

# 防风网对大跨度煤棚风荷载特性的影响\*

付赛飞<sup>1</sup>, 贾娅娅<sup>1,3,4</sup>, 周一航<sup>1</sup>, 陈娟<sup>1</sup>, 郑云飞<sup>2</sup>, 刘庆宽<sup>1,3,4</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁路职业技术学院铁道工程系 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. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

**摘要** 为了研究防风网对大跨煤棚风荷载的影响,通过风洞刚性模型测压试验,对3种透孔率的防风网下煤棚表面风荷载进行研究,分析了风向角、有无防风网和防风网透孔率对典型测点和分区的体型系数以及测点的脉动风荷载的功率谱特性的影响。结果表明:不同风向角下,结构体型系数极值出现的位置和范围差别较大;防风网对减小煤棚风荷载有较好效果,放置防风网后煤棚表面呈现为绝对值较小的负压;大部分风向角下,20%的透孔率防风网对减小风荷载效果更好;不同位置测点受来流脉动影响情况不同,煤棚迎风侧角部测点脉动风荷载无量纲功率谱数值较大,且功率谱成分复杂,放置防风网后其峰值明显减小。

**关键词** 煤棚;风洞试验;防风网;分区体型系数;功率谱  
**中图分类号** TU312.1

## 引言

煤棚为空间曲面结构,具有跨度大、阻尼小、柔度大等特点,对风荷载的作用十分敏感<sup>[1]</sup>。文献[2-3]通过对大跨度柱面网壳结构进行风洞测压试验,得出了结构的平均脉动风压分布特性、脉动风荷载谱以及测点间脉动风荷载的相关性等。郑肖楠等<sup>[4]</sup>对煤棚结构的刚性模型进行风洞试验研究,分析煤棚两端弧面及天窗位置处风压分布情况,得出天窗位置风压较大,应适当对其进行加固。郭云等<sup>[5]</sup>采用数值模拟的方法,对网壳结构进行整体稳定性分析及风振响应分析,得出了最优的结构选型以及特殊结构体型风荷载取值建议。

以上均是对煤棚结构整体或典型测点进行研究,也有很多学者对煤棚分块体型系数进行了研究,使其能够方便地应用到实际工程中。方伟定等<sup>[6]</sup>研究了分区体型系数,指出横向端部体型系数绝对值偏大,因此建议加强该部位。黄鹏等<sup>[7]</sup>通过试验研究了风向角、内部煤堆及大气边界层风场等因素对煤棚平均和脉动风荷载的影响,给出了不同工况下干燥煤棚的分块体型系数。孙一飞等<sup>[8]</sup>通过对比分析全封闭状态和半封闭状态下煤棚典型测点、分块的体型系数和极值风

压系数,指出在半封闭状态下,结构各分区将承受更大的极值风荷载。齐月芹等<sup>[9]</sup>对某电厂煤棚进行风洞试验,并研究了仰角对干燥煤棚体型系数的影响,得出了不利工况下干燥煤棚表面的分块体型系数。Li等<sup>[10]</sup>通过同时测量3个刚性圆柱形外壳模型的风压分布,论证了单层网状球形壳体有效风荷载分布估算方法的效率。Portela等<sup>[11]</sup>研究了不同径跨比柱面网壳结构屈曲特性对风压分布的影响。

以上研究均是从煤棚气动外形的角度主动抗风来考虑风荷载的作用,而没有通过被动抗风(设置防风墙、导流板等)来对煤棚的抗风安全问题进行研究。笔者通过刚性模型测压试验,分析了有无防风网以及防风网的透孔率对煤棚典型测点和分块区域体型系数的影响规律,以便对煤棚的抗风设计提供参考。

## 1 试验概况

笔者以某实际气膜煤棚为研究背景,在风洞中进行缩尺模型的刚性测压试验。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,低速试验段宽为4.4 m、高为3.0 m、长为24.0 m,最大风速达30.0 m/s。

\* 国家自然科学基金资助项目(5177838);河北省自然科学基金资助项目(E2018210044, E2021210110);河北省高端人才资助项目(冀办[2019]63号)

