

小长跨比柱面煤棚风荷载特性试验研究

张 渊¹, 高佳文², 吴晓龙¹, 刘小兵²

(1. 北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:以某实际工程柱面煤棚(长跨比为 5/6)为对象,通过刚性模型测压风洞试验的方法研究了小长跨比柱面煤棚的风荷载特性。分析了风荷载体型系数和整体力系数随风向角的分布规律,讨论了表面脉动风压的非高斯特性,在此基础上明确了极值风压系数的分布规律。结果表明,当来流风与跨向呈 45°角时,煤棚跨向受力最大;当来流风垂直跨向时,煤棚受到的竖向吸力最大;煤棚在角部区域的极值风压最大,进行围护结构设计时应注意提高角部区域的抗风性能。

关键词:柱面煤棚;风荷载;体型系数;整体力系数;极值风压系数;风洞试验

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0023-07

随着中国电力事业的迅速发展,柱面煤棚的建设也得到了很大的发展^[1]。柱面煤棚跨度大,净空高,结构轻柔,对风荷载较为敏感^[2],因此在其结构设计中,风荷载成为主要控制荷载之一^[3]。

黄鹏等^[4]对长跨比为 3.5、5.2 和 7 的柱面煤棚的风荷载进行了模型风洞试验研究,结果表明长跨比对柱面煤棚风荷载分布的影响较小。于敬海等^[5]通过数值模拟的方法研究了长跨比对柱面结构风荷载体型系数的影响,选取的长跨比分别为 3/2、6/5 和 1,结果表明背风侧所受风压随着长跨比的增大而逐渐减小。陈琳琳等^[6]对长跨比为 2.3 的柱面煤棚进行了试验研究,分析了风向角、煤堆及周边建筑对结构风荷载的影响规律。钟奇等^[7]对长跨比为 2.5 的大跨度柱面煤棚风荷载特性进行了研究,结果表明斜风向作用下煤棚的风荷载较大。吴迪等^[8]对长跨比为 1 的柱面煤棚的极值风压概率分布进行了研究,结果表明柱面煤棚左右两侧与来流约 30°轴线上,极值负压的离散性最大。李玉学等^[9-10]对长跨比为 3.06 的柱面煤棚的风荷载特性进行了研究,结果表明风向角对柱面煤棚表面风压分布具有较大影响,脉动风压非高斯特性明显的区域主要集中在迎风前缘和边角位置。

综上,已有文献主要是针对长跨比较大的柱面煤棚进行研究,对小长跨比(长跨比小于 1)的柱面煤棚的风荷载特性研究很少。在实际工程中,柱面煤棚的跨度越来越大,而受到场地等因素的影响,其长度常常受到限制,导致小长跨比柱面煤棚的建设越来越多。长跨比的减小对柱面煤棚风荷载特性的影响规律是值得深入研究的问题。鉴于此,以某实际工程柱面煤棚(长跨比为 5/6)为研究对象,通过刚性模型测压风洞试验的方法研究了小长跨比柱面煤棚的风荷载特性。

1 风洞试验概况

1.1 试验模型与测点布置

试验以某实际工程为对象,柱面煤棚长度 $L=150$ m,跨度 $D=180$ m,矢高 $H=40.475$ m,煤棚平面图和立面图如图 1 所示, X 轴垂直于煤棚跨度方向, Y 轴平行于跨度方向,坐标系满足右手定则, Z 轴垂直于 XOY 平面法向向上。试验模型为刚性测压模型,模型材料为 ABS 板。模型采用的几何缩尺比为

收稿日期:2022-05-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220135

基金项目:国家自然科学基金(52078313)

作者简介:张渊(1980—),男,高级工程师,研究方向为大跨度钢结构。E-mail:consultor@foxmail.com

张渊,高佳文,吴晓龙,等.小长跨比柱面煤棚风荷载特性试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):23-29.

