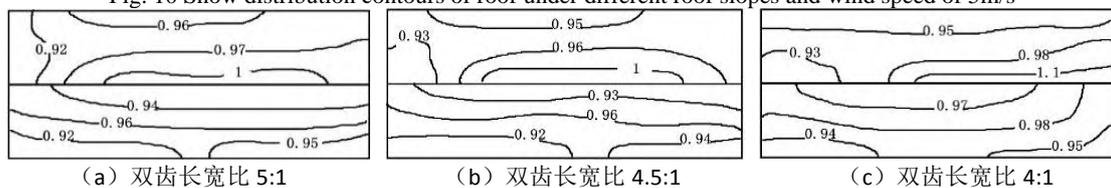


图 10 5m/s 风速, 不同屋面坡度比下屋面积雪分布系数等值线

Fig. 10 Snow distribution contours of roof under different roof slopes and wind speed of 5m/s



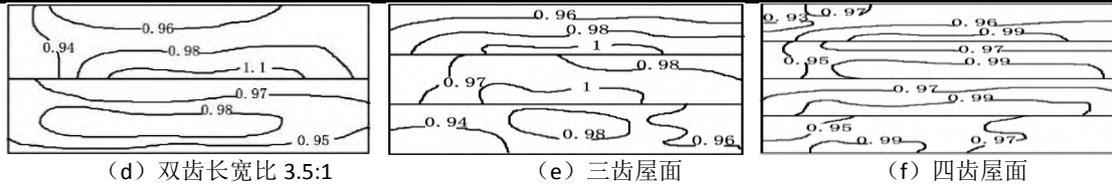


图 11 不同结构长宽比和组合形式下屋面积雪分布系数等值线

Fig. 11 Snow distribution contours of roof under different structural aspect ratio and combination

面积雪分布系数等值线范围为 0.6~0.8; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 0.8; B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.6。**180°风向角下**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.62~0.81; A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 0.81; B2 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.62。

综上所述可知:低层双齿大棚屋面靠近速度入口处积雪侵蚀量最大,两锯齿屋面的交界处积雪厚度最大且会发生积雪堆积,原因在于:两锯齿屋面交界处是低层双齿大棚屋面上的低凹区域,这种低凹区域可以减小风对积雪的裹挟作用,积雪在自身重力作用下堆积在此低凹区域。随着**风向角**的改变,低层双齿大棚屋面积雪受侵蚀程度最大和最小区域的位置发生了变化;随着**风速**的增大,低层双齿大棚屋面积雪受侵蚀程度增大。各风向角和风速工况下,低层双齿大棚屋面 A3 区域积雪被侵蚀量相对最小,屋面积雪分布系数较大,因此在工程设计时,对 A3 区域应引起重视。

3.2 屋面坡度比的影响

由低层双齿大棚的屋面坡度比一般小于 1:2,因此,屋面坡度比取为 1:2 (α 为 26.6°)、1:2.5 (α 为 21.8°) 和 1:3 (α 为 18.4°) 三种,风速取为 5m/s,风向角为 0° 和 90° 。不同屋面坡度比和风向角下屋面积雪分布系数等值线见图 10。

由图 10 可知:

(1) 0° 风向角工况下

屋面坡度比为 1:2 时,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.93~1.1; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1.1; A1 和 B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.93。**屋面坡度比为 1:2.5 时**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.91~1.1; A3 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1.1; B1 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.91。**屋面坡度比为 1:3 时**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.91~1.1; A3 区域屋面积雪堆积,屋面积雪分布系数为 1.1; B3 区域

屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.91。

(2) 90° 风向角工况下

屋面坡度比为 1:2 时,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.93~1.1; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1.1; B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.93。**屋面坡度比为 1:2.5 时**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.95~1; A3 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1; B1 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.95。**坡度比 1:3 工况下**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.95~1.1; A3 区域屋面积雪堆积,屋面积雪分布系数为 1.1; B2 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.95。

综上所述可知:随着坡度比的增大,低层双齿大棚屋面积雪受侵蚀程度减弱,但坡度比的改变对积雪受侵蚀程度的影响相比风速和风向角因素低。在各屋面坡度比的工况下,低层双齿大棚屋面 A3 区域积雪被侵蚀量相对最小。

