

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-250-06

某单洞双向隧道列车 火灾的烟气蔓延特性及防控研究

张晓林¹ 谢永亮¹ 任浩²

(1. 西南交通大学机械学院 成都 100191;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

【摘要】 铁路隧道属于狭长形相对密闭空间, 道路的长宽比十分大, 与外部直接连接的仅有进口与出口, 当发生火灾时, 烟气无法及时排出隧道, 造成烟气在隧道内蔓延, 不仅对隧道内人员生命安全产生威胁, 还阻碍了消防人员及时进入隧道内进行扑救。其中, 高铁地下单洞双向隧道不仅断面面积大、行车组织复杂, 而且发生火灾的位置往往不在纵向中心线上, 因而隧道通风和排烟一直是工程设计中的重难点。以济滨隧道为研究对象, 围绕单洞双向隧道的通风排烟模式和排烟参数, 开展三维数值研究。其中, 主要分析火灾发展过程中的烟气温度、碳烟密度、能见度等特征参数的分布情况。研究表明: 在正常通风情况下, 列车减速停车过程产生的活塞风效应, 会起到一定的纵向排烟作用, 但不能将隧道内的烟气条件控制在对人体无害的范围; 若采用大小为临界风速(3.7m/s)的纵向排烟模式, 隧道内的温度可以得到有效控制, 但下游人员逃生线路上的碳烟密度无法得到有效控制。提出的排烟模式和排烟参数可以为轨道交通领域类似工程通风排烟设计提供参考。

【关键词】 单洞双向隧道; 火灾; 烟气运动; 狭长空间; 数值模拟; 通风排烟

中图分类号 V221.3 文献标识码 A

Smoke Movement and Control of Island High-speed Railway Underground Station Platform Fire

Zhang Xiaolin¹ Xie Yongliang¹ Ren Hao²

(1. School of Astronautics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 100191;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Xi'an, 710043)

【Abstract】 As the tunnel is a long narrow and relatively closed space, the road has a very large aspect ratio, and only the entrance and the exit are directly connected to the outside. When a fire occurs, the smoke cannot be discharged from the tunnel in time, causing the smoke to spread in the tunnel. It threatens the safety of the people in the tunnel, and it also prevents fire fighters from entering the tunnel for rescue. Single-hole double-track tunnel in railway transit system has the characteristics of complicated traffic organization with big cross-section area. For the design, ventilation and smoke exhaust is very important and difficult. This paper takes the single-hole double-track tunnel as the research object, and uses numerical simulation to study the smoke exhaust mode and exhaust parameters of the fire in the narrow space of the platform. It mainly analyzes the distribution of characteristic parameters such as smoke temperature, soot density, and visibility during the development of a fire. Research conclusions: In normal ventilation, the piston wind will assist the exhaust. In the longitudinal smoke exhaust mode, the size is critical wind speed

作者简介: 张晓林 (1997.05-), 男, 硕士研究生, E-mail: 1771726255@qq.com

通讯作者: 谢永亮 (1986.09-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yongliangxie17@163.com

收稿日期: 2022-10-10

(3.5m/s), the temperature in the tunnel can be effectively controlled. But the density of soot on the downstream escape route could not be effectively controlled. The proposed smoke exhaust mode and parameters are applicable to the fire smoke prevention and exhaust design of this type of tunnel.

【Keywords】 single-hole double-track tunnel; fire; smoke movement; narrow space; CFD simulation; ventilation and smoke exhaust

0 引言

伴随经济的发展,高速铁路成为新时代宠儿。高速铁路作为新兴的运输手段,可以满足人们对交通工具快速便捷高效环保的要求。进入21世纪后,国内高速铁路建设日新月异,呈现井喷之势。随着国内铁路隧道建设向着高海拔、超深地下空间发展,单洞双线隧道以工程造价低、占用地下空间小的优势,在城际地下空间、水下空间、山岭中获得了一定的建设规模。但由于隧道救援通道及安全空间容易受到隧道内轮廓空间的影响,两条线路通常不设置隔墙,隧道内若发生火灾将直接对相邻线路列车造成威胁,人员无法速疏散,增加了火灾条件下的疏散难度,对火灾排烟设计安全性提出了更高的要求。

