

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-753-07

隧道顶部式太阳能烟囱 空腔截面比对通风与火灾排烟性能影响研究

李程¹ 黄有波²

(1. 广西工业职业技术学院建筑工程学院 南宁 530001;
2. 重庆科技大学安全工程学院应急管理學院 重庆 401331)

【摘要】 为研究城市浅埋隧道顶部式太阳能烟囱耦合运营通风与事故排烟的性能, 采用数值模拟方法, 开展不同烟囱空腔截面宽/深比下的通风与火灾烟气流动模拟, 分析太阳能烟囱入口体积流量变化规律。设置太阳能辐射强度由 $400\text{W}/\text{m}^2$ 至 $1200\text{W}/\text{m}^2$, 烟囱截面积为 24m^2 , 截面宽/深比由 1.5 至 6, 火源热释放速率为 3MW、10MW、20MW。研究得出: 太阳能辐射强度增加使空腔吸热量上升, 导致通风流量更大, 通风流量与 $q^{1/3}$ 呈正相关; 太阳能烟囱入口处体积流量与烟囱深度的 $2/3$ 和烟囱宽度呈线性增加, 烟囱空腔宽/深比越大, 烟囱入口处的通风体积流量增加, 排烟体积流量却更低, 烟囱排烟体积流量随 $Q^{1/3}$ 和 $hc^{1/2}$ 增加, 烟囱宽为 12m, 空腔间隙为 2m 时, 上游所有烟气被排除, 其通风与排烟性能最佳; 基于模拟结果, 建立了通风与排烟流量修正模型, 修正模型预测值与模拟结果吻合较好。可为隧道太阳能烟囱设计与性能优化提供参考。

【关键词】 太阳能烟囱; 隧道火灾; 新能源; 排烟竖井; 通风流量

中图分类号 TU834.1 文献标志码 A

Effect of Aspect Ratio of Solar Chimney Cavity on Performance of Natural Ventilation and Smoke Exhaustion in Tunnel

Li Cheng¹ Huang Youbo²

(1. Civil engineering institute, Guangxi vocational & technical institute of industry, Nanning, 530001;
2. College of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331)

【Abstract】 In order to investigate the performance of solar chimney adopted at tunnel under natural ventilation and fire conditions, the numerical code was employed to simulate the airflow and smoke propagation in tunnel with varied ratio of cavity width to cavity gap. The variation law of volumetric flow rate at cavity inlet was analyzed. The solar radiation intensities varied from $400\text{W}/\text{m}^2$ to $1200\text{W}/\text{m}^2$. The ratios of cavity width to cavity gap of solar chimney was in range from 1.5 to 6 with same area of 24m^2 . The fire powers of 3MW, 10MW, 20MW were conducted. Results show that the absorbed heat power in per unit area increased with the solar radiation that induces the higher airflow velocity, and the airflow velocity linearly improves with $q^{1/3}$. The volumetric flow rate at inlet linearly increases with $2/3$ power of cavity gap and cavity width. The larger ratio of cavity width to cavity gap enhances the volumetric flow rate but weaken the smoke exhaustion. The smoke exhaustion rate increases with $Q^{1/3}$ and

基金项目: 重庆市博士“直通车”科研项目 (CSTB2022BSXM-JCX0151); 重庆市自然科学基金 (cstc2021jcyj-msxmX0919); 重庆科技大学科研项目 (20240354)

作者简介: 李程 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: 1019533453@qq.com

通讯作者: 黄有波 (1991-), 男, 博士, 副教授, E-mail: ybhuang@cqust.edu.cn

收稿日期: 2024-06-18

$h_c^{1/2}$. The optimum chimney configuration with 12m width and 2m gap can exhaust all smoke from upstream. A modified model is developed for predicting the airflow rate and smoke exhaustion rate through solar chimney that the predictions fits in good agreement with numerical modelling. This study contributes to application of solar chimney in tunnel and guides extraction design.

