

文章编号: 1000-4750(2020)Suppl-0296-05

条形封闭网架煤棚风荷载分布规律试验研究

郑肖楠¹, 刘庆宽^{2,3}, 崔会敏^{3,4}, 郑云飞⁵

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学风工程研究中心, 石家庄 050043;

3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 石家庄 050043; 4. 石家庄铁道大学数理系, 石家庄 050043;

5. 石家庄铁路职业技术学院, 石家庄 050043)

摘 要: 大跨度煤棚结构作为风敏感结构, 在工程设计中应充分考虑风荷载的影响。该文以煤棚结构为研究对象, 对其刚性模型进行风洞试验研究。考虑分别在 0°、90°、180°和 270°风向角下, 煤棚两端弧面及天窗位置处风压分布情况, 进一步分析煤棚表面特殊形状位置处体型系数随风向角的变化规律。研究表明: 观察 0°、90°、180°和 270°风向角下各个测点的体型系数, 发现风向角为 90°时, 弧面底部位置处, 测点 A1(B1) 体型系数较大, 在煤棚设计与施工中应针对该测点附近区域进行加固。对比分析各风向角下, 天窗位置测点的体型系数, 90°风向角下体型系数绝对值较大, 认为此时风压较大, 应适当对其加固。

关键词: 风洞试验; 风荷载; 风向角; 大跨屋盖; 体型系数

中图分类号: TU356; TU312.1 文献标志码: A doi: [10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S056](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S056)

EXPERIMENTAL STUDY ON WIND LOAD DISTRIBUTION OF COAL SHED IN STRIP CLOSED COAL YARD

ZHENG Xiao-nan¹, LIU Qing-kuan^{2,3}, CUI Hui-min^{3,4}, ZHENG Yun-fei⁵

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

4. Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

5. Shijiazhuang Institute Of Railway Technology, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: As a wind-sensitive structure, the large-span coal shed structure should fully consider the influence of wind load in engineering design. The coal shed structure is taken as the research object, and the wind tunnel test is carried out on its rigid model. Considering the wind angles of 0°, 90°, 180° and 270° respectively, distributions of wind pressure are obtained at skylight position and the arc surface at the ends of coal shed. The variation of body shape coefficient with the wind direction angle is further studied at the special shape position of coal shed surface, and the body shape coefficient of each measuring point is obtained at 0°, 90°, 180° and 270° wind direction angles. It shows that the measuring point A1(B1) has a larger body shape coefficient at the bottom of the arc when the wind direction angle is 90°. In the design and construction of coal shed, the area near the measuring point should be reinforced. Comparative analysis is performed on the body shape coefficient of the measurement point at sunroof position under different wind directions, showing that the absolute value of the body shape coefficient under 90° wind direction is larger, and some reinforcement should be conducted in that case.

Key words: wind tunnel tests; wind load; angle of direction wind; large span roof; shape coefficient of building

收稿日期: 2019-04-30; 修改日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778381, 11802186); 河北省自然科学基金项目(E2018210044); 河北省高等学校高层次人才项目(GCC2014046); 河北省自然科学基金青年项目(E2018210113); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2019004)

通讯作者: 刘庆宽(1971—), 男, 河北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制研究 (E-mail: lqk@stdu.edu.cn).

作者简介: 郑肖楠(1996—), 女, 河北人, 硕士生, 主要从事桥梁风荷载、风致振动与控制研究 (E-mail: zheng_xiaonan_0211@163.com);

崔会敏(1987—), 女, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事高层建筑、大跨结构内流动与传热机理研究 (E-mail: huimincai@stdu.edu.cn);

郑云飞(1985—), 男, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事桥梁的风荷载、风致振动与控制研究 (E-mail: yunfeizheng@foxmail.com).

