

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230520001

龙卷风作用下大跨柱面煤棚风荷载特性研究*

李玉学^{1,2,3}, 董阳^{1,4}, 陈铁^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北石家庄 050043; 2. 河北省风工程与风能利用工程技术创新中心, 河北石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北石家庄 050043; 4. 中国铁路郑州局集团有限公司南阳工务段, 河南南阳 473010)

摘要: 为了探究龙卷风作用下大跨柱面煤棚结构风荷载特性, 以某大跨柱面煤棚为工程背景, 采用CFD数值模拟方法分析了龙卷风移动速度、角度路径和径向距离对大跨柱面煤棚风荷载的影响规律, 并根据分析结果对煤棚表面龙卷风荷载进行风压分区, 为工程设计提供建议。研究表明: 龙卷风作用下煤棚表面风荷载以风吸力为主, 结构位于 $d=0R_m$ 位置处, 煤棚表面风压系数呈中心对称分布, 结构位于 $d=1.0R_m$ 位置处, 煤棚表面存在最大风压系数差, 最大及最小风压系数差值约为负风压系数极值的1.88倍; 龙卷风移动速度的增加使右侧边区的流动分离现象增强, 风压绝对值随之增大, 但当龙卷风移动速度到达一限值后, 风压系数不会增加并有下降的趋势; 相比 0° 路径, 在 45° 角路径下, 煤棚表面最大负风压系数为-1.8, 在 90° 角路径下, 煤棚右下角部流动分离现象减弱, 最大负风压绝对值随之减小; 龙卷风移动速度对 A_2 区及 D 区影响较大, 在同一角度路径下, 龙卷风移动速度不同时, A_2 区风压系数绝对值变化幅度最高可达28%, D 区风压系数绝对值变化幅度最高可达46%, 相较其他路径, 在 90° 角路径下, 除 B_2 区之外的分区风压系数差别较大, 较大风压均出现在角部及边缘区域, 工程设计时应加强结构角部及边缘区屋面板的设计。

关键词: 龙卷风荷载; 数值模拟; 移动速度; 角度路径; 风压系数

中图分类号: TU312.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1418-10

Research on the Wind Load Characteristics of Long-Span Cylindrical Coal Shed under Tornado

LI Yuxue^{1,2,3}, DONG Yang^{1,4}, CHEN Tie^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. China Railway Zhengzhou Bureau Group Co., Ltd. Nanyang Engineering Section, Nanyang 473010, China)

Abstract: To investigate the wind load characteristics of the long-span cylindrical coal shed structure under tornado action, a long-span cylindrical coal shed was taken as the engineering case. CFD numerical simulation methods were used to analyze the effect of tornado moving speed, angle path, and radi-

* 收稿日期: 2023-05-20; 修回日期: 2023-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278314)、河北省自然科学基金资助项目(E2019210031)、中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G)、北京交通大学“结构风工程与城市风环境北京市重点实验室”开放课题(2023-1)资助

作者简介: 李玉学(1978—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事结构风工程研究。E-mail: liyuxue2000@163.com

al distance on the wind load of the long-span cylindrical coal shed. Based on the analysis results, wind pressure zoning on the coal shed surface under tornado load was conducted to provide recommendations for engineering design. The results showed that, under tornado action, the wind load on the coal shed surface was primarily dominated by wind suction. The wind pressure coefficient on the coal shed surface exhibited a centrally symmetric distribution at the position $d = 0R_m$. The maximum wind pressure coefficient difference occurred on the coal shed surface at $d = 1.0R_m$, with the maximum wind pressure coefficient difference being about 1.88 times the extreme negative wind pressure value. The increase of tornado moving speed strengthened the flow separation phenomenon in the right-side edge zone, causing an increase in the absolute value of the wind pressure. However, once the tornado moving speed reached a threshold, the wind pressure coefficient stopped increasing and began to decrease. Compared to the 0° path, at the 45° angle path, the maximum negative wind pressure coefficient on the coal shed surface was -1.8 . At the 90° angle path, the flow separation phenomenon in the lower-right corner of the coal shed weakened, and the absolute value of the maximum negative wind pressure decreased. The tornado moving speed had a greater influence on zone A_2 and zone D. Under the same angle path, when the tornado moving speed varied, the absolute value of the wind pressure coefficient in the A_2 area changed by up to 28%, and the absolute value of the wind pressure coefficient in the D area changed by up to 46%. Compared to other paths, at the 90° angle path, the wind pressure coefficient differences in regions excluding the B_2 zone were larger, with higher wind pressure observed in corner and edge areas. Engineering design should therefore focus on strengthening the design of the roof panels in the corner and edge areas of the structure.

Keywords: tornado load; numerical simulation; moving speed; angle path; wind pressure coefficient

0 引言

龙卷风作为风致灾害的一种形式,其具有影响范围小、作用时间短、瞬时风速大、破坏力强等特点^[1-3]。近年来,随着全球气候的改变,在气旋活跃的地区龙卷风发生频率明显增加,其经过地区的工程结构安全面临严峻挑战。大跨柱面煤棚结构作为风敏感的公共建筑,其一旦遭遇龙卷风毁破坏,不仅造成一定的经济损失,而且会带来不良的社会影响,因此,准确确定龙卷风作用下结构表面风荷载值对于保证结构合理进行抗龙卷风设计非常重要^[4-6]。

目前,针对风敏感的大跨结构,现行的结构风荷载规范还未给出其抗龙卷风设计的相关规定,对此国内外不少学者进行了探索,主要通过采用理论分析、现场实测、物理模拟和数值模拟等手段。在理论分析方面,J.S.Deppermann R^[7]最早提出用Rankine涡模型描述台风、龙卷风等大气涡旋现象。在现场实测方面,C.Alexander等^[8]和J.Wurman等^[9]利用多普勒雷达采集到的Spencer龙卷风实测

