

底部开口特征对柱面煤棚平均风荷载影响研究*

刘小兵^{1,2,3}, 李宇青¹, 崔会敏^{2,3,4}, 吴倩云¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 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)

(4. 石家庄铁道大学数理系 石家庄, 050043)

摘要 为满足运输、工艺及通风方面的要求,实际工程中的煤棚结构常在底部设置洞口和百叶窗,这些不同底部开口特征对煤棚结构平均风荷载特性的影响规律值得深入研究。以某顶部设置通风气楼、底部设置洞口和百叶窗的柱面煤棚为对象,通过刚性模型测压试验,研究了不同底部开口特征对结构整体风荷载以及局部风荷载的影响规律。结果表明:不同底部开口特征对结构纵向和跨向的整体力作用不明显,对竖向的整体力作用较为显著。与底部洞口全开时相比,只关闭底部百叶窗时,竖向整体力系数减小70%~93%;洞口全关闭时,竖向整体力方向由向上变为向下。不同底部开口特征对结构外表面风荷载的影响较小,对内表面风荷载的影响较为明显。随着底部透风率的减小,内表面风吸力逐渐增大。

关键词 柱面煤棚;风洞试验;底部开口;整体力系数;体型系数

中图分类号 TU312;TH126

0 引言

煤棚是一种大型煤炭存储仓库^[1]。随着煤棚跨度不断增大,其结构对风荷载愈发敏感。出于功能及环保等方面的考虑,煤棚常在顶部设置天窗(通风气楼),而山墙则常设计为全开启或半开启。与全封闭煤棚相比,不同的开口形式使得结构的风荷载分布规律更为复杂^[2-6]。

为确保煤棚结构的抗风安全,许多学者对其风荷载特性进行了深入研究。刘庆宽等^[7]研究了球壳结构煤棚的风荷载分布特性,发现天窗开启和关闭对结构外表面部分区域风压分布有明显影响,主要影响结构的背风面风压。黄鹏等^[8]研究了柱面网壳结构煤棚的风荷载分布特性,明确了端部开口对结构表面风荷载分布特征的影响规律。陈琳琳等^[9]对一侧半封闭山墙柱面煤棚的体型系数的分布规律进行了研究,发现纵向来流作用下半封闭端部山墙对结构不利,顶部承受更大风荷载。孙高健等^[10]针对柱面煤棚结构,基于模型风洞试验对比分析了两端全开口、半封闭以及全封闭时结构表面体型系数的变化规律。孙一飞等^[11]对比研究了两端全封闭和一端半封闭状态下柱面煤棚的体型系数和极值风压系数,给出了两种状态下的最不利风向角,发现半封闭

状态下结构将承受更大的极值风荷载。钟奇等^[12]对比分析了端部开口及端部封闭状态下煤棚结构的风荷载分布特性,发现两端山墙采用半球形网壳进行封闭可有效降低结构边缘处的风荷载。

综上,既有研究主要对比分析了天窗的开启与关闭,以及山墙的全开启、全关闭与半封闭对煤棚结构风荷载特性的影响规律。为满足运输和工艺方面的要求,实际工程煤棚结构常在底部局部位置设置不同类型的洞口。此外,为满足通风要求,除煤棚上部设置天窗(通风气楼)外,其底部常设置百叶窗,此类底部开口对煤棚结构风荷载特性的影响规律同样值得深入研究。基于此,本研究以某电厂柱面网架煤棚为研究对象,通过刚性模型测压试验对不同底部开口特征的煤棚平均风荷载特性进行研究,对比分析结构的整体力系数以及局部体型系数的分布规律,为类似煤棚主体结构的抗风设计提供参考。

1 风洞试验设计

1.1 工程简介

煤棚立面图如图1所示。该煤棚纵向长为269.5 m,跨向长为185 m、高为52.8 m。煤棚底部周向设有4层百叶窗,每个百叶窗尺寸为1.5 m×1.8 m

* 国家自然科学基金资助项目(52078313,52008273);中央引导地方科技发展资金资助项目(236Z5407G,236Z5410G)

收稿日期:2023-11-11;修回日期:2024-01-30

(宽×高)。南北立面设有车行洞(Ⅰ型、Ⅱ型)和人行洞。东、西立面各设有3个人行洞。车行洞Ⅰ(V_1 、 V_3 、 V_5 、 V_6 、 V_9)尺寸为6 m×6 m(宽×高)。车行洞Ⅱ(V_2 、 V_4 、 V_7 、 V_8)尺寸为11 m×6.15 m(宽×高),人行洞(M_1 ~ M_{15})尺寸为1.5 m×6.1 m(宽×高),煤棚顶部设有通风气楼。

