

# 干煤棚柱面网壳结构风荷载试验研究\*

黄 鹏, 顾 明, 叶孟洋

(同济大学土木工程防灾国家级重点实验室, 上海 200092)

摘要] 大跨度干煤棚常采用柱面网壳结构,且常成对布置,而规范中对该类网壳结构的体型系数未作明确规定。以电厂实际干煤棚为背景,通过试验研究了风向角、内部煤堆、大气边界层风场,以及周边另一个干煤棚的气动干扰等因素对一矢跨比为0.39的干煤棚网壳上平均和脉动风荷载的影响,探讨了网壳外表面、内表面和净风压的荷载分布特性。最后根据相关设计部门建议,将网壳表面分为5个面积区域,给出了适合工程应用的体型系数,供规范参考。

关键词] 干煤棚;柱面网壳结构;风洞试验;体型系数;脉动风压;干扰效应

中图分类号: TU352 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)S1-1432-06

## Experimental study on wind loads on cylindrical reticulated shells

Huang Peng, Gu Ming, Ye Mengyang

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The cylindrical reticulated shell structures without gable wall are usually used as dry-coal-sheds in a thermal power plant, and are normally arranged in pair, whose wind loads can not be found in the standards and codes. The mean and fluctuating wind loads on a cylindrical reticulated shell with rise-span ratio of 0.39 were studied through a series of wind tunnel tests. The characteristics of the wind pressures on the upper and lower surfaces and the net pressures were presented. The effects of wind direction, coal stack, terrain and interference from another shell structure were discussed respectively. At last, the surface of the shell are divided into five blocks and the block pressure coefficients, which were suitable for engineering application, were given as references for wind load codes.

**Keywords:** dry-coal-shed; cylindrical reticulated shell; wind tunnel test; block pressure coefficient; fluctuating pressure; interference effect

## 0 引言

干煤棚是火力发电厂中存储煤的一种大型库房。随着我国近年来大批火力发电厂建设项目的上马,干煤棚的建设也获得了很大的发展,呈现高度越来越高、跨径越来越大的趋势。随着干煤棚跨径和高度的增大,其质量轻、刚度小、小阻尼的特点越来越突出,而且处在大气边界层内湍流度高的近地区域,其绕流和空气动力作用非常复杂。因此大跨度干煤棚是一种典型的风敏感结构,其所受的风荷载是控制结构设计的主要荷载之一,是进行结构设计时不可忽视的问题<sup>[1-4]</sup>。

干煤棚一般为大跨度网壳桁架结构,与其他大跨屋盖结构显著的不同在于干煤棚两端开口。当风吹向干煤棚时,其中部分气流从网壳下表面穿过,因此干煤棚所受的风荷载必须要同时考虑网壳上表面和下表面压力的共同作用。同时,大型电厂干煤棚常常是成对布置,其周边另一个干煤棚的气动干扰因素不容忽视。对干煤棚由于我国现行的《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)<sup>[5]</sup>中缺乏这类结构相应的设计数据,为保证干煤棚整体结构和

围护结构安全,进行风洞模拟试验是十分必要的。

干煤棚通常采用三心圆柱面网壳结构,这种结构具有空间利用率高、结构形式经济的特点<sup>[6]</sup>。本文以电厂实际干煤棚为背景。该项目采用三心圆柱面网壳结构,跨度达103m,高40.5m,长140m,矢跨比为0.39。介绍了该大跨结构模型的风洞试验和数据处理方法。

## 1 试验设备、模型及数据处理

### 1.1 试验概况

风洞测压试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的TJ-2大气边界层风洞中进行的。TJ-2风洞试验段尺寸为3m宽、2.5m高、15m长。空风洞试验风速范围为0.5m/s~68m/s。建筑模型用有机玻璃板制成,几何缩尺比为1/150。试验中风向角间隔取为15°,以来流风垂直吹向干煤棚纵轴时为0°风向角工况,按顺时针方向增加。干煤棚模型参数及风向角定义见图1。

\* 上海市浦江人才计划和国家自然科学基金项目(50708082)联合资助。  
作者简介:黄鹏,博士,副研究员,Email: huangtju@tongji.edu.cn。

