

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-416-06

竖井风塔外结构优化及阻力特性研究

陈嘉¹ 王文¹ 孙三祥²

(1. 陕西铁路工程职业技术学院 渭南 714000;

2. 兰州交通大学环境与市政工程学院 兰州 730070)

【摘要】 依托实际隧道工程, 基于数值模拟软件 Fluent, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对不同竖井外结构下的通风流场、阻力特性进行模拟研究。研究表明: 风塔外结构阻力系数越大, 所形成的抽吸效应越明显, 竖井出流量越大; 采用凸台状风塔外结构时, 竖井出流量最大, 竖井自然通风节能效果最佳; 相同风塔结构, 外环境风速大于竖井出流速度时, 外环境风速不再对竖井出流起到积极作用。

【关键词】 竖井; 数值模拟; 阻力特性; 风塔结构

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Study on the Structure Optimization and Resistance Characteristics of Shaft Tower

Chen Jia¹ Wang Wen¹ Sun Sanxiang²

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan, 714000;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070)

【Abstract】 Relying on the actual tunnel engineering, based on the numerical simulation software FLUENT, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is used to simulate the flow field and resistance characteristics of different external structure of shaft. The results show that the larger the resistance coefficient of the outer structure of the tower is, the more obvious the chimney effect is and the larger the flow rate of the shaft is. When the external structure of the convex tower is adopted, the shaft outflow is the largest and the natural ventilation energy-saving effect is the best. With the same wind tower structure, when the external environment wind speed is greater than the shaft outflow speed, the external environment wind speed no longer has a positive effect on the shaft outflow.

【Keywords】 vertical shaft; numerical simulation; resistance characteristics; wind tower structure

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目 (17YF1GA010); 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目 (KY2018-64); 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目 (KY2020-13)

作者简介: 陈嘉 (1992-), 男, 硕士研究生, 助教, E-mail: 346008564@qq.com

通讯作者: 王文 (1990-), 男, 讲师, E-mail: 1205901714@qq.com

收稿日期: 2021-12-13

0 前言

隧道施工、运营通风中, 有效地利用竖井自然通风来辅助隧道本身的机械通风, 可以提高通风效果, 节约能耗^{[1],[2]}。

国内外学者对隧道通风研究做了大量理论和试验研究。张恒等^[3]以锦州地下储油洞库群和官田隧道的施工通风为依托, 采用理论分析、数值模拟

及现场测试对竖井自然通风效应的影响参数进行了研究。Chuangang F 等^[4]采用大涡模拟方法研究了强环境风对自然通风条件下隧道火灾的影响及竖井内“烟囱效应”烟气运动规律。张亚琴等^[5]以诱导通风量及热水换热温差为试验指标, 选取竖井高度、竖井通道直径、入口水温及水流量作为四个试验因素, 研究竖井通风系统中关键参数对系统性

能的影响程度,通过极差分析方法对各试验因素的影响程度进行了正交试验方案设计。朱培根等^[6]采用 CFD 方法,对 25 种竖井送排风组合进行了模拟,分析了不同送排风组合隧道内的通风效果。姜童辉等^[7]通过开展小尺寸实验以及 FDS 数值模拟实验,研究纵向通风对不同高度竖井的排烟影响并确定最佳通风风速。通过分析纵向通风风速、竖井高度对吸穿现象、边界层分离的影响规律,讨论了吸穿现象的临界条件。Fan 等^[8]通过大涡模拟 (LES) 研究了竖井上方环境风对隧道自然通风效果的影响,通过系统地改变竖井上方的环境风速和隧道纵向风速,对烟气运动特性进行了详细研究。王文^[9,10]等采用 FLUENT 软件,分析了隧道竖井位于隧道纵向不同位置时隧道内风速及流场分布规律,根据竖井风塔在不同结构工况下的出量及流场分布对竖井结构进行优化计算。对于隧道竖井通风方面的研究主要集中于竖井自然通风及排烟领域,同时对竖井直径、高度、设置位置等也有较多研究,但对于竖井出口外结构流场及其与竖井出流关系的研究较少。

研究依托于当金山隧道工程实际,对竖井结构进行优化,采用数值模拟软件 Fluent,选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,对不同竖井结构下的通风效果进行模拟研究,分析不同风塔外结构下隧道竖井外部流场分布及阻力特性关系,提出一种最为合理的竖井风塔外结构模型,为隧道通风及节能提供参考依据。