1:150, 阻塞度最大时为 3.2%, 满足文献[11]中所要求的小于 5%, 图 2 为试验照片。模型结构内外两面同时承受风压, 在双面布置测点, 图 3 为外表面测点布置图, 以 ad 和 bc 为分割线将煤棚柱面部分划分为 3 个区域, 结构内外两面的测点位置一一对应, 共布置 1 306 个测压点。

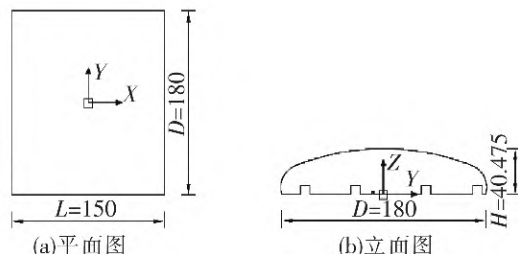


图 1 煤棚平面图和立面图(单位:m)



图 2 试验照片

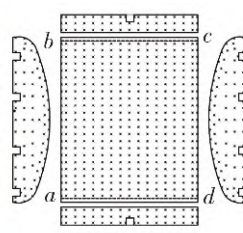


图 3 测点布置图

1.2 风场布置与试验工况

试验在石家庄铁道大学风工程研究中心风洞实验室低速试验段内进行, 该试验段宽 4.4 m, 高 3.0 m, 长 24.0 m, 最大风速可达 30.0 m/s, 速度不稳定性 $\leq 0.6\%$, 速度场不均匀性 $\leq 0.4\%$, 湍流度 $\leq 0.4\%$ 。根据工程所在位置, 依据文献[12], 试验模拟 B 类地面风场。图 4 为试验模拟 B 类风场所得到的平均风速剖面 and 顺风向紊流度剖面, 试验模拟得到的风速剖面与中国建筑结构荷载规范规定的理论风剖面吻合较好。试验风速为 16 m/s, 模型表面不同位置测压孔的风压通过电子压力扫描阀测得, 电子压力扫描阀的采样频率为 330 Hz, 采样时间为 30 s, 采样点数为 9 900 个。试验定义来流平行于结构跨度方向为 0° 风向角, 以 15° 风向角为间隔逆时针旋转, 旋转至 360° , 试验模型布置与风向角定义如图 5 所示。

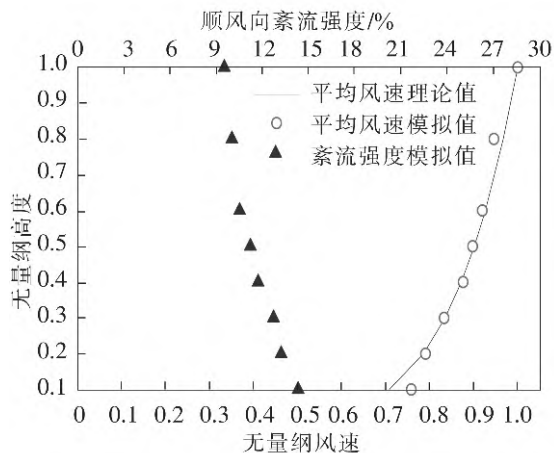


图 4 试验平均风速剖面 and 紊流度剖面

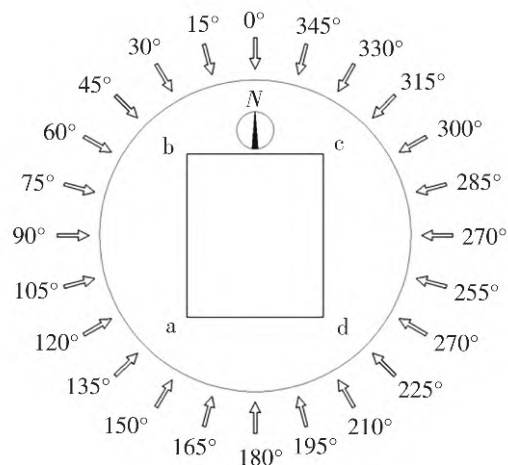


图 5 模型布置与风向角示意图

1.3 数据处理及参数定义

采用无量纲风压系数描述结构表面风压, 结构表面风压系数 C_{pi} 和结构净压系数 C_{pdi} 为

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_s}{p_t - p_s} = \frac{p_i - p_s}{0.5\rho U_r^2} \quad (1)$$

$$C_{pdi} = C_{pwi} - C_{pni} \quad (2)$$

式中, C_{pi} 为测点的风压系数; P_i 为测点处的压力; P_s 为参考点静压; P_t 为参考点总压; ρ 为空气密度; U_r 为 10 m 高度处参考风速; C_{pwi} 、 C_{pni} 分别为测点位置对应的外表面测、内表面测点风压系数。