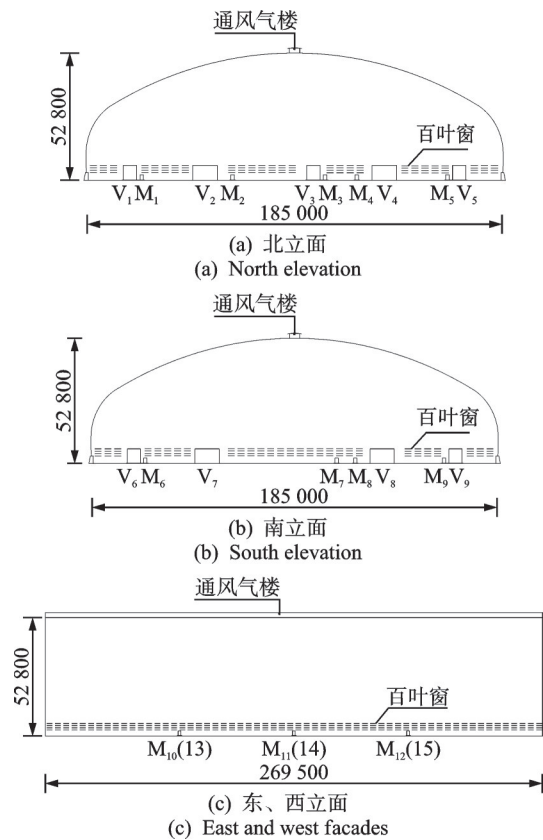


图 1 煤棚立面图(单位:mm)
Fig.1 Elevation view of coal shed (unit: mm)

1.2 试验概况

风洞试验模型实物图如图 2 所示,模型的几何缩尺比为 1:200,采用丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene,简称 ABS)板制作而成。内外表面均存在风压,在内外表面均设置测压孔,共设置 1 076 个测点。煤棚顶部风压变化较为复杂,因此在顶部测点进行了加密处理。模型的测点布置如图 3 所示。

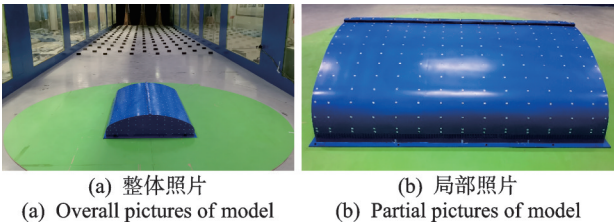


图 2 试验模型实物图
Fig.2 Pictures of test model

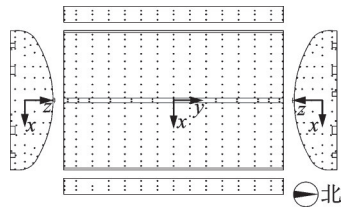


图 3 模型测点布置图
Fig.3 Layout of model measuring points

试验在石家庄铁道大学风工程研究中心风洞试验室低速试验段进行,该试验段的尺寸长为 24 m、宽为 4.4 m、高为 3 m,低速试验段最大风速可达 30 m/s。试验时,模型安置于转盘中心位置,通过转动转盘改变来流风向角。采用刚性模型进行测压试验,通过电子压力扫描阀测得模型表面不同位置测压孔的风压,采样频率为 330 Hz,采样时间为 30 s,采样点数为 9 900。按照我国《建筑结构荷载规范》^[13],本工程所在地地形地貌及待测建筑周边环境的地貌粗糙度为 B 类。采用尖劈和粗糙元被动模拟方法模拟地表粗糙度特性,风洞中地面粗糙度模拟布置如图 4 所示。图 5 为平均风剖面 and 紊流度剖面,即采用图 4 中模拟装置得到的数据。图中: Z_r 为参考高度,对应实际高度 200 m; U 为不同高度处的风速; U_r 为 Z_r 高度处的风速; Z/Z_r 与 U/U_r 均为量纲一的量。可以看出,试验模拟得到的风速剖面、紊流度剖面均与规范规定的理论值吻合较好。