1 模型建立

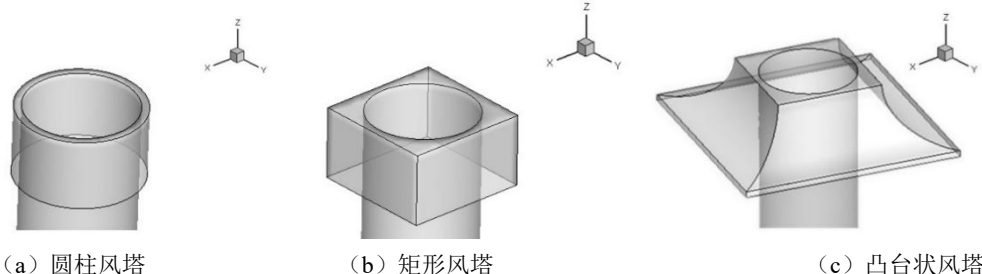


图 2 风塔几何结构

Fig.2 Tower geometry

1.2 数学模型

采用基于 Navier—Stokes 方程的风流模型,选取 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型使方程组封闭。隧道竖井及外环境空气湍流流动与气体扩散用到的控制方程有

当金山隧道全长 20.14km (隧道进口高程为 2864.83, 出口高程为 3107.00), 隧道通过区海拔在 2600—4000m 左右。隧道除进口段 470m 为双线车站隧道,其余洞身为单线隧道。全隧道除出口段 224.18m 位于 R-1600m 的曲线上外其余均位于直线上,隧道洞身坡度依次为 6‰/570m、12.3‰/19200m、7‰/370m 的单面上坡。隧道建设初期为缩短高海拔独头施工通风距离,隧道中部设置了 2 座通风竖井,竖井采用圆形断面外径为 3.0m,运营期间 1 号竖井封闭,2 号竖井作为永久的防灾救援风道使用。由于环境风速对竖井风塔出流有很大的影响,故研究主要针对不同竖井外型结构在不同环境风速下出流量及流场分布规律。隧道主体建筑如图 1 所示。

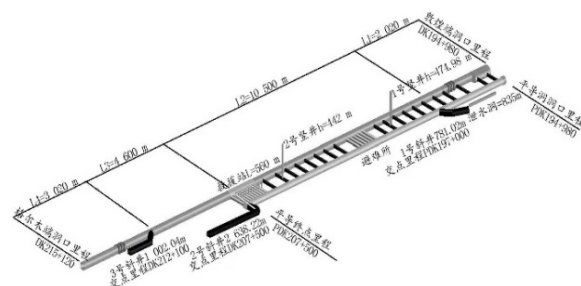


图 1 隧道主体建筑示意图

Fig.1 Main building diagram of tunnel

1.1 物理模型

采用 CFD 软件分别对无竖井风塔、圆柱风塔、矩形风塔和凸台状风塔进行简化建模,底座 $h=0.2\text{m}$, 风塔高 $H=2\text{m}$, 最薄壁厚 $\delta=0.2\text{m}$ 。竖井内断面为圆形断面, 外径 $R=1.5\text{m}$ 。计算区域 (长 \times 宽 \times 高) $50\times 40\times 20\text{m}$ 。风塔结构如图 2 所示。

质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、湍流动能 k 方程、湍流动能耗散率 ϵ 方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍流脉动动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_{eff} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流动能耗散 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_{eff} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

由湍动能 k 和耗散率 ε 共同决定了湍流密度

μ_t :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中, u_i 为速度分量, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; G 表示由于平均速度梯度而产生的湍动能; μ 为层流动力黏性系数, Pa·s; μ_t 为紊流动力黏性系数, Pa·s; σ_k 和 σ_ε 分别对应湍动能 k 与湍流耗散率 ε 的 Prandtl 数, c_1 、 c_2 与 c_μ 为经验常数。最终选择 c_1 、 c_2 、 c_μ 、 σ_k 、 σ_ε 的值为: $c_1=1.44$, $c_2=1.92$, $c_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.3 边界条件

