

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.014

纵向通风下地铁疏散走道内烟气运动特性

吴婧¹, 林凌敏^{1,2}

(1.福建工程学院 建筑新能源与节能福建省高校重点实验室,福建 福州 350118;
2.德州理工大学,拉伯克 79409)

摘要:以福州地铁四号线的一个地铁隧道区间为研究对象,利用 FLUENT 构建车头电气火灾的数值模型。重点分析了在阻塞比为 0.38 与 0.55 条件下火灾烟气的运动特征及对疏散人员的影响。模拟结果表明:在火源上游位置,在未开启通风和开启通风的条件下,高温烟气聚集在隧道顶部,随高度下降,烟气温度降低。同时,在未开启通风,且火源释热率及火灾发展时间相同的情况下,高阻塞比隧道内的初始温度较高;开启纵向通风后,对流换热增强,降温快,高温烟气在火源上游沿隧道长度方向、高度方向的运动都能得到有效的控制,有利于人员疏散。最后,给出了纵向通风条件下的疏散方案及建议。

关键词:地铁区间;隧道火灾;阻塞比;纵向通风;CFD 模拟

中图分类号: U121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)06-0594-07

Characteristics of smoke movement in subway evacuation pathways under longitudinal ventilation

WU Jing¹, LIN Lingmin^{1,2}

(1.Key Laboratory of New Energy and Energy-saving in Architectural Design in Colleges and Universities of Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Texas Tech University, Lubbock 79409, USA)

Abstract: Taking a subway tunnel section of Fuzhou Metro Line 4 as the research object, a numerical model of the locomotive electrical fire was constructed with FLUENT. Emphasis was put on the analysis of fire-induced smoke movement impact on evacuees when the blockage ratio was 0.38 and 0.55, respectively. Simulation results show that in the upstream position of the fire source, whether vented or not, smoke with a higher temperature appears primarily near the tunnel ceiling, and the smoke temperature decreases with the height falling. When the ventilation is not turned on, the initial temperature of the tunnel with the higher blockage ratio appears to be higher after the same fire development time and heat release rate. After introducing longitudinal ventilation, the convection heat exchange is enhanced and the cooling is faster. In the upstream of the fire source, the movement of high temperature smoke along the tunnel length direction and height direction upstream of the fire source can be effectively controlled. This is beneficial for the evacuation process. At last, the evacuation plan and suggestions under the longitudinal ventilation are given.

Keywords: subway section; tunnel fire; blockage ratio; longitudinal ventilation; CFD simulation

纵向通风系统不需要额外的空间用于布置通风风管,占据隧道空间小,系统造价便宜,被广泛应用^[1]。纵向通风将火灾产生的烟气吹向下游,在火灾上游形成一个无烟区域,保证了隧道使用

者的安全。纵向通风的风速在大于等于临界风速时能够有效地抑制烟气逆流,Oka 通过实验得出了无量纲临界风速数学表达式^[2]。

地铁隧道内发生火灾时,理想的疏散策略是将列车停靠在地铁站点,便于人员从站台疏散^[3-4]。根据过去的研究^[5],在约 45% 的火灾案情中,列车没有行进至指定站点,而是停在站与站之间的区间隧道内,这种情况对人员疏散更为不利。前人学者们引入阻塞比来描述火灾发生时列车占据隧道的情况,并且 Gannouni^[6]、Zhang^[7] 已经证实阻塞比对临界速度、烟气逆流长度的显著影响。

以往的火灾模拟实验^[1],探测点布置在隧道顶棚附近及火灾上下游位置,不处于疏散走道附近,并不能直接表明高温有毒烟气对于疏散人员的伤害情况,通风对疏散走道处高温的抑制效果也未得到研究。而且疏散时间对人员逃生至关重要。罗振敏^[8] 基于疏散时间研究了地铁隧道内不同风速对于人员疏散的影响。陈火炬^[9] 依据人流模型,分析疏散出口间距、疏散出口宽度等因素对于人员疏散速度以及效率的影响。针对火灾产生的高温烟气分布给出的疏散指导意见较少,而高温烟气的危害如上所述,不应被忽视。