近年来土木工程的发展逐渐完善,工程师对于建筑结构在外形和功能上的要求日益复杂,外形要求新颖特别,功能上有空间大、用途广泛的要求。而体育馆、飞机场、煤棚等结构在这些方面的应用非常广泛^[1-3]。这类结构的屋盖具有质量轻、阻尼小、柔性大的特点,正是这些特点使其对风荷载极其敏感,所以设计此类结构时,风荷载往往作为其主要控制荷载之一^[4-6]。得到风荷载的主要方法有现场实测、风洞试验和理论研究(CFD数值建筑体型的发展^[7-9])。但由于《建筑结构荷载规范(GB 50009—2012)》^[10]中缺乏这类结构相应的设计数据,而目前较为可信的方法为风洞试验,因此,为了获得准确的风荷载数据,保证煤棚的设计安全,需要进行风洞试验获得模型表面风压系数和风荷载体型系数的分布情况。本文以条形封闭网架煤棚通过风洞试验的方法探究模型表面风荷载体型系数的分布情况。

1 试验概况

1.1 风洞介绍

本试验在石家庄铁道大学风工程研究中心STU-1风洞实验室低速试验段内进行。低速试验段宽4.4 m,高3.0 m,长24.0 m,最大风速大于30.0 m/s。

1.2 试验模型

试验模型采用刚性的ABS板制作。综合考虑试验断面的尺寸(宽4.4 m,高3.0 m)、模型风洞试验阻塞度的要求(宜小于5%)以及周边干扰建筑物的外形尺寸与位置,选定模型缩尺比为1:250。在模型表面502个位置布置了双面测点,测点总数为1004个。天窗、圆形底部及模型形状发生改变等处流动参数变化较剧烈,测点布置较密集;在圆形弧面位置处流动参数变化比较平缓,测点设置较稀疏。图1、图2分别为0°和270°风向角下煤棚及周边干扰建筑物的模型示意图。

1.3 试验工况

按照我国建筑结构荷载规范、煤棚所在地的地形地貌及待测建筑周边的建筑环境,确定地面粗糙度为B类。图3中模型测点均等间距对称分布。模型顺时针旋转360°,以10°为间隔,共测试了36个风向角下的工况,如图4所示。



图1 条形封闭网架煤棚模型

Fig. 1 Coal shed model of strip closed grid

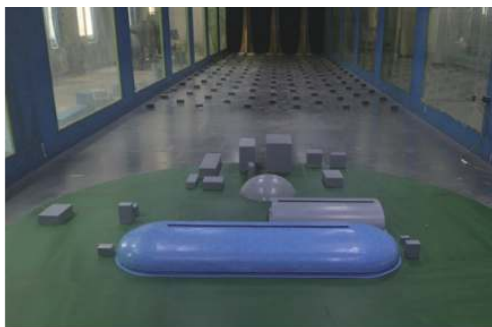


图2 模型及附近干扰俯视图

Fig. 2 Top view of model

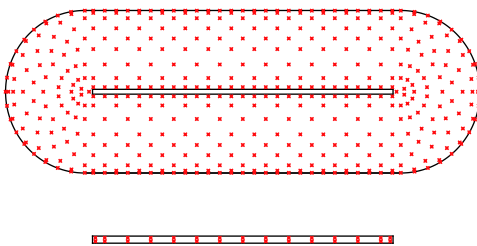


图3 模型测点布置图

Fig. 3 Layout of model measuring points

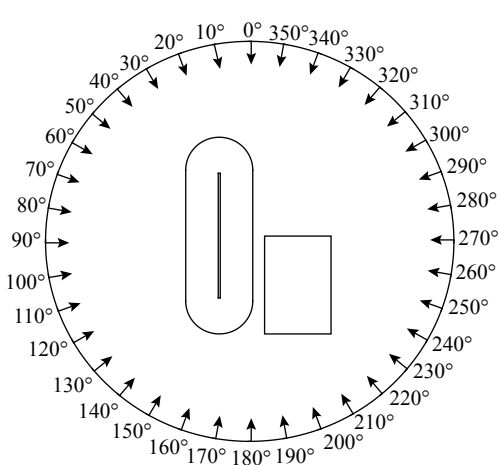


图4 模型摆放方位与试验风向角

Fig. 4 Model placement and test wind direction

2 试验数据处理及分析

2.1 用于主体结构设计的风荷载计算方法

取风洞测压试验来流风速为16 m/s,采样频

率为 330 Hz。采用无量纲系数表示风压:

$$C_{Pi,\theta} = \frac{P_{i,\theta} - \bar{P}_S}{\bar{P}_{t,h} - \bar{P}_S} = \frac{P_{i,\theta} - \bar{P}_S}{0.5\rho V_h^2} \quad (1)$$

