

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220902002

不均匀积雪致大跨网架结构局部损伤分析*

刘 晖^{1,2}, 黄昌昊³, 吉柏锋^{1,2}

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学海南研究院, 海南 三亚 572025;
3. 中建三局工程设计有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 网架结构管球连接处局部损伤是此类结构的重要安全隐患。在风致雪漂移引起的不均匀积雪荷载作用下, 局部损伤会加剧, 最终导致结构局部破坏。因此很有必要分析不均匀积雪荷载作用下带伤服役网架结构局部损伤劣化情况。采用CFD数值模拟技术, 以一正放四角锥网架结构为研究背景, 分析了在90°风向角、12 m/s风速下, 持续降雪24 h中网架结构屋面不均匀积雪分布的变化情况, 并建立可表征网架结构管球连接处存在裂纹损伤的多尺度模型, 分析了网架结构节点存在不同裂纹尺寸局部损伤时, 不均匀积雪致网架结构局部损伤劣化程度。结果表明: 网架结构风致积雪不均匀程度非常显著, 而且当网架结构管球连接处存在局部裂纹损伤时, 在降雪中后期, 有管球连接损伤的节点大多都出现了不同程度的裂纹扩展, 节点为最不利分布的穿透型裂纹时, 裂纹扩展最大为15.64 mm。说明在持续特大降雪这种极端荷载作用下, 带伤服役网架结构局部损伤将进一步加剧, 危及结构使用安全。

关键词: 风致不均匀积雪; 大跨网架结构; 局部损伤; 结构多尺度模型

中图分类号: TU312.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0099-10

Local Damages of Long-span Grid Structure Caused by Uneven Snow Cover

LIU Hui^{1,2}, HUANG Changhao³, JI Baifeng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Hainan Institute of Wuhan University of Technology, Sanya 572025, China;
3. China Construction Third Bureau Engineering Design Co. Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Local damage of the pipe-ball joints in the grid structure poses a significant safety hazard. Such local damage will be aggravated under uneven snow cover caused by wind-induced snow drifting, eventually leading to partial structural failure. Therefore, it is necessary to analyze the degradation of the structure with local damage under the action of uneven snow load. The CFD numerical simulation technology is adopted to analyze the variation of uneven snow distribution on the roof of an orthogonal quadrangular grid structure under the continuous snowfall for 24 hours at the 90° wind direction and 12m/s wind speed. Then a multi-scale numerical model is established to characterize the crack damage at the pipe-ball joints of the grid structure, and the local damage deterioration degree of the grid structure caused by uneven snow cover is analyzed when there is local damage of different crack sizes at the joints of the grid structure. The results show that the uneven degree of the wind-induced snow cover on the grid structure is very significant, and when there are local crack damages at

* 收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2023-01-14

基金项目: 海南省自然科学基金(522CXTD517, 522MS096, 522RC879)资助

作者简介: 刘晖(1972—), 女, 教授, 博士。主要从事结构风工程和结构损伤识别研究。E-mail: drliuh@263.net

the pipe-ball joints of the grid structure, most of the joints with damage have different degrees of crack propagation in the middle and late stages of snowfall. The maximum crack propagation is 15.64 mm when the joint damage is the penetrating cracks with the most unfavorable distribution. It indicates that under the extreme load of continuous heavy snowfall, the local damages in the grid structure with existing cracks will be further aggravated, endangering the service safety of the structure.

Keywords: wind-induced uneven snow cover; long-span grid structure; local damages; multi-scale model of structure

0 引言

由于全球变暖,气候环境逐渐恶劣,使得暴风雪等极端灾害天气频发,导致大跨网架结构倒塌破坏事故时有发生。如:2010年,美国发生特大暴风雪,Minnesota Vikings 体育场的屋顶被积雪压塌;2007年,我国辽宁遭受了平均风力6~7级、阵风风力9~10级且积雪深度达38 cm的暴风雪袭击,造成沈阳建筑大学游泳馆网架结构垮塌、三菱联合厂房屋面网架结构破坏等严重事故^[1]。通过事故调查并对比建筑荷载规范发现^[2-4],结构倒塌的主要原因是风致雪漂移造成屋面积雪,局部沉积严重,甚至超过了规范的风荷载取值,导致结构由局部破坏逐渐发展为整体倒塌。而且网架结构在漫长服役过程中,由于材料老化以及服役环境复杂等因素不可避免地造成结构薄弱部位管球连接处易出现损伤,存在局部损伤的网架结构在极端降雪过程中会使损伤加剧,导致结构安全储备降低,使其更易发生局部破坏,进而引发整体倒塌。因此,分析网架结构存在管球连接局部损伤时,在极端降雪过程中局部损伤劣化程度,对保证结构服役安全十分必要。

针对风致雪漂移引起网架结构屋面雪荷载不均匀分布导致结构破坏事故时有发生,学者们首先在风致网架结构屋面不均匀积雪预测方面展开大量研究,多采用基于CFD技术的风吹雪数值模拟来预测积雪分布,方法集中于欧拉-欧拉方法^[5]与欧拉-拉格朗日方法^[6]。如:T.Sato等^[7]提出三维模拟方法模拟了防雪栏周边风致雪漂移。随后,学者们在获得大跨结构屋面不均匀积雪荷载基础上,研究了结构不均匀雪致响应,如:X.Y. Sun等^[8]模拟了大跨膜结构屋盖上的风致雪漂移,分析了不同风向下膜结构屋盖的积雪分布系数,研究发现相比均匀雪荷载作用,不均匀积雪荷载作用下大跨结构的应力及位移都明显增加,结构存在重大安全隐患。黄友