目前,针对隧道的排烟方式,按驱动力的不同可分为自然排烟和机械排烟;按烟气的流动方向的不同可分为纵向排烟和横向排烟。此外,目前还研究了几种新的通风方式,如吊顶机械排烟和纵向排烟相结合^[1-3]。其中,纵向排烟在以往的研究中一直很受欢迎,它的优点是可将隧道运营通风和排烟兼顾,不需要修建单独的通风管道,省去了通风机房所占位置及投资、实际运营费用,初始投资低^[4]。但由于烟气的单向流动,烟气会不断卷吸周围的空气,使得烟气量不断增加,导致排烟方向的能见度降低^[5]。吕金金^[6]利用小尺寸实验以及FDS软件研究了在纵向通风情况下出现的烟气分叉现象,认为烟气分叉主要是纵向风的水平纵向力以及烟羽流形成的热浮升力共同作用的结果,并总结了临界风速与火源热释放率之间的函数关系。张众杰^[7]利用盐水实验和FDS软件模拟的方法研究了纵向排烟和自然通风相结合的排烟方式,认为相较于普通的单一的排烟方式,火源上游采取纵向通风,火源下游采取自然排烟的排烟方式具有较高的排烟效率的结论。并通过FDS软件对纵向排烟的风速和自然排烟的排烟井尺寸进行了优化,为采用该排烟方式的实际工程的设计选取合理的参数提供了参考。

在以前的研究中,一直假设火灾发生在隧道的纵向中心线,事实上,单洞双向隧道内发生火灾的位置往往不在纵向中心线上。纪杰^[8]等研究发现,随着与火灾纵向距离的增加,顶棚下的最大烟温呈指数下降。因此,开展有关单洞双向铁路隧道火灾烟气运动及防控方面的研究,对提高铁路隧道的消防设计水平和火灾应急处置能力有重要意义。

在本文研究中,选择一段典型的单洞双线隧道,通过数值模拟方法,研究列车火灾时隧道内烟气蔓延规律;给出隧道内烟气温度、碳烟密度、能见度等特征参数的分布情况;研究火灾在纵向排烟系统条件下,烟气是否可以得以有效控制。

1 数值方法

隧道中烟气的运动是三维的、不稳定的、可压缩的湍流。因此,我们使用计算流体力学(CFD)来分析本研究铁路隧道系统中的烟流。具体来说,我们使用了雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方程^[9],与大涡模拟(LES)相比^[10-12];RANS 方程不仅满足所需的计算精度,而且大大减少了研究的计算时间。

1.1 控制方程

为了利用 RANS 方程分析本研究的铁路隧道系统的烟气流动,计算依赖于以下一般控制方程:

$$\delta(\rho\phi)\delta t + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: ϕ 为通用变量; S 为源相; Γ 为广义扩散系数; ρ 为气流密度, kg/m^3 ; U 为速度, m/s 。

还使用了理想气体方程,其公式如下:

$$P = \rho R_g T \quad (2)$$

式中: P 是压力, Pa ; R_g 是气体常数, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; T 是温度, K ;

1.2 数值模型

在本研究中,数值方法以正在设计施工的中国济滨隧道为模板。这条铁路隧道分两段,一段5公里,一段4.2公里。本文将研究区间隧道列车火灾在自然和纵向排烟模式下的可行性。

为了支持该铁路隧道数值模型的确立,我们首

先详细说明了其几何形状。图1是铁路隧道的断面图。

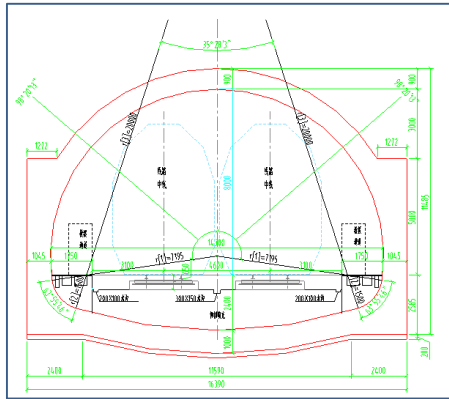


图1 铁路隧道的断面图

Fig.1 Section view of railway tunnel

区间隧道采用圆形盾构隧道，隧道断面直径为7.2m，内轨顶面到隧道顶部的距离为7.38m，隧道横截面积约为100m²。

基于济滨隧道的几何形状，我们使用STAR-CCM+软件开发了数值模型^[13]。图2显示了所得数值模型，隧道总长度为2.3km。在数值模拟过程中，使用了中国铁路CRH6型列车，如图3所示，该模型列车采用8节编组，总长度为201.4m，车身宽度为3.3m，高度为3.86m。在这项研究中，火源位于第5节车厢内，车门和窗户都打开，让高温烟雾进入隧道。发生火灾后，列车先保持原速（200km/h）匀速行驶5s，随后以1.2m/s²的减速度制动停车。

