

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-642-07

超长公路隧道火灾纵向通风的烟气特性研究

李智勇¹ 唐莎²

(1. 中信建设有限责任公司 北京 100027;

2. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100120)

【摘要】 目前公路隧道火灾纵向通风的研究主要集中在中、短隧道, 针对5km以上超长隧道的研究成果较少, 也缺乏相应的具体的设计指导准则。依托实际工程项目—大兴乡隧道, 针对典型火灾场景(30MW), 建立了超长隧道火灾全纵向通风的数值计算模型, 研究超长隧道火灾全纵向通风的烟气特性。结果表明: 超长隧道火灾烟气基本在火源下游1300m以外达到均匀分布, 即下游1300m以外的烟气浓度不再随蔓延距离的变化而变化, 而通风速度的增加有助于隧道烟气浓度的下降。研究的三种风速情况下, 超长隧道火灾烟气均满足安全控制标准。

【关键词】 公路隧道; 火灾烟气; 数值模拟; 纵向通风

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Study on Smoke Characteristics of Longitudinal Ventilation for Fires in Very Long Highway Tunnels

Li Zhiyong¹ Tang Sha²

(1. CITIC CONSTRUCTION Co., Ltd, Beijing, 100027;

2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd, Beijing, 100120)

【Abstract】 At present, the research on longitudinal ventilation for fire in road tunnels mainly focuses on medium and short tunnels, and there are fewer research results on super-long tunnels of more than 5 km, and there is a lack of corresponding specific design guidelines. In this paper, relying on the actual project - Daxingxiang Tunnel, for a typical fire scenario (30MW), a numerical calculation model of the full longitudinal ventilation of long tunnels with fire is established, and the smoke characteristics of the full longitudinal ventilation of long tunnels with fire are investigated. The results show that the smoke from a super-long tunnel fire basically reaches a uniform distribution beyond 1300m downstream of the fire source, i.e., the smoke concentration beyond 1300m downstream no longer varies with the spreading distance; the increase of the ventilation speed helps the decrease of the smoke concentration in the tunnel; and the smoke from a fire in a super-long tunnel meets the safety control standards under the three wind speed scenarios studied in this report.

【Keywords】 Highway tunnel; Fire smoke characteristics; Numerical simulation; Vertical ventilation

0 引言

随着改革开放以来国民经济快速增长, 隧道建设逐渐加快, 我国已成为世界上隧道数量最多、隧道体系最复杂的国家^[1]。随着我国交通强国和西部大开发战略的进一步实施, 在我国西部地区, 修建

了越来越多的长度大于5km的超长公路隧道。尽管隧道内发生火灾的概率很小, 但一旦发生火灾, 将造成无法挽回的生命和财产损失^[2-7]。

全射流纵向通风排烟已被广泛应用于国内外公路隧道中, 当隧道发生火灾时, 该通风方式可以

在上游形成一个无烟的疏散环境, 确保火灾上游车辆不会受到火灾烟气的危害, 并由开启的车行横洞驶入非火灾侧隧道, 火灾下游的车辆继续向前并驶离隧道。国内外大量学者对纵向通风进行了深入、细致的研究, 主要集中在临界风速^[8-11]、烟气回流长度^[12-15]和烟气温度分布^[16-19]等方面, 大量的研究表明, 公路隧道纵向通风排烟技术成熟、工程建设经济, 因此, 公路隧道首选纵向通风排烟方式进行火灾防排烟。

然而, 公路隧道发生火灾采用纵向排烟时, 烟气沿火灾下游隧道段蔓延, 对下游隧道的安全疏散造成潜在危害, 而且会在一定程度上破坏下游隧道的设施设备。《公路隧道通风设计细则》JTG/T D70/2-02-2014^[20]规定, 采用纵向排烟的单向交通隧道, 火灾烟雾在隧道内的最大行程不宜大于 5km, 因此, 在我国长度大于 5km 的超长公路隧道建设中, 绝大多数采用斜、竖井送排式纵向通风方式, 系统需要设置排烟斜井进行分段排烟, 这将极大增加工程造价和施工难度, 造成施工周期的延长。