(1) 入口边界: 竖井底部为压力入口 $P=10\text{Pa}$, 环境风入口为压力入口, 对应风速环境风速: $v_e=1、2、3、5、7、9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) 出口边界: 环境风出口边界为压力出口 $P=0\text{Pa}$ 。

(3) 壁面边界: 地面为无滑移恒温边界, 温度 $T=298\text{K}$, 其余边界设置为对称边界。

主要模拟工况设置如表 1 所示。

表 1 主要模拟工况设置

Table 1 Settings of main simulated working condition

速度 (m·s ⁻¹)	竖井风塔结构			
	无	圆柱	矩形	凸台 ($\beta=90^\circ$)
0	Case 1	Case 8	Case 15	Case 22
1	Case 2	Case 9	Case 16	Case 23
2	Case 3	Case 10	Case 17	Case 24
3	Case 4	Case 11	Case 18	Case 25

5	Case 5	Case 12	Case 19	Case 26
7	Case 6	Case 13	Case 20	Case 27
9	Case 7	Case 14	Case 21	Case 28

2 模拟方式选取

2.1 数值算法

速度场模拟选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 流场迭代采用 SIMPLE 算法, 压力场采用标准方式离散, 其他参数采用二阶迎风格式离散。利用网格划分软件, 采用六面体和四面体网格结构对模型计算区域进行分区网格划分, 对竖井出流口附近区域进行网格加密。并已进行网格无关性检验, 确保网格数量对模拟结果无影响。

2.2 结果验证

为确保模拟方式选取、参数设置及模拟结果的正确性, 选取相近研究模型进行模拟, 并将模拟与文献测量压力系数 C_p 值作对比分析, 压力系数按 $C_p=(P-P_0)/(0.5\rho U_0^2)$ 计算, 其中 P 为内表面平均静压力, P_0 为参考值静压, ρ 为空气密度 ($\rho=1.225\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), U_0 为自由流速度。对比结果如图 3 所示^[10]。