收稿日期:2022-01-14;修回日期:2022-04-15

实际煤棚长为200 m、宽为100 m、高为30 m,模型的几何缩尺比为1:200,在模型表面布置了483个测压孔,且在端部对测点进行了加密,每个测点采样次数为9 900,采样频率为330 Hz,风场类型为B类。模型及风场布置如图1所示。采用图1地面粗糙度模拟装置,得到的试验平均风速剖面和湍流速度剖面如图2所示。其中: $Z$ 为高度; $Z_r$ 为模型参考点高度; $V$ 为风速; $V_g$ 为参考点处风速; $I_u$ 为紊流度。可以看出,试验模拟得到的风速剖面与我国《建筑结构荷载规范》规定的理论风剖面吻合较好。

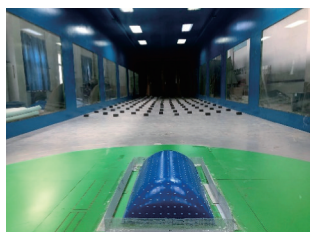


图1 模型及风场布置

Fig.1 Model and wind field layout

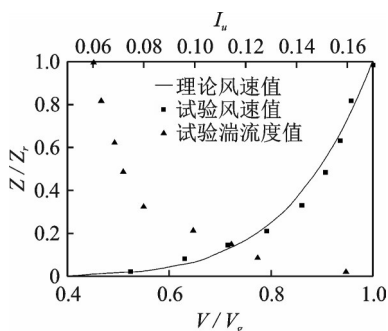


图2 试验平均风速剖面和湍流度剖面

Fig.2 Experimental average wind speed profile and turbulence profile

## 2 试验工况

### 2.1 防风网参数与风向角

笔者研究了3种不同透孔率的防风网对煤棚风荷载的影响。根据调研结果<sup>[12]</sup>,选择防风网高度为12.5 m,距离煤棚12.5 m。防风网模型如图3所示。其中,透孔率表示孔的面积占板的总面积的百分比。

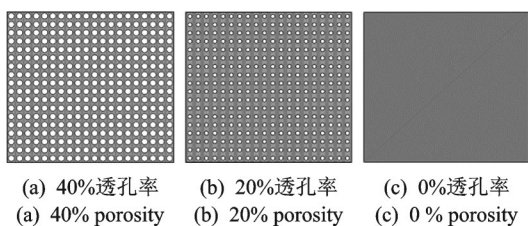


图3 防风网模型

Fig.3 Model of windbreak net

由于模型基本对称,所以选取试验风向角为 $0\sim 90^\circ$ ,以 $10^\circ$ 为间隔,中间增加 $45^\circ$ 风向角,风向角用 $\beta$ 表示。模型布置及风向角定义如图4所示。

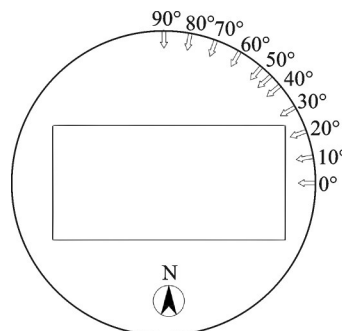


图4 模型布置及风向角定义

Fig.4 Model layout and wind direction angle definition

### 2.2 研究测点的选取及分区

本次共进行了40种工况试验,采集了大量试验数据,为满足工程实际应用,选取了3个典型测点,并对煤棚进行了分区处理。煤棚风荷载的最不利区域主要为前后两侧底部、东南弧线以及顶部,因此选择煤棚表面3处测点。典型测点位置与分区示意图如图5所示。在 $0^\circ$ 风向角,A169为整个煤棚最不利位置,随着风向角增加,A169处的体型系数绝对值先减小后增大; $45^\circ$ 风向角时,最不利位置由A169处经过A150处向顶部移动; $90^\circ$ 风向角时到达A081处。考虑到煤棚外形以及风场特性等因素,将煤棚表面划分为49块区域。

