

# 通风方式对非对称隧道火灾烟气蔓延的影响

肖峻峰<sup>1,2</sup>, 胡涛涛<sup>1,2</sup>, 秦荣水<sup>1,2</sup>, 梁至昕<sup>2</sup>

(1. 建筑健康监测与灾害预防技术国家地方联合工程实验室, 合肥 230601; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 合肥 230601)

**摘要:** 为研究非对称隧道内不同通风方式对火灾烟气蔓延的影响, 利用 PyroSim 数值模拟软件构建非对称隧道模型, 对隧道内烟气流速、温度分布和烟气运动进行研究, 并分析了不同风速对人员疏散的影响。结果表明: 上坡隧道内诱导气流与补充气流存在竞争关系, 随着坡度差增大, 烟气流速增加, 烟气从上坡隧道排出, 新鲜空气从平坡段隧道进入补充燃烧消耗; 自然通风下隧道充满烟气, 在纵向风速 1.5 m/s 下隧道环境得以改善; 随着风速继续增大, 隧道烟气流速紊乱, 烟气层被扰乱。在实际非对称隧道中, 建议火灾初期以 1.5 m/s 的纵向风速进行通风, 待人员疏散后再增加风速加速排烟。

**关键词:** 火灾烟气; 数值模拟; 温度分布; 人员疏散; 坡度差

**中图分类号:** X928.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.014

## Influence of Ventilation Mode on Smoke Spread in Asymmetric Tunnel Fires

XIAO Junfeng<sup>1,2</sup>, HU Taotao<sup>1,2</sup>, QIN Rongshui<sup>1,2</sup>, LIANG Zhixin<sup>2</sup>

(1. National-local Joint Engineering Laboratory of Building Health Monitoring and Disaster Prevention Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different ventilation methods on the spread of fire smoke in asymmetric tunnels, PyroSim numerical simulation software was used to construct an asymmetric tunnel model, to study the smoke flow rate, temperature distribution and smoke movement in the tunnel, and to analyse the effects of different wind speeds on the evacuation of people. The results show that there is a competitive relationship between the induced airflow and the supplementary airflow in the uphill tunnel, and as the difference in slope increases, the flue gas flow rate increases, the flue gas is discharged from the uphill tunnel, and the fresh air enters only from the flat-slope section of the tunnel to supplement the combustion consumption. The tunnel is filled with smoke under natural ventilation, and the tunnel environment is improved under a longitudinal wind speed of 1.5 m/s. As the wind speed continues to increase, the tunnel flue gas flow rate is disturbed and the flue gas layer is disturbed. In practical asymmetric tunnels, it is recommended to ventilate the tunnel with a longitudinal wind speed of 1.5 m/s at the beginning of the fire, and then increase the wind speed to accelerate smoke evacuation after the evacuation of people.

**Key words:** fire smoke; numerical simulation; temperature distribution; personnel evacuation; slope difference

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目(220901269155739); 安徽省自然科学基金项目(2108085ME159); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310878011)

作者简介: 肖峻峰(1978—), 男, 教授, 博士。

随着中国城市的快速发展,新建公路隧道工程逐年增多<sup>[1]</sup>。由于隧道中行车环境近乎封闭,车辆众多,当隧道发生火灾时,人员面临极其复杂的危险环境<sup>[2]</sup>。受地质条件制约,公路隧道坡形多为非对称结构<sup>[3]</sup>,坡度变化会对火灾烟气的蔓延产生重要影响,使得隧道内火灾烟气扩散和温度分布发生改变,更具危险性。因此,开展非对称坡度隧道内火灾烟气蔓延的研究十分重要。