目前公路隧道火灾纵向通风的研究主要集中在中、短隧道, 针对 5km 以上超长隧道的研究成果较少, 也缺乏相应的具体的设计指导准则。因此, 为进一步研究全纵向通风是否适用于超长公路隧道, 本文建立了超长隧道火灾的数值计算模型, 采用数值模拟的方法, 研究了纵向通风模式下超长公路隧道火灾烟气温度和浓度的分布规律, 以期掌握超长公路隧道火灾全纵向通风的烟气特性。

1 超长隧道火灾数值计算模型

本文依托实际工程项目一大兴乡隧道, 建立了超长隧道火灾全纵向通风的数值计算模型, 研究超长隧道火灾全纵向通风的烟气特性。

1.1 几何模型

大兴乡隧道采用双洞单向四车道高速公路建设标准, 设计速度 80km/h, 路基宽度 25.50m。其右线起止桩号为 K39+820~K45+510, 分界段全长 5690m, 下坡, 路段纵坡-2.35%; 左线起止桩号为 ZK39+835~ZK45+507, 分界段全长 5672m, 上坡, 路段纵坡+2.35%。隧道内轮廓净空宽度 10.25m、高度 7.2m, 净空高度 5.00m。

根据项目实际对隧道断面做一定简化, 数值模

型中的隧道断面被简化为矩形断面, 断面高 7.2m、宽 10.25m, 隧道断面尺寸如图 1 所示, 隧道全长为 5.7km。

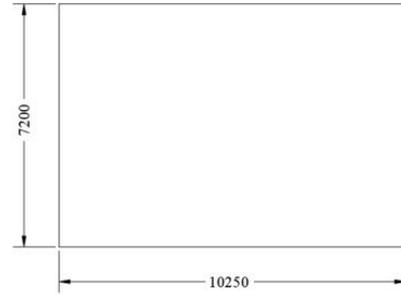


图 1 隧道断面结构图

Fig.1 Tunnel cross-section structural diagram

1.2 火源设定

数值模型中的火源燃料为正庚烷“N-HEPTANE”(C₇H₁₆)。火源尺寸为 1m×1m×0.4m (长×宽×高), 热释放率为大兴乡隧道设计火源功率 30MW。火源设置在距隧道入口 200m 处, 位于隧道横向中轴线上。

1.3 网格划分

网格尺寸对隧道火灾模拟结果有着重要影响, 网格尺寸过大会导致计算精度不够, 网格尺寸太小又会显著增加网格数量, 消耗计算机内存并增加计算时间。因此需要合理平衡网格数量和计算精度, FDS 手册对火灾计算网格进行了说明, 推荐采用 0.06D*~0.25D*之间的网格尺寸, 其中 D*为火源特征直径, 定义如下:

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

式中, D*为火源特征直径; Q 为火灾热释放速率, kW。

本文隧道火灾总热释放速率 Q 为 30MW, 经计算得火源特征直径 D*为 3.72, 取网格尺寸约为 0.1D*, 本文选取的网格尺寸为 0.5m×0.5m×0.5m。

1.4 边界条件

依据车流方向, 确定车流驶入的隧道局部段外边界为隧道入口边界, 车流驶出的隧道局部段外边界为隧道出口边界。根据数值流体理论, 将入口边界设置为风速边界, 方向指向出口, 将出口边界设置为压力边界, 压力设置为 0Pa。

数值模型中环境温度取 20℃，大气压力取 101325Pa，模拟时间设定为 2000s，并且考虑了隧道坡度，模拟通过设置重力加速度“Specify Gravity”来实现右线路段纵坡为-2.35%和左线路段纵坡为+2.35%。

根据实际情况，隧道壁面以及地面均设置为对流壁面边界。

根据大兴乡隧道实际工程测算，火灾功率为 30MW 时，隧道的临界风速为 3.5m/s。根据《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014)“单向交通隧道的设计风速不宜大于 10m/s”，为了更好的掌握超长隧道火灾全纵向通风的烟气特性，本文研究了三种不同的纵向通风风速对烟气蔓延的影响规律分别为 3.5m/s、6m/s 和 10m/s。