【Keywords】 Solar chimney; Tunnel fire; Renewable energy; Smoke exhaust shaft; Airflow rate

0 引言

能源消耗和火灾安全是隧道设计与运营过程中的重要两项因素^[1]。现有隧道通常采用竖井自然排烟或机械排烟方式,竖井自然排烟存在性能不高的缺点,常需与机械风机联合使用以实现运营阶段通风和火灾场景下排烟^[2];机械排烟性能可控,但能耗较高,且建设与运维成本高。隧道内机械通风与排烟系统以电能驱动为主,据统计钟南山隧道机械通风系统能耗占隧道运营能耗的 70%^[3],地铁区间隧道机械通风系统能耗占运营能耗的 55%以上^[4],并且 68%的电能以化石能源发电为主^[5],将加剧能源危机和环境污染。因此,为了降低隧道通风与排烟系统的能源消耗,减少碳排放,亟需采用一种新能源系统用于隧道通风与排烟。

太阳能烟囱是一种利用太阳能辐射加热的通风装置,由玻璃透光面、吸热面和侧壁组成,通过吸热墙吸收太阳辐射加热空腔内空气,形成热浮力驱动空气流动,常用于建筑被动式通风系统^[6],其通风性能得到大量研究^[7]。但太阳能烟囱用于建筑火灾排烟相关研究少,Cheng 等^[8]验证了太阳能烟囱用于单室房间的通风与排烟有效性,Shi 等^[5]研究了太阳能烟囱用于实际建筑的通风与排烟性能,并得到烟囱配置参数与太阳辐射强度是影响性能的重要因素。

现有研究主要关注太阳能烟囱用于地上建筑,鲜有文献关注太阳能烟囱用于地下隧道。高一然^[9]研究太阳能烟囱用于公路隧道通风流量的预测模型;Cheng 等^[10]采用 FDS(Fire Dynamics Simulator)数值模拟验证了太阳能烟囱耦合城市浅埋隧道通风与排烟的有效性;Huang 等^[11]实验研究得出太阳能烟囱用于隧道通风流量预测模型。因城市浅埋隧道通常埋深较浅,且常采用竖井作为排烟设施^[12],这给太阳能烟囱应用提供了有利条件,并且太阳能烟囱与竖井排烟具有相似的热浮力驱动原理,将排烟竖井侧壁改为玻璃墙和吸热墙即为太阳能烟囱,可实现运营通风和火灾排烟双重功能。但太阳能烟囱配置参数对隧道通风与排烟的性能影响亟需揭

示,以得到最优化的烟囱设计参数。

通过以上分析,太阳能烟囱用于地面建筑通风系统相关研究,并提出了相应的理论预测模型,但太阳能烟囱用于隧道的研究较少,并且太阳能烟囱用于建筑排烟研究较少,特别对于太阳能烟囱耦合隧道通风与排烟研究鲜有报道,烟囱空腔配置参数对隧道通风与排烟性能的影响研究更未见到,缺乏理论预测模型为工程设计做指导。因此,本研究采用数值模拟方法,揭示太阳能烟囱空腔截面宽度、深度及火源热释放速率对自然通风流量和排烟量的影响规律,建立太阳能烟囱入口流量预测模型,以为隧道通风与排烟系统设计提供参考。

1 数值模型建立

1.1 数值模型

采用火灾动态模拟软件 FDS 开展模拟计算,其受浮力驱动的低马赫数流动的 Navie-Stokes 方程,主要求解火灾过程中的热传递和烟气流动。FDS 中含有直接数值模拟和大涡模拟两种计算模型,本研究采用 Smagorinsky 亚格子模型处理湍流扰动的大涡模拟进行太阳能烟囱的通风与排烟模拟,主要控制方程包括:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H - \tilde{p} \nabla (1/\rho) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\tilde{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}''' \quad (3)$$

组分守恒方程:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{m}_i''' + \dot{m}_{b,i}''' \quad (4)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子; \mathbf{u} 为速度矢量; \dot{m}_b'''

为由蒸发作用产生的单位体积质量产率; ω 为涡向量; H 为总压强除以密度 (伯努利积分); \bar{p} 为压力扰动; \mathbf{f}_b 为外力向量 (除了重力); τ 为粘性应力; h_s 为组分焓值; \dot{q}''' 为单位体积热释放速率; $\dot{\mathbf{q}}''$ 为热通量向量; Y_i 为第 i 种组分的质量分数; D_i 为第 i 种组分的扩散系数; \dot{m}_i''' 为由化学反应产生的第 i 种组分单位体积生成率; \dot{m}_i'' 为由蒸发作用产生的第 i 种组分单位体积生成率。