数据,分析了龙卷风特性及破坏程度,为物理及数值模拟提供了真实数据参考与对比。在物理模拟方面,S.Ying等^[10]建立了世界上第一台龙卷风模拟器并展开了风场特性的研究,试验中龙卷风三维风速和气压降特性的再验证了该模拟器的有效性和物理模拟研究的可行性。N.Ward^[11]对S.Ying等^[10]设计的模拟器进行了改进,Ward模拟器在腔体顶部附加一个蜂窝板,它的作用是消除上升气流中的旋转和径向分量,这种改进成为了后续被广泛应用龙卷风模拟器的标准。由于龙卷风物理模拟器造价较高且体积较小,很难在模拟器中对足尺结构模型进行研究。随着计算仿真技术的高速发展及计算流体力学理论知识得到更多的完善,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)的数值模拟方法被越来越多地使用到龙卷风研究工作中。国内外学者借助数值模拟方法研究了高铁连续桥^[12]、超大型冷却塔^[13]、列车-桥梁系统^[14]、低矮建筑^[15]等多种不同结构体系的风荷载特性。然而,大跨柱面煤棚结构与上述结构差异较大,龙卷风作用于大跨柱面煤棚的研究相对较少,尤其缺少大跨结构抗龙卷风设计的参考依据。

本文采用CFD方法对龙卷风场进行数值模拟,在验证龙卷风模拟风场准确性基础上,以某大跨柱面煤棚为工程背景,研究龙卷风作用下大跨柱面煤棚表面风荷载特性,得到龙卷风对煤棚表面风荷载的作用规律,并据此对结构表面龙卷风荷载风压进行分区,为其抗龙卷风设计提供基础。

1 龙卷风风场模拟

1.1 龙卷风场模拟方法

综合考虑目前龙卷风的空气动力学分析相关研究成果以及国内外实验室龙卷风发生装置的设计思路^[16-18],本文对龙卷风的数值模拟采用具有轴对称的双圆柱模型(图1),初始条件下,模型底部设为入流区域,顶部设为出流区域,中间设为对流区域,据此可以直接在柱坐标系下于入流区域边界处指定切向速度和径向速度分量,气流在中间对流区由底部旋转上升至顶部出流区域,并通过指定顶部出流区域边界条件从而实现龙卷风场模拟。

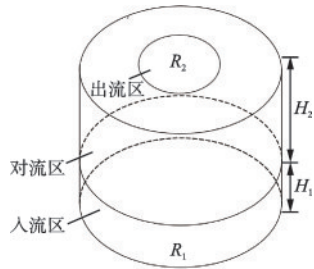


图1 龙卷风场双圆柱模型结构示意图

Fig.1 Diagram of the double cylinder model structure of the tornado field

图1中, H_1 、 R_1 、 H_2 和 R_2 分别为入流区域高度、入流半径、对流区域高度和出流半径,分别取320、800、800、400 m。

入流区域边界处的切向速度 $V_t(z)$ 和径向速度 $V_r(z)$ 采用基于龙卷风雷达实测数据回归得到的拟合方程(1)和(2)^[19];出流区域边界条件设为压力出口。

$$V_t(z) = 20.61 \left(\frac{z}{20} \right)^{0.1774} \quad (1)$$

$$V_r(z) = \begin{cases} -31.14 \left(\frac{z}{20} \right)^{0.169}, & z < 20 \text{ m} \\ 45.14 \left(\frac{z}{20} \right)^{0.1826} - 76.48, & z \geq 20 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

式中, z 为离地面高度。

模型求解采用压力基类型求解器,考虑到龙卷风场具有强旋转、多向性等特征,采用SST $k-\omega$ 湍流模型,压力-速度耦合采用SIMPLEC算法,压力梯度采用Green-Gauss Cell Based格式,压力插值采用PRESTO!格式,离散格式采用一阶迎风格式。

模型划分采用四面体网格,试算发现当网格数量超过199万时,风场最大切向速度和径向速度均达到稳定,据此最终选定网格数量约为199万,网格划分结果如图2所示。

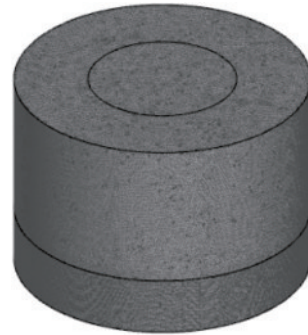


图2 龙卷风场模型网格划分结果

Fig.2 Mesh grid results of the tornado field model

1.2 龙卷风场模拟结果分析

根据1.1节所建立的龙卷风场模型、网格划分以及相应的求解设置等,计算得到了龙卷风场切向速度 $V_t(z, r)$,选取20、50、80、110 m 4个代表性高度 z 处的无量纲切向速度 $V_t(z, r)/V_m(z)$ 沿风场径向 r 的分布结果以及文献[20-21]中的Spencer龙卷风场80 m高度处的实测结果如图3所示,其中, $V_m(z)$ 为高度 z 处的最大切向速度, $R_m(z)$ 为高度 z 处龙卷风场最大切向速度位置对应的半径,也称为涡核半径。