试验时,分别考虑了三种因素对干煤棚风荷载的影响。1) 煤堆的影响,模拟了干煤棚内堆煤的情况,取煤堆高度  $h = 6\text{m}$  (称为“低煤堆”工况)、 $h = 12\text{m}$  (称为“高煤堆”工况) 和无煤堆三种情况,煤堆长度与干煤棚等长。2) 风场的影响,考虑干煤棚处于不同的周边环境,模拟了满足我国荷载规范要求的 A 类和 B 类地面粗糙度风场。A 类和 B 类风场的平均风速剖面指数分别为 0.12 和 0.16,而在干煤棚顶部的紊流度分别为 10% 和 15%。3) 周边建筑的干扰影响。本研究除了考虑仅一个干煤棚单独存在的情况(称为“无干扰”工况),还考虑了存在相邻干煤棚的情况,其中两个干煤棚间距  $D = 16\text{m}$  称为“近干扰”工况,间距  $D = 32\text{m}$  称为“远干扰”工况,见图 1。

由于干煤棚模型内外表面同时受风,每个测点位置需布置内、外表面两个测压孔,以同时测量该点处内外表面的压力。在干煤棚模型上总共布置了 215 个测点(430 个测压孔),位置示意图见图 1。压力测量和数据采集由美国 Scanivalve 扫描阀公司的 DSM3000 电子式压力扫描阀系统、PC 机,以及自编的信号采集及数据处理软件完成。

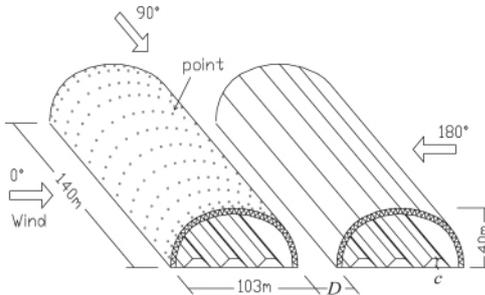


图 1 干煤棚模型参数及风向角示意图

1.2 数据处理方法

在空气动力学中,物体表面的压力通常用无量纲压力系数  $C_{pi}$  表示为:

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_\infty}{0.5\rho v_\infty^2} \quad (1)$$

式中:  $C_{pi}$  为测点  $i$  处的压力系数;  $p_i$  为作用在测点  $i$  处的压力;  $p_\infty$  是试验时参考高度处的静压;  $\rho$  为空气密度;  $v_\infty$  是参考高度处的风速。

为便于结果对比并按风工程习惯,文中取结构顶部高度 40m 处的来流风压为参考风压。网壳上、下表面风压符号的约定均为:压力作用向测量表面为正,而作用离测量表面(吸力)为负。

网壳上、下表面同步测量的各对测压点上的净(合)压力系数由下式导出(符号以向下(向内)为正,向上(向外)为负):

$$C_{pi} = \frac{P_{iu} - P_{id}}{0.5\rho v_\infty^2} \quad (2)$$

其中:  $P_{iu}$  为作用在测点  $i$  处的上表面压力,  $P_{id}$  为作用在测点  $i$  处的下表面压力。

对各测点的  $C_{pi}$  进行数据统计分析即可得平均风压系数  $\bar{C}_{pi}$  和脉动风压系数  $C_{pi,rms}$ 。

根据测得的平均风压系数  $\bar{C}_{pi}$ ,可容易地换算得到各测点的点体型系数  $\mu_{si}$  (荷载规范中的体型系数为整个测量面上的平均值,为加以区别,这里称为“点体型系数”)即:

$$\mu_{si} = \bar{C}_{pi} \times \left(\frac{40.5}{z}\right)^{2\alpha} \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为风速剖面指数,A 类和 B 类风场分别等于 0.12 和 0.16;  $z$  为测点高度。

大量的试验数据的表达形式很复杂,不便于分析最不利风向及其对应的风荷载。为方便工程应用,将干煤棚表面划分为若干个区域,给出每个分块的分块体型系数  $\mu_{s,b}$ :

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{si} \mu_{zi} A_i}{\mu_z A} \quad (4)$$

式中:  $\mu_{si}$   $\mu_{zi}$   $A_i$  为测点  $i$  的体型系数、风压高度变化系数和对应的面积;  $A$  为分块的总面积,  $\mu_z$  为分块中心的风压高度变化系数。