1.2 模型建立

因实际隧道较长, 在研究过程中选取隧道节段

开展太阳能烟囱用于隧道通风与排烟数值模拟, Cheng 等^[10]得出隧道长度设置为 100m 时可得出有效结果。因 FDS 中具有对称边界功能, 模拟隧道长度为 200m, 因在中间设置对称属性, 实际运算区域为 100m 长隧道, 隧道宽 12m, 高 5m, 火源设置在隧道对称边界位置 (见图 1), 火源功率设置为 3MW、10MW 和 20MW。隧道壁面材料为钢筋混凝土, 密度为 2280kg/m³, 导热系数为 1.8W/(m·K), 定压比热为 1.04kJ/(kg·K)。

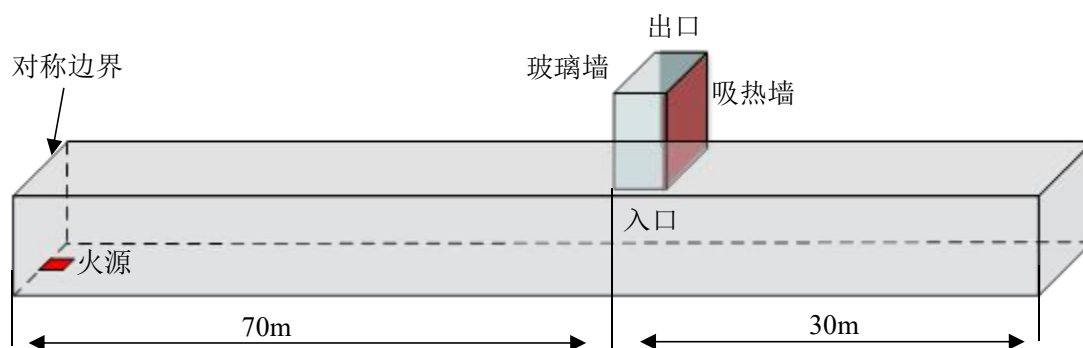


图 1 太阳能烟囱用于隧道模型示意图

Fig.1 Schematic of solar chimney applied in tunnel

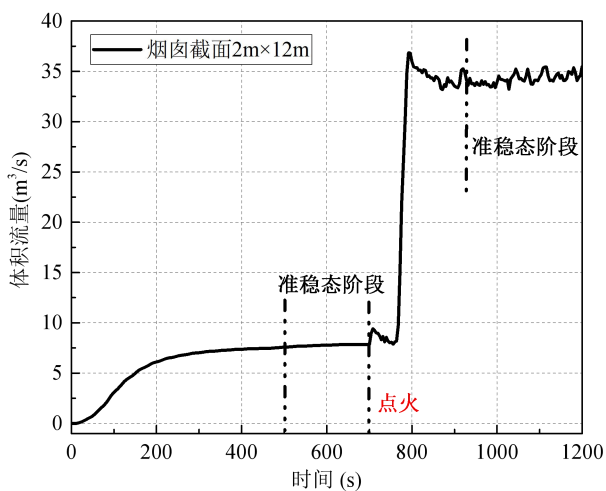


图 2 太阳能烟囱空腔体积流量

Fig.2 Volumetric flow rate inside solar chimney cavity

太阳能烟囱位于隧道入口 30m 处, 吸热墙靠近隧道入口侧, 烟囱高度为 5m, 烟囱空腔面积为 24m², 分别设置 5 种不同空腔宽度与空腔深度之比, 即烟囱空腔宽度与空腔深度尺寸分别为: 12m×2m、10m×2.4m、9.6m×2.5m、8m×3m、6m×4m, 其宽/深比 (R) 分别为 6、4.17、3.84、2.67 和 1.5, 太阳能热辐射设置为 400W/m²、800W/m² 和

1200W/m²。太阳能烟囱吸热墙材料为铝, 密度为 2700kg/m³, 导热系数为 167W/(m·K), 定压比热为 0.1kJ/(kg·K)。隧道两端及太阳能烟囱的出口设定为开放边界, 太阳能烟囱和隧道主体连通, 设置环境温度为 20°C。为综合分析通与排烟性能, 每组工况首先模拟 700s 无火源的通风场景, 700s 足以使烟囱空腔内气流受热浮力驱动达到稳定, 然后点火进行排烟模拟, 如图 2 所示。