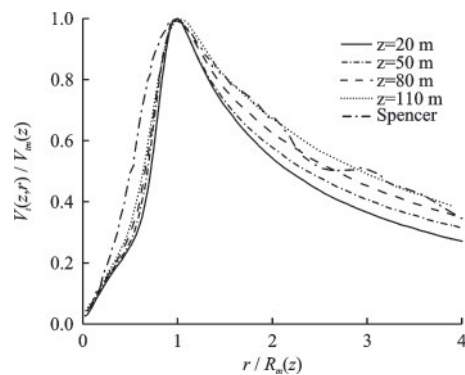


图3 不同高度处切向速度沿径向分布及与实测结果对比
Fig.3 Radial distribution of tangential velocity at different heights and comparison with measured results

由图3可见,所选4个代表性高度 z 处计算所得切向速度沿风场半径的变化趋势基本一致,表现为在风场中心处切向风速接近于0;当 $r/R_m(z) < 1$ 时,即在涡核半径 $R_m(z)$ 范围内,切向速度随着风场半径的增大而增大,且不同高度处差别不大;当 $r/R_m(z) > 1$ 时,即在涡核半径 $R_m(z)$ 范围之外,切向速度随风场半径的增大而减小,且随着高度的增加,减小越缓慢,总体随径向分布呈现出“漏斗”形状,其分布规律与文献[20-21]中的Spencer龙卷风实测结果吻合较好。

同时,根据龙卷风场径向速度 $V_r(z, r)$ 计算结果,选取 r 分别为50、200、300、400 m共4个代表性半径处无量纲径向速度 $V_r(z, r)/V_{rm}(r)$ 随高度 z 的分布结果以及文献[20-21]中的Spencer龙卷风场200 m半径处的实测结果如图4所示,其中 $V_{rm}(r)$ 为龙卷风场半径 r 处最大径向速度, z_{\max} 为测点最大高度;定义径向速度 $V_r(z, r)$ 指向龙卷风场中心为负,反之为正。

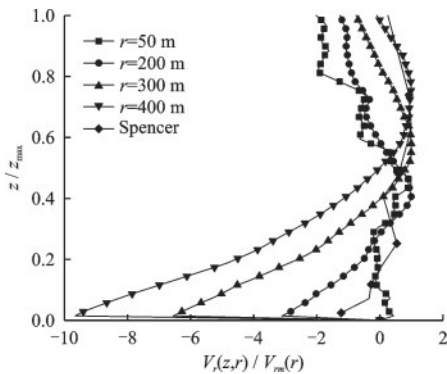


图4 不同半径处径向速度随高度分布及与实测结果对比
Fig.4 Radial velocity distribution with height at different radial distances and comparison with measured results

由图4可见,在 $r=50$ m处,当 $z/z_{\max} < 0.5$ 时,风场径向速度接近为0,且随高度变化不大,当 $z/z_{\max} > 0.5$ 时,径向速度表现为负,气流指向龙卷风中心,径向速度随着高度的增加而增大;在 r 分别为200、300、400 m时,大约在 $z/z_{\max} < 0.5$ 的近地面高度范围,径向速度随着风场半径的增加而增大,大约在 $z/z_{\max} > 0.5$ 高度范围,随着高度的增加,径向速度从较大的负值增大至0进而出现较小的正值,气流总体表现为从风场中心向外流为主,随后径向速度由正转负,原因可能在于气流冲击模型壁面产生回流。总体来看,径向风速随高度分布的上述规律与文献[20-21]中的Spencer龙卷风实测结果

也具有较好的一致性。

同样,根据龙卷风场轴向速度 $V_s(z, r)$ 计算结果,选取 r 分别为50、200、300、400 m共4个代表性半径处无量纲轴向速度 $V_s(z, r)/V_{sm}(r)$ 随高度的分布见图5,其中 $V_{sm}(r)$ 为龙卷风场半径 r 处最大轴向速度;定义轴向速度 $V_s(z, r)$ 向下为负,反之为正。

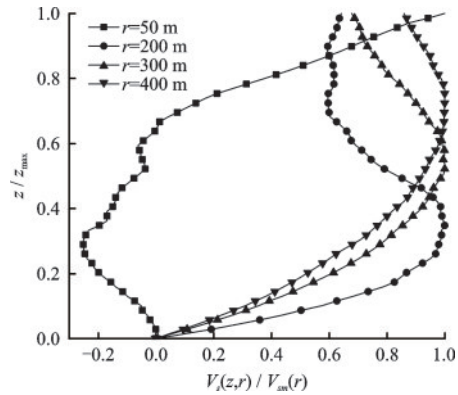


图5 不同半径处轴向速度随高度分布
Fig.5 Axial velocity distribution with height at different radial distances

由图5可见,在 $r=50$ m处,当 $z/z_{\max} < 0.6$ 时,轴向速度均为负值,且随高度的增加其绝对值先增大后减小,表明此范围以下沉气流为主,当 $z/z_{\max} > 0.6$ 时,轴向速度为正值,且随高度的增加而增大,表明此范围以上升气流为主;在 r 分别为200、300、400 m时,大约在 $z/z_{\max} < 0.5$ 的近地面高度范围,轴向速度随着风场半径的增加而增大;在 $r=200$ m时(涡核半径处),轴向速度随高度分布呈出较明显的“S”状;在 $r=300$ m和 $r=400$ m处,轴向速度随高度增加先增大后减小,数值均为正,表现为上升气流。

2 龙卷风作用下大跨柱面煤棚风荷载模拟

2.1 工程概况

研究所选大跨柱面煤棚结构长度(纵向)为370 m,跨度(横向)为121 m,高度为47.5 m,柱面矢高为41.5 m,矢跨比为0.34,底部支承柱高出地面6 m,柱面由三段圆弧组成,两端圆弧半径为40 m,中心段圆弧半径为80 m,其所对应的圆心角分别为 31° 和 92° ,如图6所示。