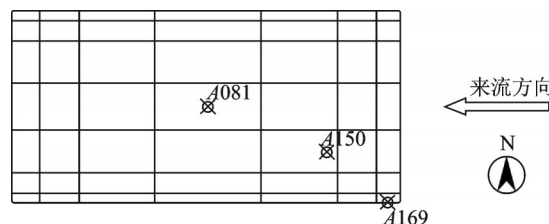


图5 典型测点位置与分区示意图

Fig.5 Diagram of typical measuring point location and partition

## 3 试验数据处理方法

在研究过程中,对风压值符号进行定义。沿结构表面法线方向靠近结构时为正压,表现为风压力;反之为负压,表现为风吸力<sup>[2]</sup>。

物体表面的压力利用无量纲压力系数来表示,即

$$C_{p,i} = (p_i - p_\infty) / (p_0 - p_\infty) \quad (1)$$

其中: $C_{p,i}$ 为测点*i*的风压系数; $p_i$ 为测点*i*压力值; $p_0$ 和 $p_\infty$ 分别为参考点处的总压和静压。

体型系数  $\mu_{s,i}$  与风压系数的换算关系为

$$\mu_{s,i} = C_{p,i} \left( \frac{z}{h} \right)^{2\alpha} = \frac{p_i - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \left( \frac{z}{h} \right)^{2\alpha} \quad (2)$$

其中:  $z$  为参考点高度;  $h$  为测点高度;  $\alpha$  为风场的粗糙度指数。

由于测点数量较多, 在工程实际中没有必要对每个测点数据都进行分析, 因此将气膜煤棚划分为若干个分块部分, 给出每个分块的体型系数  $\mu_{s,b}$ , 即

$$\mu_{s,b} = \sum_{i=1}^n \mu_{sdi} \mu_{z,i} A_i / \mu_{z,b} A \quad (3)$$

其中:  $\mu_{sdi}$  为测点  $i$  处的体型系数;  $\mu_{z,i}$  为测点  $i$  处高度变化系数;  $A_i$  为每个测点代表的面积;  $\mu_{z,b}$  为分区中心位置处的高度变化系数;  $A$  为分区面积。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 分区体型系数

为了简化设计, 综合考虑气膜煤棚形状以及表面风场特性等因素, 将煤棚表面划分为 49 块区域。典型风向角下有无防风网对煤棚分区体型系数的影响如图 6 所示。其中, 防风网透孔率为 20%, 风向角分别为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $90^\circ$ 。

$0^\circ$  风向角下, 来流由东向西垂直吹向煤棚东侧, 无防风网时, 只有迎风侧有较小的正压, 煤棚的体型系数沿来流先由正变负, 之后绝对值逐渐减小, 由于气流分离, 两侧一直处于负压状态, 负压绝对值逐渐减小, 到达尾部时略微增大, 这可能是出现了气流再

0	-0.1	0	0	-0.1	-0.4	-0.8
0	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.5	-0.6
0	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0.6	0.1
0	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0.6	0.3
0	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0.5	0.2
0	-0.2	0	0	-0.1	-0.5	-0.5
0	-0.1	0	0	-0.1	-0.3	-0.9

(a)  $\beta=0^\circ$ , 单煤棚  
(a)  $\beta=0^\circ$ , single coal shed

0.1	0	0	-0.2	-0.4	-0.3	-0.4
0	0	0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2
0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3
0	0	0	-0.2	-0.4	-0.3	-0.3
0	0	0	-0.2	-0.5	-0.3	-0.3

(b)  $\beta=0^\circ$ , 放置防风网  
(b)  $\beta=0^\circ$ , place the windbreak net

-0.3	0	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8
-0.4	-0.4	-0.1	0	0.1	0.3	0.6
-0.3	-0.7	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0.3
-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.1
-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.6	-1.1	-0.7
-0.3	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.7	-1.1
-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.6

(c)  $\beta=45^\circ$ , 单煤棚  
(c)  $\beta=45^\circ$ , single coal shed

-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0	-0.1
-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.2
-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.4	-0.3
-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.5
-0.4	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4