1.3 网格划分

数值模拟结果的准确性受网格尺寸影响明显, 其中网格尺寸可通过火源特征直径 (D^*) 进行确定, 并且通常网格尺寸为 $0.1D^*$ 可得到较准确的模拟结果^[13]。为了节省计算资源, 并得到可靠的模拟结果, 需要对网格尺寸进行验证, 热释放速率越小网格尺寸越小, 火源热释放速率为 3MW 时, 火源特征直径约 1.5, $0.1D^*$ 为 0.15m。因此, 在该尺寸两侧设置 3 组不同网格尺寸进行敏感性分析。选取排烟时的准稳态阶段烟囱入口流量进行分析, 如图 3 所示, 网格尺寸为 0.1m 和 0.2m 时流量比较接近, 网格尺寸为 0.4m 时入口流量明显更低。因此, 选择网格尺寸为 0.2m 作为数值计算网格。

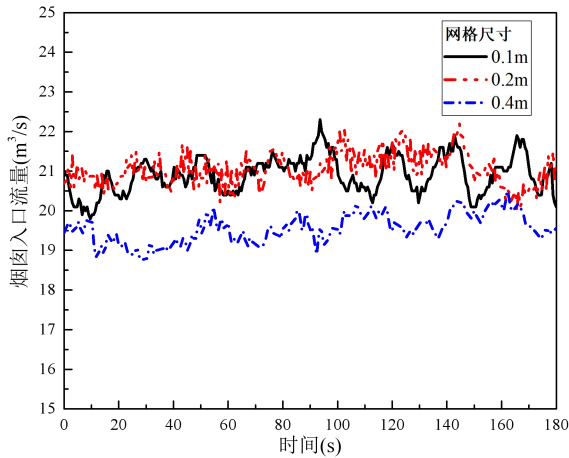


图3 网格尺寸敏感性分析

Fig.3 Analysis of mesh size

2 结果与讨论

2.1 烟囱空腔入口通风流量

图4为不同状态下的烟囱空腔入口体积流量。给定烟囱空腔宽/深比条件下，太阳辐射强度越大，烟囱入口处的空气体积流量越大。烟囱空腔宽/深比为0.5时，不同太阳辐射强度下烟囱入口处空气体积流量分别为4.45m³/s、5.91m³/s、7.02m³/s。辐射强度越大体积流量增幅下降，这与Shi等^[5]和Cheng等^[10]研究得出的太阳能烟囱内空气流量与辐射强度呈指数关系一致。太阳辐射强度越大，单位面积内吸热墙吸收的热量越多，因此吸热墙与腔室内空气的温差越大，受对流换热影响，冷空气被加热后与腔室外温差越大，使太阳能烟囱空腔内具有更高的气流速度。

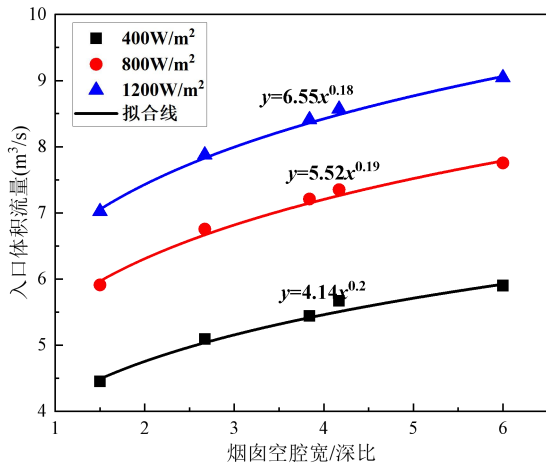


图4 太阳能烟囱自然通风流量

Fig.4 Natural ventilation rate through solar chimney

给定太阳辐射强度下，烟囱横截面积相同时，烟囱空腔宽/深比越大，烟囱空腔入口处气流体积流量增加，并且随着宽/深比增加，烟囱空腔入口体积流量上升速率变缓，整体上不同辐射强度下，入口体积流量与宽/深比的指数系数介于1.8~0.2之间。基于太阳能烟囱玻璃墙与吸热墙相对面安装的结构特征，并且吸热面与隧道宽度方向垂直安装，当烟囱空腔宽度越大时，一方面烟囱进气口宽度越大，隧道宽度方向更广范围的空气可以被吸入；另一方面，吸热墙的表面积越大，吸收的总热量越多，在更宽的空腔范围内加热气体并使其流动，导致流过烟囱的总体积流量增加。通过对每种太阳辐射强度下烟囱入口体积流量与烟囱宽/深比的结果拟合，可得出体积流量与宽/深比呈现较好的指数关系，并且常数项系数随太阳辐射强度增加而增加，指数项系数随太阳辐射强度增加而下降，具体可表示为式(5)关系：