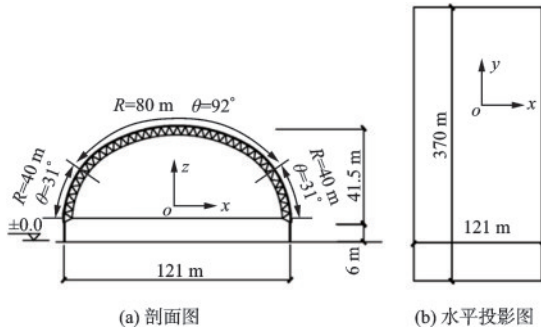


图6 柱面煤棚结构示意图

Fig.6 Diagram of cylindrical coal shed structure

2.2 模型建立、网格划分及求解设置

影响龙卷风作用下大跨柱面煤棚风荷载特性的因素较多,本文主要考虑(1)龙卷风场中心距离大跨柱面煤棚不同;(2)龙卷风以不同的移动速度掠过大跨柱面煤棚;(3)龙卷风以不同的角度路径掠过大跨度柱面煤棚。据此,将2.1节所述柱面煤棚结构置于1.1节所建立的龙卷风场中,采用固定龙卷风场模型,通过大跨柱面煤棚模型的移动以实现上述3种影响因素的模拟,其中大跨柱面煤棚结构附近的核心区网格进行加密处理,其余龙卷风场边界条件定义以及求解设置等均与1.1节相同。

2.3 模型测点布置及计算结果数据处理

为了更好把握龙卷风作用下大跨柱面煤棚表面不同位置区域风荷载分布特性,在其表面设置了357个观测点,并定义了龙卷风掠过结构的角度路径,具体观测点位置、编号及龙卷风掠过结构的路径角度如图7所示。

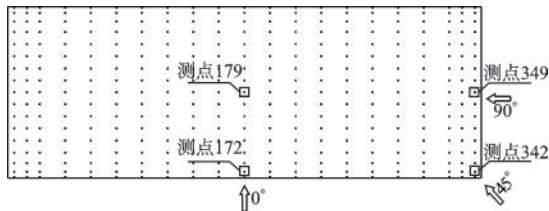


图7 大跨柱面煤棚模型测点布置及风向角定义

Fig.7 Measuring point arrangement and definition of wind angle for the long-span cylindrical coal shed model

为了表示方便,将大跨柱面表面风压利用公式(3)处理为无量纲的风压系数:

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{0.5\rho V_m^2} \quad (3)$$

式中, P 为测点风压; P_{ref} 为参考静压; ρ 为空气质量密度,取 1.225 kg/m^3 ; V_m 为最大切向风速。

3 计算结果分析

3.1 风场中心距离大跨柱面煤棚不同时结构表面风压分布特性

为了把握龙卷风场中心距离大跨柱面煤棚不同时结构表面风压分布特性,选取了 0° 角路径下,龙卷风移动速度 $v=15 \text{ m/s}$ 时,风场中心距离大跨柱面煤棚中心 d 分别为 $0R_m$ 、 $1.0R_m$ 以及 $2.0R_m$ (R_m 为龙卷风场涡核半径)三种代表性距离时结构表面风压值,并利用公式(3)处理为无量纲的风压系数,如图8所示。

由图8(a)可见,在 0° 角路径下,结构位于 $d=0R_m$ 位置处,结构表面风压系数呈中心对称分布。其中,结构表面风压主要为负值,以风吸力为主。结构右上和左下端部风压表现出较强的梯度变化,原因在于龙卷风气流在结构这些部位发生了明显的流动分离,从而产生较大的风吸力,且最大负压系数绝对值为1.0。另外,结构左上和右下端部为迎风区域,受到龙卷风气流的冲击产生正压,最大正风压系数为1.0。

由图8(b)可见,在 0° 角路径下,结构位于 $d=1.0R_m$ 位置处,结构表面右侧区域流动分离现象增

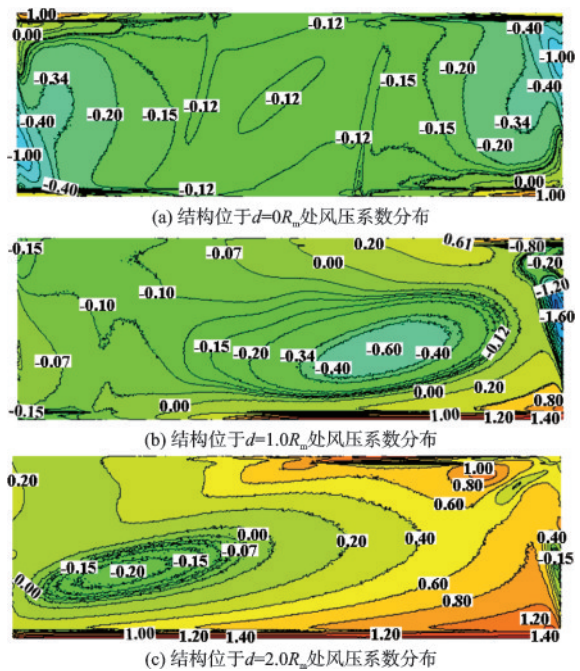


图8 风场中心距离大跨柱面煤棚不同时结构表面风压分布(0° 角)

Fig.8 Wind pressure distribution on the structural surface at different distances from the wind field center (0° angle)

强,负风压系数绝对值增大。其中,在结构右下端部形成两个锥形涡,上侧以风吸力为主,最大负风压系数绝对值为1.6,下侧以风压力为主,最大正风压系数为1.4。此时结构表面存在的风压系数差最大,差值约为负风压系数极值的1.88倍,结构表面最易遭受破坏。