目前国内外学者对不同坡形隧道的火灾烟气蔓延规律进行了大量研究。李响等<sup>[4]</sup>研究了不同坡度组合下的火灾烟气蔓延,发现在低坡度侧的回流长度受两侧坡度和坡度差共同影响。Ji 等<sup>[5]</sup>通过数值模拟研究了不同斜坡隧道对温度分布的影响。Chow 等<sup>[6]</sup>将模型实验和数值模拟相结合,探讨了自然通风下火源上、下游的烟气流速分布。郑枫等<sup>[7]</sup>针对不同坡形隧道进行了隧道火灾模拟,结果表明,对称 V 形隧道内温度最高,烟气蔓延长度较小。Oka 等<sup>[8]</sup>将水平隧道和倾斜隧道的温度分布进行了比较,同时提出了一种新的考虑隧道倾角的温度分布关系式。王海涛等<sup>[9]</sup>采用理论分析、热烟验证和数值模拟相结合的方法,探究了不同 V 形坡隧道对烟气逆流长度的影响。姜学鹏等<sup>[10]</sup>分析了 V 形坡隧道内不同火源位置下两侧隧道对烟气扩散的影响。另外,学者也对隧道火灾下人员疏散进行了研究,赵胜中<sup>[11]</sup>发现在较长的隧道中火灾烟气蔓延到一定距离会发生烟气沉降,不利于人员疏散。戎贤等<sup>[12]</sup>研究了特长公路隧道烟气沉降对人员疏散的影响。

上述研究主要针对单坡倾斜隧道或对称隧道,而实际隧道的坡形多为非对称结构,鉴于此,本文采用 PyroSim 软件模拟非对称隧道火灾,分析不同通风方式对火灾烟气流速、温度分布和人员疏散的影响,以期对隧道内防排烟和疏散救援提供一定的参考。

## 1 隧道模型建立与工况设置

实际隧道中存在多种坡度组合,为更好地揭示非对称隧道坡度对烟气蔓延的影响,同时为控制变量简化分析,以青山湖隧道为参照,将一侧隧道设置为平坡,另一侧设置为上坡隧道,平坡段隧道与上坡隧道之间的坡度差用  $\theta$  表示,建立五种不同坡度差的隧道。坡度差  $\theta$  分别设置为 1%、3%、5%、7% 和 9%,隧道长度设置为 300 m,隧道断面为 10 m(宽)×4.5 m(高)的矩形。

火灾中汽车的最大热释放速率为 2 ~ 10 MW<sup>[13]</sup>,为了使非对称隧道火灾烟气蔓延更加明显,选取热释放速率分别为 7.5、10 MW 进行模拟。将长 2 m、宽 1 m、高 1.2 m 的长方体作为汽车来模拟汽车着火,火源设置在长方体上表面,火源位于隧道的变坡点处,距下游隧道开口处 150 m。设置火源为  $t^2$  快速火,增长速率为 0.046 9 kJ/s<sup>3</sup>,模拟时间 600 s。大气环境温度设置为 20 °C,大气压力为 101.325 kPa,纵向通风时平坡段隧道一侧端口设置为“SUPPLY”。无纵向通风时隧道两端开口边界条件设置为自然开口,用于模拟外部大气环境。

为研究不同风速下非对称隧道火灾烟气蔓延情况,设置多个风速值,利用 PyroSim 软件依次模拟,从中选取若干具有代表性的风速值作为模拟工况风速。具体工况见表 1。在隧道纵向中心线上高度 1.8 m 处布置温度和能见度测点,间隔为 10 m。在隧道纵向中心线顶板下方 0.1 m 设置温度测点,在火源下游顶板下方设置风速测点,非对称隧道模型和测点示意图如图 1 所示。

表 1 数值模拟工况

Table 1 Numerical simulation of working conditions

工况编号	通风方式	纵向风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	热释放速率/MW	坡度差/%
1~5	自然通风	0	7.5	1,3,5,7,9
6~8	自然通风	0	10	1,3,5
9~14	纵向通风	1.5,2.2,2.4, 2.6,2.8,3.0	7.5	1

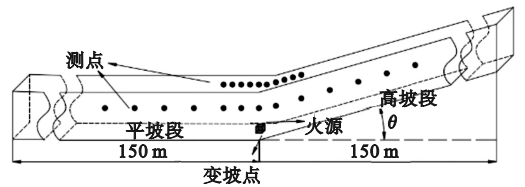


图 1 隧道模型及测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel model and measurement points

PyroSim 的最小计算单位是单位网格,其决定了数值模拟计算的精度,直接影响模拟结果。用无量纲表达式  $D^*/\delta$  来设置网格尺寸,其中  $\delta$  为网格尺寸, $D^*$  为特征火源直径,其计算式为

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中: $Q$  为火源热释放速率; $\rho_0$  为空气密度; $c_p$  为空气定压比热; $T_0$  为环境温度; $g$  为重力加速度。

当网格尺寸在  $1/4D^* \sim 1/16D^*$ , 即  $0.11 \sim 0.60$  m 时, 计算模拟精度较高。考虑到计算机性能和模拟精度, 隧道网格尺寸采用  $0.2$  m。