结构净压体型系数 $\mu_{i,\theta}$ 可由测点的平均净压系数计算得到

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

式中, Z_i 为测点 i 所处的高度; α 为地貌粗糙度指数, B 类地貌 α 取 0.15; h 为 10 m 参考高度。

将作用在结构上的风压在各风向角下进行积分, 得到结构的整体力, 定义 X 、 Y 、 Z 方向的无量纲体轴力系数分别为 C_{Fx} 、 C_{Fy} 、 C_{Fz} , 其定义公式为

$$C_{Fx} = \frac{C_{pdi} A_i \cos \theta_i}{A_x} \quad (4)$$

$$C_{Fy} = \frac{C_{pdi} A_i \cos \theta_i}{A_y} \quad (5)$$

$$C_{Fz} = \frac{C_{pdi} A_i \cos \theta_i}{A_z} \quad (6)$$

式中, A_i 为测点所处位置的从属面积; θ_i 为测点法线方向与水平方向的夹角; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为结构在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上的投影面积。

平均风压系数 $C_{p,\text{mean}}$ 、脉动风压系数 $C_{p,\text{rms}}$ 、正向极值风压系数 $C_{p,\text{peak}}^+$ 以及负向极值风压系数 $C_{p,\text{peak}}^-$ 定义为

$$C_{p,\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_p(i)}{N} \quad (7)$$

$$C_{p,\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [C_p(i) - C_{p,\text{mean}}]^2}{N-1}} \quad (8)$$

$$C_{p,\text{peak}}^\pm = C_{p,\text{mean}} \pm g C_{p,\text{rms}} \quad (9)$$

式中, $C_{p(i)}$ 为测点风压时程; N 为风压系数时程样本数; g 为峰值因子。

2 试验结果分析

2.1 体型系数

由于煤棚为对称结构, 因此选取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角进行体型系数分析。如图 6 所示为结构体型系数云图。从图 6(a) 中可以看出体型系数在迎风面为较大的正值, 最大值出现在门洞两侧区域; 在顶部区域受负压, 所受负压最大处体型系数为 -0.53 , 并逐渐向背风面过渡为较小的正值; 两侧山墙在靠近 b 点一侧受较大的负压, 并向背风面一侧逐渐增大为正值。文献[12]中给出的顶部区域风荷载体型系数为 -0.8 , 将试验结果与规范所给结果相对比可知, 煤棚顶部区域的体型系数绝对值比规范小 0.3 左右, 这是由于煤棚长跨比较小、顶部区域较为平坦的原因。从图 6(b)~图 6(f) 可以看出, 在 15° 风向角下, 由于结构长跨比较小, 结构在 a 点处附近气流分离, 受到很大的负压, 随着风向角的增大, 分离点逐渐向 b 点移动, b 点处附近所受负压逐渐增大, 在 45° 和 75° 风向角时负压较大, 此时体型系数在 -1.3 左右。在 ab 侧山墙体型系数随着风向角增大而增大, 并且正压区域逐渐向 a 点处靠近。从图 6(g) 中可以看出, 当风向角增大到 90° 时, 结构体型系数呈对称分布, 迎风侧山墙底部体型系数最大, 并随着高度的增加逐渐减小, 并在顶部区域的迎风侧气流分离, 所受负压较大, 随着向背风侧过渡负压逐渐减小。总体来看, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角范围内, 煤棚顶部体型系数均为负值。 0° 风向角时体型系数绝对值最大值出现在顶部中间区域, 随着风向

角增大到 15° 附近, 绝对值最大值出现在 a 点附近, 并随着风向角的继续增大而逐渐向 b 点移动; 顶部区域体型系数绝对值最大值随着风向角增大整体呈先增大后减小的趋势。