2 试验结果及分析

2.1 平均风压系数和分块体型系数

不同因素影响下干煤棚的风荷载差别很大。根据对各工况干煤棚平均风荷载特征的分析,这里取 B 类风场、无干扰和低煤堆为基本工况,以此为基础分析各因素的影响。

2.1.1 不同风向角的影响

不同的风向角对干煤棚的风荷载有很大的影响,限于篇幅,仅给出了在 B 类风场、无干扰和低煤堆情况下,几个典型风向角(0°, 30° 和 90°)的结果,见图 2~4(平面投影图)。图 2 为 0° 风向角时干煤棚外表面、内表面和净风压的平均风压系数等值线图(以 40.5m 为参考高度)。在图 2(a) 中可见,网壳外表面迎风面为正压,随着高度的增大,风压减小,很快变为负压,在顶部由于旋涡脱落产生了绝对值最大的负压,风压系数达 -1.0; 在网壳外表面背风面,负压绝对值又逐渐变小。由此可见,干煤棚外表面的风压分布与通常的封闭式的拱形屋面类似。在图 2(b) 中,网壳内表面的风压基本比较接近,均在 -0.5 左右。将网壳外表面风压减去内表面风压即为网壳净风压,见图 2(c)。对于

净风压而言,网壳迎风面的风荷载由于内外风压方向相同而增大了,而顶部风压减小了。值得注意的是,由于内表面风压的作用,网壳背风面的净风压为正压,作用方向向内。

90°风向角时风沿纵轴吹向干煤棚,此时网壳下部为风通道,气流可顺畅通过,使得风荷载与0°风向角有较大不同。网壳外表面除前沿出现较大的负压外,随后气流在中后部出现再附,风荷载较小。而网壳内表面除前沿出现部分正压外,在中后部风荷载同样很小。最终的净风压,除在前沿出现较大的负压外,整体风荷载均很小。

斜风向作用下干煤棚的风荷载有较大的不同。根据对各风向干煤棚平均风荷载的计算分析,发现30°~45°风向角时干煤棚受到的风荷载作用最为不利。30°风向角下,网壳外表面前沿出现-1.75以上的风压系数,而在内表面的附近位置则为正压,两者叠合,出现-2.0以上的净风压系数,见图3。从静风荷载的角度来看,由于内外表面风压的共同作用,30°附近风向角成为干煤棚的最不利风向。

平均风压系数等值线图虽然能清楚表示干煤棚表面风荷载分布特征,但不利于结构设计者使用。综合考虑干煤棚曲面形状、迎背风区以及多种流动性态的影响,将干煤棚表面划分为35块区域,根据上述结果,给出了0°、30°和90°风向角下干煤棚表面的净风压的分块体型系数,见图5(平面投影图)。

2.1.2 煤堆的影响

干煤棚的目的是用来堆放煤堆。试验结果表明,煤堆的存在对干煤棚外表面风压几乎没有影响,但对内表面风荷载会产生一定的影响。以干煤棚所受风荷载作用最不利的30°风向角为例,分析了煤堆的影响。图6给出了在B类风场和无干扰时,无煤堆( $h=0$ )、低煤堆( $h=6\text{m}$ )和高煤堆( $h=12\text{m}$ )三种情况下干煤棚内表面的分块体型系数。由图6可见,随着煤堆高度的增加,内表面分块体型系数绝对值有一定程度降低。当煤堆从无煤堆变化到低煤堆时,内表面分块体型系数平均降低约0.04(绝对值),而高煤堆时,与低煤堆相比内表面分块体型系数又平均降低约0.04(绝对值)。煤堆对来风有一个阻流效应,煤堆越高,阻流效应越显著,使得网壳内表面负压绝对值在一定程度上降低。但应指出的是,由于整个网壳内表面风压变化的趋势相同,因此从静风荷载的角度来看,煤堆对干煤棚所受风荷载影响很小。