(d)  $\beta=45^\circ$ , 放置防风网  
(d)  $\beta=45^\circ$ , place the windbreak net

-0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.6	-0.6
-1.1	-0.1	0.2	0.2	0.2	-0.1	-1
-0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6
-0.5	-0.8	-1.1	-1	-1.1	-0.8	-0.5
-0.5	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3

(e)  $\beta=90^\circ$ , 单煤棚  
(e)  $\beta=90^\circ$ , single coal shed

-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4
-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4
-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4

(f)  $\beta=90^\circ$ , 放置防风网  
(f)  $\beta=90^\circ$ , place the windbreak net

图 6 典型风向角下有无防风网对煤棚分区体型系数的影响  
Fig.6 The influence of windbreak net on shape coefficient of coal shed partition under typical wind direction angle

附现象; 放置防风网后, 煤棚整体受负压, 且煤棚东侧前沿角部位置负压明显减小, 最大减小 50%。随着风向角增加到  $45^\circ$  时, 煤棚东北角部出现较大正压, 体型系数为 0.8, 最不利位置出现在东南弧线, 原东南角部位置处的较大负压沿着东南弧线向上移动, 且负压增大到  $-1.1$ ; 放置防风网后, 该处体型系数绝对值最大减小 54% 左右。  $90^\circ$  风向角时, 来流由东向西垂直吹向煤棚北侧, 北侧边缘出现较大正压, 体型系数为 0.8, 煤棚西北角部和东北角部气流



分离,会出现较大负压,煤棚中线体型系数绝对值呈先减小后增大、又减小的趋势;放置防风网后,煤棚整体表现为负压,迎风侧底部边缘位置处的体型系数由0.8变为-0.4,北部两侧的角部体型系数绝对值明显减小,该处最大减小约56%。

### 4.2 典型测点体型系数

为了分析网壳局部位置的最不利风荷载工况和放置不同透孔率的防风网对其体型系数绝对值的减小程度,选取了结构3个关键位置的测点A169, A150和A081,其在不同透孔率下随风向角变化曲线如图7所示。

在大部分风向角下,放置防风网与单煤棚相比,测点体型系数绝对值明显减小,且随着防风网透孔

率的增加,煤棚体型系数绝对值先增加后减小。由图7(a)可见,0~90°风向角下,单煤棚角部测点(A169)体型系数均为负值,且为3个测点中负值最大的测点,最不利工况(其数值约为-1.32)出现在10°风向角左右;放置防风网后,体型系数绝对值最大减小68%,且当风向角小于60°时,20%透孔率的防风网挡风效果优于另外2个透孔率。由图7(b)可见,0~90°风向角下,单煤棚角部测点(A150)体型系数最大绝对值(约为-1.27)出现在45°风向角左右;放置防风网后,体型系数绝对值最大减小55%。由图7(c)可见,0~90°风向角下,单煤棚角部测点(A081)体型系数最大绝对值(约为-1.19)出现在70°风向角左右;放置防风网后,体型系数绝对值最大减小62%,且当风向角大于30°时,随着防风网透孔率的增加,煤棚体型系数绝对值先增加后减小,20%透孔率的防风网挡风效果优于另外2个透孔率。由上述可知,20%的透孔率防风网对减小风荷载效果更好,煤棚角部测点的负压为控制荷载,因此针对此类结构在设计中对角部位置应进行加强,并确定其控制风荷载及相对应的风向角。

### 4.3 脉动风荷载功率谱特性

根据风洞测压数据结果,分析不同风向角时结构典型测点的脉动风荷载功率谱图。为了使结果更有说明性,对其进行无量纲处理。不同风向角下典型测点风压无量纲功率谱如图8所示。图中:纵轴 $nS(n)/\sigma^2$ 为无量纲功率谱值, $n$ 为频率, $S(n)$ 为风压系数功率谱值, $\sigma$ 为脉动风荷载的方差;横坐标 $nZ_r/V_g$ 为无量纲频率, $Z_r$ 为模型参考点高度, $V_g$ 为参考点处试验风速。