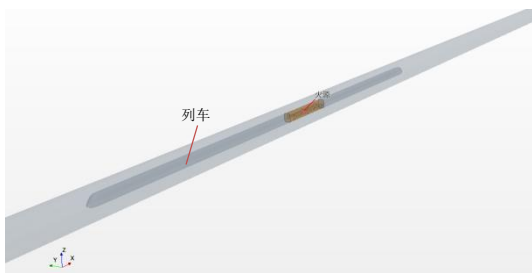


图2 区间隧道火灾数值模型

Fig.2 Numerical model of tunnel fire in running tunnel



图3 列车模型

Fig.3 The train model

图4是数值模型的边界条件和计算域。其中，

压力出口边界条件作用于隧道的上游和下游出口处，对流传热的壁面条件应用于所有固体表面。此外，数值计算时共设有3计算域，分别是隧道、列车、火源，其中列车和火源是可运动的，隧道是静止的。另外，采用重叠动网格技术对列车的运行进行模拟，各区域间有重叠，分别是列车与隧道重叠、火源与隧道重叠、火源与列车重叠。各计算域与重叠区域如图5示。

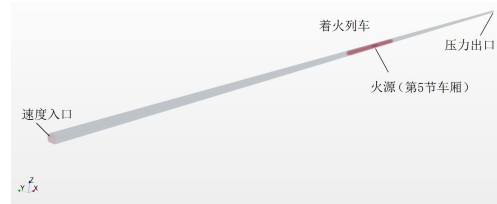
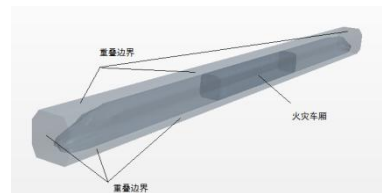
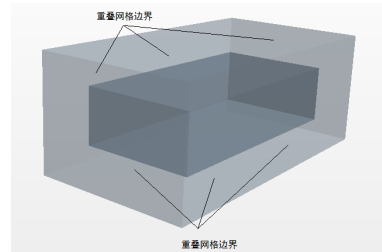


图4 隧道区域

Fig.4 Tunnel area



(a) 列车重叠域



(b) 火源重叠域

图5 重叠区域

Fig.5 Overlapping region

确定火源的放热速率为：

$$Q = \alpha t^2$$

式中： Q 为火灾热释放速率，kW； t 为时间，s； α 为火灾增长系数，kW/s²。

在本研究中，我们稳定火源功率设定为《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》^[14]（TB10020-2017）中推荐的15MW。列车火灾发展为超快速火，火灾增长系数为0.1878kW/s²。

1.3 数值网格

为确保火灾模拟的准确性，应在火源附近使用较小的网格尺寸。但是，过小的网格尺寸会增加网

格数量和后续计算时间。因此最终确定的网格尺寸为 0.2m, 以平衡精度与计算时间。在这项研究中, 使用多面体网格, 燃烧列车周围的网格如图 6 所示。整个数值模型包括大约 1200 万个网格。

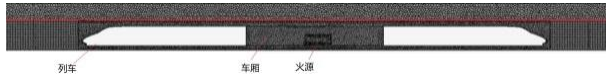


图 6 列车附近网格场景

Fig.6 Grid around the train

2 结果分析

2.1 区间隧道自然排烟下的火灾场景

列车发生火灾后, 隧道内的碳烟密度如图 7 所示。在火灾发生 51.3s 时, 车辆停下, 开启车门, 人员逃生, 同时热烟气逐渐从车厢中蔓延出来, 烟气在近火源区域的温度显著高于环境温度, 在浮力的驱动下, 热烟气主要沿隧道纵向流动, 可维持较高的烟气层。从 60s-180s 云图可见, 由于列车运动产生向右的持续性的活塞风效应, 右侧碳烟密度明显大于左侧, 但是随着活塞风衰减, 300s 和 360s 云图可见, 烟气向两端蔓延形式趋于稳定, 烟气也产生了明显的分层, 此时列车运动产生的活塞风效应已经十分微弱, 对烟气蔓延已经基本没有影响。