本文将地铁隧道阻塞比考虑在内,借助 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学) 软件模拟纵向通风条件下的地铁隧道中发生火灾后的烟气运动规律,重点分析位于疏散走道位置的温度分布情况,评估通风的有效性,为地铁设计及地铁火灾疏散应对策略提供参考。

1 实验方法

1.1 隧道模型

根据福州地铁四号线实际工程设置隧道模型,设定隧道区间内停有 6 节编组列车,单节车厢的长×宽×高为 19 m×2.8 m×3.8 m,为城市大中型地铁线路常用的 B 型车厢尺寸。选取的隧道区间为盾构型直管段,长 153 m,隧道建筑限界直径 6.2 m,对应的阻塞比 $\varphi_1 = 0.38$,为本文的低阻塞比实验组。根据地铁限界标准 CJJ/T96 - 2018^[10],区间圆形隧道建筑限界直径普通道床地段最小应为 5.2 m,对应的阻塞比 $\varphi_2 = 0.55$,作为高阻塞比对照组。

1.2 模拟火源

约 48% 的列车火灾是由机械或电器故障引发的,而电子设备与刹车系统多位于车厢底部^[5]。为模拟车头部位发生电器火灾,将模拟火源设定在列车头车厢底部的前端^[6-7]。将火源中心位置设为坐标原点,以便于研究烟气逆流长度。隧道内纵向通风由车尾部火灾上游区域送入,吹向车头下游发生火灾区域,如图 1 所示。

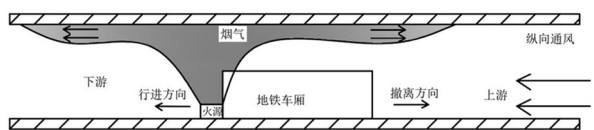


图 1 模型示意图

Fig.1 Demonstration of the metro tunnel model

地铁车头发生电气火灾时的火源释热率为 10 MW。模拟火源用恒定体积热源代替,采用恒定释热率模拟最不利情况,有助于进行火灾情况下通风及人员疏散的风险评估^[1]。Ingason^[1] 依据 Runehamar 隧道全尺寸燃烧实验测量的数据,推导出燃烧产生的二氧化碳含量与释热率关系的公式(1)。CO 含量根据 Vega^[11] 从 EUREKA 实验数据得到的结果,在不完全燃烧的模型中,每 20 mg/kg 的 CO₂ 约含 1 mg/kg 的 CO。因此,火源燃烧产物边界条件简化为 CO₂ 的生成率 0.87 kg/s, CO 含量则根据上述理论直接计算得出。

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 0.087 \dot{Q} \quad (1)$$

式中, \dot{m}_{CO_2} 为 CO₂ 生成率,kg/s; \dot{Q} 为释热率,MW。

1.3 模型设置

模拟利用计算流体力学软件 FLUENT 进行 3D 计算域内流体的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程求解。模拟的计算域网格在隧道壁面及车厢壁面设置膨胀层,其余计算域设置非结构化网格,如图 2 所示。 φ_1 组总网格数为 294 668 个, φ_2 组总网格数为 239 578 个。湍流模型选择 standard k- ϵ RNG,考虑重力作用,开启组分运输模型以模拟燃烧产物。利用 Boussinesq 方法计算热压引起的浮力作用^[12-13]。辐射传热选用 DO (The discrete ordinates radiation, 离散坐标辐射) 模型,DO 模型适用于有局部热源与气体辐射传热的情况^[14]。