由图8可以看出:典型测点的脉动风荷载无量纲功率谱大多在低频出现峰值,随着频率的增加其值逐步衰减,说明脉动风荷载的能量主要集中在低频区域,且放置防风网后,功率谱峰值降低,整体波动变小,高频脉动增加。这可能是来流风通过防风网后,将流场中的涡“打散”成较小的涡,从而出现了这种现象。

在来流方向,不同位置的测点,其无量纲功率谱的谱峰宽度差别较大。如测点A169,在低频时出现了较宽的带宽,45°风向角还出现了双峰值,说明由于气流撞击形成的分离泡和大尺度、间歇性漩涡脱落使得无量纲功率谱在相应处的主导频率能量增加。不同风向角下,防风网减小风荷载的效果也不同。相对其他风向角,测点A169在45°风向角下放

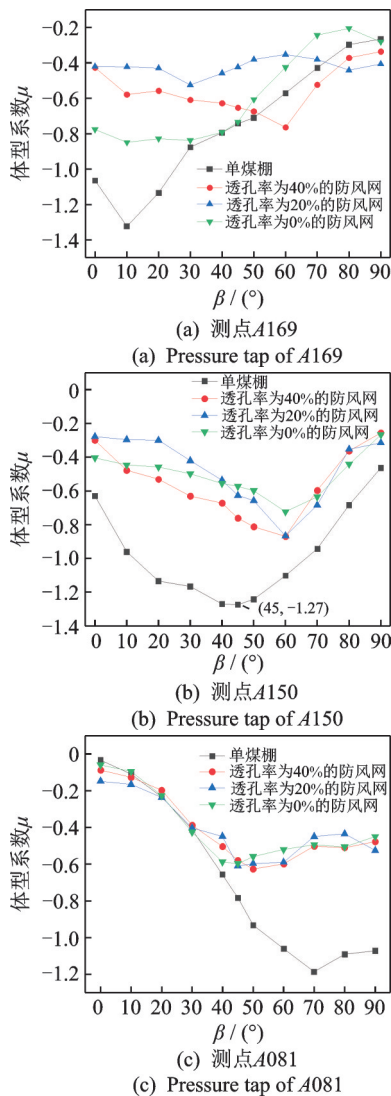


图7 测点A169, A150和A081在不同透孔率下随风向角变化曲线  
Fig.7 Changing curves of pressure taps A169, A150 and A081 with wind direction under different permeability