钦等^[9]分析了风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定性,研究表明不均匀积雪分布使单层柱面网壳更易出现动力失稳,以荷载规范中雪荷载标准值分析得到的结构动力稳定结论偏于不安全。由以上研究可看出,风致不均匀积雪会降低大跨结构服役的安全性。

如果当结构易损部位存在严重积雪沉积时,那么结构发生局部破坏甚至整体倒塌的可能性将大大增加。鉴于此,本文以在哈尔滨地区服役的某大跨平屋盖网架结构为研究对象,基于计算流体力学软件FLUENT,模拟大跨网架结构屋面的风致不均匀积雪分布,同时建立可表征网架结构存在管球连接局部损伤的多尺度模型,分析不均匀积雪荷载作用下有损伤网架结构的损伤加剧情况,为评估带伤服役网架结构在风致不均匀雪荷载作用下的安全提供科学依据。

1 屋面不均匀积雪分布模拟

1.1 网架结构模型

该平屋盖为125 m×85 m的正放四角锥网架结构,网架高度为30 m,网格尺寸为5 m×5 m,厚度为5 m。哈尔滨地区50年一遇的基本雪压 $S_0=0.45 \text{ kN/m}^2$ 。该地区降雪量等级高且持续时间长,当降雪量等级为中到大雪时,24 h屋面积雪深度可达30 cm^[10]。

采用FLUENT前处理网格划分软件建立网架结构模型。依据《建筑工程风洞试验方法标准》(JGJ/T 338—2014)^[11],计算域为 $31L \times 15L \times 10H$ (L 为模型最大尺度, H 为模型高度),在顺风向模型置于距入流面 $1/3$ 流域长度处,在横风向置于计算流域中点。采用混合网格离散,边界层最小网格尺寸为0.025 m,网格总数为280万,如图1所示。

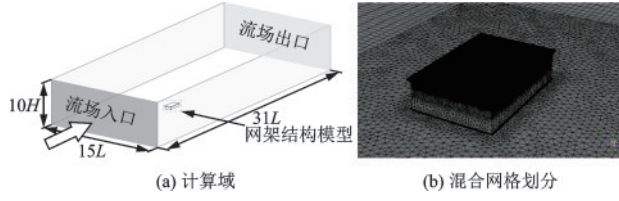


图1 计算域及网格划分

Fig.1 Computational domain and meshing

1.2 控制方程

风雪漂移为气固两相流问题, Mixture 模型不仅能考虑不同相之间的速度滑移、混合以及分离且具有良好的稳定性, 因此本文采用 Mixture 模型实现风致雪漂移的数值模拟。在 Mixture 模型中, 空气相和雪均采用基于质量守恒定律的连续性方程和基于牛顿第二运动定律的动量方程^[12]。

风场湍流模型采用 $k-k_l-\omega$ 模型^[13], 方程为:

$$\frac{Dk_T}{Dt} = P_{KT} + R + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_K} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = P_{KL} - R + R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{KT} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_\omega} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R + R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_\omega \alpha_T f_\omega^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\alpha_T}{\alpha_K} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

式中, k_T 、 k_L 和 ω 分别为湍动能、层流动能和比耗散率; P_{KT} 和 P_{KL} 分别为湍流和层流动能产生项; R 和 R_{NAT} 分别为层流到湍流内波动影响和自然转捩生成项; D_T 、 D_L 分别为近壁面湍流和层流耗散项; x_j 为坐标分量; v 为流体运动粘性系数; α_T 为湍流有效扩散系数; α_K 为计算系数, 文中 $\alpha_K = 1$; f_w 和 f_ω 分别为非粘性近壁面阻尼系数和边界层阻尼系数; d 为到物体表面最小距离; C_ω 为湍流粘性系数, 文中 $C_{\omega 1} = 0.44$, $C_{\omega 2} = 0.92$, $C_{\omega 3} = 0.3$, $C_{\omega R} = 1.5$ 。

1.3 积雪的侵蚀与沉积

积雪侵蚀或沉积通过壁面摩擦速度 μ_* 与壁面阈值速度 μ_{*t} 来判断, 其中 $\mu_{*t} = 0.15 \text{ m/s}$ ^[13], 当 $\mu_* > \mu_{*t}$ 时, 积雪为侵蚀状态; 当 $\mu_* < \mu_{*t}$ 时, 积雪为沉积状态。壁面摩擦速度 μ_* 为:

$$\mu_* = \frac{u(z) \cdot k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4)$$

式中, $u(z)$ 为近壁面风速; k 为 Karman 常数, 取 0.4; z_0 为雪面粗糙度, 取 0.0005 m; z 为近壁面网格中心到雪面高度。

积雪侵蚀量与沉积量分别为^[15]:

$$q_{\text{ero}} = A(\mu_*^2 - \mu_{*t}^2) \mu_* \geq \mu_{*t} \quad (5)$$

$$q_{\text{dep}} = \varphi \omega_f \frac{\mu_*^2 - \mu_{*t}^2}{\mu_{*t}^2} \mu_* < \mu_{*t} \quad (6)$$

式中, q_{ero} 、 q_{dep} 分别为单位时间内单位壁面面积上侵蚀进入流域或沉积雪的质量; A 为侵蚀常数, 取 7.0×10^{-4} ; ω_f 为雪颗粒下落速度, 取 0.2 m/s; $\varphi = f \cdot \rho_s$ 为近壁面雪质量浓度, f 为雪相体积分数, ρ_s 为积雪密度。