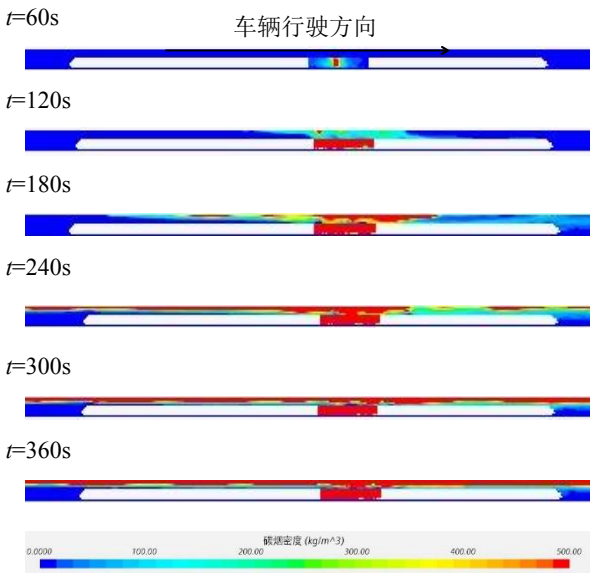


图 7 区间隧道纵向截面碳烟密度变化

Fig.7 Change of soot density in longitudinal section of running tunnel

隧道顶部烟气温度分布如图 8 所示。PIARC 指出, 人员在几分钟内能够忍受的辐射热量极限为 2~2.5kW/m²。当辐射热量为 2.5kW/m² 时, 6m 高、

8m 宽的隧道对应烟气温度为 180℃。由图可见, 在火灾发生 180s 内, 由于列车运动产生的向右的活塞风效应对烟气蔓延产生的影响, 导致此时火源右端温度相比于左侧对称位置明显更高, 但是随着活塞风的逐渐衰减, 对后续烟气的蔓延已经基本没有影响, 后续温度基本呈对称分布。此外, 当火灾发生 240s 时离火源 30m 外的隧道顶部烟气温度已经大于 180℃, 不满足热辐射控制标准, 将影响人员的安全疏散。

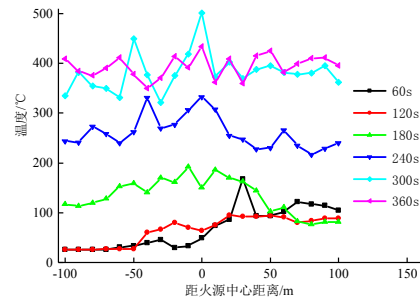


图 8 逃生路线上的顶棚温度变化

Fig.8 Ceiling temperature change on escape route

逃生通道上人高 2m 处温度变化如图 9 所示。温度的变化与热烟气的分布吻合, 在火灾发展至 60s 时, 列车已停下 8.3s, 烟气从车厢内涌出, 在浮力作用下上浮, 同时列车运动产生的活塞风强烈扰乱烟气层的形成, 因而着火车厢右侧存在大量蔓延的烟气, 距火源 30m 外人高 2m 处的温度明显大于 60℃, 这不符合地面 2m 高度处温度不得超过 60℃的要求^[15], 会对人员逃生产生严重威胁。而伴随着火灾的进一步发展, 活塞风也逐渐衰减, 除着火车厢附近存在上浮的烟气, 温度较高, 其他位置形成的烟气层逐渐稳定, 距火源 30m 外温度已低于 60℃, 这符合地面 2m 高度处的温度不得超过 60℃的要求。

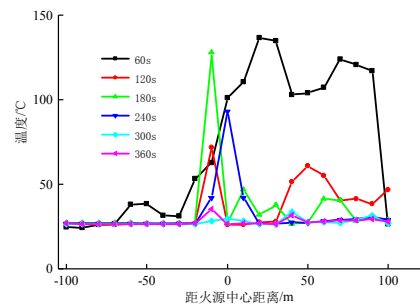


图9 逃生图线上人高2m处温度变化

Fig.9 Temperature change at height 2m on the escape route

逃生通道上的能见度如图 10 所示。由于列车运动产生的向右的活塞风效应对烟气蔓延产生的气流扰动，不利于烟气层的形成，致使着火车厢右端高 2m 平面上仍漂浮一定量的烟气，导致火灾发生 240s 之后着火车厢附近能见度严重低于 10m，左端 30m 外能见度满足规范要求的 10m，而右端则十分接近规范要求的 10m，还是会人员安全疏散造成一定的影响。