2.1.3 风场的影响

火力发电厂通常处于海边或空旷开阔地区。本

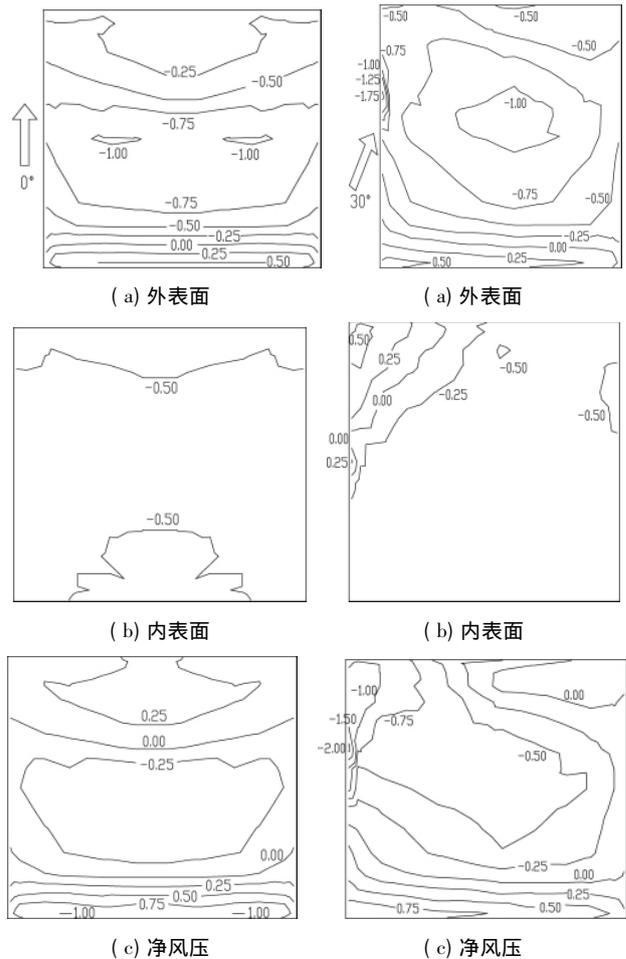


图2 0°风向角平均风压系数 图3 30°风向角平均风压系数

节取无干扰和低煤堆为基本情况,通过对比A类风场结果与上述B类风场结果,分析风场对干煤棚风荷载的影响。A类风场下,3个典型风向(0°、30°和90°风向角),干煤棚净风压的分块体型系数见图7。与图5相比,除个别位置的分块体型系数有一定差异外,A类和B类风场的结果基本一致,这表明干煤棚风荷载体型系数与风场类型无关。

2.1.4 周边干煤棚的干扰影响

在实际环境中,干煤棚往往处在复杂的地形环境中,周边建筑(特别是附近常常存在的另一个干煤棚)对所测干煤棚风荷载的干扰效应影响不容忽视。本节取B类风场和低煤堆为基本情况,分别研究了无干扰、两个干煤棚间距 $D=32\text{m}$ 的“远干扰”和间距 $D=16\text{m}$ 的“近干扰”三种情况下干煤棚的风荷载。近干扰情况下,0°、150°和180°风向角的干煤棚净风压的分块体型系数见图8。从图8可见,施扰干煤棚与所测干煤棚(受扰干煤棚)的风荷载有较大的影响。0°风向角时,受扰干煤棚迎风面风荷载与无干扰时几乎没有变化,而在网壳顶部和背风面分块体型系数则在数值上增加了约0.1,