$$V = aR^k \tag{5}$$

式中： V 为体积流量， m^3/s ； R 为太阳能烟囱截面宽/深比； a 、 k 为系数。

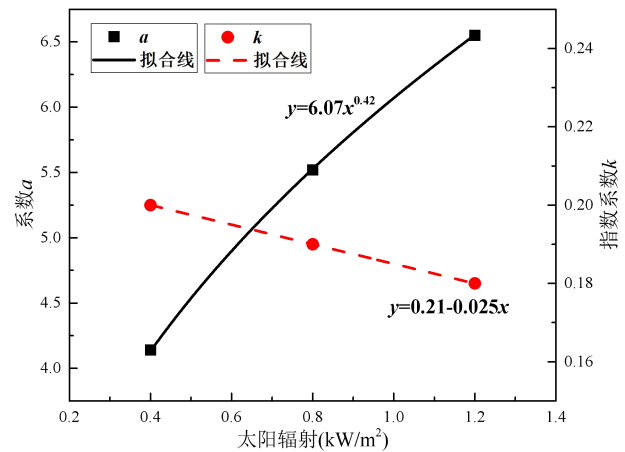


图5 自然通风下的系数随辐射强度变化

Fig.5 Variation of coefficients vs solar radiation under natural ventilation

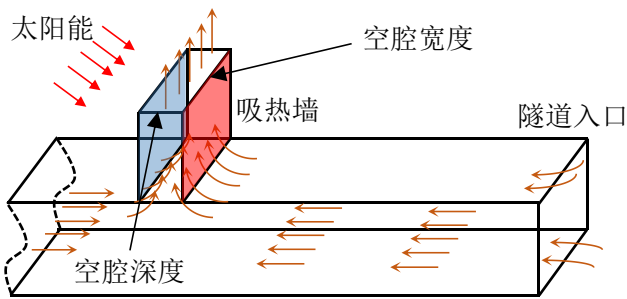
图5为式(5)中的系数与太阳辐射强度之间的关系，常数项系数 a 随辐射强度的0.42次幂增加，指数项系数 k 随辐射强度增加而呈线性下降，通过指数系数 k 变化规律可得出，太阳能辐射强度越大，烟囱入口体积流量随宽/深比增长速率更慢。将系数代入表达式(5)中可得出不同烟囱截面比

下的流量预测经验模型为:

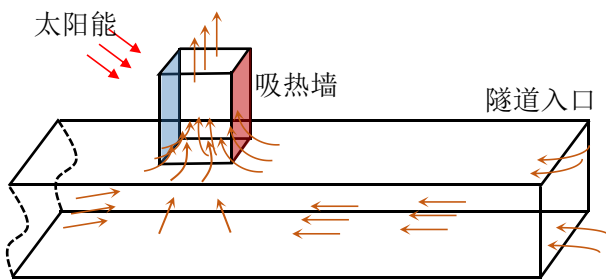
$$V = 6.07q^{0.42}R^{0.21-0.025q} \quad (6)$$

式中: q 为太阳辐射强度, kW/m^2 。

以上得出的模型为经验公式, 并且是基于烟囱开口面积为 24m^2 得出, 对于其他开口面积的烟囱适用性受到限制。因此, 为了能够得到适用范围更广、能够预测太阳能烟囱空腔不同宽/深比下的流量模型, 以下将进行理论分析, 得到归一化模型, 并与本经验公式预测结果对比分析。



(a) 空腔与隧道同宽的大宽/深比



(b) 空腔宽度小于隧道宽的小宽/深比

图 6 不同烟囱空腔宽/深比下的气流示意图

Fig.6 Schematic of the airflow inside solar chimney with different aspect ratio

对于太阳能烟囱通风流量的预测模型, Cheng 等^[10]假设烟囱空腔内的温度竖向呈线性增加, 空腔间歇深度方向呈抛物线分布, 通过理论分析得到了体积流量预测表达式为式 (7)。该表达式基于烟囱截面积求解流量, 对于浮力通量基于烟囱内外温差求得, 但对于给定烟囱高度情况, 竖向单位面积内外温差受截面积影响较小, 主要受到烟囱空腔宽/深比变化引起总吸热量和流动宽度变化, 如图 6 所示。因此, 该处将总热量通过吸热面积与单位面积辐射通量求得, 即 $E=qwh_c$, 并基于浮力通量表达式化简 $B=Eg/\rho_0C_pT_0$, 可进一步得到明确的预测模型式 (8)。

$$V_i = 0.63(C_d A)^{2/3} (B h_c)^{1/3} \quad (7)$$

$$V_i = 0.63(C_d A)^{2/3} \left(\frac{q w g h_c^2}{\rho_0 C_p T_0} \right)^{1/3} \quad (8)$$