## 2 非对称隧道火灾烟气受力分析

非对称隧道内发生火灾时, 火灾烟气沿着隧道顶板向两侧蔓延, 对火源两侧烟气的受力情况进行分析, 在不考虑隧道壁黏性力的条件下, 烟气向两侧隧道蔓延过程中主要受上坡隧道烟囱效应产生的火风压和空气阻力的影响, 其中火风压是上坡隧道烟气蔓延的主要动力来源。隧道内烟气与空气的压差  $\Delta P_f$  为

$$\Delta P_f = \Delta \rho g H \quad (2)$$

$$\Delta \rho = \rho_s - \rho_0 \quad (3)$$

式中:  $\Delta \rho$  为烟气与空气的密度差;  $\rho_s$  和  $\rho_0$  分别为烟气和空气密度;  $H$  为烟气蔓延高度。

由于存在温度差和燃烧消耗空气, 诱导外界空气从洞口进入隧道, 流入隧道内的气体与烟气蔓延方向相反, 产生阻力作用, 其阻力  $P_a$  大小可表示为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \quad (4)$$

式中  $u_0$  为空气流速。

根据式(2)和式(4), 火灾烟气在一侧隧道内的受力可表示为

$$P = \Delta P_f - P_a = \Delta \rho g H - \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \quad (5)$$

对于非对称隧道, 当火源位于变坡点处时, 隧道内烟气蔓延示意如图2所示。

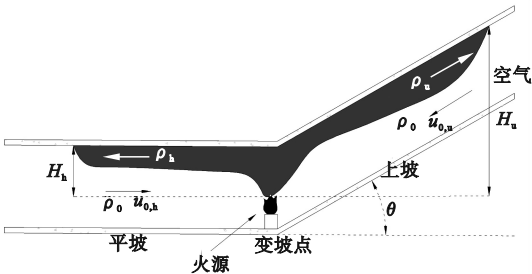


图2 隧道内烟气蔓延示意图

Fig. 2 Schematic diagram of smoke spread in the tunnel

隧道内的压力差  $\Delta P$  为

$$\Delta P = P_u - P_h$$

$$= \left( \Delta \rho_u g H_u - \frac{1}{2} \rho_0 u_{0,u}^2 \right) - \left( \Delta \rho_h g H_h - \frac{1}{2} \rho_0 u_{0,h}^2 \right) \quad (6)$$

式中:  $P_u$ 、 $P_h$  分别为平坡隧道和上坡隧道的压力;

$\Delta \rho_u$ 、 $\Delta \rho_h$  分别为上坡隧道和平坡隧道内空气与烟气的密度差;  $H_u$  和  $H_h$  分别为烟气在上坡隧道和平坡隧道内的蔓延高度;  $u_{0,u}$  和  $u_{0,h}$  分别为流入上坡和平坡隧道内的空气流速。

将式(3)代入式(6)可得

$$\Delta P = (\rho_0 - \rho_u) g H_u - (\rho_0 - \rho_h) g H_h + \left( \frac{1}{2} \rho_0 u_{0,u}^2 - \frac{1}{2} \rho_0 u_{0,h}^2 \right) \quad (7)$$

当火源位于变坡点处时, 受到上坡隧道烟囱效应影响, 火灾烟气沿着上坡隧道向上蔓延, 而平坡隧道内烟气蔓延高度不变, 因此烟气蔓延高度  $H_u > H_h$ ; 上游烟气温度较高, 烟气密度较高, 因此  $\rho_h > \rho_u$ ; 由于在上坡隧道烟囱效应对气体流动起驱动作用, 导致上坡隧道排烟较多, 新鲜空气进入减少, 上坡隧道内的空气流速  $u_{0,u}$  小于  $u_{0,h}$ , 故在非对称隧道内  $\Delta P > 0$ 。