模拟场景为:在地铁隧道区间内车头着火,列车停靠在区间内,火源释热率为 10 MW。根据

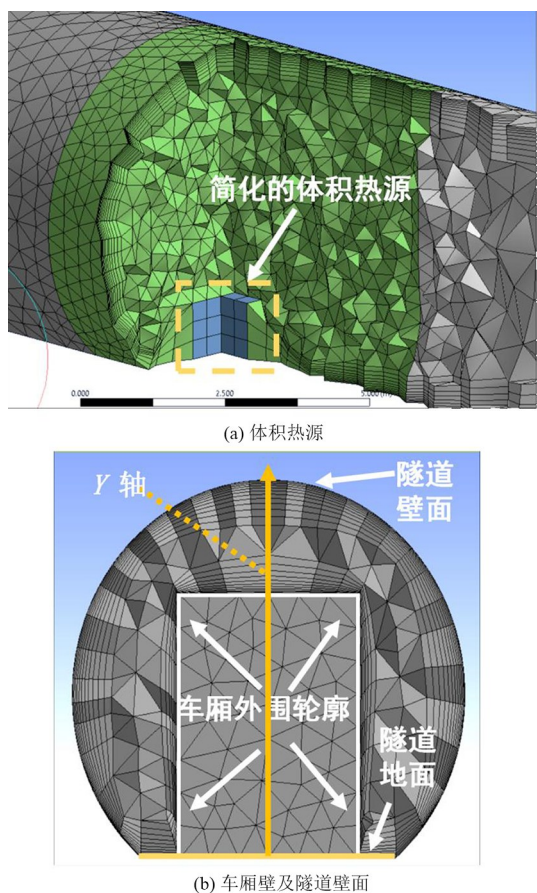


图 2 计算域网格处理
Fig.2 Meshing setup

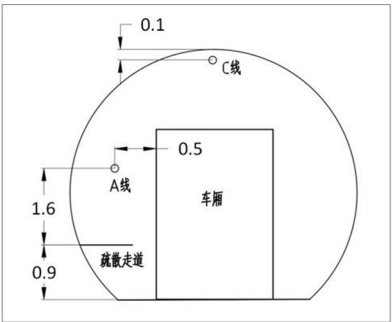
GB51298-2018^[15]中通风章节的规定,隧道内事故通风系统的响应时间不得超过 180 s。考虑不利的条件,认为前 180 s 隧道内没有机械通风,火势自由发展。180 s 后开启通风,通风风速 $v = 2 \text{ m/s}$,引入的纵向通风温度 300 K,环境温度 300 K,离隧道壁面 3 m 处保持 298 K 恒温,壁面导热系数 $1.75 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。采用瞬时计算模型,以逐时研究通风效果^[16]。

1.4 测点布置

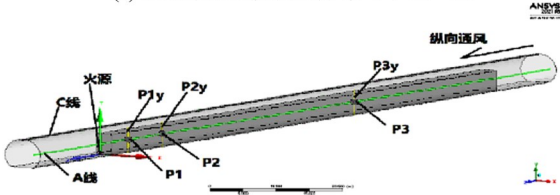
实验坐标轴原点为火源底部中心位置, x 轴为隧道宽度方向坐标, y 轴为高度方向坐标,隧道地面定义为 $y = 0 \text{ m}$, z 轴为隧道长度方向坐标,火源下游为正值,火源上游为负值。

以往的实验及模拟会在隧道中心线所在的顶棚下取测点研究烟气逆流情况。本次实验保留隧道中心线顶棚下端 10 cm 处布置的温度测点(C 线),同时,增加疏散走道上人眼特征高度位置的温度测点(A 线),如图 3 (a),以研究高温烟气对

人员疏散的影响。根据地铁设计防火标准^[15],隧道区间内的疏散走道位于列车行进方向左侧,且离轨面高度不得大于 900 mm,故本次疏散走道确定在离轨面 900 mm 高度上。Wu^[17]认为沉降到人眼高度附近(约 1.6 m)的烟气会被人吸入,因此最终确定的沿疏散走道人眼特征高度温度测点(A 线)离地高度 2.5 m ($0.9 \text{ m} + 1.6 \text{ m}$),距离车厢壁 50 cm,位于列车行进方向左侧。在离火源 5、15 和 72 m 的 A 线上取 P1、P2 和 P3 三处测点,如图 3 (b),这 3 个点大致在车厢第一节的车头、尾部及第 4 节车厢的尾部。为研究沿 y 轴方向(隧道高度)烟气的沉降情况,过 P1 和 P2 取两处沿 y 方向排布的测点簇,称为 P1y 与 P2y。P1y 与 P2y 起点位于疏散走道平面高度 (+0.9 m),终点位于隧道顶部。