3.3 几何尺寸的影响

双齿大棚结构长宽比取为: 3.5:1、4:1、4.5:1 和 5:1 四种,风速为 5m/s,风向角为 0° 。不同双齿大棚结构长宽比下屋面风致积雪分布系数等值线见图 11。

由图 11 可知:

双齿长宽比为 5:1 工况下,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.92~1; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数等值线为 1; A1 和 B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.92。**双齿长宽比为 4.5:1 工况下**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.92~1; A3 和 A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1; A1 和 B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.92。**双齿长宽比为 4:1 工况下**,屋面积雪分布系数等值线范围为 0.93~1.1; A4 区域屋面积雪被侵蚀最少,屋面积雪分布系数为 1.1; A1 和 B3 区域屋面积雪被侵蚀最多,屋面积雪分布系数为 0.93。**双齿长宽比为 3.5:1 工况下**,屋面积雪分布系数等值线范围

为 0.94~1.1; A4 区域屋面积雪被侵蚀最少, 屋面积雪分布系数为 1.1; A1 和 B3 区域屋面积雪被侵蚀最多, 屋面积雪分布系数为 0.94。

综上所述可知: 不同结构长宽比工况下, 大屋面风致积雪分布规律一致, 结构长宽比对屋面积雪分布的影响较小。

3.4 低层三齿和四齿大棚屋面积雪分布规律探究

在实际使用中, 可以通过增加锯齿数量对低层大棚屋面空间进行拓展, 使之成为低层三齿或四齿大棚屋面。风速为 5m/s, 风向角为 0°, 屋面坡度比为 1:2, 不同屋面组合下屋面积雪分布系数等值线见图 11 (e) 和 (f)。

由图 11 (e) 和 (f) 可知, 低层三齿大棚屋面积雪分布系数等值线范围在 0.94~1 之间, 低层四齿大棚屋面积雪分布系数等值线范围在 0.93~0.99 之间, 在各锯齿交界的低凹处, 积雪受侵蚀程度较小。三齿和四齿屋面的积雪分布系数比相同工况下双齿屋面的风致积雪分布系数有所减少, 但是差别不大。因此设计时, 对于低层三齿和四齿大棚屋面的积雪分布系数可以依据低层双齿大棚屋面积雪分布系数取值。

4 低层双齿大棚屋面风致积雪不均匀分布系数

因为 5m/s 低风速下, 屋面积雪分布系数等值线数值较大, 所以图 12 给出了 5m/s 风速不同风向角下低层双齿大棚屋面各分区风致积雪分布系数 μ_r 。取图 12 中低层双齿大棚屋面各分区屋面积雪分布系数 μ_r 的最大值得到低层双齿大棚屋面分区积雪不均匀分布系数建议值见表 1, 并与“GB 50009”^[12]和“GB/T 51183”^[13]中的多跨单坡屋面积雪不均匀分布情况与均匀分布情况下的积雪分布系数进行对比分析。

对比表 1 中“GB 50009”和“GB/T 51183”取值可知: 不均匀分布情况下, “GB/T 51183”在低层双齿大棚屋面各分区积雪不均匀分布系数的取值较大; 均匀分布情况下, “GB 50009”在低层双齿大棚屋面各分区积雪不均匀分布系数的取值较大。

由表 1 中的建议值可知: A3 和 A4 区域积雪不均匀分布系数最大, 分析原因为: A3 和 A4 区域处于低层双齿大棚屋面两锯齿之间的低凹区域, 在低凹区域内积雪受侵蚀程度低且易于堆积。A2 和 B2

区域积雪不均匀分布系数最小, 因为 A2 和 B2 区域处于低层双齿大棚屋面两锯齿的齿尖区域, 在齿尖区域内积雪受侵蚀程度更大且不易堆积。

对比建议值和规范取值可知: 均匀分布情况下, “GB 50009”和“GB/T 51183”取值未考虑风致雪漂移和局部堆雪及滑雪影响时, 对于 A3 和 A4 面, 取值不安全; 考虑风致雪漂移后, 不均匀分布情况下, “GB 50009”和“GB/T 51183”取值在 A1、A2、B1 和 B2 区域取值偏不安全, 而位于易于造成积雪堆积的低凹区域 A3 和 A4 面, 取值偏保守; B3 和 B4 区域“GB 50009”和“GB/T 51183”取值过于保守, 因为规范所规定情况是多跨屋面, 对于低层双齿大棚屋面这两块区域没有形成低凹区域。图 13 为低层双齿大棚屋面风致积雪不均匀分布系数最终建议取值。