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 烟气流速分布

自然通风下隧道变坡点处起火时, 不同坡度差下上坡侧隧道内烟气流速如图3所示。

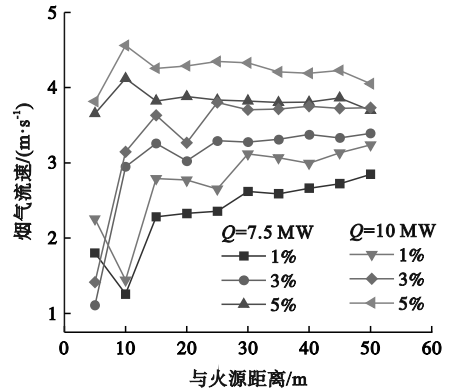


图3 自然通风下烟气流速分布

Fig. 3 Flue gas flow rate distribution under natural ventilation

由图3可知, 自然通风下隧道内烟气流速较为稳定, 在较远距离上变化不明显。不同坡度差下隧道内烟气流速存在明显差异: 当坡度差为3%时, 上坡隧道内最大流速约为  $3.3$  m/s; 当坡度差为5%时, 上坡隧道内最大流速约为  $3.8$  m/s。说明隧道坡度差增大, 使得隧道内烟囱效应产生的诱导气流增大, 导致上坡隧道内烟气蔓延速度增加。坡度差为5%、热释放速率为  $7.5$  MW 时的平均烟气流速约为热释放速率为  $10$  MW 时的90%。表明随着热释放速率增大, 水平惯性力增

加,加快了烟气沿上坡隧道的蔓延速度。

图 4 为坡度差  $\theta = 1\%$  的隧道在不同纵向风速下的烟气流速分布图。

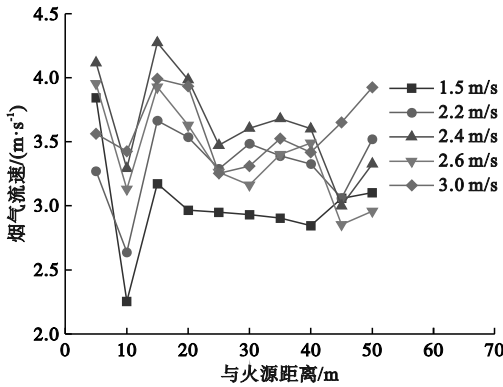


图 4 不同纵向风速下的烟气流速分布

Fig. 4 Flue gas flow rate distribution at different longitudinal wind speeds

由图 4 可知,当纵向风速为 1.5 m/s 时,上坡隧道内的烟气流速最低,且较为稳定,烟气流速维持在 3.0 m/s,相较于自然通风下的烟气流速。随着纵向风速增大,烟气流动波动较大,上坡隧道内烟气流动紊乱。

### 3.2 隧道内温度分布与烟气运动状态

热释放速率为 7.5 MW, 坡度差  $\theta$  为 1%、3%、5%、7%、9% 时,自然通风下的隧道顶板纵向温度分布如图 5 所示。

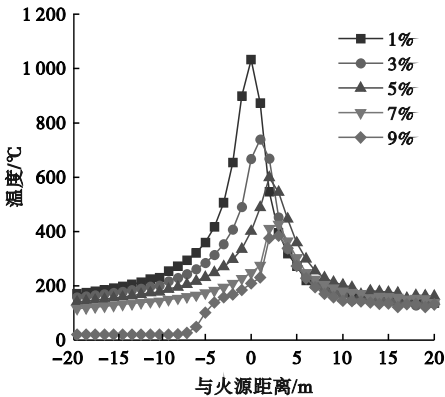


图 5 纵向温度分布曲线

Fig. 5 Longitudinal temperature distribution curves

由图 5 可知,隧道顶板最高温随坡度差的增大而降低。产生上述现象的原因是,坡度差增加,烟囱效应作用增强,空气流动加快,新鲜空气的流入稀释了烟气,同时由于火焰倾斜对顶板的热反馈减少,导致烟气最高温度降低。当  $\theta = 1\%$  时,最高温度在火源处即变坡点上方,随着坡度差增加,最高温度位置向火源下游移动,当  $\theta = 9\%$  时最高

温度位置出现在下游 3 m 处。

由图 5 还可得出,上游烟气温度和烟气逆流长度受坡度差影响较大,当隧道坡度差增加时,诱导风增大,上游温度降低,烟气逆流长度减小。当  $\theta = 9\%$  时,逆流长度仅为 6.4 m。由式(7)可知,坡度差增加,上坡隧道烟气蔓延高度  $H_u$  增大,压力差  $\Delta P$  增大,对平坡隧道内烟气蔓延阻滞作用增强,抑制了平坡隧道内烟气蔓延,导致烟气蔓延距离减小。