式中: $C_{Pi,\theta}$ 为 i 点在 θ 风向角下的体型系数; $P_{i,\theta}$ 为 i 点在 θ 风向角下的压力; $\bar{P}_S$ 为参考点静压平均值; $\bar{P}_{t,h}$ 为参考高度 h 处总压; V_h 为参考高度 h 处的平均风速。为方便使用, 参考点高度 $h=10$ m; $\bar{C}_{Pi,\theta}$ 表示 $C_{Pi,\theta}$ 的均值, 称为平均风压系数。当单层结构需要上下表面或者内外表面同步测压时, 定义测点静压系数:

$$C_{Pni,\theta} = C_{Pei,\theta} - C_{Pii,\theta} \quad (2)$$

式中: $C_{Pni,\theta}$ 为 i 点位置在 θ 风向角下的风压系数; $C_{Pei,\theta}$ 和 $C_{Pii,\theta}$ 为 i 点位置对应在 θ 风向角下的外部测点和内部测点的风压系数。

体型系数可由测点的平均风压系数计算得到:

$$\mu_{i,\theta} = \frac{\bar{C}_{Pi,\theta}}{(Z_i/h)^{2\alpha}} \quad (3)$$

式中: $\mu_{i,\theta}(\mu_{ni,\theta})$ 均为测点 i 处的体型系数; Z_i 为测点 i 所处高度; α 为地貌粗糙度指数, 取 $\alpha=0.15$ 。

2.2 选取研究测点

由于各个风向角下圆形煤棚底部体型系数最大, 半圆柱形煤棚弧形顶端位置处有最大吸力, 故在对称等高位置处选取测点 A1~A7、B1~B7 (见图 5)。如图 6 所示, 煤棚边缘随风向角最大风压区域发生改变, 即分别在 0° 、 30° 、 60° 和 90° 风向角下观测其整体风荷载体型系数的分布情况。由于煤棚维护结构天窗位置处, 在天窗位置选取测点 C1~C7, 天窗附近选取测点 D1~D7。分别在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 风向角下观察测点位置处风荷载体型系数的变化。

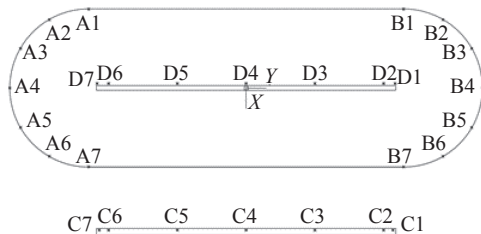


图 5 测点位置分布图

Fig. 5 Location distribution map of measuring points

2.3 体型系数随风向角变化规律

首先分别对测点 A1~A7 与测点 B1~B7 在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 风向角下的体型系数的数值变化

规律进行分析。对比图 7、图 8 可知, 测点 A1~A7 和测点 B1~B7 为对称等高的测点, 当来流风沿 y 轴负方向吹向煤棚时 (即 0° 风向角), 测点 B1~B7 受到正向压力, 测点 A 体型系数分布均匀、无明显突变, 测点 B1~B7 的体型系数对称分布, 体型系数在测点 B3、B4、B5 处达到最大值, 测点整体趋势与 180° 风向角下测点 A1~A7 呈中心对称; 来流风沿 y 轴正方向吹向煤棚 (即 180° 风向角), 测点 A1~A7 受正压, 测点风压分布均匀且体型系数绝对值较小, 与 0° 风向角下测点 B1~B7 体型系数分布规律相似, 测点 A1~A7 大致呈对称形式, 先上升后下降, 测点 A3、A4、A5 的体型系数达到最大值。

当风向与 x 轴正方向相同 (90° 风向角), 测点 A1、B1 为迎风状态, 体型系数达到 1.50, 由于两端面形状为弧形, 来流风在测点 A4、B4 处发生气动分离, 此时该点处存在最大风吸力; 当来流风