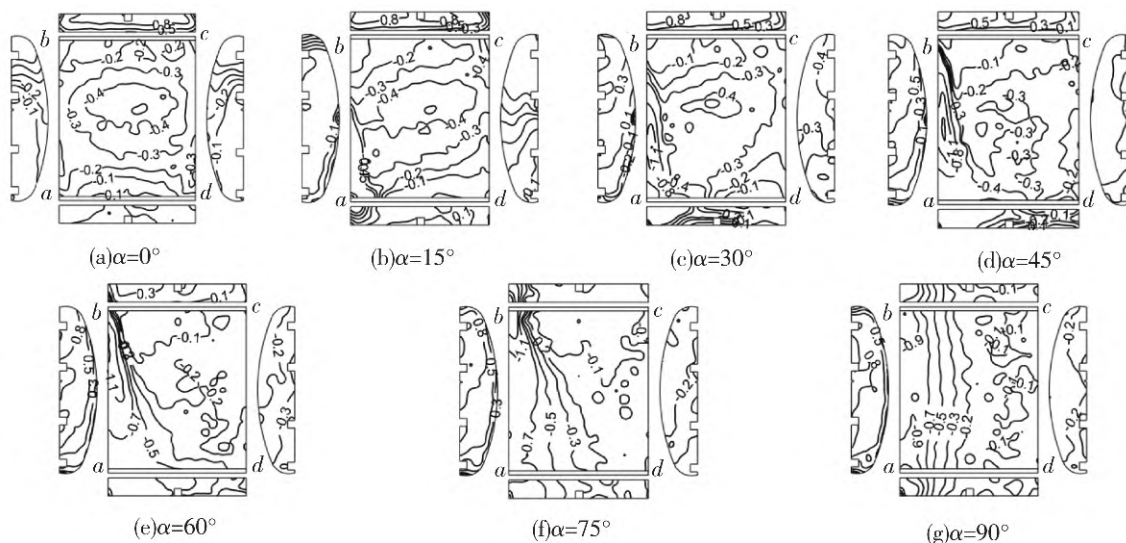


图 6 结构体型系数云图

2.2 整体力系数

由于煤棚结构的对称性, 选取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角的整体力系数进行分析。如图 7 所示为煤棚结构在 X 、 Y 、 Z 轴 3 个方向的整体力系数随风向角的变化曲线。从图 7 可以看出, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角内, X 方向上整体力系数均为正值, 随着风向角增大呈先增大后减小的趋势, 在 60° 风向角附近迎风面山墙受正压较大而背风面山墙所受负压较大, 使 C_{Fx} 在 60° 风向角附近达到最大值约为 1.03。 Y 轴方向上整体力系数为负值, 表明力的方向与图 1 中 Y 轴的正方向相反, Y 轴方向上整体力系数大小随着风向角增大呈先增大后减小的趋势, 在 45° 风向角下迎风面积达到最大, 且背风面负压较大, 使其 Y 轴方向上整体力系数达到最大为 0.54。 Z 轴方向上整体力系数均为正值, 表明结构受到整体向上的风吸力, 在 0° 风向角下 C_{Fz} 约为 0.38, 随着风向角的增大呈现出先增大后减小, 然后再增大的变化规律; 煤棚在 90° 风向角时, 顶部靠近迎风面山墙的区域所受负压均比较大, 使 C_{Fz} 在 90° 风向角时达到最大, 为 0.5。

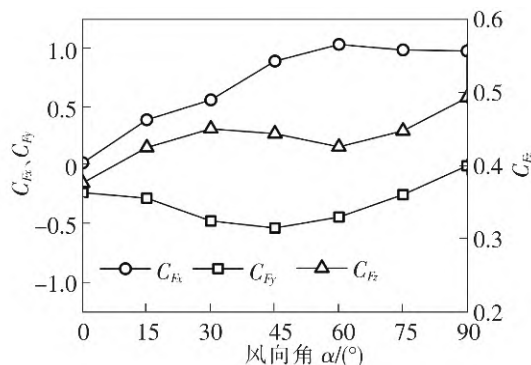


图 7 整体力系数随风向角变化规律

2.3 脉动风压的非高斯特性

2.3.1 非高斯区域划分

在结构的抗风设计中, 通常认为结构表面脉动风荷载符合高斯分布, 实际上由于风敏感结构表面绕流的复杂性, 会使某些部位的脉动风荷载不再符合高斯分布。结构表面测点风压是否符合高斯分布可以通过计算其概率密度分布曲线并与标准高斯分布曲线对比确定, 该方法较为直观, 但属于定性描述。理论研究^[13]表明, 通过将风压脉动信号的三阶统计量(偏度)和四阶统计量(峰度)与标准高斯信号(偏度为 0, 峰度为 3)进行比较, 可以实现对非高斯信号的定量判断。偏度(Skewness)记为 S ; 峰度(Kurtosis)记为 K , 定义如下