雪相入流边界分为跃移层和悬移层^[16]。跃移层雪相体积分数为:

$$f = \frac{0.68 \rho_a}{\mu_* g u_p h_s \rho_s} u_{*t} (\mu_*^2 - u_{*t}^2) \quad z \leq h_s \quad (7)$$

$$h_s = \frac{1.6 \mu_*^2}{2g} \quad (8)$$

式中, ρ_a 为空气密度; $u_p = 2.8 \mu_{*t}$ 为跃移层雪粒平均速度; h_s 为跃移层与悬移层的临界高度值。

悬移层雪相体积分数为:

$$f = \frac{0.8}{\rho_s} \exp\left[-1.55(4.78 \mu_*^{-0.544} - z^{-0.544})\right] \quad z > h_s \quad (9)$$

1.4 屋面不均匀积雪分布情况

本文以某次降雪时间为 24 h, 降雪量可达 30 cm 的中到大雪为荷载背景, 采用准动态模拟方法获得 24 h 降雪过程中网架结构屋面上的风致不均匀积雪分布变化情况^[17]。即将降雪过程划分时段, 分段模拟屋面上的风致雪漂移, 根据每段末积雪不均匀分布结果, 建立新的屋面几何边界条件, 并对新屋面进行网格更新, 直到 24 h 降雪停止。

对不同风向角、不同风速下屋面积雪分布分析发现: 90° 风向角、12 m/s 风速下积雪沉积现象最严重^[17]。在此荷载情况下, 24 h 降雪中的屋面积雪分布变化如图 2 所示, 图中 x_1 和 y_1 分别为结构的长度和宽度。

从图 2 可看出, 随着降雪的持续推进, 网架结构屋面积雪沉积最大值从降雪初 4 h 后的 1.06 逐渐增加至降雪 24 h 完成后的 1.33, 是建筑荷载规范给出的跨度大于 100 m 屋盖结构的积雪分布系数最大值为 1.2 的

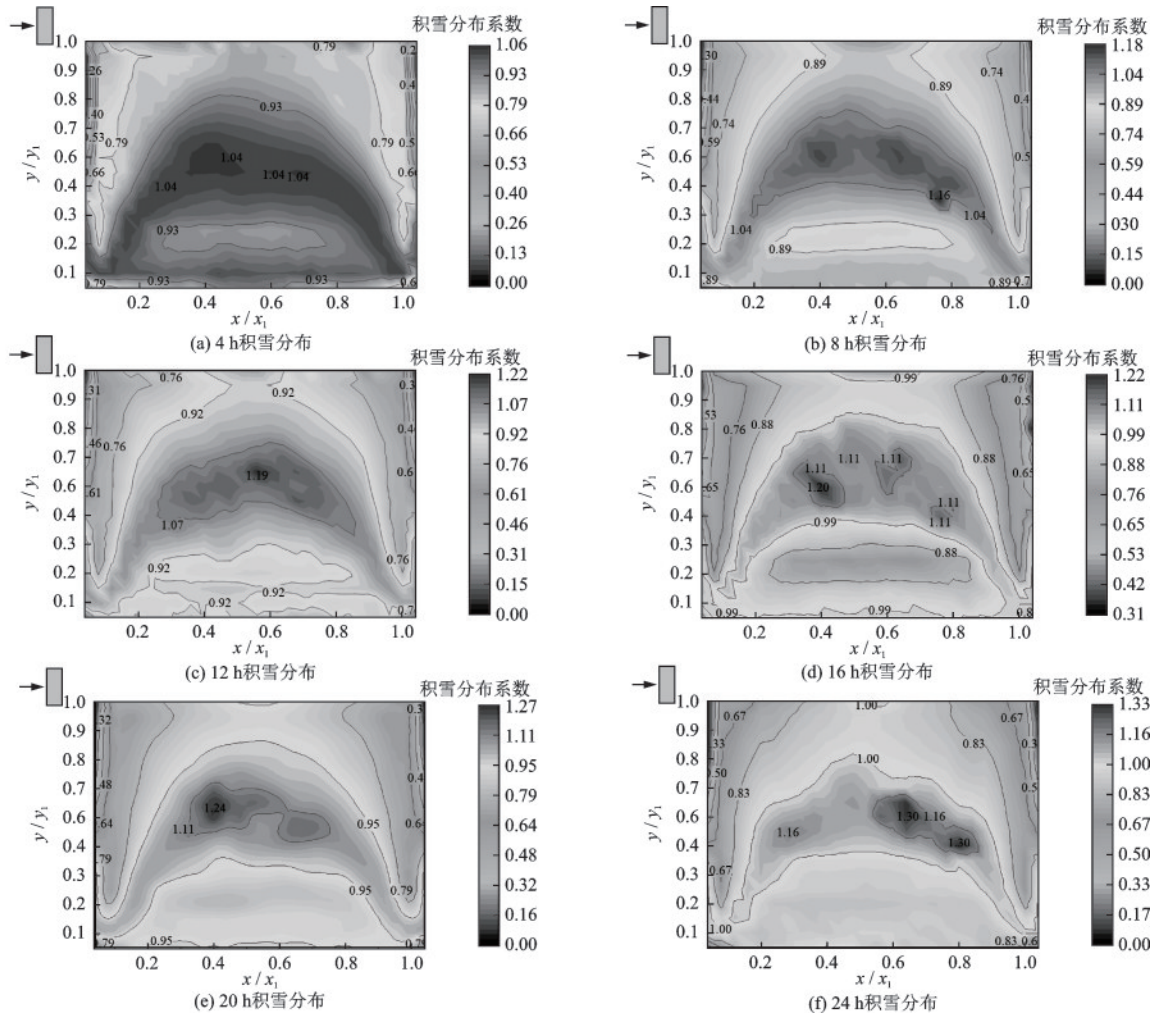


图2 24小时降雪中的屋面积雪分布变化

Fig.2 Changes in snow distribution on roofs during 24-hour snowfall

1.11倍。因此,在某些风雪耦合特定情况下,大跨网架结构屋面积雪沉积是相当严重的,采用规范给出的积雪分布系数对结构进行分析,可能偏于不安全。

2 有损伤网架结构多尺度模型

2.1 ANSYS与Franc3D的联合建模方法

网架结构管球连接处是局部损伤的易发位置,且局部损伤表现形式为裂纹,要对网架结构在一次降雪过程中局部损伤劣化情况进行分析,就必须建立能够表征裂纹损伤的网架结构多尺度模型。因此本文提出采用ANSYS与Franc3D联合建模的方式,先采用ANSYS建立网架结构球节点及其相连部分圆管精细化实体模型,再建立其余杆件梁单元模型,将两种模型界面进行连接,获得网架结构多尺度有限元模型,接着利用Franc3D建立裂纹模型,