图 6 为热释放速率为 7.5 MW, 坡度差  $\theta$  从 1% 增加到 9% 情况下火源附近的风流变化图。

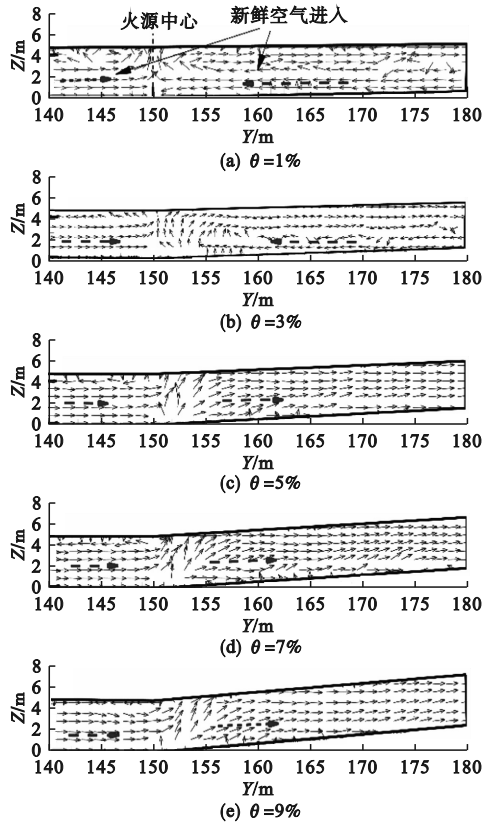


图 6 自然通风下火源附近风流变化图

Fig. 6 Vector diagrams of longitudinal flow rate of flue gas under natural ventilation

由图 6 可见,当坡度差为 1% 和 3% 时,上坡隧道新鲜空气从隧道两侧下层补充进入,这是由于火源在燃烧过程中消耗了隧道空气,火灾燃烧消耗两侧的空气,在火源附近形成负压区,导致外界空气进入隧道。但当坡度差  $\theta$  大于 5% 时,隧道内新鲜空气全部通过平坡隧道下层进入火源处,补充燃烧所消耗的氧气。这主要是因为隧道内诱导气流与从上坡隧道端口进入的补充气流存在竞争关系,随着坡度差增大,诱导气流更具竞争优势,使得隧道内烟气从下坡隧道排出,新鲜空气供

应从平坡隧道进入,补充燃烧消耗。

自然通风下火源附近纵向平面的温度云图如图7所示。

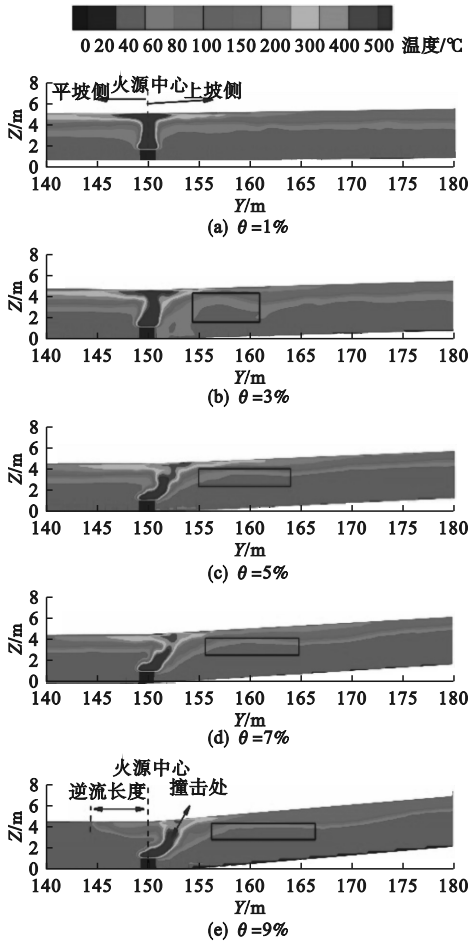


图7 自然通风下火源附近纵向平面的温度云图

Fig.7 Temperature cloud diagrams in the longitudinal plane near the fire source under natural ventilation