(a) 隧道截面温度测点分布 (单位: m)



(b) 隧道纵向温度测点分布

图 3 测点布置示意

Fig.3 Detector layout

1.5 CFD 模型验证

通过本隧道模型模拟得到的临界风速值与前人学者的实验数据进行比对,验证 CFD 模拟的准确性。临界风速的计算见文献[11],选取不同的火源热释放率,得到对应的临界风速。将模拟的结果(图中圆圈点)与 Zhang、Ganuonni^[6, 11]的结果进行比对(如图 4),横坐标为无量纲热释放率(公式 2),纵坐标为包含阻塞比条件的无量纲临界风速(公式 4)。模拟得到的不同临界风速与 Ganuonni 的结果最为接近,临界风速随热释放率

的变化趋势与 Zhang 的实验结果一致。因此,认为该设定下的模拟结果能够反映真实火灾情景。

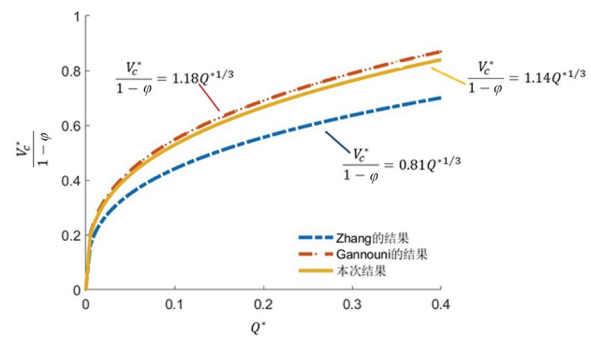


图 4 利用临界风速验证 CFD 模型

Fig.4 Validation of CFD model using critical velocity

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 g 12 \bar{H} 52} \quad (2)$$

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{g}} \quad (3)$$

$$V^* = \frac{V_c^*}{1 - \varphi} \quad (4)$$

式中, Q 为释热率, kW; ρ_0 为纵向来流空气的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_p 为定压比热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_0 为温度, K; V_c 为临界风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\bar{H} = \frac{4WH}{2(W+H)}$ 为隧道的当量直径, m; φ 为隧道阻塞比。

2 结果与讨论

2.1 未开启通风时烟气状态

对未开启通风,火源自由发展 180 s 时的隧道内温度分布进行分析。根据美国消防工程师学会 NFPA-130 的数据^[15],人体裸露皮肤所能承受的流体温度上限为 120 °C。超过 120 °C,人会在数分钟之内有强烈痛感,并有灼烧痕迹遗留在皮肤上。因此,将人体可耐受温度上限值设定在 120 °C,选取疏散走道人眼特征高度平面在刚要开启通风时刻的温度云图,以研究高温烟气对疏散人员的威胁。如图 5 所示,两种阻塞条件下,在疏散走道侧均出现温度大于 120 °C 的区域,集中分布在火源附近的位置,从火源处向隧道两边,温度逐渐降低。阻塞比为 0.55 组处于高温范围的烟气区域分布更广,基本扩散到火源上游 70 m,对应第 4 节车厢位置;阻塞比为 0.38 组,高于 120 °C 的烟气大约发展

至火源上游 30 m,对应第 2 节车厢位置。

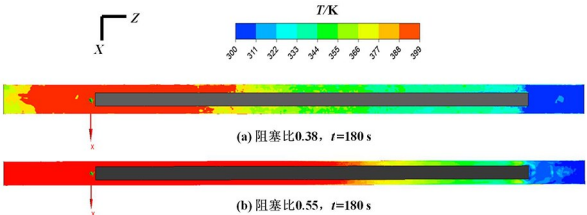


图 5 $t=180$ s 时 $y=2.5$ m 高度处的温度云图

Fig.5 Temperature contour plot at $y=2.5$ m when $t=180$ s

进一步研究烟气在 P1 与 P2 沿 y 轴方向上的温度分布情况,如图 6 所示。温度更高的烟气集中在靠近隧道顶部的位置,随着高度的下降,温度逐渐降低。根据此温度分布特征,建议适当降低疏散走道高度。对比两种阻塞条件下的沿 y 轴方向温度分布情况,可以看到,从疏散走道平台处(高度为 0.9 m)至人眼特征高度处(2.5 m),以及延伸到对应的隧道顶部,均是高阻塞比条件下的温度更高。