最后将有限元模型与裂纹模型合并,建立可表征结构局部损伤的多尺度模型。这样就可根据ANSYS与Franc3D联合仿真模拟方法^[18],如图3所示,对网架结构在降雪过程中裂纹扩展情况进行分析。

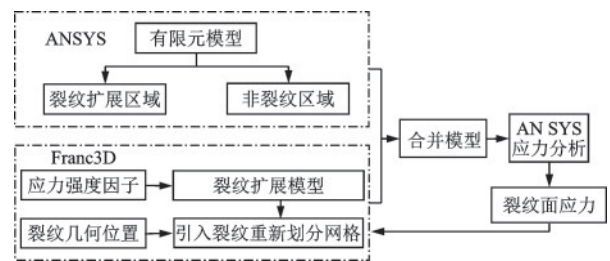


图3 ANSYS与Franc3D软件联合仿真模拟示意

Fig.3 Schematic diagram of simulation of combining ANSYS and Franc3D software

2.2 基于ANSYS的网架结构多尺度有限元模型

网架结构节点为WS4518焊接空心球,空心球

直径为 450 mm,壁厚为 18 mm;与空心球相连的圆管直径为 159 mm,壁厚为 6 mm,在管球连接处有尺寸为 7 mm 的焊脚。节点采用实体单元 solid186,焊脚区域附近采用 4 mm 的网格尺寸进行加密,其余网格尺寸均为 10 mm;杆件采用梁单元 beam188,材料为 Q345B,屈服强度为 $f_y=345 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3,共计 3 400 个单元;网架结构边界条件为四周铰接支撑,支座间距为 10 m。

采用 ANSYS 中的 CERIG 命令自动建立约束方程,将梁单元模型界面处主节点和圆管实体模型界面处从节点的自由度通过约束方程生成刚性面,建立网架结构多尺度有限元模型,如图 4 所示。

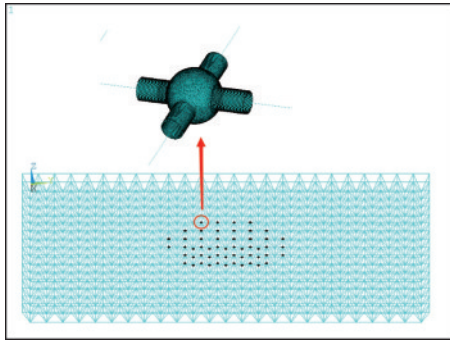


图 4 网架结构多尺度有限元模型

Fig.4 Multi-scale finite element model of grid structure

2.3 基于 Franc3D 的裂纹模型

先在 Franc3D 中将焊接球节点的圆管焊趾处进行剪切并存储为局部模型,如图 5 所示。

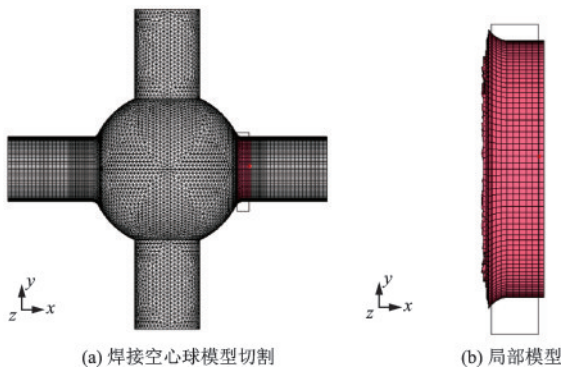


图 5 基于 Franc^{3D} 的局部模型提取

Fig.5 Local model extraction based on Franc^{3D}

然后在焊接空心球节点圆管焊趾处建立初始裂纹,裂纹附近重新划分网格,如图 6 所示,焊趾局部模型网格由原本的六面体网格变为四面体网格,同时对裂纹周边网格进行局部加密。最后,与有限

元模型合并,得到可表征管球连接处有裂纹局部损伤的多尺度模型。

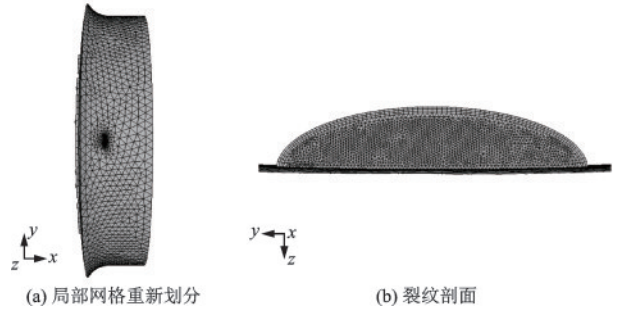


图 6 裂纹及其附近网格划分

Fig.6 Mesh of the cracks and adjacent structure

3 不均匀雪致结构局部损伤分析

3.1 杆件重要性判别

一般来说,结构存在局部损伤节点数不会超过节点总数的 10%,且属于小损伤情况,因此本文考虑 54 个节点管球连接处有初始裂纹损伤,占节点总数的 6%。为了获得有损伤节点的最不利分布,依据对结构杆件敏感性计算方法^[19],先确定网架结构重要杆件,进而确定重要节点。