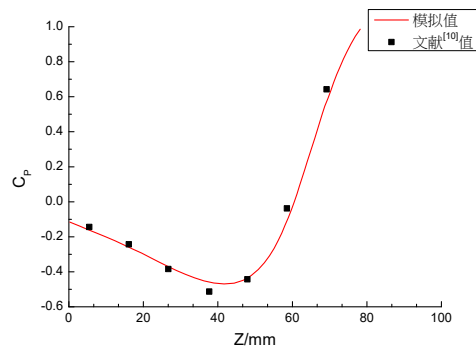


图 3 模拟验证

Fig.3 Simulation Verification

由图 3 可以看出, CFD 模拟值与文献值契合度较好, 文献测量值与模拟值最大绝对偏差约为 7%。对于本文的研究, 选用相似模拟设置进行模拟, 模拟结果可靠。

3 模拟结果及分析

3.1 外环境风速对流场的影响

以圆柱状风塔为例, 截取距地高 $h=1\text{m}$ 截面对

不同外环境风速下的速度场做分析, 如图 4 所示。

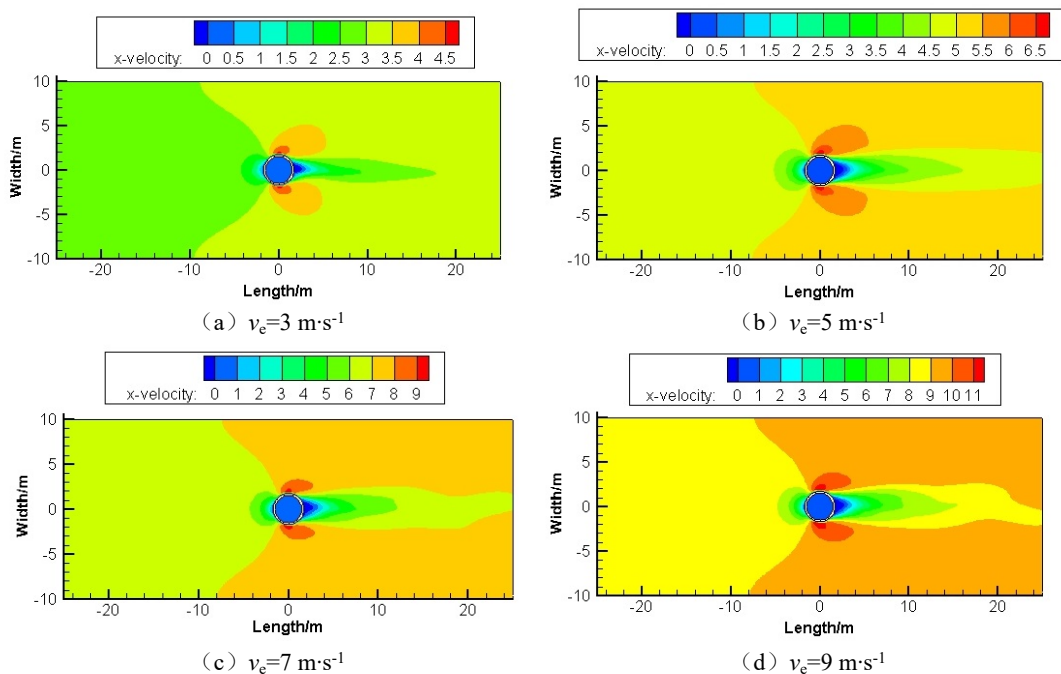


图 4 速度分布云图

Fig.4 Velocity distribution

由图 4 可以看出, 风塔其后侧速度都较低, 且后侧范围影响远大于前侧。在风塔两侧由于绕流作用, 形成了较高的绕流速度。随着外环境风速的不断增大圆柱后端涡流作用区域逐渐增大, 同时涡流区的扰动也逐渐增强。

取 $y=0\text{m}$ 、 $h=1\text{m}$ 位置作为压力系数监测线, 监测不同外环境风速工况下圆柱风塔前后压力系数分布, 结果如图 5 所示。

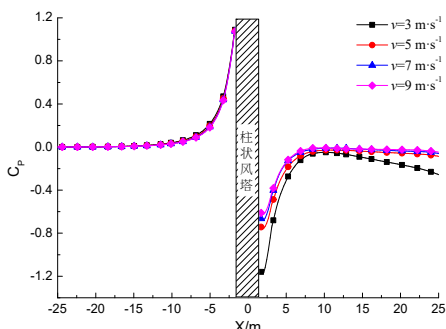


图 5 不同风速压力系数

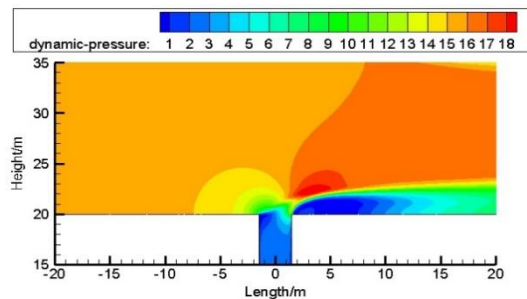
Fig.5 Pressure coefficient of different wind speed

由图 5 可以看出, 相同风塔结构、不同外环境风速工况下, 风塔来流侧压力系数差异极小。风塔背风侧涡流区域压力系数值小于 0, 且在塔后 $x \approx 7\text{m}$ 的范围内呈递增关系, $x \approx 7\text{m}$ 后范围压力系数

维持恒定。随着环境风速的增大, 压力系数逐渐增大, 但环境系数最大突变区域集中在环境风速 $v_e=3\sim 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围之内。表明在风速大于 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, 随外环境风速增大, 风塔后侧对竖井出流的积极作用逐渐减弱。

3.2 风塔结构对流场的影响

以外环境风速 $v_e=5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为例, 截取 $y=0$ 截面不同竖井风塔外结构下竖井风塔附近压力分布云图, 分析不同竖井风塔外结构对竖井出流的影响, 如图 6 所示。