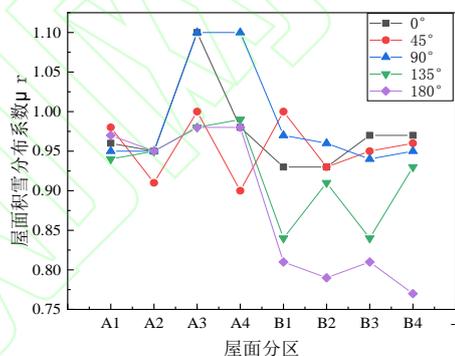


图 12 低风速 5m/s 工况屋面积雪分布
Fig.12 Snow distribution of house area under low wind speed of 5m/s

表 1 屋面分区积雪不均匀分布系数建议值
Table 1 Model number and calculation parameters

屋面分区	建议值	GB 50009		GB/T 51183	
		不均匀分布 I	均匀分布	不均匀分布	均匀分布
A1 和 A2	0.98	0.6	1	0.8	0.8
A3 和 A4	1.1	1.4	1	1.6	0.8
B1 和 B2	0.97	0.6	1	0.8	0.8
B3 和 B4	0.96	1.4	1	1.6	0.8

注: “GB 50009”规范值取屋面坡度角为 25°; “GB/T 51183”规范值取屋面坡度角为 30°

综上所述, 在低层双齿大棚屋面荷载设计时对 A3 和 A4 区域雪荷载取值应适当增大, 以确保低层双齿大棚屋面的安全性。

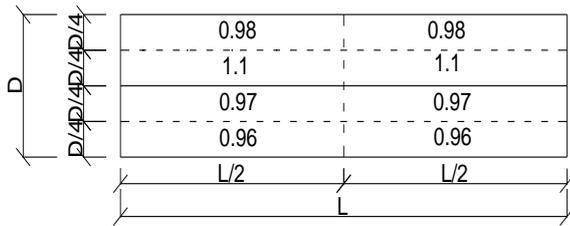


图 13 低层双齿大棚屋面积雪不均匀分布系数
Fig.13 Uneven distribution coefficient of snow area in large space low-rise double-tooth large shed

5 结论

通过对低层双齿大棚屋面风致积雪分布研究可得到以下结论:

(1) 使用 *Mixture* 多相流模型模拟立方体周边积雪分布情况, *k-w*、*k-kl-w* 和 *SST k-w* 湍流模型分析得到的屋面风致积雪分布系数与试验结果趋势相同, 但整体比试验值偏大。其中, *k-kl-w* 湍流模型模拟结果与试验结果更为吻合, 可用于大棚屋面风致积雪分布研究。

(2) 风速、风向角、坡度比和双齿长宽比的变化均会影响低层双齿大棚屋面风致积雪分布情况。低层双齿大棚屋面积雪厚度随着风速和屋面坡度比增大而减小, 但屋面坡度比的影响程度较风速与风向角的影响小; 大棚屋面积雪受侵蚀和堆积区域位置随风向角变化而变化; 低层双齿大棚结构长宽比对屋面积雪分布的影响较小, 可以忽略; 低层三齿大棚屋面和低层四齿大棚屋面的屋面积雪分布系数小于低层双齿大棚, 可参考低层双齿大棚屋面; 低层双齿大棚屋面上, 易于造成积雪堆积的低凹区域 A3 面在各工况下屋面积雪分布系数较大, 应当引起重视。

(3) 均匀分布情况下未考虑风致雪漂移和局部堆雪及滑雪影响, A3 和 A4 屋面积雪分布系数“GB 50009”和“GB/T 51183”规范取值不安全; 考虑风致雪漂移后, 不均匀分布情况下, “GB 50009”和“GB/T 51183”规范值在屋脊附近区域取值偏不安全, 位于易于造成积雪堆积的低凹区域 A3 和 A4 面, “GB 50009”和“GB/T 51183”规范取值偏保守。提出低层双齿大棚屋面风致积雪不均匀分布系数, 供工程设计和应用参考。

参考文献:

[1] ALHAJRAF S. Computational Fluid Dynamic Modeling of Drifting Particles at Porous Fences [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2): 163-170.
[2] 赵雷, 余志祥, 齐欣, 等. 低矮建筑屋盖风雪流作用场

地实测与数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(22): 225-231+244.