2 结果与讨论

2.1 隧道拱顶处烟气温度分布规律

隧道拱顶处烟气温度随火源距离的变化规律如图 2 所示。从图中可以看出，三种通风速度下隧道拱顶处的烟气温度均随着火源距离的增大而呈现出先急剧增大而后缓慢减小最终趋于平缓的趋势，而且随隧道纵向通风风速的增大而减小。当纵向通风风速为 3.5m/s、6m/s 和 10m/s 时，拱顶处烟气最高温度分别为 302.93℃、102.55℃和 66.36℃，最高温度的位置分别为距离火源下游 6m、80m 和 160m 处。

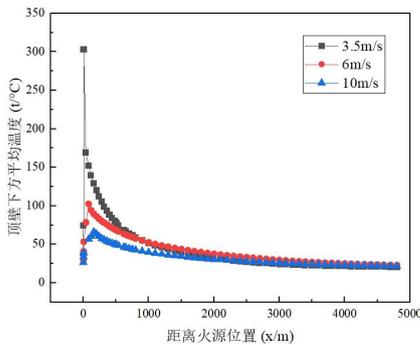


图 2 隧道顶壁下方烟气温度变化

Fig.2 Change in flue gas temperature below the top wall of the tunnel

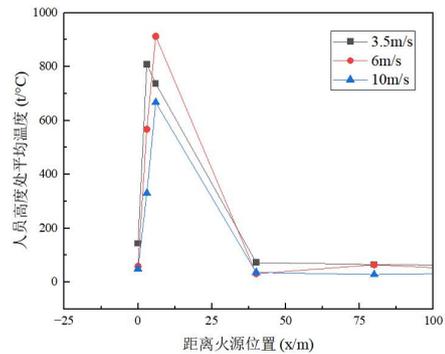
从图中也可看出：当纵向通风风速为 3.5m/s 时，距离火源下游 30m 之外的顶壁下方平均烟气温度最大值为 168.86℃。当纵向通风风速为 6m/s 时，距离火源下游 30m 之外的顶壁下方平均烟气

温度最大值为 102.55℃。当纵向通风风速为 10m/s 时，距离火源下游 30m 之外的顶壁下方平均烟气温度最大值为 66.36℃。因此，三种工况均满足火灾安全控制标准，即距火源 30m 之外隧道顶壁下方烟气温度不高于 180℃。

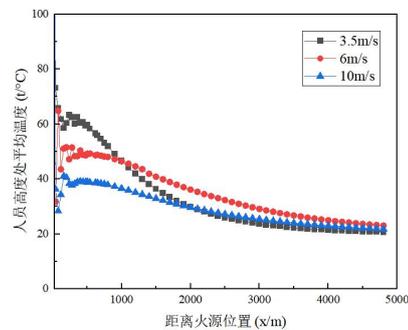
2.2 人员高度处烟气温度和浓度分布规律

2.2.1 烟气温度

人员高度处烟气温度变化如图 3 所示。从图中可以看出，人员高度处烟气温度均随着火源距离的增大而呈现出先急剧增大而后急剧减小最终缓慢地趋于平缓的趋势。随着隧道纵向通风风速的增大，距离火源下游 50m 范围之外的人员高度处平均烟气温度普遍逐渐减小。当纵向通风风速为 3.5m/s 时，人员高度处平均烟气温度最大值为 808.55℃，出现在距离火源下游 3m 处。当纵向通风风速为 6m/s 时，人员高度处平均烟气温度最大值为 912.66℃，出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 10m/s 时，人员高度处平均烟气温度最大值为 667.22℃，出现在距离火源下游 6m 处。