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(C_{pi}(t) - C_{p, \text{mean}})^3 C_{p, \text{rms}}^{-3}] \quad (10)$$

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(C_{pi}(t) - C_{p, \text{mean}})^4 C_{p, \text{rms}}^{-4}] \quad (11)$$

对试验模型所有测点的偏度和峰度值进行了统计,在图8中给出了各风向角下的峰度与偏度关系曲线。从图8可以看出,峰度与偏度曲线呈非线性分布,但其整体变化趋势不偏离。

基于图8的分布特点,考虑到风压脉动的随机特性,参考文献[14]的划分标准,将 $|S| > 0.5$ 且 $|K| > 3.5$ 作为风压准高斯区域与非高斯区域划分标准。依据此划分标准得到结构表面非高斯区域分布情况随风向角变化规律,如图9阴影部分所示。

从图9可以看出,结构顶部区域的非高斯区域在 0° 风向角时呈对称分布,分别分布在迎风面底部和结构背风面角部区域;随着风向角增大到 30° ,靠近a点的角部区域的非高斯区域逐渐增大,靠近b点角部区域的非高斯区域逐渐减小,在背风面底部非高斯区域逐渐增大。随着风向角继续增大,在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 风向角范围内,迎风面底部和背风面底部非高斯区域整体呈减小的趋势;靠近ab侧的非高斯区域开始出现分岔,并且面积越来越大。当风向角增大到 90° 时,ab侧为迎风面,结构顶部非高斯区域呈对称分布,分别分布在迎风面前缘,以及侧风面中间区域。ab侧山墙的非高斯区域随风向角增大,呈先减少后增加再继续减少的趋势,在 15° 风向角时最小,在 60° 风向角时最大。cd侧山墙非高斯区域在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内逐渐增大,在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 风向角范围内,cd侧山墙无非高斯区域。