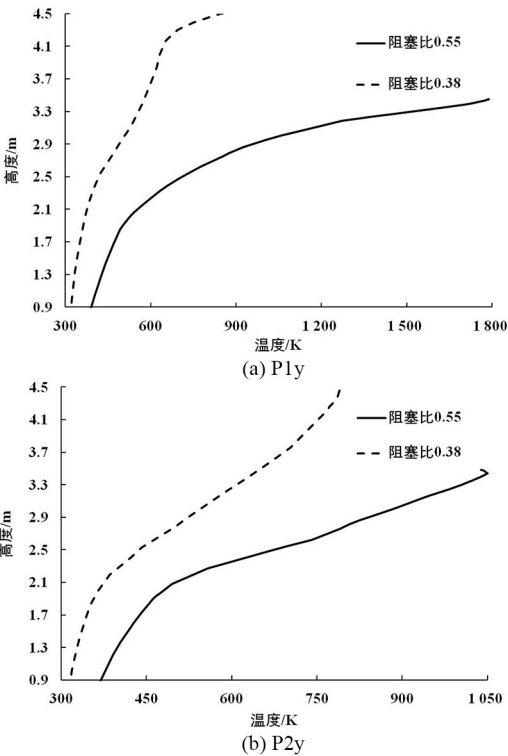


图 6 $t=180$ s 时 P1y、P2y 两处竖直方向上的温度分布

Fig.6 Vertical temperature distribution at P1y, P2y when $t=180$ s

因此,在高阻塞比隧道中,更应该注意降低疏散走道的高度设置。如在阻塞比 0.55 隧道内的

P1y 上,通过降低疏散走道高度,让原本处于 2.5 m 的人眼特征高度位置下降至 2.1 m,则对应的烟气温度可从 700 K 降至 550 K 左右。当采取降低疏散走道的策略时,应当注意适当增加楼梯等辅助行走设备,以便人员疏散时顺利地从位于高处的车厢地板转移到车厢外高度相对较低的疏散平台上。

2.2 开启通风后烟气运动

2.2.1 沿隧道长度方向

从第 180 s 开启通风后,位于隧道顶棚附近位置(C 线)及疏散走道人眼特征高度位置(A 线)的烟气均得到抑制,火源上游的烟气沿隧道长度方向运动速度得到抑制,如图 7 所示。通过温度曲线与纵坐标 300 K 交点对应的沿隧道长度方向位置坐标,判断烟气逆流长度(以火源处为零坐标点),以阻塞比 0.38 组的 A 线位置的烟气逆流长度为例,未开启通风时烟气逆流长度约为 115 m,220 s 时逆流长度约为 75 m,到 260 s 时逆流基本消失。而对于同组的 C 线位置,由于通风风速小于临界风速,所以顶棚位置的烟气并未得到完全抑制,在 $t = 310$ s 时仍有 20 m 左右的烟气逆流长度,由此可见,不同位置处烟气逆流所需时间不同。根据本实验的结果,若隧道顶部中心处的烟气逆流得到抑制,则相同位置坐标下疏散走道人眼特征位置的烟气也能得到有效控制。

开启通风后,仅火源上游的烟气得到抑制,火源下游的烟气依然存在。在图 7 中,火源下游位置(约 0~20 m)温度曲线仍高于 300 K,且不论是隧道顶部附近(C 线)还是疏散走道人眼特征高度(A 线),都存在高温烟气。纵向通风的缺点在此处体现,即纵向通风只能够在火源上游地区创造出安全空间,下游地段的安全不能保证。因此,在采用纵向通风的隧道内,应有显著的指引标志及撤离语音指导,以正确引导人员往火源上游撤离,避免逃向火源下游位置。