由图8(c)可见,在 0° 角路径下,结构位于 $d=2.0R_m$ 位置处,结构表面右侧区域主要为正风压,负风压区的作用范围较 $d=1.0R_m$ 时向左侧端部发生了偏移,漩涡中心处的负风压系数绝对值也有所降低,最大负风压系数绝对值由1.6变为0.15,原因可能在于结构远离龙卷风中心后,受到的切向风速及气压降作用均减小。

3.2 龙卷风移动速度不同时结构表面风压分布特性

为了把握龙卷风以不同速度掠过时结构表面风压分布特性,选取了 0° 角路径下,结构位于 $d=1.0R_m$ (由3.1分析结果发现,此距离处结构表面风压分布最不利),龙卷风移动速度分别为15、20、30 m/s时结构表面风压值,并利用公式(3)处理为无量纲的风压系数,如图9所示,其中 $v=15$ m/s时风压分布见图8(b)。

由图9(a)可见,在 0° 角路径下,龙卷风移动速度 $v=20$ m/s时,结构右上端部处的最大负风压系数绝对值及右下端部的最大正风压系数均有增加,说明移动速度的增加,没有改变结构表面风压分布形式,但增大了风压值。

由图9(b)可见,在 0° 角路径下,龙卷风移动速度 $v=30$ m/s时,结构表面左侧区域脱落漩涡的作

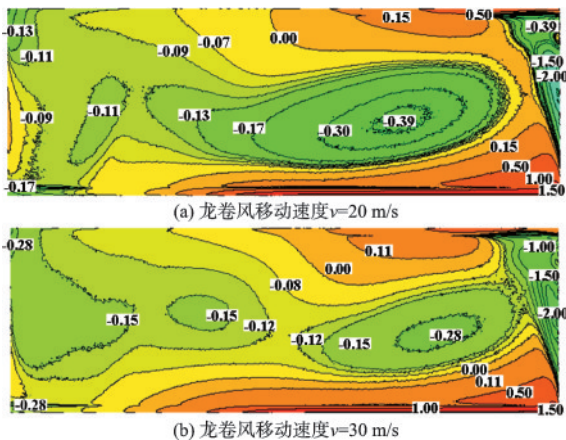


图9 不同移动速度时结构表面风压分布(0° 角)

Fig.9 Wind pressure distribution on the structural surface at different tornado moving speeds (0° angle)

用范围有所增大,表明龙卷风移动速度增加使得此区域流动分离现象增强。需要说明的是,结构右上端部处的最大负风压系数绝对值及右下端部的最大正风压系数相比移动速度 $v=20$ m/s均无太大变化,原因可能在于龙卷风移动速度达到一限值后,风压不会增加并可能有下降的趋势。

3.3 不同的角度路径掠过大跨度柱面煤棚时结构表面风压分布特性

为了把握龙卷风以不同的角度路径掠过大跨度柱面煤棚时结构表面风压分布特性,选取了龙卷风移动速度为 $v=15$ m/s,分别以 0° 角、 45° 角及 90° 角路径掠过大跨度柱面煤棚, $d=1.0R_m$ 时结构表面风压数值,并利用公式(3)处理为无量纲的风压系数,如图10所示,其中 0° 角时结构表面风压分布见图8(b)。

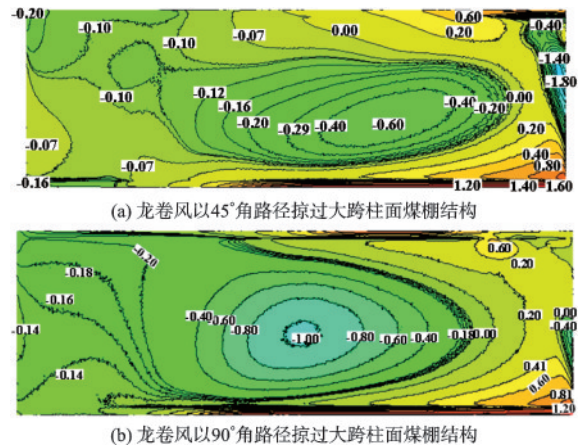


图10 龙卷风以不同的角度路径掠过大跨度柱面煤棚时结构表面风压系数分布

Fig.10 Wind pressure coefficients contours on the structural surface when a tornado passes over a long-span cylindrical coal shed at different angles

3.4 代表性测点风压系数分布

为直观分析煤棚表面典型位置区域风压分布特性,选取结构表面关键位置4个代表性测点,即结构表面中心位置(测点179)、边缘位置(测点172、349)及角部位置(测点342),分别整理了此四个代表性测点在 0° 角、 45° 角及 90° 角路径下,龙卷风移动速度 v 分别为15、20、30 m/s时风压系数随结构中心与龙卷风中心间的距离 d 的变化规律,如图11所示。