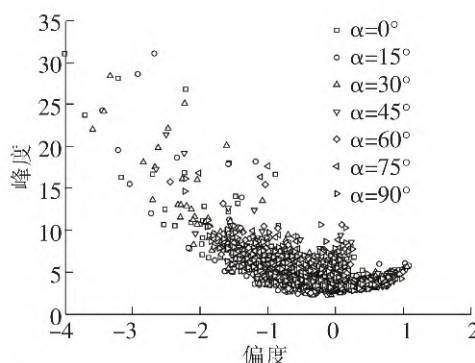


图8 测点峰度与偏度关系曲线

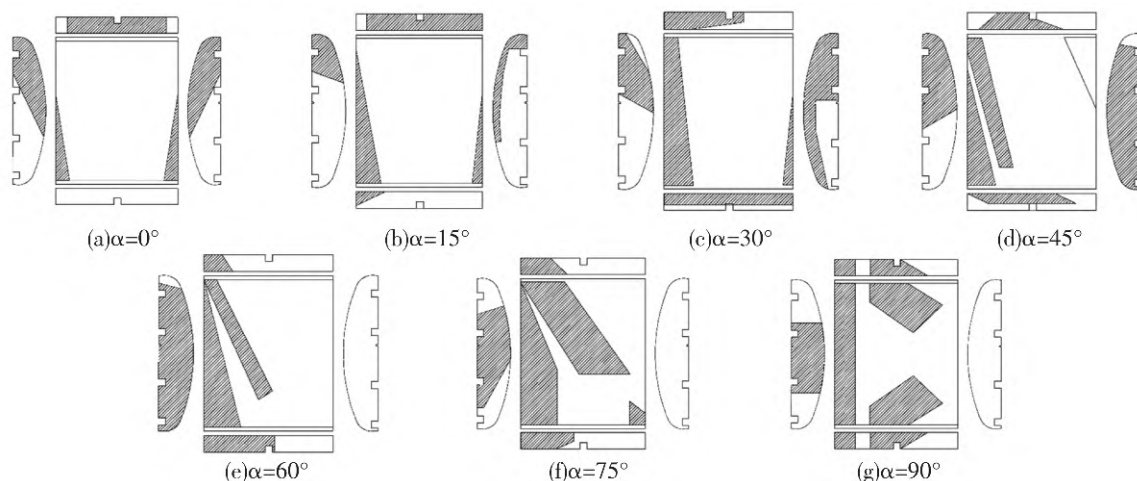


图9 非高斯区域随风向角变化规律

2.3.2 峰值因子取值

文献[12]中根据Davenport所提出的传统峰值因子法,建议采用围护结构设计的峰值因子取2.5(保证率为99.38%)。然而在运用相关计算理论对峰值因子进行计算时,峰值因子是穿越率 v 、时间段 T 和保证率 P 的函数,即与具体工况相关。

计算峰值因子时,将峰值因子时程与风工程的典型曲线拟合,可得到一定保证率下峰值因子取值^[14]。用高斯曲线拟合各测点的峰值因子时程,得到其概率密度曲线及其累计概率密度曲线,并设定每个测点的峰值因子概率密度曲线的保证率为99.38%,通过此方法针对每个测点都得到一个峰值因子取值,结果可知,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角范围内,准高斯区域和非高斯区域峰值因子取值随风向角的变化不明显。规范中基于高斯假设的峰值因子取值为2.5,而计算得到的准高斯区域峰值因子平均值约在2.8附近,与规范值相近;非高斯区域峰值因子平均值在3.4左右,明显大于规范值。

2.3.3 极值风压系数

根据计算得到的每个测点的峰值因子,得到结构表面的极值风压系数并进行全风向角统计,得到如

图 10 所示统计意义下结构表面极值风压系数。从图 10 可看出,其表面极值风压系数呈对称分布。从图 10(a)可知,煤棚顶部区域正向极值风压系数较小,约为 0.5,沿长度方向向两侧逐渐增大;由于煤棚结构跨度较大而矢高较小,因此在中间区域沿跨度方向变化不大;其正向极值风压系数最大值出现在 4 个角点位置附近,最大值为 2.8。两侧山墙的正向极值风压系数最大值为 2.2,出现在山墙中心位置。从图 10(b)可以看出,在顶部中间区域负向极值风压系数绝对值较小,并沿长度方向向两侧山墙靠近其绝对值逐渐增大,在靠近山墙两侧边负向极值风压系数绝对值较大,绝对值最大值出现在角部区域,其值为-5.2。在两侧山墙,其负向极值风压系数绝对值随着高度的增加而逐渐增大,在山墙顶部跨中位置绝对值最大,此时负向极值风压系数为-3.0。当峰值因子按照规范取值为 2.5 时,煤棚顶部区域计算得到的正向极值风压系数最大值为 2.1,负向极值风压系数绝对值最大时为-4.5,由此可知按照规范取值求得的极值风压系数明显较小。通过对极值风压系数分析可知,结构在角点附近较为危险,进行围护结构设计时应提高其抗风性能。