由图7可知:当 $\theta = 1\%$ 时,下游烟气流动平缓,随着坡度差增大,火源下游烟气蔓延出现“凹陷”现象;当 $\theta = 3\%$ 时,“凹陷”现象尤为明显,这主要是火源对上坡隧道下层冷空气的卷吸造成的;之后,坡度差增加,上坡隧道下层新鲜空气难以补充到火源处,“凹陷”区域进一步向下游延伸扩大,这主要是因为火灾烟气沿着上坡隧道流动时,在热浮力和坡度差产生的诱导气流共同作用下撞击顶板,之后在烟气蔓延过程中,热量不断减少,烟气温度降低,并且受到重力作用,使得烟气聚集沉降,烟气层厚度增加,在这一过程中,随着坡度差增大,诱导气流增强,将会导致烟气在更远距离上聚集沉降。

### 3.3 不同纵向风速对人员疏散的影响

烟气浓度对能见度的影响较大,因此可以用

能见度分布来表示火灾烟气的变化情况。坡度差 $\theta = 1\%$ 的隧道纵向切面能见度分布如图8所示。

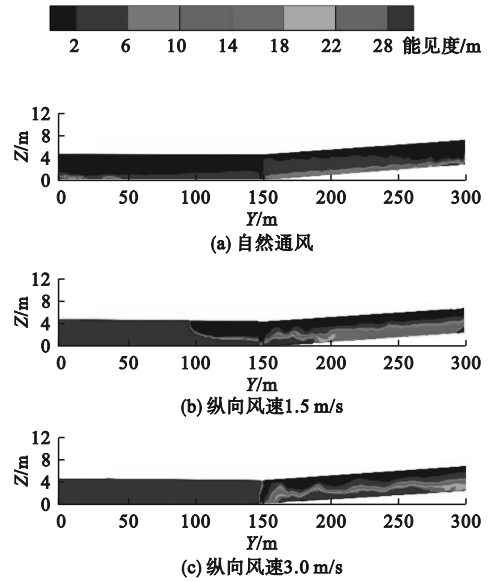


图8 非对称隧道内纵向切面能见度分布

Fig.8 Distribution of visibility in longitudinal sections in asymmetric tunnels

由图8(a)可见,自然通风下,坡度差为1%非对称隧道内充满烟气,烟气层较厚,并且在上坡隧道内较远距离上发生了烟气沉降现象。由图8(b)和图8(c)可知,纵向风速对非对称隧道内的烟气流动特性有显著影响。与自然通风相比,当风速增加到1.5 m/s时,上坡隧道下层烟气变得稀薄,火源下游附近烟气紊乱。继续增加风速,当风速为3 m/s时,火源上游无烟气蔓延,上坡隧道内烟气沿着顶板蔓延,隧道下层无烟气蔓延。上坡隧道内烟气流动完全由风速主导,烟气分层被破坏,烟气呈“波浪”状向下游蔓延。因此,在非对称隧道内纵向风速不宜过大,否则会影响烟气层的分布,破坏下游烟气层结构,危及人员疏散。

增加纵向风速会对火源下游的烟气结构造成破坏<sup>[14-15]</sup>,影响人员疏散,因此需要合理的风速来满足疏散要求。考虑到非对称隧道环境条件复杂,将人体特征高度1.8 m处的安全温度60℃和能见度临界值10 m作为人员安全疏散标准。为确定坡度差为1%隧道在7.5 MW下的临界风速,通过PyroSim软件获得了不同风速下的烟气回流长度,当风速为2.2、2.4、2.6、2.8、3 m/s的烟气回流长度分别为12、7、0、0、0 m,确定了临界风速为2.6 m/s。