由图11(a)可见,在 0° 和 45° 角路径下,龙卷风速度 v 分别为15、20、30 m/s时,结构边缘位置测点

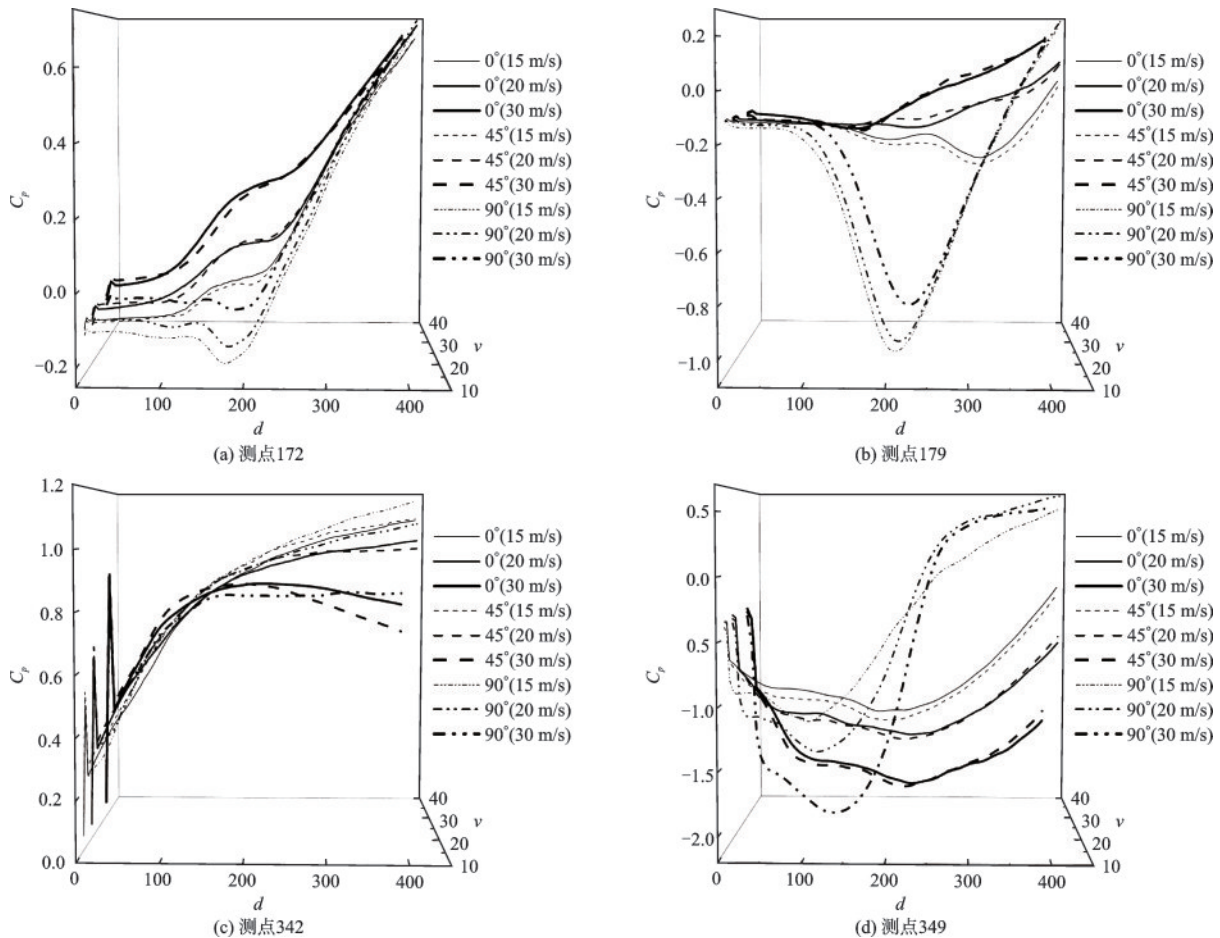


图 11 典型测点风压系数分布曲线

Fig.11 Distribution curves of wind pressure coefficient at typical measurement points

172 风压系数随着 d 的增加而增大,当 $d < 100$ m 时,风压系数为负且变化平缓,当 $d > 200$ m 时,风压系数为正且变化陡峭,表明此范围为风压激增区,原因在于测点 172 位于迎风区,直接遭受高速风的冲击;在 90° 角路径下,龙卷风速度 v 分别为 15、20、30 m/s 时,风压系数曲线随 d 的增加呈现先减小后增大的趋势,大约在 $d = 180$ m 处,风压系数出现最小值分别为 -0.22 、 -0.20 和 -0.15 ;整体来看,在 0° 、 45° 和 90° 角路径下,龙卷风速度 v 分别为 15、20、30 m/s 时,在同一距离 d 处,测点 172 风压系数随着龙卷风移动速度的增加而增大。

由图 11(b) 可见,在 0° 和 45° 角路径下,龙卷风移动速度 $v = 15$ m/s 时,结构表面中心位置测点 179 风压系数呈波动性变化,大约在 $d = 200$ m 及 $d = 300$ m 处,风压系数出现极小值;在 0° 和 45° 角路径下,龙卷风移动速度 v 分别为 20、30 m/s 时,在 $d < 180$ m 的范围内,风压系数曲线变化平缓,在 $d > 180$ m 的范围内,风压系数随着 d 的增加而增加;在 90° 角路径下,龙卷风移动速度 v 分别为 15、20、

30 m/s 时,测点 179 风压系数随着 d 的增加呈现先减小后增大的趋势,原因在于随着角度路径的变化,测点 179 所在区域的流场显著改变,其中,大约在 $d = 200$ m 左右,风压系数出现最小值,分别为 -0.99 、 -1.01 和 -0.94 ,当 $d > 200$ m 时,风压系数随 d 增加而迅速增大。

由图 11(c) 可见,在 0° 、 45° 和 90° 角路径下,龙卷风移动速度 v 分别为 15、20 m/s 时,结构角部位置测点 342 风压系数基本为正,风压系数随着 d 的增加而增大;在 0° 、 45° 角路径下,龙卷风移动速度 $v = 30$ m/s 时,大约在 $d < 185$ m 的范围内,同一距离 d 处,测点 342 风压系数随着龙卷风移动速度的增加而增大,当 $d > 185$ m 时,同一距离 d 处,测点 342 风压系数随着龙卷风移动速度的增加而减小;在 90° 角路径下,龙卷风移动速度 $v = 30$ m/s 时,测点 342 风压系数随着 d 的增加先增大后逐渐趋于平缓。