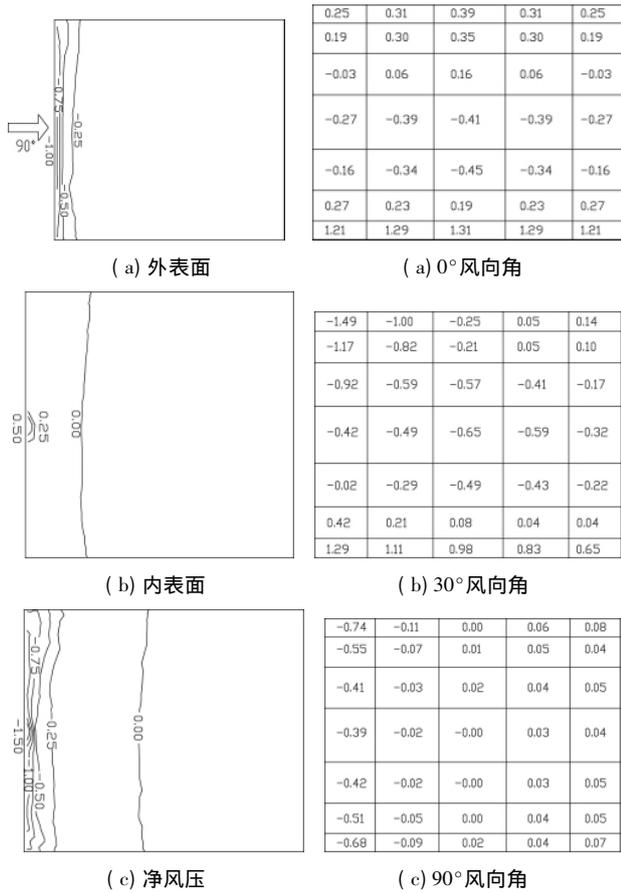


图 4 90°风向角平均风压系数 图 5 净风压分块体型系数

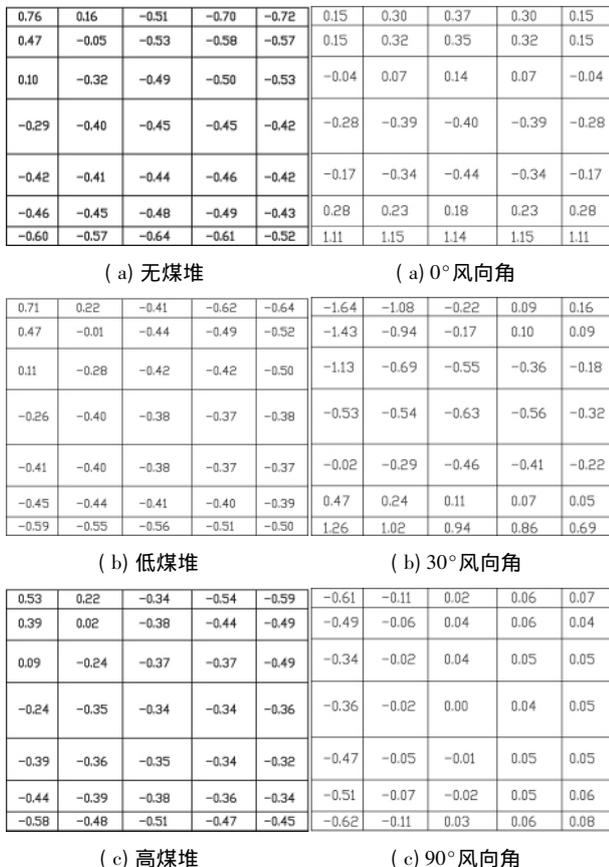


图 6 内表面分块体型系数 图 7 净风压分块体型系数

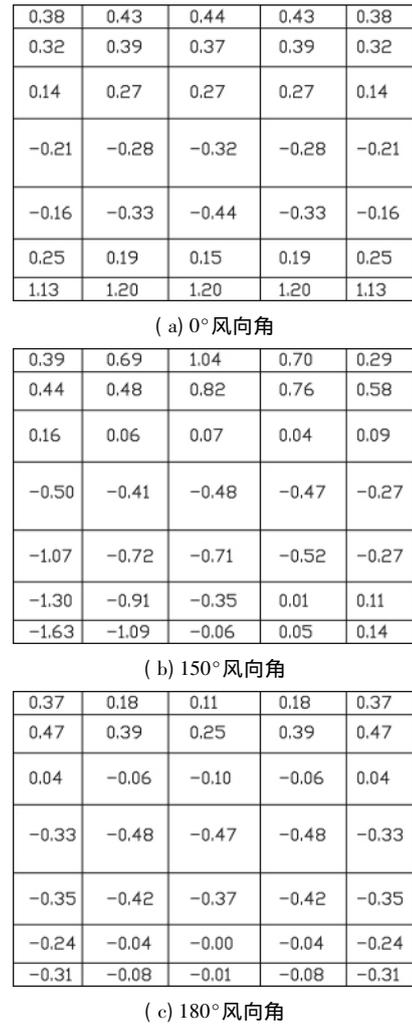


图 8 近干扰情况下干煤棚净风压的分块体型系数 (B 类风场、低煤堆)