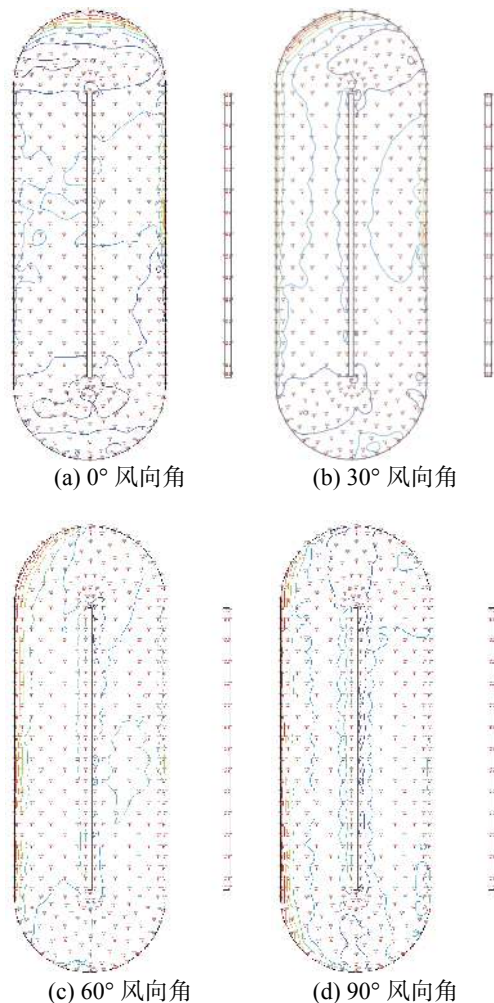


图 6 各风向角下风荷载体型系数分布云图

Fig. 6 Wind load shape coefficient distributions under various wind direction angles

沿 x 轴负方向吹向煤棚 (270°方向角下), 由于测点 A 端有建筑物遮挡, 测点 A1~A7、B1~B7 体型系数并未呈现对称分布, 在测点 B7 体型系数最大, 为 1.18。

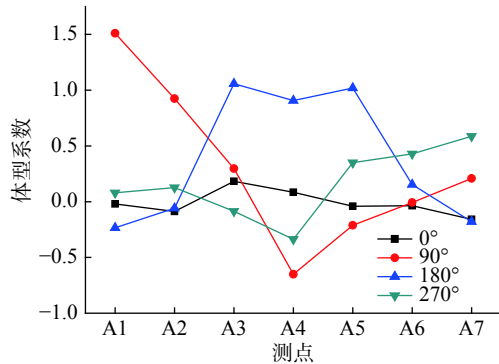


图 7 测点 A1~A7 体型系数随风向角变化图
Fig. 7 Variation of body shape coefficient of measurement points A1~A7 with wind direction

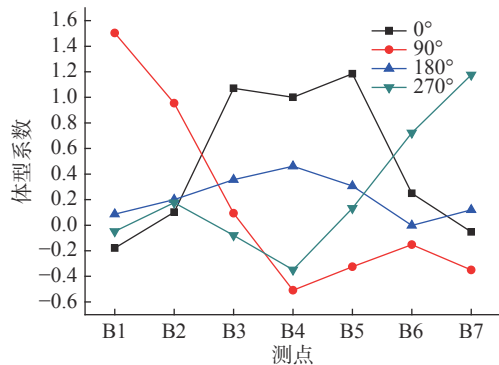


图 8 测点 B1~B7 体型系数随风向角变化图
Fig. 8 Variation of the shape coefficient of measurement points B1~B7

对比图 9、图 10, 0°风向角下, 由于部分气流通过天窗流向煤棚内部, 分流作用天窗位置风压较小, 体型系数绝对值较小, 且与屋盖顶部体型系数分布形式不同; 90°风向角下, 天窗位置处体型系数整体风压表现为最大吸力, 体型系数绝对值均在 1.5~2.0 范围内, 应考虑该风向角下的风荷载为控制荷载; 风向角为 180°时, 测点 C1~C7 与 0°风向角下体型系数的变化大致对称, 测点 D1~D7 规律相似, 故不再赘述; 270°风向角下, 测点 C1~C7 体型系数绝对值逐渐减小, D1~D7 体型系数变化曲线的整体趋势为先上升后下降再趋于稳定, 由于 C4~C7(D4~D7) 前方的遮挡物对来流风起到分散、缓冲的作用, 其体型系数的绝对值小于测点 C1~C3(D1~D3) 体型系数的绝对值大小。