式中: C_d 为泄漏系数; A 为烟囱空腔横截面积, m^2 ; B 为浮力通量, m^4/s^3 ; E 为总热量, kW ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h_c 为烟囱高度, m ; ρ_0 为环境密度, kg/m^3 ; C_p 为定压比热, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; T_0 为环境温度, K ; w_c 为烟囱宽度, m 。

将表达式 (8) 的预测结果与模拟结果、经验公式 (6) 的结果分别进行对比, 如图 7 所示, 流量均随着烟囱空腔宽/深比上升, 三者预测结果误差较小。综合以上分析可知, 设计隧道顶部式太阳能烟囱系统时, 应考虑更宽和更薄间歇的烟囱空腔。本经验模型基于烟囱空腔截面积为 24m^2 提出, 预测模型式 (8) 的适用范围需要通过验证进行扩展。

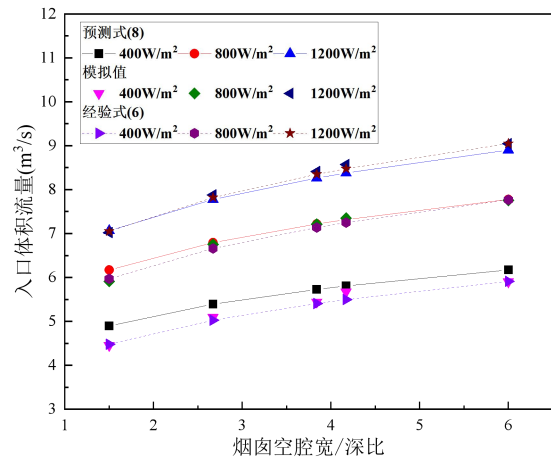


图 7 烟囱入口体积流量预测结果对比

Fig.7 Comparison of ventilation rate at inlet

2.2 烟囱空腔入口排烟量

火源功率为 10MW , 典型烟囱空腔宽/深比下隧道与烟囱内中心面温度分布如图 8 所示。靠近烟气来流方向的烟囱壁面温度更高, 并且当烟囱与隧道同宽时, 烟囱下游没有明显温升, 说明热烟气由烟囱空腔全部排除。当烟囱宽度小于隧道宽度时, 在烟囱空腔内出现竖向低温区, 主要原因为烟气竖向出现吸穿效应, 将隧道内底部空气吸出, 降低了烟囱排烟效率^[11]。因此, 在考虑排烟时, 不应设置较大的烟囱深度。排烟状态下烟囱内的温度可达 80°C , 太阳能辐射引发的温升相较于热烟气温度影响非常小, 其对排烟量影响可忽略^[10], 故以下分析太阳辐射强度为 800W/m^2 下的排烟量。

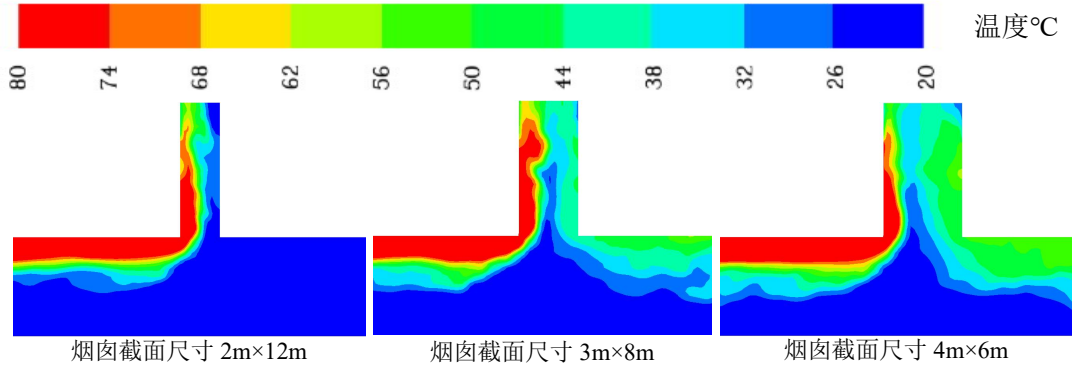


图 8 10MW 火源功率排烟状态下隧道与烟囱空腔中心面温度分布

Fig.8 Temperature distribution in tunnel center and channels under fire size 10MW