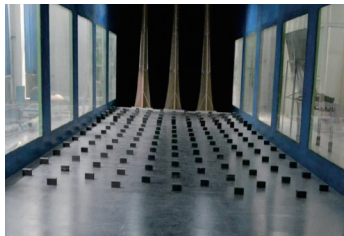


图 4 地面粗糙度模拟装置
Fig.4 Surface roughness simulator

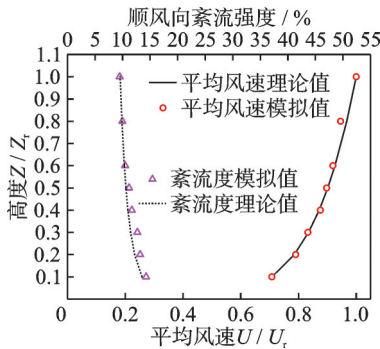


图 5 平均风剖面 and 紊流度剖面
Fig.5 Mean velocity profile and turbulence intensity profile

试验共进行了 7 个风向角的测试,风平行于长轴方向吹向山墙为 0°风向角,风向角间隔为 30°,逆

时针增加,坐标系满足右手定则, z 轴向上为正。风向角定义示意如图6所示。

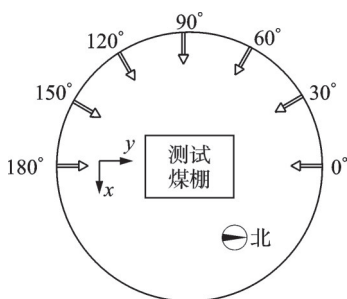


图6 风向角定义示意图

Fig.6 Diagram of definition for wind direction angle

通过控制人行洞、车行洞和百叶窗的开启和关闭,实现模型开口状态的改变,共设置6种不同工况,不同工况下模型透风率如表1所示。6种试验工况编号为 $C_1 \sim C_6$ 。 C_1 :全开,即人行洞、车行洞、百叶窗全部打开; C_2 :只关人行洞,打开车行洞、百叶窗; C_3 :只关车行洞,打开人行洞、百叶窗; C_4 :半关百叶窗,即关闭底部上面2层的百叶窗,打开人行洞、车行洞; C_5 :全关百叶窗,即底部4层百叶窗全部关闭,打开人行洞、车行洞; C_6 :全关,即人行洞、车行洞、底部4层百叶窗全关闭。

表1 不同工况下模型各立面透风率

工况	北立面	南立面	西立面	东立面
C_1	9.46	9.24	8.14	8.14
C_2	9.26	9.08	8.08	8.08
C_3	8.11	8.34	8.14	8.14
C_4	5.50	5.14	4.10	4.10
C_5	1.54	1.05	0.06	0.06
C_6	0	0	0	0

从表1可以看出, $C_1 \sim C_3$ 工况下模型各立面透风率差别不大,减小约1.2%。 $C_3 \sim C_5$ 工况下各立面透风率减小约4%, C_6 工况下各立面透风率为0。

1.3 参数定义

试验采用内外表面同步测压技术,风压系数定义为

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

其中: C_{pi} 为*i*点的风压系数; p_i 为测点*i*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 为参考高度处(对应实际工程结构的高度为10 m)来流的风速。

净压系数为

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

其中: C_{pdi} 为*i*点的净压系数; C_{pwi} 和 C_{pni} 分别为外部测点和内部测点的风压系数。

对于结构内、外表面来说,风压沿结构表面的法向指向结构时为正值,远离结构时为负值。

净压体型系数可由测点净压系数计算得到,即

$$\mu_{sdi} = \frac{\bar{C}_{pdi}}{(Z_i/10)^{2\alpha}} \quad (3)$$

其中: μ_{sdi} 为*i*点的净压体型系数; $\bar{C}_{pdi}$ 为平均净压系数; Z_i 为测点*i*处的高度; $\alpha=0.15$,为地貌粗糙度指数,本研究工程所在地为B类地貌。

引入结构的整体力系数,对不同底部开口特征工况下整体风荷载的变化进行评价,即

$$C_{Fq} = \sum_i \bar{C}_{pdi} A_i \cos \gamma_{qi} / A_q \quad (4)$$

其中: C_{Fq} 为*q*向结构的整体力系数; $q=x, y, z$,分别表示*x*方向、*y*方向和*z*方向,正方向见图3; $\bar{C}_{pdi}$ 为测点*i*的净风压系数; A_i 为测点*i*的所属面积; A_q 为结构在*q*方向上的投影面积; γ_{qi} 为测点*i*在*q*方向上的法向量的方向角。

2 试验结果分析

2.1 不同底部开口特征对整体风荷载的影响

通过分析结构3个方向的整体力系数,研究不同底部开口特征对煤棚结构整体风荷载的影响。图7为不同方向的整体力系数,展示了6种不同开口工况下*x*、*y*、*z*方向的数据,正值表示与坐标轴正向相一致,负值则表示相反。

由图7可知,不同底部开口特征工况下对*x*、*y*方向的力系数影响较小,整体变化趋势基本一致。随着风向角的变化,*x*、*y*方向的整体力系数有一定波动。整体来看,*z*方向的整体力系数对不同开口的变化情况较为敏感,不同开口工况下力系数差别较大,甚至出现力方向上的变化。