杆件敏感性和重要性系数计算公式分别为:

$$S_{ij} = (\gamma_{ij} - \gamma_{j0}) / \gamma_{j0} \quad (10)$$

$$SI_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n S_{ij} / (n - 1) \quad (11)$$

式中, S_{ij} 为 j 杆件对 i 杆件失效的敏感性; SI_i 为 i 杆件重要性系数; γ_{j0} 为正常情况下 j 杆件响应参数; γ_{ij} 为 i 杆件失效后 j 杆件响应参数; n 为杆件数量。本文中杆件响应参数为杆件轴向应力。

通过对杆件重要性分析,网架结构重要杆件主要分布在结构中部,如图 7(a)所示,根据重要杆件确定 54 个重要节点,上、下弦分别为 39 个和 15 个,分布如图 7(b)所示。

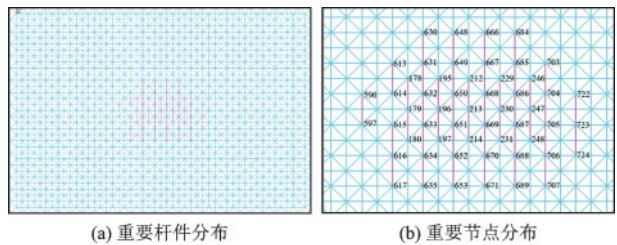


图 7 重要杆件及重要节点分布

图 7 重要杆件及重要节点分布

Fig.7 Distribution of important members and joints

3.2 分析工况

结构有损伤节点的最不利分布即为根据杆件重要性分析确定的重要节点出现损伤,再考虑一般情况的结构损伤节点均匀分布,如图8所示。

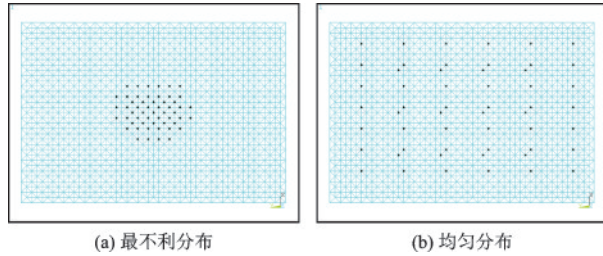


图8 损伤节点分布

Fig.8 Distribution of damage joints

损伤节点裂纹尺寸分别为:2.5 mm×1 mm的初始宏观裂纹、5 mm×2 mm的小型裂纹、10 mm×4 mm的中型裂纹以及20 mm×8 mm的穿透裂纹。裂纹形状为半椭圆型,2.5 mm×1 mm表示椭圆裂纹长轴半径2.5 mm,短轴半径1 mm。因此,分析工况共计8种,见表1。

表1 分析工况

Table 1 Working conditions in the analysis

工况	损伤节点分布	裂纹尺寸	备注
1	最不利分布	2.5 mm×1 mm	初始宏观裂纹
2	最不利分布	5 mm×2 mm	小型裂纹
3	最不利分布	10 mm×4 mm	中型裂纹
4	最不利分布	20 mm×8 mm	穿透裂纹
5	均匀分布	2.5 mm×1 mm	初始宏观裂纹
6	均匀分布	5 mm×2 mm	小型裂纹
7	均匀分布	10 mm×4 mm	中型裂纹
8	均匀分布	20 mm×8 mm	穿透裂纹

3.3 有损伤节点裂纹扩展分析

为了说明有损伤节点裂纹扩展分析过程,本文分别以受压应力最大节点651和受拉应力最大节点213为例,分析了这两个节点在24 h降雪过程中局部损伤加剧情况。

当651节点管球连接处存在2.5 mm×1 mm的半椭圆形初始裂纹时,降雪24 h后,裂纹处应力云图如图9所示。

从图9(a)可看出,裂纹尖端出现了明显裂纹扩展。从图9(b)可看出,裂纹尖端处多个单元应力达到了345 MPa的材料屈服强度,说明在这次降雪结

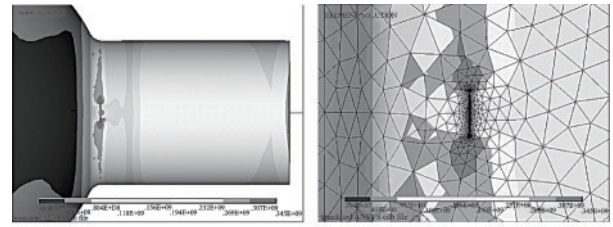


图9 651节点应力云图

Fig.9 Stress contour of joint 651

束后,存在初始宏观裂纹的651节点出现了局部损伤加剧状况。

从图10可看出,在本次降雪过程中节点651管球连接处裂纹长度从5 mm扩展至降雪结束后的8.35 mm,增加了67.07%。由此可见节点在不均匀雪荷载作用下裂纹附近发生了十分严重的压溃现象,损伤加剧状况明显。

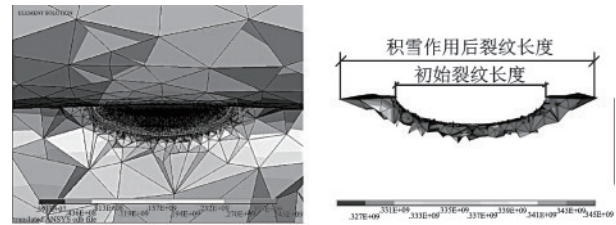


图10 651节点损伤加剧情况

Fig.10 The aggravation of damage at joint 651

节点651在24 h降雪过程中裂纹附近应力变化过程如图11所示。

由图11可看出,在降雪持续13 h后,裂纹前缘单元应力最先达到屈服强度,随着雪荷载继续增加,沿椭圆裂纹长轴方向持续有单元应力达到屈服强度,损伤情况不断加剧。裂纹长度随积雪荷载作用时间变化如图12所示。