由图 11(d) 可见,在 0° 和 45° 角路径下,龙卷风速度 v 分别为 15、20、30 m/s 时,边缘位置测点 349 风压系数随着 d 的增加呈现出先减小后增大的趋

势,其中,在同一角度路径下,风压系数随着龙卷风速度的增加而减小;而在90°角路径下,龙卷风移动速度 v 分别为15、20、30 m/s时,测点349风压系数随着 d 的增加先减小后增大,最后趋于平缓,其中拐点位置随着龙卷风速度的增加向右发生偏移,风压系数 d 分别在100、110、120 m出现最小值,其值分别为-1.15、-1.48和-2.17。

4 结构表面分区风压系数计算

根据第3节分析所得龙卷风作用下大跨柱面煤棚结构表面风压分布规律和特点,为方便结构进行抗龙卷风设计,借鉴我国现行《屋盖结构风荷载标

准》^[22]对常态风引起的柱面结构表面风压分区处理方法,将大跨柱面煤棚表面划分为7个区域,如图12所示,(a 取0.1L、0.1d和0.4H(结构高度)中的最小值)并根据公式(4)计算得到了相应区域的分区风压系数见表1。

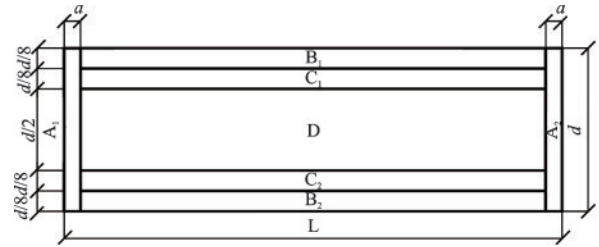


图12 结构表面分区示意

Fig.12 Structural surface zoning diagram

表1 结构表面各分区风压系数

Table 1 Wind pressure coefficients in each zone on the structural surface

	分区风压系数						
	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D
0°15 m/s	-0.07	-1.35	0.04	1.31	-0.05	-0.12	-0.35
0°20 m/s	-0.11	-1.47	0.03	1.33	-0.04	-0.10	-0.27
0°30 m/s	-0.16	-1.53	0.03	1.32	-0.06	-0.08	-0.19
45°15 m/s	-0.09	-1.38	0.04	1.34	-0.05	-0.11	-0.37
45°20 m/s	-0.10	-1.49	0.06	1.36	-0.03	-0.09	-0.29
45°30 m/s	-0.18	-1.58	0.04	1.35	-0.01	-0.07	-0.21
90°15 m/s	-0.16	-0.43	0.21	1.27	-0.13	-0.21	-0.53
90°20 m/s	-0.17	-0.47	0.35	1.28	-0.15	-0.23	-0.57
90°30 m/s	-0.19	-0.55	0.41	1.33	-0.12	-0.25	-0.55

分区风压系数等于该区域所有测点风压系数乘以对应从属面积并加权处理,见下式:

$$\hat{C}_p = \sum_{i=1}^N C_{pi} A_i / A \quad (4)$$

式中, \hat{C}_p 为分区风压系数; C_{pi} 为某一测点风压系数; A_i 为测点风压系数对应的从属面积; A 为分区面积。

表1给出了在0°角路径、45°角路径和90°角路径下,龙卷风速度 v 分别为15、20、30 m/s时,结构位于 $d=1.0R_m$ 处,结构表面不同分区的风压系数。由表可以看出,结构表面各分区风压主要以风吸力为主,其中,较大的正风压系数出现在B₂区,原因在于B₂区位于迎风区域,直接遭受龙卷风的冲击,B₂区风压系数最大值为1.36。较大的负风压系数出现在A₂区,原因在于此处发生强烈的流动分离现象,其中A₂区风压系数最小值为-1.58。

从整体来看,龙卷风移动速度对A₂区及D区影响较大,对于A₂区,在同一角度路径下,龙卷风移动速度不同时,风压系数绝对值变化幅度最高可达28%,对于D区,风压系数绝对值变化幅度最高可达46%。当龙卷风移动速度相同时,在0°角路径及45°角路径下,风压系数相差不大,但在90°角路径下,除B₂区之外的分区风压系数均差别较大。

5 结 论

(1)龙卷风作用下,煤棚表面风荷载以风吸力为主,结构位于 $d=0R_m$ 位置处,风压呈中心对称分布,结构位于 $d=1.0R_m$ 位置处,结构表面风吸力达到最大,此时结构表面存在最大风压系数差,差值约为负风压系数极值的1.88倍。结构位于 $d=2.0R_m$ 位置处,此时结构远离龙卷风中心,结构表面

受切向风速及气压降的作用均减小,风荷载以风压力为主。

(2)随着龙卷风移动速度的增加,漩涡的作用范围增大并出现漩涡脱落,右侧边区的流动分离现象增强,风压绝对值随之增大,但当龙卷风移动速度达到一限值后,风压不再增加并有下降的趋势。

(3)相比 0° 路径,龙卷风在 45° 角路径下,结构表面最大负风压系数为 -1.8 ,在 90° 角路径下,结构右下角区域流动分离现象减弱,最大负风压绝对值减小。

(4)龙卷风移动速度对 A_2 区及D区风压系数影响较大,相较 0° 角路径及 45° 角路径,在 90° 角路径下,除 B_2 区之外的分区风压系数差别较大。结构表面较大风压均位于角部及其边缘区域,其中, B_2 区风压系数最大值为 1.36 , A_2 区风压系数最小值为 -1.58 。因此在进行结构抗龙卷风设计时,考虑到龙卷风对风压分布的影响,应加强结构角部及边缘区域屋面板的设计。