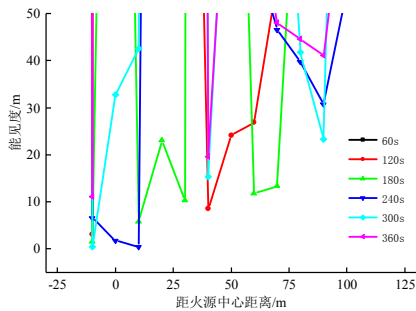


图 10 逃生通道上人高 2m 处的能见度

Fig.10 Visibility change at height 2m on the escape route

2.2 区间隧道纵向排烟下的火灾场景

列车发生火灾后，纵向排烟模式下，隧道内的碳烟密度如图 11 所示。列车火灾的发展采用 t^2 模型，火灾热释放率在火灾发展 282.6s 时达到峰值（15MW）。图中可见：在火灾发展的前 120s 内，车厢内涌出的烟气在纵向风速的强烈干扰下，烟气被迅速吹散排走；180s 之后，火灾热释放率随时间逐渐增大，隧道下游烟气逐渐积累，烟气开始分层；直至 360s，烟气虽然有了明显的分层，但是由于气流的强烈扰动，烟气层高度很低，此外，将整节车厢视为火源，烟气并未产生明显回流，采用的纵向排烟风速可视为临界风速。

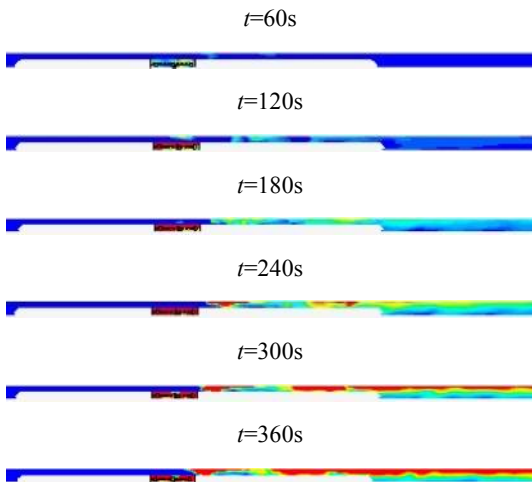


图 11 区间隧道纵向截面碳烟密度变化

Fig.11 Change of soot density in longitudinal section of running tunnel

隧道顶棚温度分布如图 12 所示。火灾发生 360s 内，上游隧道保持为无烟环境，隧道顶棚温度维持在正常环境温度，远小于 180℃；火源下游烟气在气流的强烈扰动下，严重影响了烟气层的形成，可见，在距离火源 30m 外的下游隧道顶部烟气温度的小于 180℃，满足热辐射控制标准，不会影响人员的安全疏散。

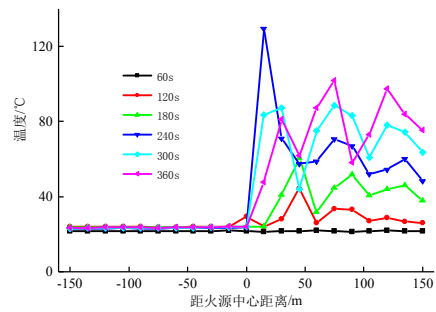


图 12 逃生路线上的顶棚温度变化

Fig.12 Ceiling temperature change on escape route

逃生通道上人高 2m 处温度变化如图 13 所示。在火灾发展 360s 内，温度的变化与热烟气的分布吻合。在纵向风速对烟气的扰动下，极大的提升了烟气的纵向流动速度，因此热量也可以得到有效的排出。可见上游隧道温度很好的维持在环境温度，下游隧道除了 360s 时距离火源 65m 处的人高 2m 处温度略高于 60℃，其余时刻温度均符合地面 2m 高度处的温度不得超过 60℃ 的要求。

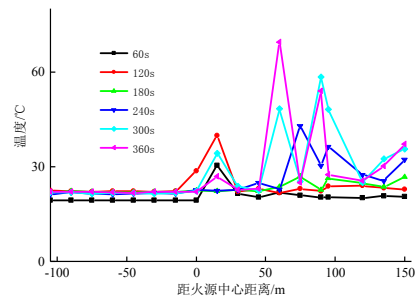


图 13 逃生图线上人高 2m 处温度变化

Fig.13 Temperature change at height 2m on the escape route

逃生通道上人高 2m 处的能见度如图 14 所示。在纵向风速强烈扰动下，烟气层的形成收到了强烈

干扰,致使下游烟气几乎充满整个隧道截面。可见,在火灾发生360s内,隧道上游能见度良好;而下游隧道在火灾发生240s之后距火源30m外已有很长一段距离能见度不足10m,这将严重影响位于下游的几节车厢内的人员疏散。