(a) 火源附近人员高度处烟气温度变化



(b) 人员高度处烟气温度总体变化

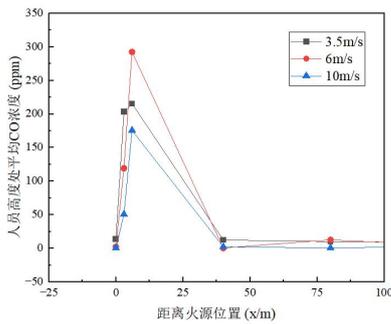
图 3 人员高度处烟气温度变化

Fig.3 Flue gas temperature change at personnel height

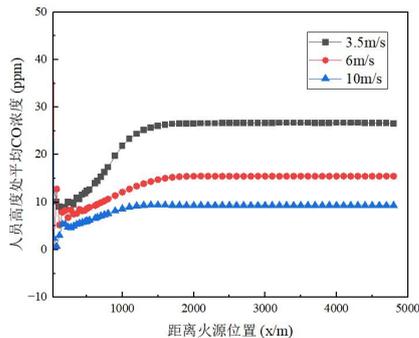
从图中也可看出：当纵向通风风速为 3.5m/s

时, 距离火源下游 30m 之外的人员高度处平均烟气温度的最大值为 73.16℃。当纵向通风风速为 6m/s 时, 距离火源下游 30m 之外的人员高度处平均烟气温度的最大值为 64.85℃。当纵向通风风速为 10m/s 时, 距离火源下游 30m 之外的人员高度处平均烟气温度的最大值为 41.07℃。因此, 三种工况均基本满足火灾安全控制标准, 即距火源 30m 之外人员高度处烟气温度不高于 70℃。

2.2.2 CO 浓度



(a) 火源附近人员高度处烟气 CO 浓度变化



(b) 人员高度处烟气 CO 浓度总体变化

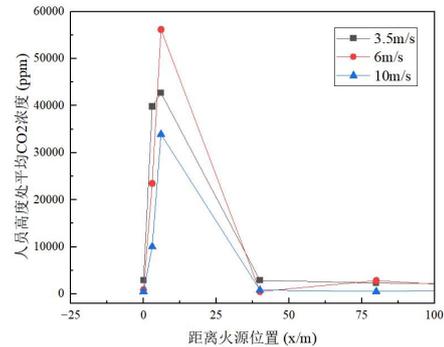
图 4 人员高度处烟气 CO 浓度变化

Fig.4 Change in flue gas CO concentration at personnel height

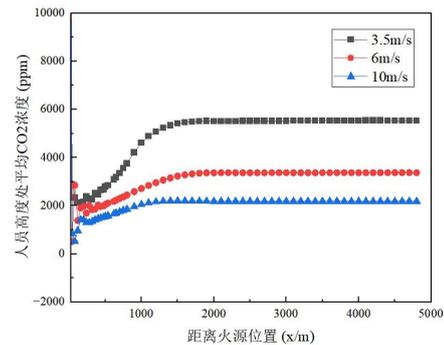
人员高度处 CO 浓度变化如图 4 所示。从图中可以看出, 三种工况下平均人员高度处烟气 CO 浓度均随着火源距离的增大而呈现出先急剧增大而后急剧减小再缓慢地增大并最终趋于平缓的趋势。随着隧道纵向通风风速的增大, 距离火源下游 50m 范围之外的人员高度处平均烟气 CO 浓度普遍逐渐减小。当纵向通风风速为 3.5m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO 浓度最大值为 215.39ppm, 出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 6m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO 浓度最大值为

292.36ppm, 出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 10m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO 浓度最大值为 175.71ppm, 出现在距离火源下游 6m 处。因此, 三种工况均满足火灾安全控制标准, 即人员高度处一氧化碳浓度不高于 1150ppm。