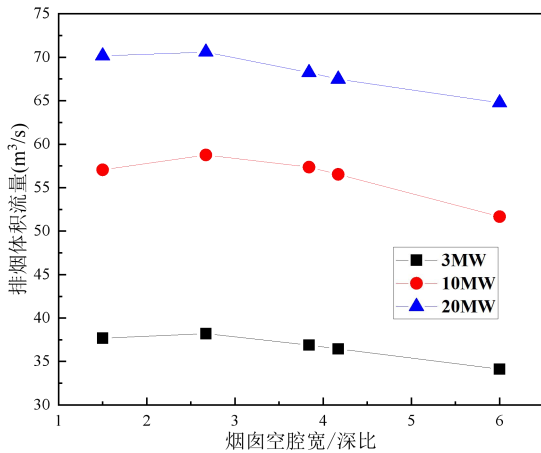


图 9 太阳能烟囱入口排烟体积流量

Fig.9 Volumetric flow rate at inlet under smoke exhaustion

图 9 为不同火源热释放速率下的烟囱排烟体积流量。热释放速率明显加强了排烟量，但排烟量增加率逐渐下降，热释放速率 10MW 增至 20MW 时，最大体积流量差为 13.09m³/s，热释放速率由 3MW 增至 10MW 时，最大体积流量差为 19.38m³/s。太阳能烟囱空腔宽/深比 < 2.67，入口体积流量略上升，此后随着太阳能烟囱空腔宽深比上升入口体积流量下降。主要原因为烟囱空腔宽/深比较小时，烟囱空腔仅在隧道中心区域排除烟气，并形成明显的吸穿效应，较大体积流量是由于大量的空气被排除；烟囱空腔宽/深比增加时，空腔开口沿隧道宽度方向更宽，横向排烟面积更宽并形成吸穿效应，因此入口体积流量增加；当烟囱宽/深比为 6 时，烟囱空腔宽度与隧道同宽，隧道内所有烟气蔓延至烟囱空腔处被排出，并未出现吸穿效应，因此体积流量更小，排烟效率更高，这与先前

隧道竖井排烟研究结论一致^[14]。基于以上分析可得出，隧道太阳能烟囱用于排烟时，应设计截面更宽纵向更窄的烟囱空腔。

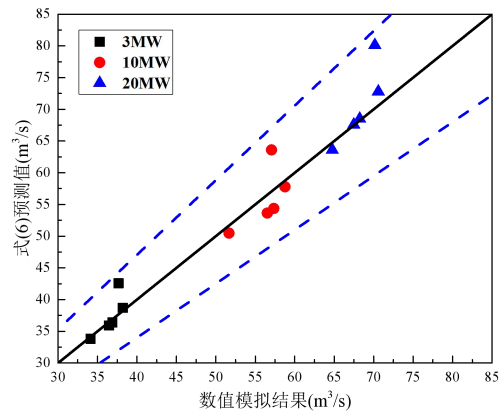


图 10 排烟量预测结果与模拟值对比

Fig.10 Comparison of smoke exhaustion rate between predictions and numerical modelling

基于隧道火灾最高温升，Cheng 等^[10]提出了隧道顶部太阳能烟囱的排烟流量预测模型（见式 9），该表达式未考虑烟囱空腔截面尺寸的影响，此外该表达式考虑所有烟气经由烟囱排除。实际自然排烟中，火源两端设置烟囱空腔，热烟气由火源两端分别排除，因此各烟囱排除烟气量可假设为 1/2。太阳能烟囱横截面宽/深比变化时，沿隧道宽度方向的烟囱开口尺寸减小，纵向尺寸增加，导致更多的空气被排除，故采用隧道宽度与烟囱宽度比值进行火源热释放速率修正，得到表达式（10）。将表达式（10）的预测结果与数值模拟结果进行对比，如图 10 所示，两者吻合的较好，误差在 15% 以内。表达式（10）适用于热释放速率 < 20MW 的隧道火灾，预测截面宽/深比 < 6 的太阳能烟囱入口排烟流量。

$$V_i = 2.63C_d A \left(\frac{gh_c Q^{2/3}}{T_0 h_t^{5/3}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$V_i = 1.315C_d A \left(\frac{gh_c (QW_t/W_c)^{2/3}}{T_0 h_t^{5/3}} \right)^{1/2} \quad (10)$$