在 $C_1 \sim C_4$ 工况下,数值多在0.1~0.4之间,整体变化规律基本一致,结构均承受风吸力。在 $C_1 \sim C_3$ 工况下,*z*方向的整体力系数差异不明显;在 C_3 工况(关车行洞)下,结构受到的风吸力基本达到最大。在 C_4 工况(半关百叶窗)下,各立面透风率下降约4%,可看到*z*方向的整体力系数较 $C_1 \sim C_3$ 工况下有所减小,减弱了结构所受的风吸力。在 C_5 和 C_6 工况下,*z*方向的整体力系数与其他工况有较大区别, C_5 工况(全关百叶窗)下大部分力系数为正值,表明结

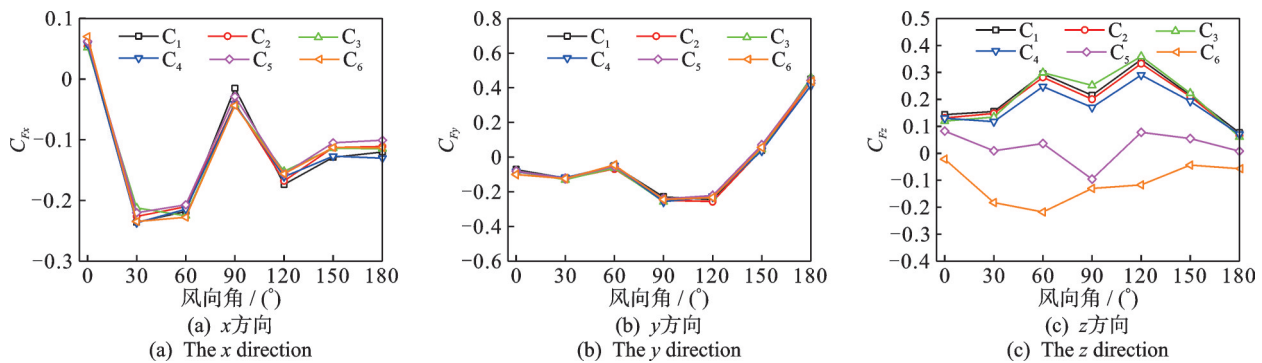


图7 不同方向的整体力系数

Fig.7 Overall force coefficient in different directions

构整体承受向上的风吸力; C_6 工况下, z 方向上整体力系数均为负值, 结构受到的风压力最大。

与 C_1 工况(全开)相比, 在 C_2 工况(关人行洞)的大部分风向角下, 竖向整体力系数减小不到 10%; 在 C_3 工况(关车行洞)某些风向角下竖向整体力系数约减小 10%~20%, 在其他风向角下则略有增大; 在 C_4 工况(半关百叶窗)下, 竖向整体力系数约减小 10%~25%; 在 C_5 工况(全关百叶窗)下, 除 90° 风向角外, 其竖向整体力系数约减小 70%~93%; 在 C_6 工况(全关)下, 竖向整体力方向由向上变为向下。随着风向角的变化, 纵向来流变为跨向来流时, z 方向的整体力系数变化明显。

2.2 不同底部开口特征对局部风荷载分布的影响

不同的风向角与透风率对煤棚风荷载的影响较大, 本小节重点分析 6 种工况在纵向及跨向来流作用下的煤棚局部风荷载分布规律, 并在纵向、跨向两个典型风向角下进行试验。

2.2.1 纵向来流

纵向来流作用下(0° 风向角)体型系数等值线图如图 8 所示, 风沿与纵轴平行方向吹向煤棚。在纵向来流作用下, 6 种不同工况外表面的体型系数分布规律基本一致, 差异不明显。由 8(a) 可知, 煤棚表面迎风侧山墙为正压, 体型系数达到 0.8。随着高度的增加, 体型系数减小为 0.6, 体型系数沿山墙跨度方向逐渐减小。由于气流分离, 导致两侧的角点区域出现小部分负压。屋盖迎风侧前缘部分, 气流在迎风侧山墙的顶部区域处发生强烈的流动分离, 表现出较强的风吸力, 体型系数达到 -0.9。沿纵向长度方向, 气流在中后部发生再附, 体型系数的绝对值逐渐减小, 风荷载较小。在屋盖跨中以及背风侧尾部区域, 体型系数均为 -0.1。屋盖体型系数分布沿纵向轴线基本成对称分布。背风侧山墙均为负