图 11 为测点 A1~A7(B1~B7) 迎风状态下体型系数的变化情况, 测点对称位置的体型系数由于

受到附近建筑物干扰, 在测点 A4(B4) 处体型系数差值最大 (图 12), 即附近干扰建筑影响最剧烈; 90°和 270°风向角下, 测点 A1~A4(B1~B4) 体型系数拟合较好, 测点 A5~A7 体型系数绝对值略低于测点 B5~B7 的体型系数绝对值。图 13、图 14 所示, 对称风向角下测点 A、B 所测体型系数大致相同, 只有风向角为 270°时体型系数受到干扰建筑物的影响差异较大。

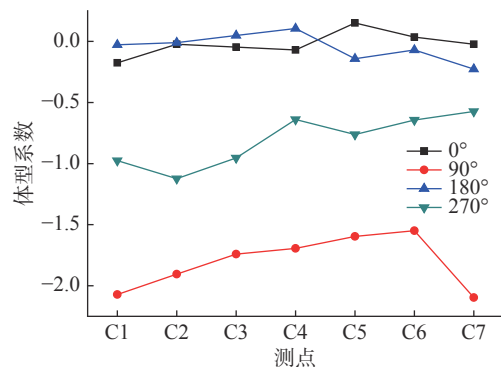


图 9 天窗位置处体型系数随风向角变化图
Fig. 9 Variation of the shape coefficient at the skylight with wind direction

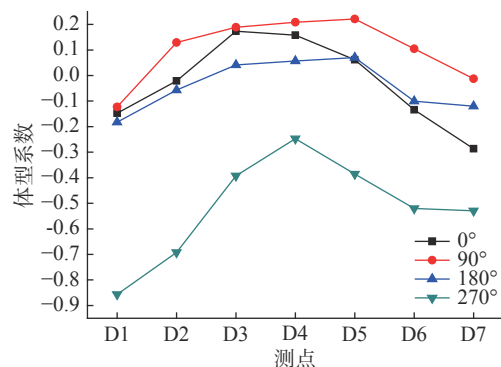


图 10 屋盖顶部体型系数随风向角变化图
Fig. 10 Variation of the shape coefficient of roof top with wind direction

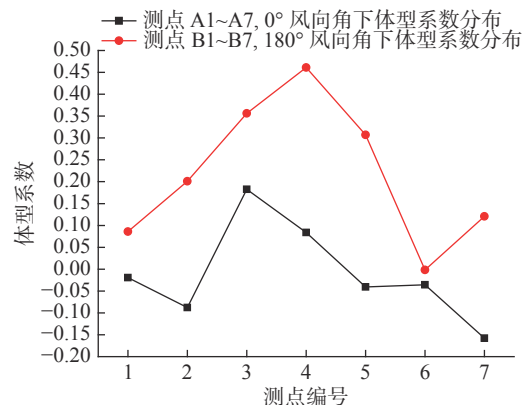


图 11 测点 A(B) 在有建筑物干扰下体型系数分布
Fig. 11 Size coefficient distribution at measurement point A(B) with or without interference of buildings

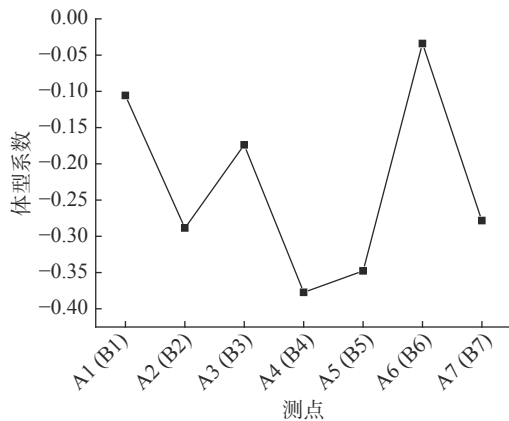


图 12 测点 A(B) 体型系数差值变化图

Fig. 12 Variation of the shape coefficient difference at measurement point A(B)