本文选取自然通风、纵向风速1.5 m/s和临界风速2.6 m/s下的温度和能见度分布来分析烟

气对人员疏散的影响。图 9 为不同风速、不同模

拟时间下人体特征高度处的温度分布。

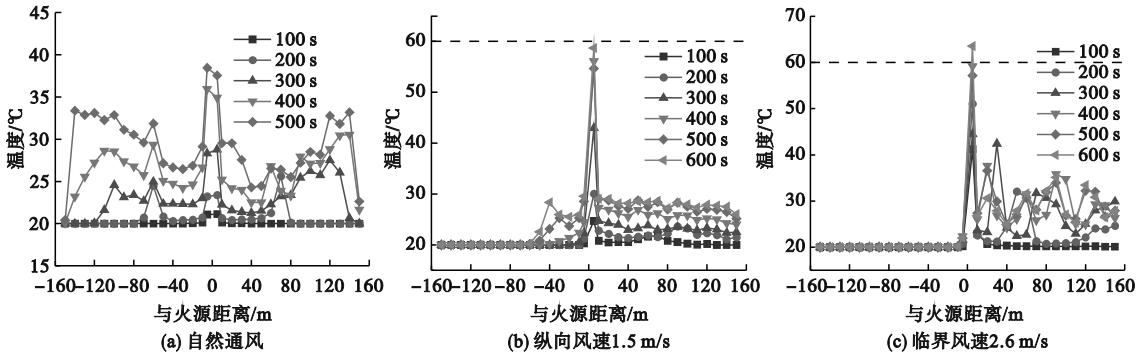


图 9 人体特征高度处的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at the characteristic height of the human body

由图 9(a)可知,随着非对称隧道火灾发展,非对称隧道内的人体特征高度处的温度均在 60 °C 以下。可以发现,随着距离火源越远,人体高度处的温度逐渐上升,这表明随着距离的增加,烟气的沉降程度逐渐增大。由图 9(b)可以看出,在模拟时间 600 s 内,纵向风速 1.5 m/s 下隧道内人体特征高度处的温度较低,上坡隧道内温度分布基本保持稳定,对人员的疏散逃生基本不构成

威胁。图 9(c)中平坡隧道内温度与环境温度一致,而上坡隧道内温度分布具有明显的波动性,说明临界风速下火灾烟气变化剧烈。不同纵向风速下烟气温度均在 60 °C 以下,温度变化基本不会威胁到疏散人员的安全。

不同风速下人体特征高度处的能见度分布如图 10 所示。

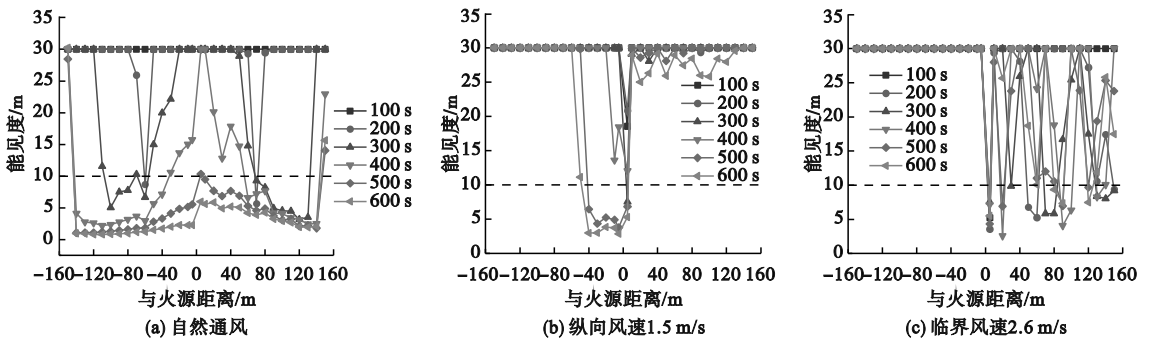


图 10 人体特征高度处的能见度分布

Fig. 10 Distribution of visibility at human characteristic height

由图 10(a)可见,在模拟时间 200 s 时烟气前锋处的能见度低于 10 m,随着时间增加,低能见度区域逐渐扩大并向火源靠近,500 s 后隧道内充满烟气,能见度下降到 10 m 以下,该工况下整个隧道环境恶劣,难以保证人员疏散安全;从图 10(b)中可以看出,火源下游能见度较高,整个上坡隧道在模拟时间 600 s 内的能见度均在 25 m 以上,相较于自然通风时,火灾发生初期烟气蔓延速度明显降低,上坡隧道内烟气层上移,在该风速下上坡隧道基本无烟气沉降,低能见度区域集中在平坡隧道内距火源 50 m 范围内,人员疏散环境得到改善,有利于人员有序逃生。

左右出现沉降,能见度迅速降到 10 m 以下,200 s 后隧道上坡内能见度变化剧烈,烟气层被扰乱,大部分区域的能见度在 10 m 以下,在该临界风速下,火灾烟气集中在上坡隧道,人员的疏散时间受到严格限制,对人员疏散十分不利。