压, 底部区域负压值为 -0.25。随着高度的增加, 体型系数逐渐减小为 -0.15。

在纵向来流作用下 6 种不同工况主要影响内表面的体型系数分布, 均承受风吸力。由图 8(b) 可知, 对比 $C_2 \sim C_6$ 工况与 C_1 工况下(全开)内表面体型系数等值线图可以发现, 内表面体型系数值差异不大, 变化较为稳定。在 $C_1 \sim C_4$ 工况下, 煤棚迎风侧山墙的底部区域体型系数值达到 -0.2, 随着高度的增加, 体型系数的绝对值逐渐减小为 -0.14, 屋盖跨中部分区域体型系数在 -0.16~-0.1 之间; 两侧底部区域负压增大, 体型系数约为 -0.2。背风侧山墙底部体型系数值在 -0.2~-0.1 之间。随着模型透风率的减小, 在 C_5 工况(全关百叶窗)和 C_6 工况(全关)下, 风荷载对内表面的影响逐渐增强, 当洞口全部关闭(C_6 工况)时, 内表面体型系数的绝对值基本达到最大, 影响更为剧烈。与 C_1 工况(全开)相比, 内表面体型系数由约 -0.12 变为 -0.16 (C_5 工况)和 -0.22 (C_6 工况), 体型系数的绝对值分别增大 33% 和 83%。在底部透风率减小到 0 时, 内表面体型系数绝对值基本达到最大。

煤棚所受的风荷载需同时考虑结构外表面和内表面压力共同作用的影响, 将外表面风压减去内表面风压即为煤棚结构的净风压。由图 8(c) 可知, C_1 工况(全开)、 C_2 工况(关人行洞)、 C_3 工况(关车行洞)和 C_4 工况(半关百叶窗)下的净风压体型系数风荷载分布规律大体相似。由于内外风压方向相同, 煤棚迎风侧山墙的风荷载增大, 体型系数约为 1.0。随着高度的增加, 体型系数逐渐减小为 0.6, 两侧角点区域仍为小部分的负压。在屋盖迎风侧前缘部分, 体型系数达到 -0.8, 与外表面负压相比有所减弱。沿纵向体型系数的绝对值逐渐减小, 在屋盖跨中以及背风侧尾部区域, 体型系数均为 0。背风侧山墙仍承受负压, 体型系数为 -0.1~-0.04, 比外表