2.2.3 CO₂ 浓度



(a) 火源附近人员高度处烟气 CO₂ 浓度变化



(b) 人员高度处烟气 CO₂ 浓度总体变化

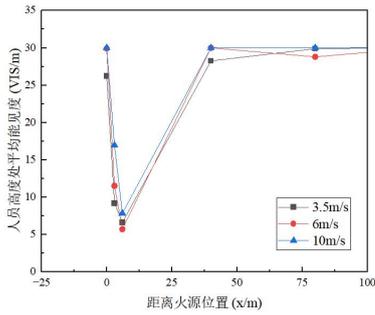
图 5 人员高度处烟气 CO₂ 浓度变化

Fig.5 Change in flue gas CO₂ concentration at personnel height

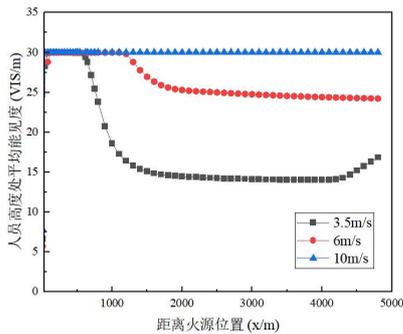
人员高度处烟气 CO₂ 浓度变化如图 5 所示。从图中可以看出, 三种工况下平均人员高度处烟气 CO₂ 浓度均随着火源距离的增大而呈现出先急剧增大而后急剧减小再缓慢地增大并最终趋于平缓的趋势。随着隧道纵向通风风速的增大, 距离火源下游 50m 范围之外的人员高度处平均烟气 CO₂ 浓度普遍逐渐减小。当纵向通风风速为 3.5m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO₂ 浓度最大值为 42697.54ppm, 出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 6m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO₂ 浓度最大值为 56169.77ppm, 出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 10m/s 时, 人员高度处平均烟气 CO₂ 浓度最大值为 33935.96ppm, 出现在

距离火源下游 6m 处。根据本文规定的二氧化碳浓度不能超过 10000ppm，结合图 5，可以看出三种工况在距离火源下游 30m 之外的人员高度处 CO₂ 浓度均满足火灾安全控制标准。

2.2.4 烟气能见度



(a) 火源附近人员高度处烟气能见度变化



(b) 人员高度处烟气能见度总体变化

图 6 人员高度处烟气能见度变化

Fig.6 Change in smoke visibility at personnel height

人员高度处烟气能见度变化如图 6 所示。从图中可以看出，三种工况下平均人员高度处烟气能见度均随着火源距离的增大而呈现出先急剧减小而后急剧增大再缓慢地减小并最终趋于平缓的趋势。随着隧道纵向通风风速的增大，距离火源下游 50m 范围之外的人员高度处平均烟气能见度普遍逐渐增大。当纵向通风风速为 3.5m/s 时，人员高度处平均烟气能见度最小值为 6.64m，出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 6m/s 时，人员高度处平均烟气能见度最小值为 5.73m，出现在距离火源下游 6m 处。当纵向通风风速为 10m/s 时，人员高度处平均烟气能见度最小值为 7.85m，出现在距离火源下游 6m 处。根据本文规定的隧道发生火灾时人员高度处最低能见度不得低于 7m，结合图 6，可以看出，当纵向通风风速为 3.5m/s 时，人员高度处最低能见度基本满足火灾安全控制标准；当

纵向通风风速为 6m/s 时，人员高度处最低能见度不能满足火灾安全控制标准；当纵向通风风速为 10m/s 时，人员高度处最低能见度满足火灾安全控制标准。

2.3 烟气竖向分布规律

2.3.1 烟气温度

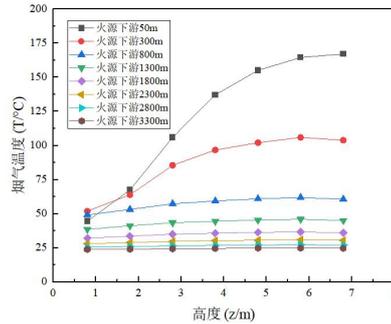


图 7 烟气温度垂直变化

Fig.7 Vertical variation of flue gas temperature

烟气温度在隧道高度方向上的变化规律如图 7 所示。从图中可以看出，在不同的火源距离（下游）处，烟气温度均随着高度的增大而增大，而且，隧道断面越接近火源，烟气温度越高，如火源下游 50m 处烟气温度整体高于其他断面处的烟气温度。