由图12可看出,随着降雪时间推移,曲线斜率逐渐增大,损伤加剧情况愈发严重,直至24 h降雪结束后节点651的裂纹长度增加至8.35 mm。

受拉节点213裂纹扩展分析,采用M积分法计算裂纹尖端处应力强度因子,并通过静态裂纹扩展Irwin准则^[20]判断裂纹是否发生扩展。节点213裂纹处应力强度因子 K_I 最大值为 $7.52 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,小于材料断裂韧性 K_{Ic} 值 $59.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$;降雪24 h后,节点213裂纹附近的应力分布如图13所示。从图中可看出,裂纹前缘的最大应力值也没有达到屈服强度的345 MPa。

因此,在这次降雪过程中,节点213的裂纹不

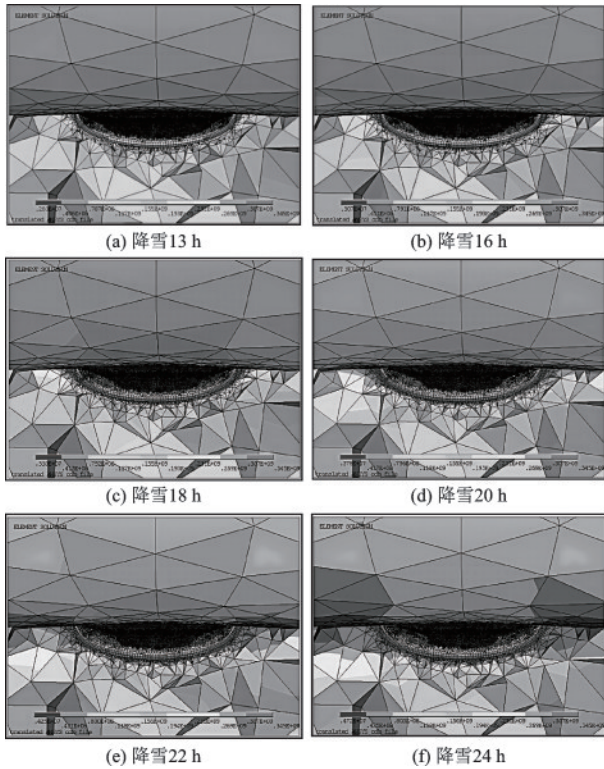


图 11 651 节点裂纹附近应力随降雪时间变化云图

Fig.11 Variation contour of stresses near crack at joint 651 with snowfall time

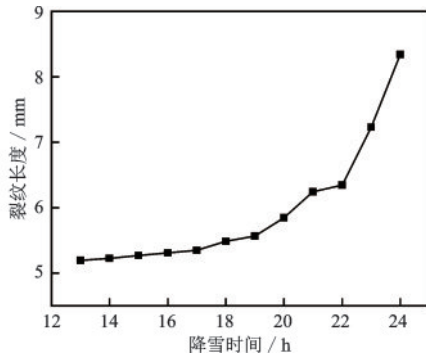
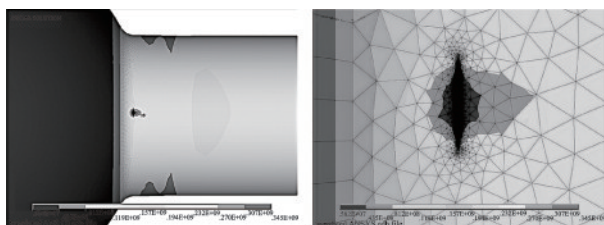


图 12 裂纹长度随降雪时间变化

Fig.12 Variation of crack length with snowfall time



(a) 管球连接处应力云图 (b) 裂纹区应力云图

图 13 213 节点应力云图

Fig.13 Stress contour of joint 213

会发生扩展。说明在积雪荷载作用下,该网架结构节点损伤以压溃为主,较少出现节点裂纹拉裂

损伤情况。

3.4 最不利分布工况的网架结构雪致损伤分析

在最不利工况下,最大压应力节点 651 的损伤加剧情况见表 2,裂纹长度随降雪时间增加情况,如图 14 所示。

表 2 最不利分布工况的损伤加剧情况

Table 2 Damage aggravation for the most unfavorable distribution conditions

工况	最大裂纹长度/mm	最大扩展长度/mm
1	8.35	3.35
2	15.93	5.93
3	29.06	9.06
4	55.64	15.64

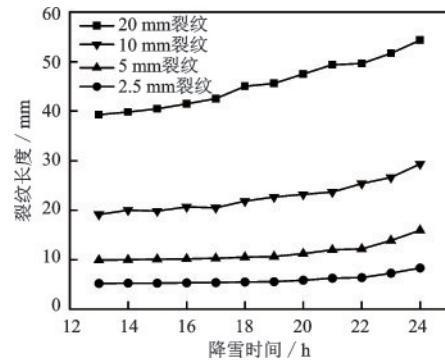


图 14 不同工况的 651 节点裂纹长度随时间变化

Fig.14 Variation of crack length with time at joint 651 under different working conditions

由表 2 和图 14 可看出,随着初始裂纹尺寸增大,在降雪过程中节点损伤程度愈发严重,裂纹扩展速率也越快。

其他各节点在本次降雪过程中的局部损伤分析过程与节点 651 类似,其中被分析的 54 个节点中有 39 个节点在此次降雪作用下发生了裂纹扩展,出现了局部损伤劣化情况。在最不利工况下,节点 651、685 和 617 是局部损伤劣化最为严重的三个节点,它们的裂纹长度随降雪时间变化情况如图 15 所示。