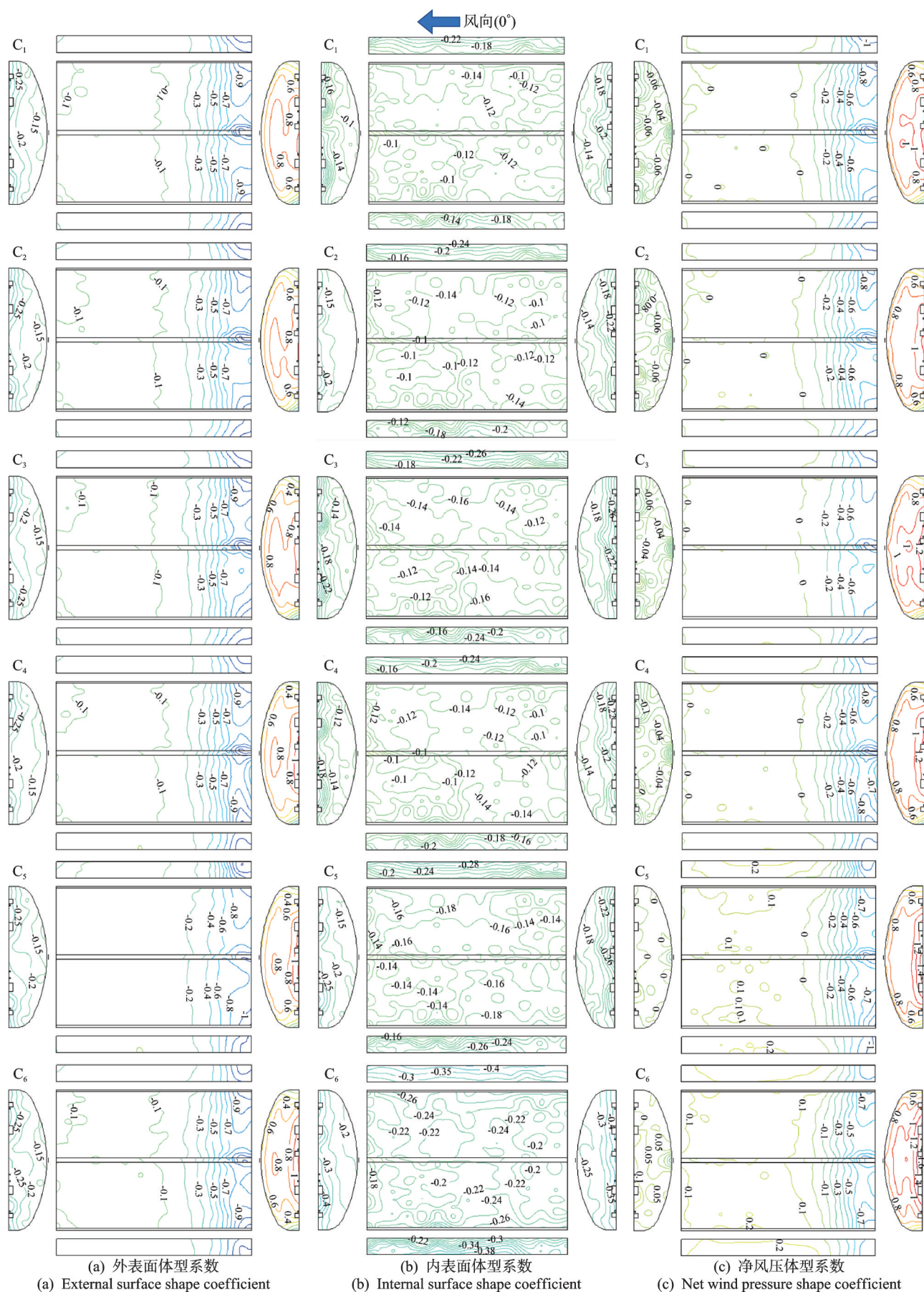


图8 纵向来流作用下(0°风向角)体型系数等值线图

Fig.8 Contour map of shape coefficient under longitudinal incoming flow (0° wind direction angle)

面背风侧山墙的体型系数绝对值减小约50%。随着模型透风率逐渐减小,在 C_5 工况(全关百叶窗)和 C_6 工况(全关)下,迎风侧山墙底部正压区域以及体型系数值显著增大。同时,在跨中尾流区域的气流再附作用加强,产生了不同的体型系数值,屋盖跨中以及背风侧尾部区域变为正压,背风侧山墙体型系数值也由0变为0.05。

2.2.2 跨向来流

跨向来流作用下(90° 风向角)体型系数的等值线图如图9所示,风沿与纵轴垂直方向吹向煤棚。在跨向来流作用下,6种不同工况外表面体型系数的分布规律基本一致,差异不明显。由图9(a)可知,煤棚的屋盖迎风侧底部区域受气流撞击形成正压,体型系数为较大的正值,在0.7~0.9之间。沿纵向长度方向,体型系数值向两侧角点区域递减,出现小部分的负压。在沿跨度方向,随着高度的增加,体型系数逐渐接近于0。气流沿曲面向上迅速爬升,体型系数变为-0.2。高度的增加使得体型系数的绝对值增大,而靠近顶部天窗的体型系数绝对值又有所减小。由于旋涡脱落,顶部区域出现较大的负压,绝对值最大约为1.6,且负压的绝对值远大于底部迎风面正压的绝对值。在屋盖背风面区域,随着高度的降低,体型系数的绝对值逐渐减小为0.3,底部区域体型系数值约为-0.4。两侧山墙体型系数的变化规律基本一致,在迎风侧角部区域,气流分离导致产生较大的风吸力,体型系数为-1.0,沿跨向体型系数的绝对值逐渐减小,值变为-0.2。

在跨向来流作用下6种不同工况主要影响内表面的体型系数分布,均承受风吸力。由图9(b)可知,对比 C_2 ~ C_6 工况下的内表面体型系数分布等值线图与 C_1 工况(全开)下的体型系数分布等值线图可以发现, C_2 工况(关人行洞)、 C_3 工况(关车行洞)和 C_4 工况(半关百叶窗)下内表面体型系数的值变化不明显。屋盖迎风侧底部区域体型系数值在-0.38~-0.22之间,中间部分区域体型系数值在-0.24~-0.14之间,变化较为稳定。在屋盖背风侧底部,负压值存在些许差异。两侧山墙底部区域负压值较大,体型系数值约为-0.25。随着高度的增加,体型系数值逐渐减小。随着模型透风率的减小,在 C_5 工况(全关百叶窗)和 C_6 工况(全关)下,内表面体型系数明显增大,风吸力的影响增强。与 C_1 工况(全开)相比,内表面体型系数值约由-0.2变为-0.34(C_5 工况)和-0.36(C_6 工况),体型系数的绝对值增大约70%和80%。可以看到,在底部透风率