鉴于此,当此类非对称隧道发生火灾时,建议在火灾发展初期以较低的纵向风速 1.5 m/s 进行通风,以保证较长的安全疏散时间,平坡隧道内受困人员应迅速远离隧道变坡点处,在 400 s 内向平坡隧道出口疏散逃离,上坡隧道内受困人员则通过上坡隧道端口疏散逃生。待上坡隧道内人员疏散完毕后,增加纵向风速加速火灾烟气排出,为救援或消防人员进入隧道提供便利条件。

由图 10(c)可知,200 s 时烟气在下游 50 m

## 4 结论

本文利用 PyroSim 数值模拟软件构建非对称隧道模型,对隧道内烟气流速、温度分布和烟气运动进行研究,得到如下结论。

1)非对称隧道发生火灾时,自然通风下隧道内烟气流速较为稳定,增大风速会使得隧道内烟气流动紊乱。

2)上坡隧道内诱导气流与补充气流存在竞争关系,随着坡度差增大,隧道内烟气从上坡隧道排出,新鲜空气只通过平坡隧道进入补充燃烧消耗。

3)自然通风下隧道内充满烟气,纵向风速 1.5 m/s 时,隧道内能见度较高,当风速达到临界风速时,火源下游烟气紊乱。建议在火灾初期以 1.5 m/s 的风速进行通风以保持较长的安全疏散时间,待下游人员疏散后再增加风速加速烟气排出。

### 参考文献 (References):

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述 2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40. (in Chinese)
- [2] 付婷,舒启林. 悬挂式轨道灭火机器人喷头机构设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(2): 70-74, 87.  
FU T, SHU Q L. Design of nozzle mechanism for suspended orbital fire extinguishing robot[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2022, 41(2): 70-74, 87. (in Chinese)
- [3] 肖明清. 我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 360-367.  
XIAO M Q. Representative projects and development trend of under water shield tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(3): 360-367. (in Chinese)
- [4] 李响,陈小峰,巴伟军,等. 非对称 V 形坡公路隧道火灾烟气蔓延特性研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 111-119.  
LI X, CHEN X F, BA W J, et al. Study on fire smoke spreading characteristics in asymmetric V-slope highway tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(5): 111-

119. (in Chinese)
- [5] JI J, WANG Z Y, DING L, et al. Effects of ambient pressure on smoke movement and temperature distribution in inclined tunnel fires [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 106006.
- [6] CHOW W K, GAO Y, ZHAO J H, et al. A study on tilted tunnel fire under natural ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2016, 81: 44-57.
- [7] 郑枫,李敬,刘宇圣,等. 不同坡形隧道中火灾烟气的自由蔓延特性[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 34(5): 498-503.  
ZHENG F, LI J, LIU Y S, et al. Free spread characteristics of fire smoke in tunnels with different slope shapes [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2020, 34(5): 498-503. (in Chinese)
- [8] OKA Y, IMAZEKI O. Temperature distribution within a ceiling jet propagating in an inclined flat-ceilinged tunnel with natural ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 20-33.
- [9] 王海涛,高欢欢,李彬. V 形坡度对地铁隧道火灾临界风速的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4858-4864.  
WANG H T, GAO H H, LI B. Influence of V-shaped slope on critical velocity in subway tunnel fires [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4858-4864. (in Chinese)
- [10] 姜学鹏,廖湘娟,景安. 水下铁路隧道 V 形坡对烟气竞争效应的影响[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 63-69.  
JIANG X P, LIAO X J, JING A. Influence of V-Shaped slope of underwater railway tunnel on smoke competition effect [J]. China Railway Science, 2019, 40(1): 63-69. (in Chinese)
- [11] 赵胜中. 纵向通风作用下隧道火灾烟气输运规律研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- [12] 戎贤,许家杰,张新宇,等. 特长公路隧道火灾烟气沉降特性对人员疏散影响的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(2): 128-135.  
RONG X, XU J J, ZHANG X Y, et al. Research on influence of fire smoke descent characteristics on personnel evacuation in extra-long highway tunnel [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(2): 128-135. (in Chinese)
- [13] XU P, ZHU D Q, LI L L, et al. Study on the key parameters of vehicle fires for the growth stage in road tunnels [J]. Fire and Materials, 2024, 48(1): 128-137.
- [14] KALECH B, BOUTERRA M, ELCAFSI A. Numerical analysis of smoke flow under the effect of longitudinal airflow in a tunnel fire [J]. Fire and Materials, 2020, 44(8): 1033-1043.
- [15] 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.

(责任编辑:徐淑姣)