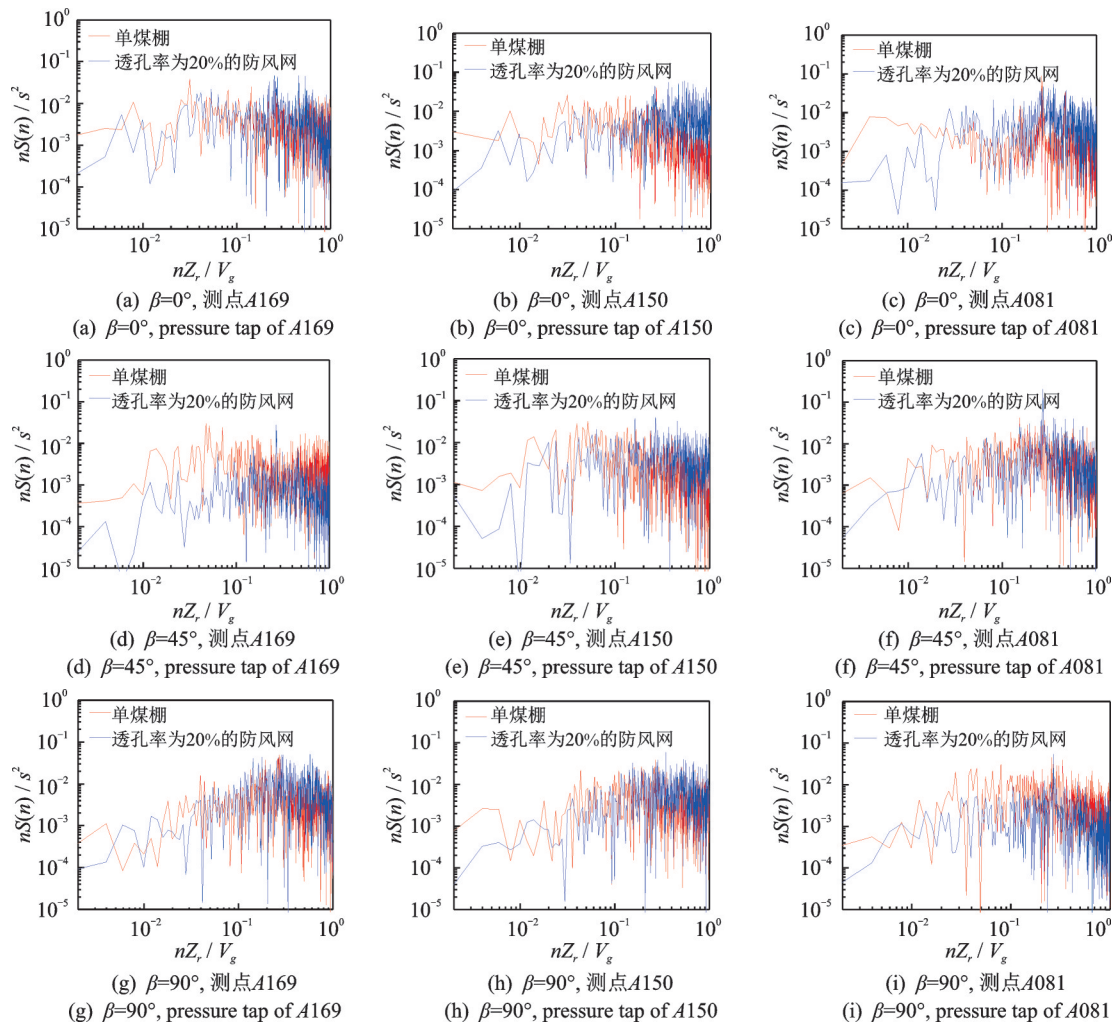


图8 不同风向角下典型测点风压无量纲功率谱

Fig.8 Wind pressure spectra of typical pressure tapes under different wind direction angles

置防风网后谱峰减小更明显,减小了82%左右(数值减小了0.025);对位于煤棚顶部的测点A081,无量纲功率谱峰值对应的无量纲频率较小,且谱峰带宽较宽,放置防风网后,功率谱峰值对应的无量纲频率增加,高频率段谱峰值较为接近,能量衰减变缓。另外,不同位置测点受到的特征湍流影响情况不同,测点A150与测点A169在 $0^\circ$ 风向角下谱峰峰值所对应的频率接近,但A150谱峰值比A169小31%,说明此处迎风位置脉动能量相对较大,湍流脉动特性明显,其无量纲功率谱峰值所对应的频率也不是统一的来流风荷载的卓越频率,功率谱成分变得复杂。

## 5 结论

1) 风向角对煤棚表面风压分布具有较大影响, $0^\circ$ 风向角时,单煤棚东侧前缘为正压区,其他区域均为负压。随着风向角的增大,正压区逐渐向东北部偏移,体型系数绝对值在东南角棱处出现最大值,并

沿弧线向上偏移, $90^\circ$ 风向角时到达顶部。

2) 有无防风网对煤棚表面的风压分布具有较大影响,放置防风网后与单煤棚相比,其典型测点与分区的体型系数绝对值均有明显减小, $90^\circ$ 风向角下,放置20%透孔率的防风网比单煤棚的分区体型系数最大减小了56%左右,且煤棚表面呈现为绝对值较小的负压。

3) 随着防风网透孔率的增加,大多数风向角下煤棚典型测点体型系数绝对值先减小后增加,因此3种透孔率中,20%透孔率的防风网对减小煤棚风荷载有更好的效果。角部测点负压为控制荷载,针对此类结构在设计中对角部位置应进行加强。