减小到0时,内表面体型系数绝对值基本达到最大,比纵向来流风作用下体型系数绝对值大0.2左右,结构内表面受到的负压更大。

由图9(c)可知, C_2 工况(关人行洞)、 C_3 工况(关车行洞)、 C_4 工况(半关百叶窗)和 C_1 工况(全开)下的净风压体型系数分布规律基本一致。由于内外表面共同作用,屋盖迎风侧底部区域体型系数值达1.1,随着高度的增加,沿跨向体型系数逐渐减小为0。屋盖迎风面中上部大部分为负压区,顶部天窗迎风侧前缘,体型系数值约为-1.2,背风侧体型系数值约为-0.9。屋盖背风面大部分为负压, C_1 ~ C_3 工况下的体型系数值为-0.2,底部中间小部分区域体型系数值为0; C_4 工况下(半关百叶窗)体型系数值为-0.1,底部中间小部分区域体型系数值为1。两侧山墙体型系数的变化规律基本一致,即由-0.6变为0。在 C_5 工况(全关百叶窗)和 C_6 工况(全关)下,屋盖迎风面底部正压的强度以及体型系数值显著增大,底部体型系数最大值达1.5;随着高度的增加,沿跨向体型系数逐渐变为0。屋盖中上部负压区的范围和强度有所减小,体型系数值变为-0.2。顶部天窗迎风面前缘负压有所减小,体型系数值变为-0.8。屋盖背风面中上部体型系数为0,背风面底部区域承受正压,体型系数值为0.1~0.3。两侧山墙体型系数变化规律基本一致,迎风侧山墙角部区域体型系数值达-0.8,仍为较大的负压,产生了较大的风吸力,沿跨向由负压逐渐变为正压,体型系数为0.4。

3 结 论

1) 以某顶部设置通风气楼、底部设置洞口和百叶窗的柱面煤棚为对象,通过刚性模型测压试验,研究了不同底部开口特征对柱面煤棚平均风荷载的影响规律。通过对比分析结构整体力系数及测点体型系数,揭示了底部开口对整体风荷载以及局部风荷载的影响规律。

2) 不同底部开口特征对结构纵向和跨向的整体力作用不明显,对竖向整体力作用较为显著。与底部洞口全开时相比,只关闭底部百叶窗时,竖向整体力系数减小70%~93%;洞口全关闭时,竖向整体力方向由向上变为向下。与纵向来流相比,跨向来流时的作用更为明显。

3) 不同底部开口特征对结构外表面风荷载的影响较小,对内表面风荷载的影响比较明显。随着底部透风率的减小,内表面风吸力逐渐增大。与底部洞口全开时相比,只关闭底部百叶窗时,内表面体