从图 15 可看出,无论是损伤为初始宏观裂纹还是损伤为穿透裂纹时,裂纹长度随降雪时间增加而显著增加。说明在这次降雪过程中,节点局部损伤劣化都有所加剧,这为结构埋下了重要安全隐患。

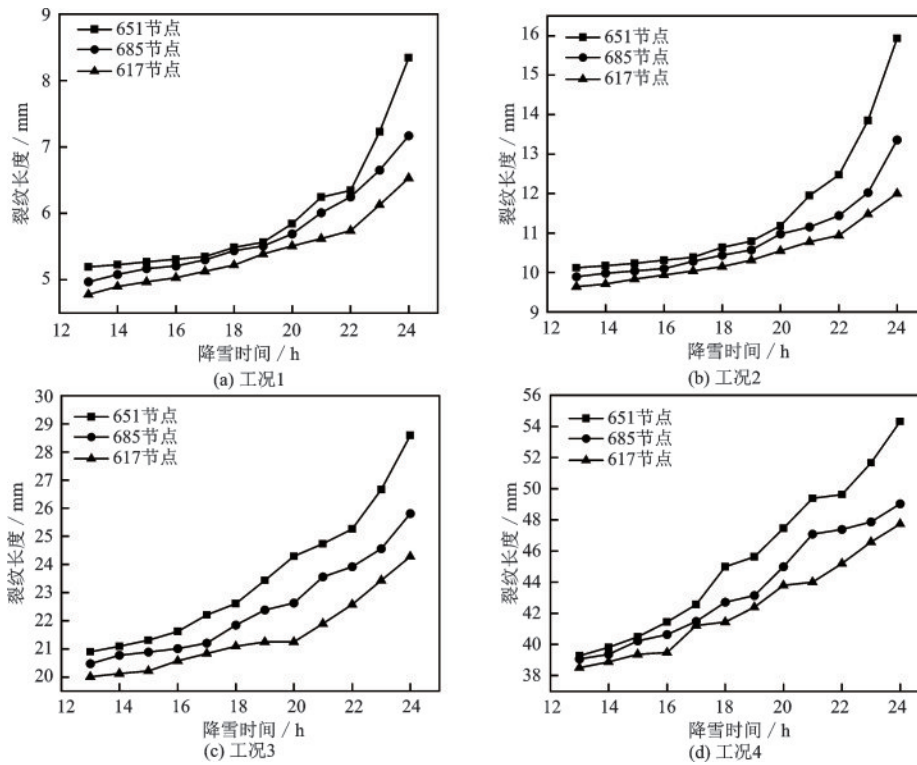


图 15 损伤劣化严重节点裂纹长度随降雪时间变化

Fig.15 Variation of the crack length of severe damage deterioration joints with snowfall time

3.5 均匀分布工况的网架结构雪致损伤分析

在此次降雪作用下,有损伤节点均匀分布时的节点局部损伤加剧分析结果见表 3。

表 3 均匀分布工况的损伤加剧情况

Table3 Damage aggravation for uniformly distributed working conditions

工况	损伤加剧节点数	最大裂纹扩展长度/mm
5	13	2.58
6	15	5.23
7	17	8.81
8	18	12.33

由表 3 可知,即使有损伤节点均匀分布时,在本次降雪作用下,节点也出现了不同程度的局部损伤劣化。当节点初始损伤程度越严重时,发生裂纹扩展的节点数越多,裂纹扩展程度也越大。发生局部损伤加剧节点分布如图 16 所示。

其中,紫色、紫色加橙色、再加红色和所有颜色分别为工况 5、工况 6、工况 7 和工况 8 的损伤加剧节点分布。从图 16 可看出,出现损伤加剧节点均集中在网架结构跨中区域。由于网架结构跨中区域积雪沉积现象最严重,因此跨中区域是平板网架结构

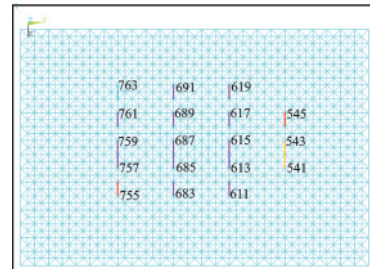


图 16 不同工况损伤加剧节点分布

Fig.16 Distribution of joints with damage aggravation under different working conditions

的薄弱部位。同时根据本文分析,大跨平板网架结构重要性杆件也位于跨中区域,故跨中区域是控制大跨平板网架结构雪致安全的关键部位。

3.6 有损伤网架结构的雪致工作状态分析

为了掌握这次降雪对结构整体工作状态的影响,还分析了降雪结束后网架结构杆件应力及挠度。

当结构完好时,网架架构最大挠度以及杆件等效应力最大值分别为 208.134 mm 以及 244.89 MPa。当结构存在局部损伤时,网架结构最大挠度以及杆件等效应力最大值结果见表 4。

由表 4 可看出,由于网架节点存在局部损伤,网

表4 不同工况的网架结构工作状态

Table4 Work status of grid structure under different working conditions

工况	最大挠度/ mm	相比完好 结构增加/%	等效应力 最大值/MPa	相比完好 结构增加%
1	208.207	0.035	257.89	5.31
2	208.269	0.065	258.76	5.66
3	208.407	0.131	261.20	6.66
4	208.585	0.217	264.58	8.04
5	208.163	0.014	249.32	1.81
6	208.187	0.025	250.13	2.14
7	208.239	0.050	251.61	2.74
8	208.313	0.086	253.58	3.55