4) 煤棚表面测点脉动风荷载无量纲功率谱的峰值基本特性为低频出现、高频段衰减。不同位置测点受特征湍流影响情况不同,迎风侧角部位置测点脉动能量更大,放置防风网对减小典型测点谱峰效果明显。

## 参 考 文 献

- [1] 康继武, 聂国隽, 钱若军. 大跨结构抗风研究现状及展望[J]. 空间结构, 2009, 15(1): 41-48, 34.  
KANG Jiwu, NIE Guojuan, QIAN Ruojun. Present state and perspectives of wind resistance studies on long-span structures[J]. Spatial Structures, 2009, 15(1): 41-48, 34.(in Chinese)
- [2] 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.  
LI Yuxue, BAI Shuo, YANG Qingshan, et al. Experimental study of wind load characteristics on large-span cylindrical latticed shell[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4): 105-111.(in Chinese)
- [3] 张庆华, 马文勇, 王强, 等. 大跨度三心柱面网壳风压分布试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 733-738.  
ZHANG Qinghua, MA Wenyong, WANG Qiang, et al. Experimental wind pressure distribution on large-span three-centered cylindrical reticulated shell[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 733-738.(in Chinese)
- [4] 郑肖楠, 刘庆宽, 崔会敏, 等. 条形封闭网架煤棚风荷载分布规律试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(supp1): 296-300.  
ZHENG Xiaonan, LIU Qingkuan, CUI Huimin, et al. Experimental study on wind load distribution of coal shed in strip closed coal yard[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(supp1): 296-300.(in Chinese)
- [5] 郭云, 陈辉, 于海凤. 某热电厂大跨度干燥棚结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 49-53.  
GUO Yun, CHEN Hui, YU Haifeng. Structural design and analysis on the large-span dry coal shed in a thermo power station [J]. Building Structure, 2015, 45(17): 49-53.(in Chinese)
- [6] 方伟定, 何江飞, 朱建成, 等. 强台风区苍南发电厂干燥棚风洞试验研究[J]. 空间结构, 2014, 20(4): 74-79.  
FANG Weiding, HE Jiangfei, ZHU Jiancheng, et al. Study on wind tunnel test of dry-coal-shed of Cangnan power plant in strong typhoon area [J]. Spatial Structures, 2014, 20(4): 74-79.(in Chinese)
- [7] 黄鹏, 兰志昆, 顾明. 干燥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.  
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, 62.(in Chinese)
- [8] 孙一飞, 张磊杰, 刘庆宽, 等. 封闭形式对大跨度煤棚风荷载影响研究[J]. 工程力学, 2019, 36(supp1): 234-239.  
SUN Yifei, ZHANG Leijie, LIU Qingkuan, et al. Study on the influence of closed form on wind load of long-span coal shed [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(supp1): 234-239.(in Chinese)
- [9] 齐月芹, 李皓玉. 大跨度干燥棚网壳结构风荷载试验研究[J]. 空间结构, 2010, 16(4): 55-59.  
QI Yueqin, LI Haoyu. Experimental investigation of wind load on large-span dry-coal-shed latticed shell [J]. Spatial Structures, 2010, 16(4): 55-59.(in Chinese)
- [10] LI Y Q, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Wind loading and its effects on single-layer reticulated cylindrical shells [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(12): 949-973.
- [11] PORTELA G, GODY L A. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(6): 808-824.
- [12] 沈熹. 防风网防尘技术在露天煤堆场的应用研究现状及对发展我国防风网防尘技术的建议 [J]. 交通环保, 1995, 16(3): 22-25.  
SHEN Xi. Current status of application research on windproof and dustproof technology in open-pit coal storage yards and suggestions for the development of windproof and dustproof technology in China [J]. Environmental Protection in Transportation, 1995, 16(3): 22-25.(in Chinese)



**第一作者简介:**付赛飞,男,1996年8月,硕士生。主要研究方向为高层建筑的风荷载、风致振动。

E-mail: fsf19960812@163.com

**通信作者简介:**刘庆宽,男,1971年1月,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制。

E-mail: lqk@stdu.edu.cn