ZHAO Lei, YU Zhi-xiang, QI Xin, et al. Measurement and Numerical Simulation of Wind-snow Flow Action Site on Low Building Roof [J]. *Vibration and Shock*, 2017, 36(22): 225-231+244. (in Chinese)

[3] BEYERS J H M, HARMS T M. Outdoors Modelling of Snow Drifting at SANAE IV Researcher Station, Antarctica [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(4): 551-569.

[4] MICHAEL O, ATHUR D, JANINE D T. Snow Drifting Transport Rates from Water Flume Simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*, 2004, 92(14-15): 1245-1264.

[5] OZMEN Y, BAYDAR E, BEECH J P A J. Wind Flow over the Low-rise Building Models with Gabled Roofs Having Different Pitch Angles[J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 63-74.

[6] 王卫华, 廖海黎, 李明水. 风致屋面积雪分布风洞试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(5): 135-141.

WANG Wei-hua, LIAO Hai-li, LI Ming-shui, et al. Wind Tunnel Test Study on Snow Distribution of Wind-induced House Area[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(5): 135-141. (in Chinese)

[7] 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(04): 323-331.

SUN Xiao-ying, HONG Cai-bin, WU Yue, et al. Numerical Simulation Study of Wind-induced Snow Drift around Buildings[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(04): 323-331. (in Chinese)

[8] 颜卫亨, 姬明辉, 代鹏, 等. 攒尖四坡屋面风致雪漂移的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2020, 37(05): 585-595.

YAN Wei-heng, JI Ming-hui, DAI Peng, et al. Numerical Simulation of Wind-induced Snow Drift on Canjian Four-slope Roof [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(05): 585-595. (in Chinese)

[9] ZHOU X Y, ZHANG Y, KANG L Q, et al. CFD Simulation of Snow Redistribution on Gable Roofs-impact of Roof Slope. [J]*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 185: 16-32.

[10] 周暄毅, 张运清, 顾明, 等. 屋面滑落雪荷载的简化计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 1833-1839.

ZHOU Xuan-yi, ZHANG Yun-qing, GU Ming, et al.

- Simplified Calculation Method of Roof Sliding Snow Load[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 1833-1839. (in Chinese)
- [11] 聂少锋, 周绪红, 陶莹, 等. 平面 T 形低矮房屋风荷载特性风洞试验与数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(02): 31-40.
NIE Shao-feng, ZHOU Xu-hong, TAO Ying, et al. Wind Tunnel Test and Numerical Analysis of Wind Load Characteristics of Flat T-shaped Low-rise Buildings[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2016, 33(02): 31-40.
- [12] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009-2012, Building Structure Load Code[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [13] GB/T 51183-2016, 农业温室结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB/T 51183-2016, Load Specification for Agricultural Greenhouse Structure[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [14] ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 人民邮电出版社, 2014.
Detailed explanation of ANSYS ICEM CFD Engineering Examples[M]. People's Posts and Telecommunications Press, 2014. (in Chinese)
- [15] 李雪峰. 风致建筑屋盖表面及其周边积雪分布研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2011.
LI Xue-feng. Research on the Distribution of Snow on the Surface of Wind-induced Building Roofs and Surrounding Areas[D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [16] GB/T 51057-2015, 种植塑料大棚工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
GB/T 51057-2015, Standard for Wind Tunnel Test Method of Construction Engineering[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.
HUANG Ben-cai, WANG Cong-jun. Theory and Application against Wind Load of Structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008. (in Chinese)
- [18] POMEROY J W, MALE D H. Steady-state Suspension of Snow [J]. Journal of Hydrology, 1992, 136(92):275-301.
- [19] 张延年. 大跨度钢结构屋面风雪荷载[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhang Yan-nian. Wind and Snow Load on Long-span Steel Structure Roof [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 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.