图中还显示出，隧道断面越接近火源，烟气温度在高度方向上的梯度越大，而距离火源较远处的断面，烟气温度在高度方向上的梯度较小，当隧道断面距离火源大于 1300m 时，可以看到烟气温度在高度上的梯度已经接近于 0。这一现象可以推断出，隧道发生火灾采用纵向排烟时，隧道下游距离火源较近的位置处烟气分层比较明显，随着蔓延距离的增大，烟气逐渐沉降，至某个位置处沉降到隧道底部，从这个位置处开始，烟气蔓延将充满整个隧道断面。

2.3.2 烟气浓度

超长隧道火灾烟气的 CO 浓度和 CO₂ 浓度竖向分布如图 8、图 9 所示，从图中可以看出，火灾烟气的 CO 浓度和 CO₂ 浓度均随着隧道高度的增大而增大。图中显示，烟气浓度在隧道高度方向上的梯度与温度梯度分布类似，CO 浓度和 CO₂ 浓度在高度方向上的梯度随着火源下游距离的增大而降低，当火源下游距离超过 1300m 时，烟气浓度在高度方向上的梯度接近于 0，这同样指示出，在距离火源较近的断面上烟气分层较为明显，而当烟气蔓延

至一定距离后, 烟气将与空气完全混合, 充满整个隧道断面。

超长隧道火灾烟气的能见度竖向分布如图 10 所示, 从图中可以看出, 在不同的火源距离(下游)处, 烟气能见度均随着高度的增大而减小。图中同样显示出, 烟气能见度在高度方向上的梯度与温度梯度分布类似, 进一步指示出近火源断面处烟气分层明显, 而远火源距离出烟气与空气完全混合的规律。

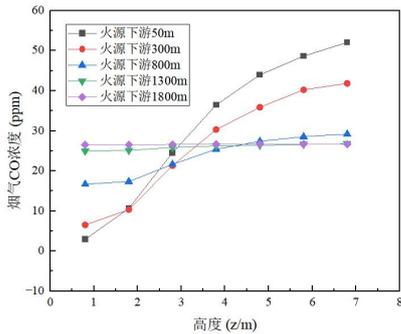


图 8 烟气 CO 浓度垂直变化

Fig.8 Vertical variation of flue gas CO concentration

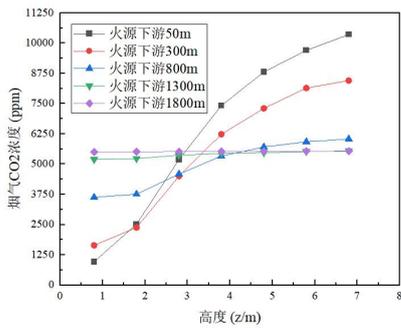


图 9 烟气 CO₂ 浓度垂直变化

Fig.9 Vertical variation of flue gas CO₂ concentration

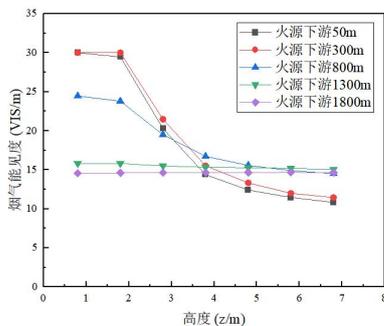


图 10 烟气能见度垂直变化

Fig.10 Vertical variation of smoke visibility

3 结论

本报告以 5km 超长公路运营隧道为研究对象, 通过资料收集、实地调研、数值模拟等方法, 针对典型火灾场景(30MW), 研究超长公路隧道烟气蔓延特性, 得到如下结论:

(1) 超长隧道火灾烟气基本在火源下游 1300m 以外达到均匀分布, 即下游 1300m 以外的烟气浓度不再随蔓延距离的变化而变化。

(2) 通风速度的增加有助于隧道烟气浓度的下降。

(3) 本报告研究的三种风速情况下, 超长隧道火灾烟气均满足安全控制标准。

参考文献:

- [1] 李士戎.移动火源对隧道温度场分布及烟气流动影响规律研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [2] 谢谦,陈华.浅谈地铁火灾事故的特点及防火安全工程建设[J].现代城市轨道交通,2004,(2):38-40.
- [3] Alan B, Richard C. The handbook of tunnel fire safety[M]. Thomas Telford Publishing, 2005-01-01.
- [4] Weng M, Obadi I, Wang F, et al. Optimal distance between jet fans used to extinguish metropolitan tunnel fires: A case study using fire dynamic simulator modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,95(Jan.):103116.1-103116.12.
- [5] Hong W H. The progress and controlling situation of Daegu subway fire disaster[J]. Fire Safety Science, 2004.
- [6] Maevski I Y. Design Fires in Road Tunnels[M]. 2011.
- [7] 吴珂.长隧道火灾湍流燃烧模拟及结构防火安全研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [8] Thomas P H. The movement of buoyant fluid against a stream and venting of underground fires[J]. Fire Safety Science, 1958.
- [9] Hu L H, Huo R, Wang H B, et al. Experimental and Numerical Studies on Longitudinal Smoke Temperature Distribution Upstream and Downstream from the Fire in a Road Tunnel[J]. Journal of Fire Sciences, 2007(1):25.
- [10] Hu L H, Peng W, Huo R. Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,150(1):68-75.

- [11] Hu L H, Liu S, Peng W, et al. Experimental study on burning rates of square/rectangular gasoline and methanol pool fires under longitudinal air flow in a wind tunnel[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1-3):972-979.
- [12] Thomas P H. The Movement of Smoke in Horizontal Passages against Air Flow[J]. *Fire Research Technical Paper*, 1968,7(1):1-8.
- [13] Oka Y, Atkinson G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 1995,25(4):305-322.
- [14] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity[J]. *Fire Safety Journal*, 2000,35(4), 363-390.
- [15] Li Y Z, Lei B, Ingason H. Study of critical velocity and back layering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2010(45),361-370.
- [16] Kurioka H, Oka Y, Satoh H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2003,38(4):319-340.
- [17] Li Y Z, Lei B, Ingason H. The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2011,46(4):204-210.
- [18] 易亮,杨洋,徐志胜,等.纵向通风公路隧道火灾拱顶烟气最高温度试验研究[J].*燃烧科学与技术*,2011,17(2): 109-114.
- [19] Zhao S, Liu F, Wang F, et al. Experimental studies on fire-induced temperature distribution below ceiling in a longitudinal ventilated metro tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018,72:281-293.
- [20] 单位招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道通风设计细则[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

(上接第 635 页)

- [7] Tao Y, Per H, BO L, et al. A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study[J]. *Energy & Buildings*, 2015,90.
- [8] Wentao W, Nari Y, Zheming T, et al. Diffuse ceiling ventilation for buildings: A review of fundamental theories and research methodologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,211(20):1666-1619.
- [9] Rahnama S, Sadeghian P, Peter N, et al. Cooling capacity of diffuse ceiling ventilation system and the impact of heat load and diffuse panel distribution[J]. *Building and Environment*, 2020,185:107290.
- [10] 姜涛.武汉某地铁站台环控系统 CFD 模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [11] 曾惜,朱淮东,龙伟月.下送上回气流组织形式在地铁车站站台公共区应用的初步探讨[J].*暖通空调*,2022, 52(S2):72-78.
- [12] 刘卓妹.新型气流组织在地铁车站通风空调系统中的应用分析[J].*暖通空调*,2018,48(9):40-44,62.
- [13] 石盼弟.弥散吊顶通风系统气流相互作用特性研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [14] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社, 1994.
- [15] 陆平.西北严寒地区住宅室内热舒适性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [16] US Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration Office of Research and Development. *Subway Environmental Design Handbook*, vol. I: Principles and Applications[M]. 1976.
- [17] 王春,冯炼,刘应清.用相对热指标确定成都地铁环控设计中的温度设计标准[J].*中国铁道科学*,2002,(5): 128-132.