架结构整体最大挠度值以及杆件最大等效应力值相比结构完好时都有所增加。又由于网架结构冗余度过高、超静定次数较多,因此增加幅度不大,结构仍然满足强度及变形要求。但是在本次降雪过程中,网架结构的局部损伤加剧情况严重,存在局部破坏的安全隐患。

4 结 论

本文先采用CFD数值模拟技术,获得某大跨平屋盖网架结构在持续降雪24 h中90°风向角、12 m/s风速下屋面的不均匀积雪荷载,再基于建立可表征网架结构管球连接处存在局部损伤的多尺度模型,分析了网架结构在不均匀积雪荷载作用下的局部损伤劣化程度,得到以下结论:

(1)在某些特定风雪耦合作用下,大跨平屋盖的风致积雪荷载不均匀性非常严重,大大超过了荷载规范规定的最大积雪分布系数,应在结构设计中予以重视。

(2)当网架结构节点存在初始裂纹损伤时,即使是小到初始宏观裂纹的损伤状况,在降雪量等级较大情况下,无论损伤节点是最不利分布还是均匀分布,在降雪中后期都出现了裂纹扩展的局部损伤加剧,如果降雪持续时间继续增加,网架结构有可能发生严重局部破坏。

(3)虽然有节点局部损伤网架结构在风致不均匀积雪荷载作用下的最大挠度值以及最大杆件等效应力值相较完好结构都增加不大,仍能满足强度及变形要求。但是在极端降雪过程中,加剧明显的局部损伤是带伤服役大跨网架结构的重大安全隐患。

参考文献:

- [1] 南波,武岳.工程雪灾害分析与加固研究[J].空间结构,2013,19(2):70-74.
Nan B, Wu Y. Analysis of engineering snow disaster and research on strengthening [J]. Spatial Structures, 2013,19(2):70-74. (in Chinese)
- [2] 刘艳艳,唐晓春,黄友钦.风雪灾害天气下的结构稳定研究进展[J].低温建筑技术,2014,36(9):52-54.
Liu Y Y, Tang X C, Huang Y Q. Advance in structural stability in the disaster climate of heavy snowstorm [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(9):52-54. (in Chinese)
- [3] 倪桂和.基于荷载规范的轻钢结构雪致破坏原因研究[D].广州:广州大学,2016.
Ni G H. Studies on snow-induced collapse of light-steel structure based on load codes [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016. (in Chinese)
- [4] 建筑结构设计荷载规范:GB 50009—2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5] 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.
Hong C B. Numerical simulation of snow drifting on typical form of long-span roofs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 周晖毅,刘长卿,顾明.拉格朗日方法在风雪运动模拟中的应用[J].工程力学,2015,32(1):36-42.
Zhou X Y, Liu C Q, Gu M. Application of lagrangian method to snowdrift model [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1):36-42. (in Chinese)
- [7] Sato T, Uematsu T, Nakata T, et al. Three dimensional numerical simulation of snowdrift [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46/47:741-746.
- [8] Sun X Y, He R J, Wu Y, et al. Numerical simulation of snowdrift on a membrane roof and the mechanical performance under snow loads [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018,150(6):15-24.
- [9] 黄友钦,顾明.风雪耦合作用下单层柱面网壳的动力稳定[J].工程力学,2011,28(11):210-217.
Huang Y Q, Gu M. Dynamic instability of single-layer reticulated cylindrical shell under coupled wind and snow loads [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 210-217. (in Chinese)
- [10] 曹冀鲁,任庆烽.降雪量与降雪深度[EB/OL]. [2010-01-19]. <http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/20120302/2012030205/201203020502/201203/t20120>

- 306_163750.html
- Cao J L, Ren Q F. Snow amount and depth[EB/OL]. [2010-01-19]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/20120302/2012030205/201203020502/201203/t20120306_163750.html(in Chinese)
- [11] 建筑工程风洞试验方法标准:JGJ/T 338—2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [12] 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
Sun X Y, Hong C B, Wu Y, et al. Numerical simulation of snow drifting around building model[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4):141-146. (in Chinese)
- [13] Walters K D, Cokljat D. A three-equation eddy-viscosity model for reynolds-averaged navier-stokes simulations of transitional flow[J]. Journal of Fluids Engineering: Transactions of the ASME, 2008, 130(12):121401.
- [14] Kind R J. Mechanics of aeolian transport of snow and sand[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1990, 36(1-3):855-866.
- [15] Naaim M, Naaim-Bouvet F, Martinez H. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models[J]. Annals of Glaciology, 1998, 26:191-196.
- [16] Pomeroy J W, Male D H. Steady-state suspension of snow[J]. Journal of Hydrology, 1992, 136(1-4):275-301.
- [17] 刘晖,黄昌昊,吉柏锋.风致不均匀积雪的大跨网架结构工作状态分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):102-110.
- Liu H, Huang C H, Ji B F. Working state analysis of long span structure considering wind-induced uneven snow cover[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3):102-110. (in Chinese)
- [18] 熊勋,杨莹,汪舟.基于FRANC3D和ABAQUS联合仿真三维疲劳裂纹扩展分析及寿命预测[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):506-512.
Xiong X, Yang Y, Wang Z. Three dimensional fatigue crack growth analysis and life prediction based on joint simulation of FRANC3D and ABAQUS[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(3):506-512. (in Chinese)
- [19] 蔡建国,王峰岚,韩运龙.大跨空间结构重要构件评估实用方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(3):7-11.
Cai J G, Wang F L, Han Y L. Practical method for the evaluation of important structural components of long-span space structures[J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2011, 38(3):7-11. (in Chinese)
- [20] Knowles J K, Sternberg E. On a class of conservation laws in linearized and finite electrostatics[J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1972, 44(3):187-211.

(本文编辑:张艺)