进一步研究不同阻塞条件对于通风效果的影响,根据两个阻塞比条件下 P1、P2 及 P3 点温度变化情况(见图 8)可以看出,高阻塞比条件下烟气温度下降更快,该现象在靠近火源位置的 P1、P2 测点更为明显。高阻塞比条件下降温速率快,是由于列车阻塞区域的大风速增强了换热,选取烟气逆流相对稳定时($t = 310$ s)两种阻塞比条件下 A 线上的瞬时风速比较,见图 9,可以观察到列

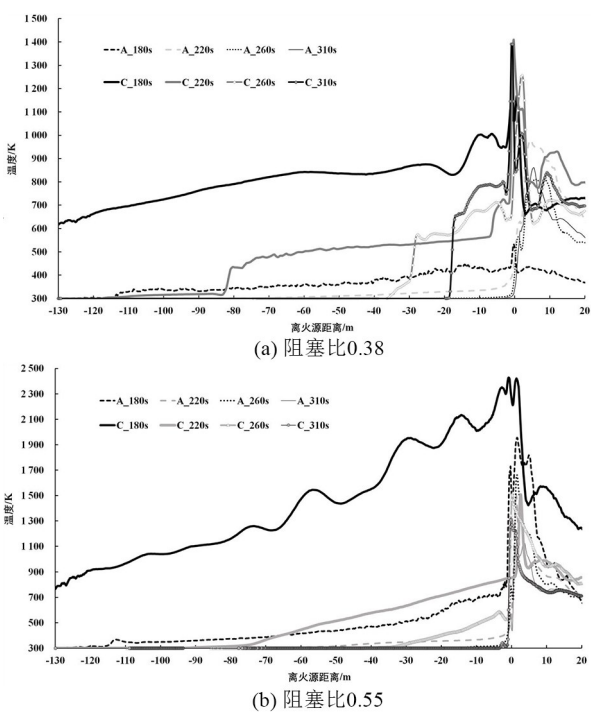


图 7 C 线与 A 线的烟气温度分布
Fig.7 Smoke temperature along Line C and Line A

车阻塞区间(-114~0 m)的风速更大,在阻塞比为 0.55 组的阻塞区间风速约为 5.5 m/s,阻塞比为 0.38 组阻塞区间风速约为 3.8 m/s,均大于通风风速 2 m/s。高阻塞比隧道内的断面尺寸更小,故形成了比低阻塞比组更大的区间风速。

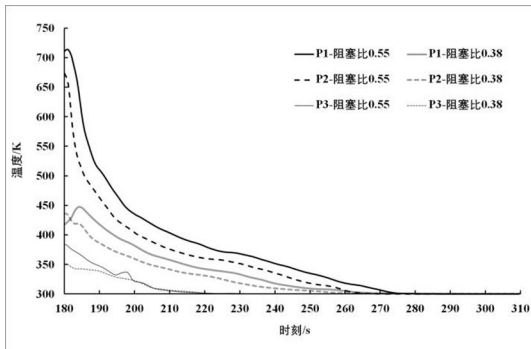


图 8 3 个测点的温度变化情况
Fig.8 Temperature variation at three testing locations

由隧道尺寸减小而形成的大风速虽有利于高温烟气的消除,可是大风速对于疏散人员的行走会形成一定阻力,影响人员疏散的行走速度,不利于人员快速转移。NFPA-130^[18]规定的隧道纵向通风风速范围是 2~11 m/s,故本次模拟的情况不论在列车阻塞区间还是非阻塞区间均符合风速