这与施扰干煤棚处于受扰干煤棚正后方,对受扰干煤棚背风区域的空气流动影响较大有关。而在 180° 风向角时,施扰干煤棚处于受扰干煤棚正前方,其遮挡效应使受扰干煤棚迎风面的风荷载有较大的降低。150° 风向角是有干扰情况下最不利风向,与对应的无干扰情况下最不利的 30° 风向角相比,网壳前沿负压区较大区域的体型系数绝对值提高了 15% ~ 20%,表明干扰的影响会导致干煤棚平均风荷载增大,应引起注意。

远干扰情况下受扰干煤棚的风荷载情况与远干扰情况下类似,限于篇幅,不再赘述。

### 2.2 脉动风压系数

试验结果表明,煤堆的存在对干煤棚内表面脉动风压的影响很小,对外表面脉动风压的影响更是微乎其微。而且可以发现,相比于平均风压,干煤棚内表面的脉动风压变化的幅度较小。因此,对脉动风压,以下分析均只讨论网壳上、下表面叠加的净风压。

同样取 B 类风场、无干扰和低煤堆为基本工况,

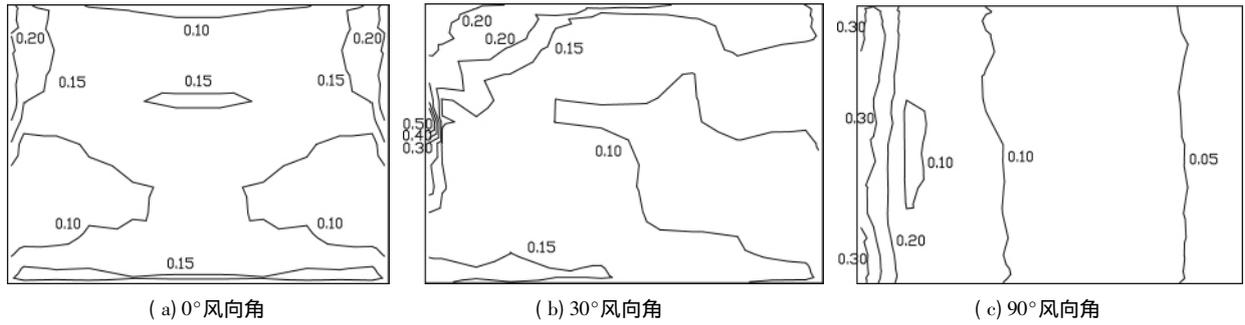


图9 干煤棚净风压的脉动风压系数(B类风场、无干扰和低煤堆)

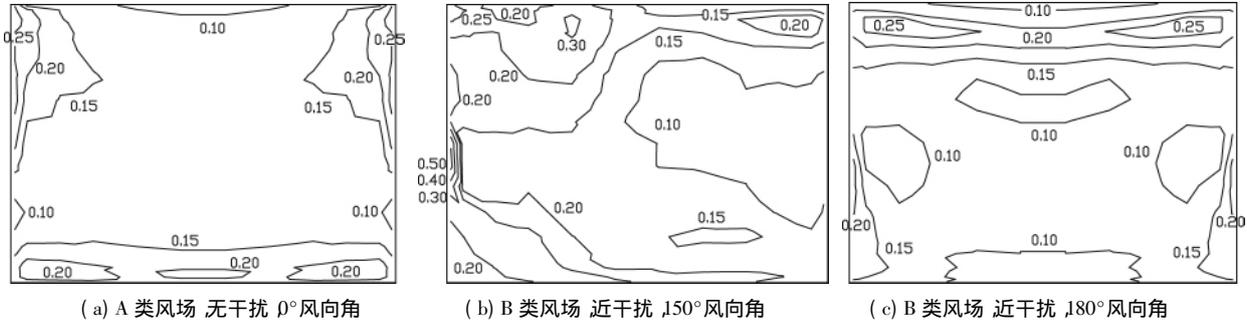


图10 干煤棚净风压的脉动风压系数(低煤堆)

典型风向角(0°、30°和90°)下干煤棚表面净风压的脉动风压系数(以40.5m为参考高度)等值线图,见图9。与平均风压分布类似,脉动风压系数也是在30°和90°风向角时迎风边缘较大,最高达0.5,这与此迎风边缘发生了强烈的旋涡脱落有关。