3 结论与展望

本研究采用数值模拟方法开展城市浅埋隧道太阳能烟囱通风与排烟体积流量研究,分析相同烟囱截面面积不同宽/深比对通风与排烟效率的影响规律,得出以下主要结论:

(1) 太阳辐射强度增加使烟囱空腔入口流量呈指数上升,指数系数为1/2,烟囱入口体积流量随烟囱截面尺寸与高度变化,太阳能烟囱空腔宽/深比越大,烟囱空腔入口流量增加,入口流量与 $R^{0.21-0.025q}$ 相关。

(2) 太阳能烟囱与隧道非等宽将形成明显的吸穿效应,降低排烟效率,烟囱空腔横贯隧道宽度方向时,排烟效率较高,排烟体积流量随修正后的热释放速率 $(QW_t/W_c)^{1/3}$ 。综合分析得出太阳能烟囱宽12m,空腔间隙2m时,其通风与排烟效率最优,即隧道顶部式太阳能烟囱应设置隧道宽度方向更宽尺寸、纵向更窄的空腔结构。

(3) 基于模拟结果提出了预测烟囱空腔入口通风与排烟体积流量经验公式,得到了预测隧道顶部式太阳能烟囱入口通风与排烟体流量的修正模型,修正模型可很好的预测不同截面尺寸太阳能烟囱入口通风与排烟量。本文主要研究相同烟囱截面面积不同宽/深比时,太阳能烟囱入口通风与排烟流量变化规律。太阳能烟囱空腔倾斜角度不仅影响吸热量,同时扰动气流速度,改变太阳能烟囱通风与排烟性能,但本研究未考虑倾斜角度的影响,在将来的研究中将进一步揭示太阳能烟囱空腔倾斜角度的影响机制。

参考文献:

[1] Cheng X, Shi L, Dai P, et al. Study on optimizing design of solar chimney for natural ventilation and smoke exhaustion [J]. *Energy & Buildings*, 2018,170:145-156.

[2] 高云骥,李智胜,罗越扬,等.纵向通风与竖井自然排烟下隧道火灾烟气特性实验研究[J].*消防科学与技术*, 2022,41(2):185-191.

[3] Guo C, Wang M, Yang L, et al, A review of energy consumption and saving in extra-long tunnel operation ventilation in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53:1558-1569.

[4] López González M, Galdo Vega M, Fernández Oro J M, et al. Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40:22-37.

[5] Shi L, Ziem A, Zhang G, et al. Solar chimney for a real building considering both energy-saving and fire safety – a case study [J]. *Energy & Buildings*, 2020,221:110016.

[6] 张华扬,秦萍,曹晓玲.太阳能烟囱强化自然通风的发展现状研究[J].*制冷与空调*,2017,31(2):130-134,193.

[7] 洪炳华,张浩,吴伟雄,等.太阳能通风墙系统结构及其关键因素综述[J].*暖通空调*,2022,52(10):84-93,74.

[8] Cheng X D, Shi L, Dai P, et al. Study on optimizing design of solar chimney for natural ventilation and smoke exhaustion [J]. *Energy & Buildings*, 2018,170: 145-156.

[9] 高一然.利用太阳能烟囱的公路隧道自然通风数值模拟与研究[D].西安:长安大学,2016.

[10] Cheng X D, Shi Z C, K Nguyen, et al. Solar chimney in tunnel considering energy-saving and fire safety [J]. *Energy*, 2020,210:118601.

[11] Huang Y B, Wang B, Shi L, et al. Performance evaluation of solar chimney in tunnel for passive ventilation and smoke exhaustion: A numerical approach [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024,238:122227.

[12] 王洁,王璐,姜学鹏.城市浅埋隧道自然排烟竖井临界间距研究[J].*消防科学与技术*,2024,43(1):65-69.

[13] 赵刚.环境压力对竖井型隧道火灾自然通风烟气特性的影响研究[J].*制冷与空调*,2023,37(4):535-538.

[14] 郭庆华,朱合华,闫治国.顶部开口自然通风隧道火灾竖井排烟效率研究[J].*消防科学与技术*,2021,40(5): 661-664.