要求。

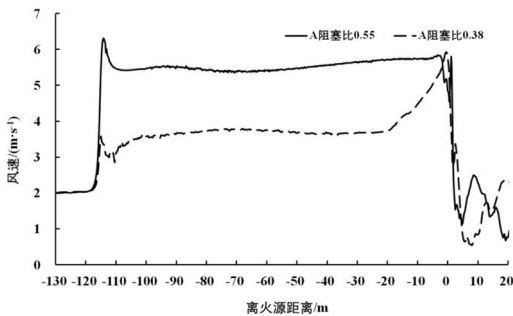


图 9 $t=310\text{ s}$ 时 A 线上瞬时风速

Fig.9 Transient velocity magnitude at Line A when $t=310\text{ s}$

2.2.2 沿隧道高度方向

图 10(a) (b) 展示的高阻塞比为 0.55P1y 与 P2y 两处的温度分布,在 $t=310\text{ s}$ 时,通风使烟气在测点 1、2 基本消失,因此从疏散走道高度至隧道顶部均恢复到环境温度 300K (图中的黑实线)。随着通风的开启,各时刻的烟气温度 y 轴方向分布大小均低于上一时刻,达到环境温度的部分则不再改变。例如,代表 310s 时 P1y 线上的黑实线,其对应的温度大小始终低于 260s 时的灰实线温度。烟气的消失过程先由疏散走道位置开始,从底部先达到环境温度,靠近隧道顶部位置后达到环境温度。因此,通风开启后,烟气有沿隧道方向 (z 轴) 的逆流过程,还有沿 y 轴的上浮运动,这两个方向上的运动均为疏散走道的人员创造出安全的撤离空间。

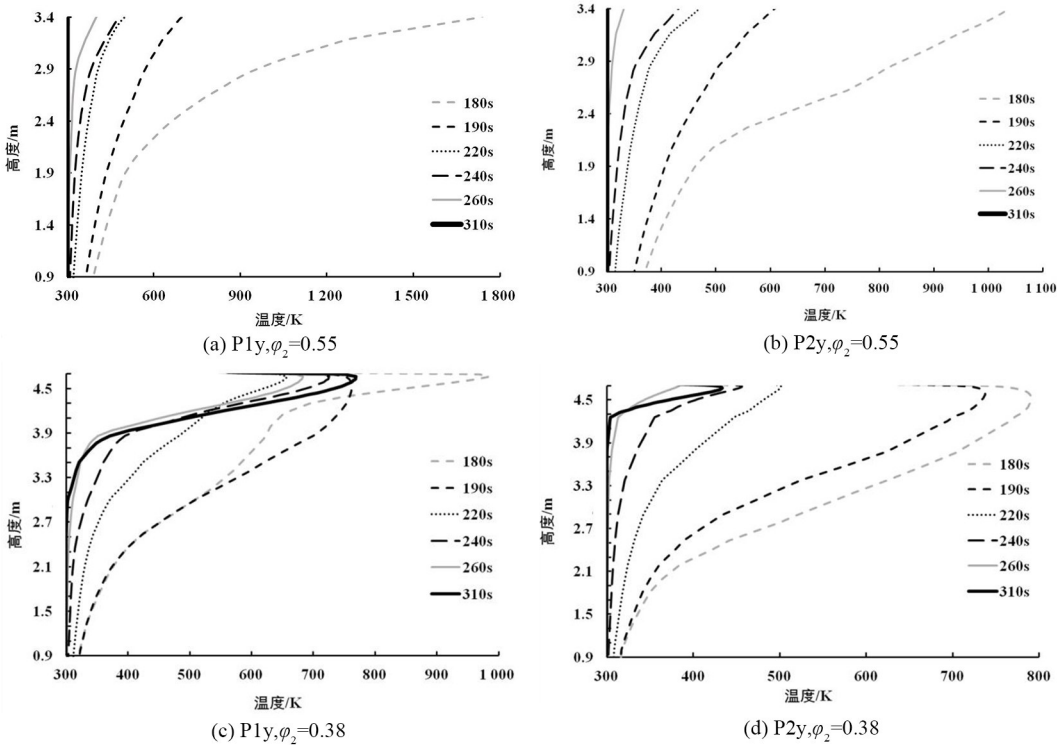


图 10 P1y、P2y 竖直方向温度分布

Fig.10 Vertical temperature distribution at P1y, P2y

与高阻塞比组的现象不同,在图 10(c) (d) 低阻塞比为 0.38 组的各时段烟气温度并不遵循随着时间必然降低的规律。低阻塞比组温度呈现时高时低。这是因为低阻塞比组的通风风速小于临界风速,P1y 与 P2y 两个测点处于烟气逆流