A类风场下0°风向角下的脉动风压等值线见图10(a)。与图9(a)相比,A类风场下网壳的脉动风压系数略大。为了分析另一个干煤棚的气动干扰影响,近干扰情况下,150°和180°风向角的脉动风压等值线分别见图10(b)和10(c)。分别与图9(b)和9(a)相比,可以发现周边的另一个干煤棚有较大影响。180°风向角时,尽管施扰干煤棚处于受扰干煤棚正前方,但与平均风压的遮挡效应不同,受扰干煤棚迎风位置的脉动风荷载反而增大了。150°风向角是有干扰情况下最不利风向,与对应的无干扰情况下最不利的30°风向角相比,主要是网壳前沿脉动风压系数从0.15~0.20提高到0.20~0.30。

### 3 规范化应用

在前述研究中,分别根据干煤棚表面平均风压系数等值线图及35块区域的分块体型系数图分析了干煤棚的风荷载特性,但对于结构设计师来说,这些结果还是不便于使用。经相关设计部门建议,并便于将来规范化的要求,将干煤棚表面划分为5块区域,见图11。

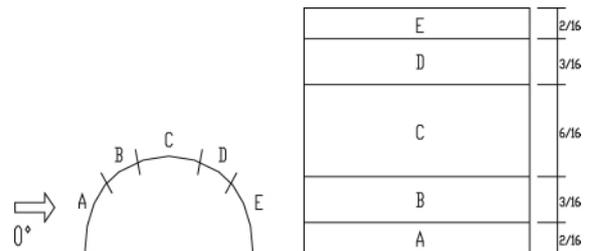


图11 干煤棚5区域示意图(右侧标注表示横轴向每个区域占横轴总长度的比例)

根据前述研究,对前述有、无周边煤棚干扰的三种情况,分别给出5块区域在0°~180°范围内的体型系数,见图12。由图12可见,远干扰和近干扰两种情况下的结果比较接近,但与无干扰情况比有较大差别。对A和E区域的体型系数而言,均是在施扰干煤棚在受扰干煤棚前方时有较大影响。施扰干煤棚对B、C、D区域的体型系数的影响更显著,这与施扰干煤棚的存在影响了受扰干煤棚在这些部位的旋涡脱落有关。

根据上述研究,风场和内部煤堆对干煤棚风荷载的影响较小,因此以B类风场和低煤堆为基本情况,对有无周边建筑干扰的三种情况,分别给出在0°~180°范围内每个分块的体型系数的最值,见表1。由于两个干煤棚互为干扰物,而本文只研究了干煤棚在一侧的情况,且A区和E区,以及B区和D区是对称布置,因此表1中A区和E区,以及B区和D区的结果是可以互换的。