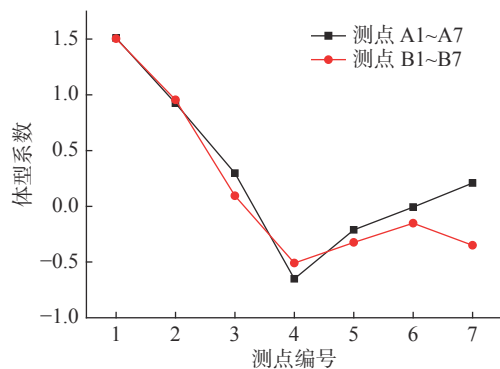


图 13 90°风向角下体型系数分布

Fig. 13 Shape coefficient distribution under 90° wind direction

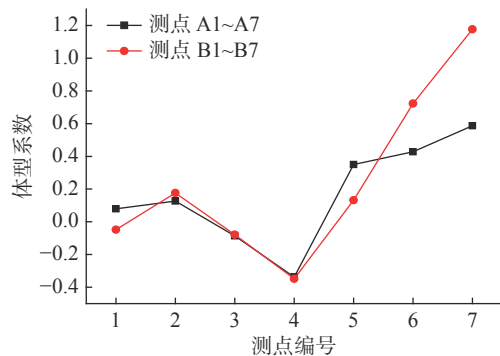


图 14 270°风向角下体型系数分布

Fig. 14 Shape coefficient distribution under 270° wind direction

3 结论

通过对观察测点的体型系数得出如下结论:

(1) 模型两端圆形弧面底部位置处, 风向角为 90°时测点 A1(B1) 体型系数较大, 为圆弧形底部最不利点, 在建设煤棚时对不利点进行加固;

(2) 90°风向角下, 天窗位置附近流场变化剧烈, 天窗位置处测点体型系数较大, 为 2.09, 天窗附近测点体型系数变化幅度较大, 因此设计屋

盖表面天窗及附近位置应考虑加固以提高其抗风承载能力;

(3) 风向角为 270°时, 对称位置处测点的体型系数有明显差异, 总体来说干扰建筑对煤棚的影响较小。

参考文献:

- [1] 罗楠, 廖海黎, 李明水. 大跨屋盖结构共振响应的简化 CQC 法[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(6): 915 — 921. Luo Nan, Liao Haili, Li Mingshui. Simplified CQC method for resonant response of long-span roof structure [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 915 — 921. (in Chinese)
- [2] 黄鹏, 蔡玲, 全涌, 等. 基于实测的低矮房屋屋面风压极值计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 247 — 253. Huang Peng, Cai Ling, Quan Yong, et al. Peak pressure estimation method of wind loads on low-rise building based on field measurement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 247 — 253. (in Chinese)
- [3] Uematsu Y, Watanabe K, Sasaki A, et al. Wind induced dynamic response and resultant load estimation of a circular flat roof [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 83(3): 251 — 261.
- [4] Holmes J D. Wind loading of structures [M]. 2nd ed. Oxon: Taylor & Francis, 2007: 27—28.
- [5] 张相庭. 结构风工程: 理论, 规范, 实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 1—2. Zhang Xiangting. Wind engineering of structures: theory, code, practice [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 1—2. (in Chinese)
- [6] Yang Qingshan, Tian Yuji. A model of probability density function of non-Gaussian wind pressure with multiple sample [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2015, 140(11): 67 — 68.
- [7] 齐月芹, 张婷, 徐步青. 基于风洞试验成果的大跨度网壳结构优化[J]. 空间结构, 2011, 17(2): 30 — 34. Qi Yueqin, Zhang Ting, Xu Buqing. Optimization of large-span latticed shell based on wind tunnel test results [J]. Spatial Structures, 2011, 17(2): 30 — 34. (in Chinese)
- [8] 黄鹏, 兰志昆, 顾明. 干煤棚柱面网壳结构多参数风荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 92 — 98. Huang Peng, Lan Zhikun, Gu Ming. Multi-parameter experimental research of wind loads on cylindrical reticulated shell structures of dry-coal sheds [J]. Building Structure, 2015, 45(17): 92 — 98. (in Chinese)
- [9] 马文勇, 刘庆宽, 肖彬, 等. 三心圆柱面网壳结构风荷载分布规律[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 166 — 170. Ma Wenyong, Liu Qingkuan, Xiao Bin, et al. Wind pressure distribution on three centered cylindrical latticed shell [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 166 — 170. (in Chinese)
- [10] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. GB50009—2012, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)