参考文献:

- [1] Cao J, Ren S, Cao S, et al. Physical simulations on wind loading characteristics of streamlined bridge decks under tornado-like vortices [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2019, 189: 56-70.
- [2] Eigo T. Environmental controls on tornadoes and tornado outbreaks [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2022, 60 (3-4): 399-421.
- [3] 李忠东. 龙卷风的危害及其应对[J]. *生命与灾害*, 2022 (1): 28-29.
Li Z D. Tornado hazards and their response [J]. *Life & Disaster*, 2022(1): 28-29. (in Chinese)
- [4] Ye Q, Rui Y, San B, et al. Aerodynamic shape optimization of large-span coal sheds for wind-induced effect mitigation using surrogate models [J]. *Engineering Structures*, 2022, 253: 113818.
- [5] 张伏, 张鹏, 王子彦. 基于某大跨度封闭干燥棚风洞试验的分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(增2): 145-148.
Zhang F, Zhang P, Wang Z X. Based on a large span closed dry coal shed wind tunnel test analysis [J]. *Journal of Wuhan University(Engineering Science)*, 2021, 54(Sup2): 145-148. (in Chinese)
- [6] 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(增1): 296-300.
Zheng X N, Liu Q K, Cui H M, et al. Experimental study on wind load distribution of coal shed with strip closed grid frame [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37 (Sup1): 296-300. (in Chinese)
- [7] Deppermann R, J S. Notes on the origin and structure of philippine typhoons [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1947, 28(9): 399-404.
- [8] Alexander C, Wurman J. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: The structural evolution and environment of the tornadoes [J]. *American Meteorological Society*, 2005, 131(1): 72-96.
- [9] Wurman J, Alexander C. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part II: Comparison of observed damage and radar-derived winds in the tornadoes [J]. *American Meteorological Society*, 2005, 131 (1): 97-119.
- [10] Ying S, Chang C. Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1970, 27(1): 3-14.
- [11] Ward N. The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29(6): 1194-1204.
- [12] 张寒, 王浩, 徐梓栋, 等. 高铁连续梁桥龙卷风荷载数值模拟[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(7): 284-290.
Zhang H, Wang H, Xu Z D, et al. Numerical simulation of tornado loads on a high-speed railway continuous girder bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(7): 284-290. (in Chinese)
- [13] Liu Z, Zhang C, Ishihara T. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 81: 656-672.
- [14] 郎天翼, 王浩, 张寒, 等. 龙卷风作用下列车-桥梁系统气动特性数值研究[J]. *铁道学报*, 2023, 45(2): 146-153.
Lang T Y, Wang H, Zhang H, et al. Numerical study on aerodynamic characteristics of train-bridge system under tornado action [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(2): 146-153. (in Chinese)
- [15] Cao S, Wang M, Cao J. Numerical study of wind pressure on low-rise buildings induced by tornado-like flows [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 183: 214-222.

- [16] 汤卓,王兆勇,卓士梅,等.龙卷风作用下双坡屋面风压分布试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(9):112-117.
Tang Z, Wang Z Y, Zhuo S M, et al. Experimental study on wind pressure distribution of double slope roof under tornado action[J]. Journal of Building Structures, 2013,34(9):112-117. (in Chinese)
- [17] Haan F, Sarkar P, Gallus W. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications[J]. Engineering Structures, 2008, 30(4):1146-1159.
- [18] Mishra A, James D, Letchford C. Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, Part A: Flow field characterization[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2008,96(8):1243-1257.
- [19] Li T, Yan G, Yuan F, et al. Dynamic structural responses of long-span dome structures induced by tornadoes [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019,190(J):293-308.
- [20] Gallus W, Sarkar P, Haan F, et al. 15.1 A translating tornado simulator for engineering tests: comparison of radar, numerical model, and simulator winds [J]. Aiaa Journal, 2004,11(2): 75-96.
- [21] Kuai L, Haan L F, Jr., et al. CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements[J]. Wind & Structures, 2008,11(2):1-21.
- [22] 屋盖结构风荷载标准:JGJ/T481—2019[S].北京:中国建筑出版传媒有限公司,2020.
(本文编辑:苏泽云)



(上接第 1417 页)

- [13] 李昊,唐朝生,刘博,等.模拟海水环境下 MICP 固化钙质砂的力学特性[J].岩土工程学报,2020,42(10):1931-1939.
Li H, Tang C S, Liu B, et al. Mechanical behavior of MICP-cemented calcareous sand in simulated seawater environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1931-1939. (in Chinese)
- [14] 李艺隆,国振,徐强,等.海水环境下 MICP 胶结钙质砂干湿循环试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(9):1740-1749.
Li Y L, Guo Z, Xu Q, et al. Experimental research on wet-dry cycle of MICP cemented calcareous sand in seawater environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(9): 1740-1749. (in Chinese)
- [15] Whiffin V S, Van Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [16] 曹晨,赵志峰,王玮.养护温度和冻融循环等对微生物胶结试样强度的影响[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):1046-1052.
Cao C, Zhao Z F, Wang W. Influence of curing temperature and freeze-thaw cycle on reinforcement strength by microbial cementation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1046-1052. (in Chinese)
- [17] Lang C, Li M, Dai R, et al. Discussion on the review and outlook of microbial geotechnical mineralization technology[C]//The 6th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering (ESCE 2020). Nanchang:IOP Publishing, 2020:609-615.
- [18] 水质钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法:GB/T 7477—1987 [S].北京:国家环境保护局,1987.