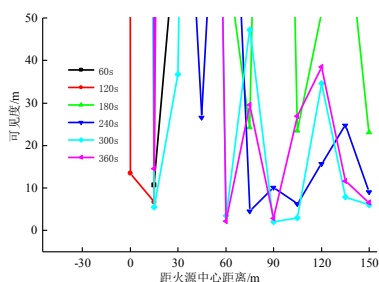


图14 逃生通道上人高2m处的能见度

Fig.14 Visibility change at height 2m on the escape route

3 结论

(1) 列车减速停车过程中产生的活塞风效应,会起到一定的纵向排烟作用。由于活塞风衰减太快,在火灾发生360s内,距火源30m外顶棚温度严重超过 180°C ,不满足热辐射控制标准;距火源30m外人高2m处温度不能严格满足低于 60°C 的要求;距火源30m外人高2m处能见度恰好满足10m的要求。总之,将会严重影响人员疏散。

(2) 单洞双线隧道截面较大,临界风速可达 3.7m/s 。当纵向排烟风速达到此风速时,在火灾发生360s内,隧道上游可以保持良好的无烟环境,隧道下游火源30m外顶棚温度不会超过 180°C ,满足热辐射控制标准;距火源30m外人高2m处温度也可满足低于 60°C 的要求;但距离火源30m外人高2m处能见度严重低于10m。总之,因能见度无法满足要求,还是会对下游隧道人员疏散产生严重的影响。

(3) 与自然排烟模式相比,纵向排烟虽然加快了排烟速度,使隧道内的温度场得到了有效控制,但严重干扰了烟气层的形成,下游隧道人员逃生环境依然严峻。

(4) 当在列车在类似的单洞双线隧道内发生火灾时,应尽量继续行驶至就近的救援站或车站,从而更有效进行人员疏散。

(5) 本文研究内容对济滨隧道单洞双向大断面隧道的通风排烟系统设计和研究有一定的参考价值,可以为轨道交通领域类似工程的通风排烟设计提供参考。

参考文献:

- [1] Tang F, Li L J, Mei F Z, et al. Thermal smoke back-layering flow length with ceiling extraction at upstream side of fire source in a longitudinal ventilated tunnel[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,106:125-130.
- [2] F Tang, F Z Mei, Q Wang, et al. Maximum temperature beneath the ceiling in tunnel fires with combination of ceiling mechanical smoke extraction and longitudinal ventilation[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2017,68:231-237.
- [3] Tang Fei, He Qing, Mei Fengzhu, et al. Effect of ceiling centralized mechanical smoke exhaust on the critical velocity that inhibits the reverse flow of thermal plume in a longitudinal ventilated tunnel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018,82:191-198.
- [4] Xu Zhi Sheng, You Wenjiao, Kong Jie, et al. A study of fire smoke spreading and control in emergency rescue stations of extra-long railway tunnels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017,49(Pt.B):155-161.
- [5] 郭海丰,周佳龙,周山水,等.我国隧道纵向排烟研究现状[J].节能,2021,40(3):16-18.
- [6] 吕金金.纵向风作用下城市隧道火灾烟气分岔流动特性研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [7] 张众杰.隧道纵向通风与下游自然排烟协同运行参数及流动特性研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [8] J Ji, C G Fan, W Zhong, et al. Experimental investigation on influence of different transverse fire locations on maximum smoke temperature under the tunnel ceiling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012,55(17-18):4817-4826.
- [9] B Mikuž, A Shams. Assessment of RANS models for flow in a loosely spaced bare rod bundle with heat transfer in low Prandtl number fluid[J]. Ann. Nucl. Energy, 2019,124:441-459.
- [10] C C Hwang, J C Edwards. The critical ventilation velocity in tunnel fires-A computer simulation[J]. Fire safety journal, 2005,40(3):213-244.
- [11] Wei Zhang, Andrew Hamer, Michael Klassen, et al. Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation[J]. Fire safety journal, 2002,37(8):721-752.

(下转第319页)