(a) 无风塔

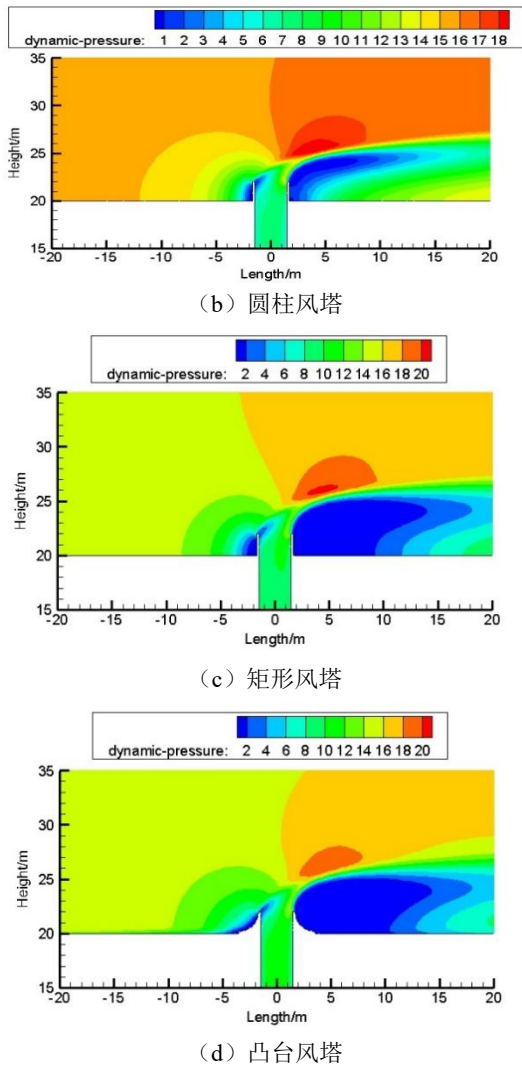


图 6 不同风塔结构压力分布

Fig.6 Pressure distribution of different tower structures

由图 6 可以看出,随着风塔结构的不断优化,竖井出口段动压力逐渐增大,表明竖井出流速度逐渐增大。风塔来流侧动压为 0 的区域随着结构优化逐渐减小,风塔背风侧动压为 0 的区域呈逐渐增大趋势,矩形风塔与凸台风塔背风侧压力分布较为相似。

以外环境风速 $v_e=5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为例,截取不同风塔结构 $h=1\text{m}$ 截面速度分布云图分析其差异,如图 7 所示。

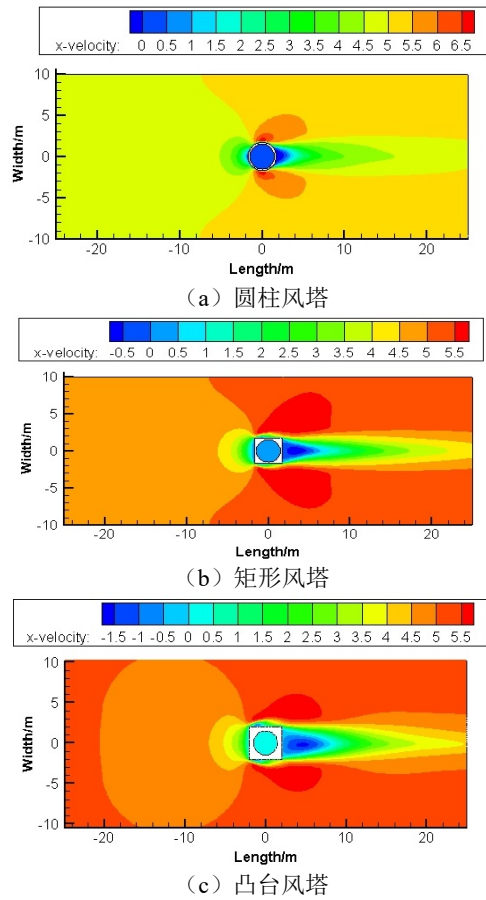


图 7 不同风塔结构速度分布

Fig.7 Velocity distribution of different tower structures

由图 7 可以看出,在外环境风速 $v_e=5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 工况下,随着风塔外结构截面积的不断增大,其涡流影响区域也逐渐增大。圆柱风塔后端在该界面没有出现明显的回流现象,矩形风塔后端最大回流速度约为 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,凸台风塔后端最大回流速度约为 $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。圆柱风塔两侧影响区域最小,凸台状风塔外结构两侧影响区域较矩形风塔小。

以外环境风速 $v_e=5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为例,取 $y=0\text{m}$ 、 $h=1\text{m}$ 作为压力系数监测线,监测结果如图 8 所示。