化,但是逆流的烟气始终处于一种动态平衡状态,故在贴近隧道顶部的逆流层出现温度波动,这种波动在图 10(c) 中较为明显,可以看到,代表不同时刻下 P1y 温度曲线,在 3.7m 高度以上出现不规则波动。而这种情况下纵向通风在疏散走道人眼特征高度位置处依然保持初始环境温度。所以,

在隧道的部分区域,就算顶部位置存在着烟气逆流,疏散人员并不受顶部逆流烟气的影响。

3 结论

1) 火源上游的烟气在未开启纵向通风以及开启通风后,在沿隧道高度方向上,高温烟气均贴近隧道顶部,位置越低,对应的烟气温度越低,高阻塞比隧道此特征更为明显,如原处于2.5m的人眼特征高度位置处烟气温度为700K,当高度下降至2.1m,烟气温度降至550K左右。

2) 纵向通风对于抑制疏散走道内高温烟气的效果显著,通风使烟气的逆流长度和烟气层厚度同时减小,为疏散人员创造安全撤离空间。

当通风风速小于临界风速时,出现在隧道顶部的烟气可能无法得到抑制,但位于疏散走道高度位置的烟气可能得到抑制。在同样引入2m/s的纵向通风情况下,高阻塞比隧道区间空气流速更大,能强化对流换热,有利于烟气温度的快速下降,减小余热的伤害。

3) 在本次模拟的场景中,纵向通风只能抑制位于火源上游区域烟气,下游区域得不到保障。故隧道内应通过不同手段,例如醒目的标记和语音提示,确保人员在疏散时从火灾上游区域进行撤离。

参考文献:

- [1] INGASON H, LI Y Z, Lönnemark A. Tunnel fire dynamics [M]. New York: Springer, 2015.
- [2] OKA Y, ATKINSON G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4):305-322.
- [3] 孙虹. 地铁区间火灾工况下疏散指示联动方案的对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1):175-179.
- [4] 陈国栋, 赵航. 铁路及地铁隧道内列车火灾疏散模式调研与分析[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2):6-10.
- [5] ZHOU D, YAN X, ZHENG J L. Study on fire characteristics of subway train running with fire[C]//14th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014:3785-3796.
- [6] GANNOUNI S, MAAD R B. Numerical study of the effect of blockage on critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 48:147-155.
- [7] ZHANG S G, CHENG X D, YAO Y Z, et al. An experimental investigation on blockage effect of metro train on the smoke back-layering in subway tunnel fires[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99:214-223.
- [8] 罗振敏, 郝强强, 程方明, 等. 地铁隧道火灾模拟及人员疏散研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3):363-367.
- [9] 陈火炬, 韩柯柯, 曹松, 等. 地铁区间隧道火灾状况下人员应急疏散效率研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3):141-144.
- [10] 住房和城乡建设部. 地铁限界标准:CJJ/T96—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] ZHANG S G, SHI L, LI X B, et al. Critical ventilation velocity under the blockage of different metro train in a long metro tunnel[J]. Fire and Materials, 2020, 44(4):497-505.
- [12] VEGA M G, ARGÜELLES DÍAZ K M, FERNÁNDEZ ORO J M, et al. Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: memorial tunnel case[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(5):539-551.
- [13] WANG F, WANG M N. A computational study on effects of fire location on smoke movement in a road tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51:405-413.
- [14] ANSYS, Inc. Ansys fluent user's guide [Z]. USA: SAS IP, Inc., 2021.
- [15] 住房和城乡建设部. 地铁设计防火标准:GB 51298—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.
- [16] INGASON H, SECO F. Numerical simulation of a model scale tunnel fire tests[Z]. Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2005.
- [17] WU J, SHEN F M. Experimental study on the effects of ventilation on smoke movement in tunnel fires[J]. International Journal of Ventilation, 2016, 15(1):94-103.
- [18] National Fire Protection Association. NFPA130, standard for fixed guideway transit and passenger rail systems[S]. USA: nfpa.org, 2017.

(责任编辑:陈雯)