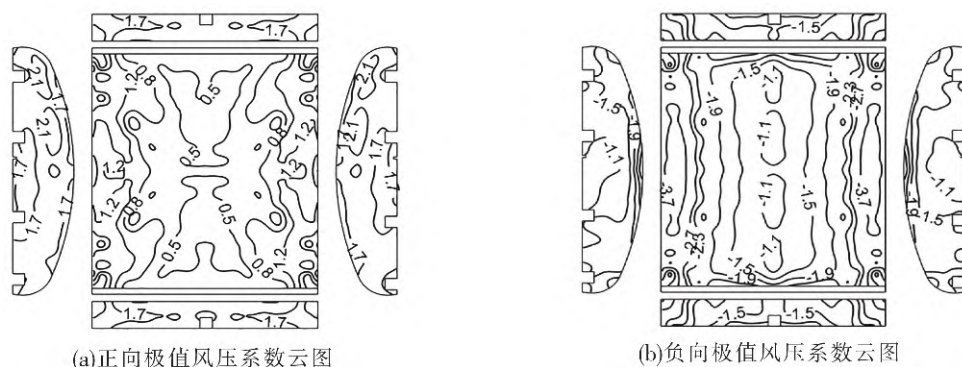


图 10 统计意义下极值风压系数云图

3 结论

以某实际工程柱面煤棚(长跨比为 5/6)为对象,通过刚性模型测压风洞试验对小长跨比柱面煤棚表面风荷载体型系数和整体力系数进行了研究,并基于表面脉动风压的非高斯特性分析对极值风压系数进行了讨论,主要得到了如下结论:

- (1) 当来流风向与跨向呈 45° 角时,小长跨比柱面煤棚跨度方向整体力最大,最大力系数为 0.54;当来流风垂直于跨向时,小长跨比柱面煤棚受到的竖向吸力最大,最大力系数为 0.5。
- (2) 小长跨比柱面煤棚表面风压非高斯区域主要分布在迎风面和背风面的尾流附着区。煤棚角部区域的极值风压较大,最大正向极值风压系数约为 2.8,最大负向极值风压系数为-5.2。进行围护结构设计时应注意提高其角部区域的抗风性能。

参 考 文 献

- [1] 王晓江, 郑云飞, 刘庆宽, 等. 四心圆煤棚风荷载分布规律的试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(S1): 59-62.
- [2] Schneider W, Zahlten W. Load-bearing behaviour and structural analysis of slender ring-stiffened cylindrical shells under quasi-static wind load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 60(1): 125-146.
- [3] 聂国隽, 钱若军. 干煤棚柱面网壳结构的设计[J]. 结构工程师, 2001(3): 1-5.
- [4] 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, 62.
- [5] 于敬海, 赵彧洋, 蒋智宇, 等. 柱状屋面风荷载体型系数数值模拟研究及取值建议[J]. 建筑结构, 2020, 50(11): 129-134, 89.
- [6] 陈琳琳, 崔会敏, 郑云飞, 等. 大跨柱面网壳结构风荷载试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 189-193.
- [7] 钟奇, 兰志昆, 黄鹏, 等. 端部开口和封闭的干煤棚风荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(S1): 963-968.
- [8] 吴迪, 武岳, 孙瑛. 大跨度屋盖结构极值风压概率分布特征研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 29-35.
- [9] 李玉学, 白硕, 杨庆山, 等. 大跨度柱面网壳结构风荷载特性风洞试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36

(4): 105-111.

[10]李玉学,白硕,杨庆山,等.大跨度封闭式柱面屋盖脉动风荷载非高斯分布试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(7): 62-69.

[11]中国建筑科学研究院.JGJ/T 338—2014 建筑工程风洞试验方法标准(附条文说明)[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[12]中国建筑科学研究院.GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[13]何选森.随机过程[M].北京:人民邮电出版社,2009.

[14]叶继红,侯信真.大跨屋盖脉动风压的非高斯特性研究[J].振动与冲击,2010,29(7): 9-15.

Experimental Study on Wind Load Characteristics of Cylindrical Coal Shed with Small Length—Span Ratio

Zhang Yuan¹, Gao Jiawen², Wu Xiaolong¹, Liu Xiaobing²

(1. Beijing Shougang International Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking a practical cylindrical coal shed (length-span ratio of 5/6) as the object, the wind load characteristics of cylindrical coal shed with a small length-span ratio were studied by pressure-measured rigid model wind tunnel tests. The distribution law of wind load shape coefficient and overall force coefficient with wind direction angle was analyzed, and the non-Gaussian characteristics of surface fluctuating wind pressure were discussed. On this basis, the distribution law of the extreme wind pressure coefficient was clarified. The results show that when the incoming wind is at a 45° angle with the span direction, the span direction stress of the coal shed is the largest. When the incoming wind crosses vertically, the vertical suction on the coal shed is the largest. The extreme wind pressure of the coal shed in the corner area is the largest. Attention should be paid to improving the wind resistance of the corner area when designing the enclosure structure.

Key words: cylindrical coal shed; wind load; shape coefficient; overall force coefficient; extreme wind pressure coefficient; wind tunnel test