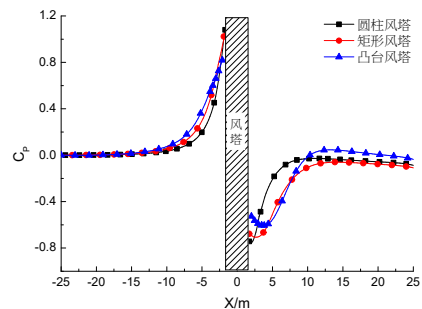


图 8 不同风塔结构压力系数

Fig.8 Pressure coefficient of different tower structures

由图 8 可以看出, 风塔外结构来流侧压力系数凸台状风塔最大、矩形风塔次之、圆柱风塔最小, 背风侧压力系数凸台状风塔最小、矩形风塔次之、圆柱风塔最大。竖井出口压力主要受来流受建筑物前端阻碍所形成的正压、建筑物后端由于涡流形成的负压所影响及竖井内部压力共同作用所决定。由此可知, 隧道竖井内部压力变化较小, 竖井出口压力主要由建筑物前后端的正、负压所决定。建筑物前端形成的正压能有效减小来流对竖井出口的封堵作用, 降低竖井出口处压力。建筑物后端形成的负压能增大竖井出流面积, 同时也降低竖井出口处压力。

4 结论

研究依托工程实际, 采用 CFD 方法对不同竖井结构下的通风效果进行模拟研究, 分析不同风塔外结构下隧道竖井外部流场分布及阻力特性关系, 主要结论如下:

(1) 隧道竖井不设出口结构时, 外界环境风竖井有效出流面积减小, 竖井出流量降低。竖井采用不同风塔外结构, 环境风流在风塔前端形成正压, 在风塔后端形成负压涡流区, 最大限度保留了竖井出流面积, 同时增大了出流速度。

(2) 常见圆柱状风塔背风侧涡流区域压力系数数值小于 0, 且在塔后 $x \approx 7\text{m}$ 的范围内呈递增关系, $x \approx 7\text{m}$ 后范围压力系数维持恒定。随着环境风速的增大, 压力系数逐渐增大, 但环境系数最大突变区域集中在环境风速 $v_e = 3 \sim 5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围之内。表明在风速大于 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 随外环境风速增大, 风塔后侧对竖井出流的积极作用逐渐减弱。

(3) 竖井出口压力主要由建筑物前后端的正、负压所决定。同一环境风速下, 矩形或凸台状风塔前端、后压力值以及影响范围最大, 表明矩形或凸台状风塔形成的竖井出流效果最佳。

参考文献:

- [1] 李丰果, 徐娇, 贺国强. 节能降耗新技术在深大通风竖井施工中的应用[J]. 隧道建设, 2012, 32(6): 849-853.
- [2] Guo C, Wang M N, Yang L, et al. A review of energy consumption and saving in extra-long tunnel operation ventilation in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53.
- [3] 张恒, 孙建春, 刘效成, 等. 利用竖井自然通风辅助机械通风的关键参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1258-1266, 1272.
- [4] Chuangang F, Li Z, Shucheng J, et al. Smoke spread characteristics inside a tunnel with natural ventilation under a strong environmental wind[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 99-110.
- [5] 张亚琴, 孙亮亮, 袁艳平, 等. 基于烟囱效应的地下空间竖井通风系统参数优化[J]. 制冷与空调, 2018, 32(5): 547-554.
- [6] 朱培根, 孔维同, 李晓昀, 等. 城市隧道竖井送排式通风优化[J]. 流体机械, 2016, 44(10): 73-79.
- [7] 姜童辉, 丛海勇, 孔祥晓, 等. 纵向通风对隧道竖井排烟影响的模拟研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(1): 14-22.
- [8] Fan C G, Jin Z F, Zhang J Q, et al. Effects of ambient wind on thermal smoke exhaust from a shaft in tunnels with natural ventilation[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 254-262.
- [9] 王文, 孙三祥, 陈军强. 竖井纵向位置对隧道自然通风的影响[J]. 制冷与空调, 2020, 34(1): 70-76.
- [10] 王文, 孙三祥. 隧道竖井外流场模拟及风塔外型结构优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 140-146.
- [11] Montazeri H, Montazeri F. CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop windcatchers: Impact of outlet openings[J]. Renewable Energy, 2018, 118(4): 502-520.