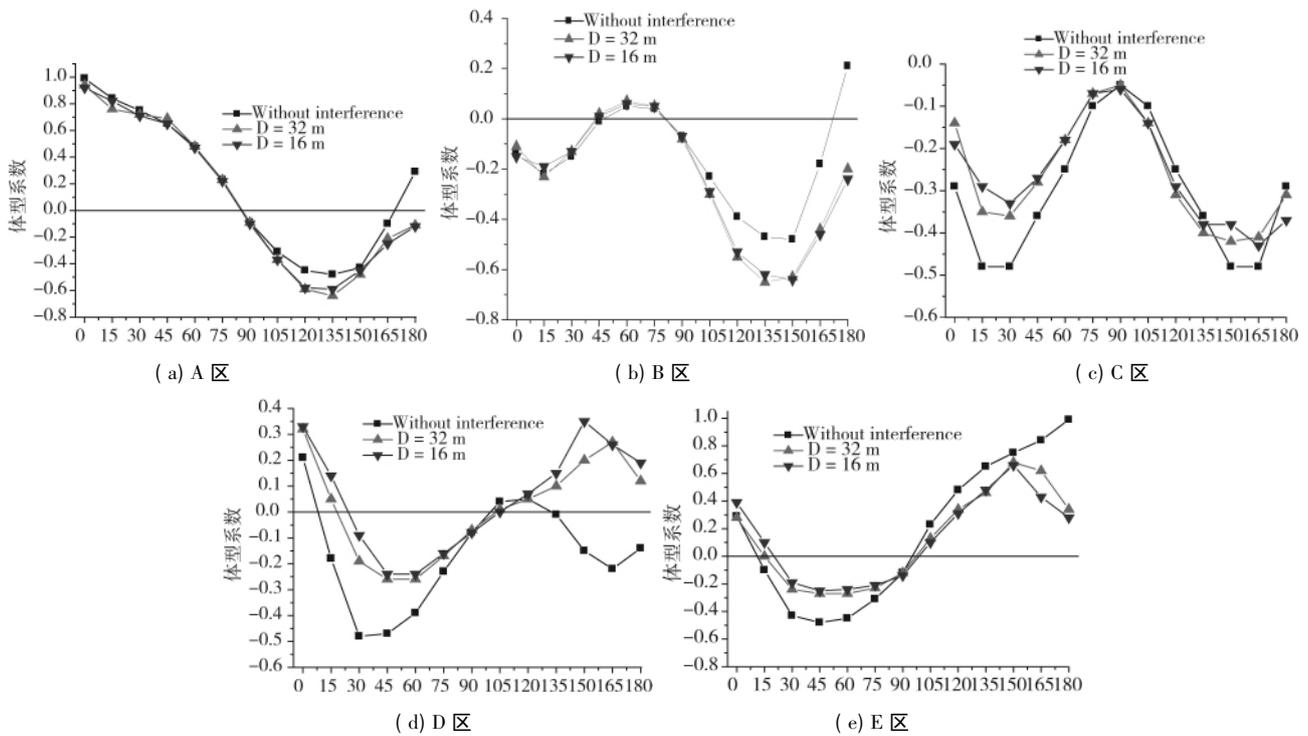


图 12 干煤棚 5 区域净风压的分块体型系数( B 类风场和低煤堆)

干煤棚表面分块体型系数的最值 表 1

	工况	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区
最大值	无干扰	0.99	0.21	-0.05	0.21	0.99
	远干扰	0.94	0.07	-0.05	0.32	0.68
	近干扰	0.92	0.06	-0.06	0.35	0.66
最小值	无干扰	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48
	远干扰	-0.64	-0.65	-0.42	-0.26	-0.27
	近干扰	-0.59	-0.64	-0.43	-0.24	-0.25

对于干煤棚结构设计来说,最不利的风荷载是其迎风面(前缘)为正压,而背风面(后缘)为负压,按照这一原则,并同时保守地取各种工况下的最不利结果,最后给出了适合工程应用的干煤棚 5 个区域的体型系数,见表 2,该结果可供规范参考。

供规范参考的各分块的体型系数 表 2

A 区	B 区	C 区	D 区	E 区
0.99	0.35	-0.48	-0.65	-0.64

#### 4 结语

以电厂干煤棚工程项目为背景,根据风洞试验研究了干煤棚这类大跨度柱面网壳结构的风荷载体型系数,得到如下结论: 1) 斜风向作用下的干煤棚风荷载较大,特别 30°~45°风向角时干煤棚受到的风荷载作用最为不利,其迎风前沿净风压的平均风压系数可达 -2.0,脉动风压系数可达 0.5; 2) 煤

堆对干煤棚内表面风压有一定影响,但从整体风荷载考虑则影响很小; 3) 干煤棚风荷载体型系数与风场类型无关; 4) 周边另一个干煤棚的干扰影响会导致受扰干煤棚的平均风荷载增大,而脉动风压系数在网壳前沿同样有明显的增加。

最后根据相关设计部门建议,将干煤棚表面分为 5 个面积区域,给出了适合工程应用的体型系数,可供规范参考。

#### 参 考 文 献

- 1] 张其林,陈扬骥,沈祖炎,等. 102(80 米煤棚网壳风压分布的风洞试验研究[J],特种结构,1993(4),57-60.
- 2] 罗尧治,张浩. 弦弓式预应力柱面网壳结构风洞试验及风致效应研究[J]. 空间结构,2005,11(2),3-8.
- 3] 王建明,刘世宇,舒恒. 大跨度干煤棚结构风载风洞实验研究[C]//第十二届全国结构风工程学术会议论文集,2005,406-412.
- 4] 李元齐,Tamura Yukio,沈祖炎. 柱面壳体表面风压分布特性风洞试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(11),1457-1463.
- 5] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- 6] 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.