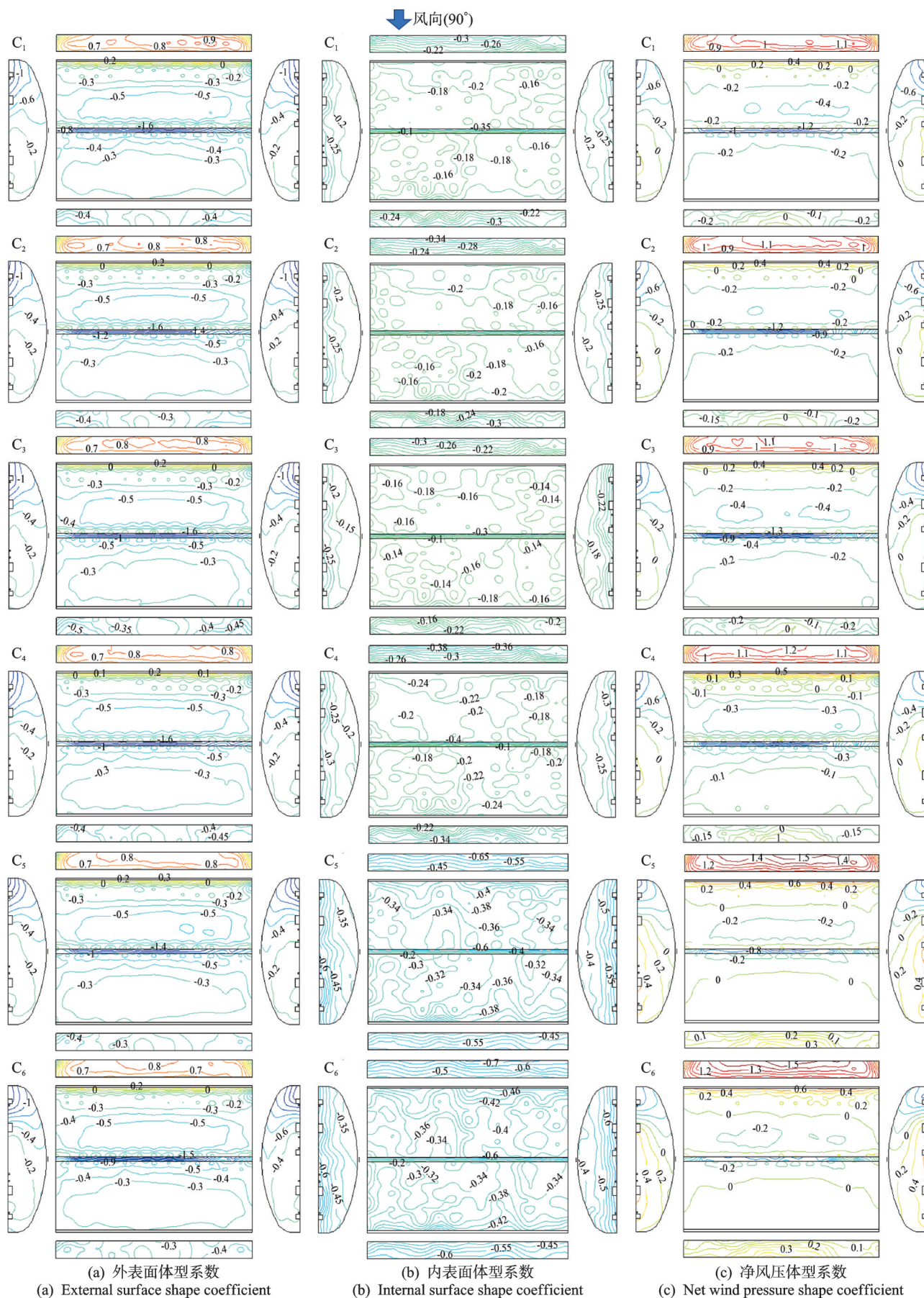


图9 跨向来流作用下(90°风向角)体型系数等值线图

Fig.9 Contour map of shape coefficient under cross flow (90° wind direction angle)

型系数的绝对值在纵向和跨向分别增大约 33% 和 70%, 洞口全关闭时, 内表面体型系数的绝对值在纵向和跨向分别增大约 83% 和 80%。

4) 实际工程中的煤棚网架抗风设计既要避免过大的向上升力, 也要避免过大的向下压力。因此, 对于上部设有天窗、底部设有门洞和百叶窗的煤棚, 需要适当控制底部开口的透风率, 以确保结构具有较好的抗风性能。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 火力发电厂土建结构设计技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [2] SU N, PENG S T, HONG N N, et al. Experimental and numerical evaluation of wind-driven natural ventilation and dust suppression effects of coal sheds with porous gables[J]. Building and Environment, 2020, 177: 106855.
- [3] 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(增刊2): 166-170, 209.
MA Wenyong, LIU Qingkuan, XIAO Bin, et al. Wind pressure distribution on three centered cylindrical latticed shell[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S2): 166-170, 209.(in Chinese)
- [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.
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)
- [5] 马文勇, 刘庆宽, 肖彬. 典型拱形壳体风荷载分布规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 63-68.
MA Wenyong, LIU Qingkuan, XIAO Bin. Wind loads distribution on typical vaulted shells[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5): 63-68.(in Chinese)
- [6] 马文勇, 李晓娜, 刘庆宽, 等. 局部开口对封闭柱面网壳风荷载影响[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 14-17, 34.
MA Wenyong, LI Xiaona, LIU Qingkuan, et al. Effects of local openings on wind loads of an enclosed cylindrical latticed shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 14-17, 34.(in Chinese)
- [7] 刘庆宽, 卢照亮, 郑云飞, 等. 大跨球壳结构风压分布规律和风致干扰效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 140-146.
LIU Qingkuan, LU Zhaoliang, ZHENG Yunfei, et al. Experimental study on wind pressure distribution and wind-induced interference effects on long-span spherical structure[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 140-146.(in Chinese)
- [8] 黄鹏, 顾明, 叶孟洋. 干煤棚柱面网壳结构风荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2011(增刊1): 1432-1437.
HUANG Peng, GU Ming, YE Mengyang. Experimental study on wind loads on cylindrical reticulated shells[J]. Building Structure, 2011(S1): 1432-1437. (in Chinese)
- [9] 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(增刊1): 189-193.
CHEN Linlin, CUI Huimin, ZHENG Yunfei, et al. Experimental investigation of wind load on large-span cylindrical latticed shell[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(S1): 189-193.(in Chinese)
- [10] 孙高健, 马文勇, 刘庆宽, 等. 开口状态及干扰对柱面结构风荷载的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 1106-1113.
SUN Gaojian, MA Wenyong, LIU Qingkuan, et al. Influence of open state and disturbance on wind load of cylindrical structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1106-1113.(in Chinese)
- [11] 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(增刊1): 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(S1): 234-239.(in Chinese)
- [12] 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(增刊1): 963-968.
ZHONG Qi, LAN Zhikun, HUANG Peng, et al. Experimental study of wind loads on open-end and closed-end dry coal shed structures[J]. Building Structure, 2016, 46(S1): 963-968.(in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.



第一作者简介:刘小兵,男,1982年3月生,博士、教授。主要研究方向为桥梁结构的风荷载与风致振动。曾发表《亚临界雷诺数下线形布置三圆柱的平均气动力特性》(《建筑结构学报》2023年第44卷第3期)等论文。
E-mail: x_b_liu@126.com