

地铁区间隧道火灾 通风模式的数值分析^{*}

广州大学 周孝清[☆] 赵相相 丁云飞 郑志敏

摘要 介绍了地铁区间隧道火灾常见的几种通风排烟模式,对其中一种最复杂的模式进行了数值分析。模拟分析得出,对于地铁实际工程中的单线盾构圆形隧道,在 10 MW 火灾强度下,着火区间隧道内 2.6~2.9 m/s 左右的纵向风速可以有效阻止烟气发生逆流;在着火区间隧道 2.9 m/s 的纵向风速下,未着火区间隧道两端对送风速度为 1~1.5 m/s 时,联络通道内有风速为 6 m/s 左右的气流流向着火区间隧道,可有效抑制烟气通过联络通道向未着火区间隧道蔓延,保证人员的安全疏散。

关键词 地铁区间隧道火灾 通风排烟模式 临界风速 联络通道

Numerical studies on ventilation modes in underground railway tunnel fire

By Zhou Xiaqing[★], Zhao Xiangxiang, Ding Yunfei and Zheng Zhimin

Abstract Presents several ordinary ventilation and smoke extraction modes, and simulates the most complex one of them. The results show that for the single-track shield tunnel in actual projects, the longitudinal ventilation velocity of 2.6~2.9 m/s can effectively prevent smoke from counter flow at a heat release rate of 10 MW; when the tunnel sector on fire with a longitudinal velocity of 2.9 m/s and the unfired tunnel sector with the velocity of 1~1.5 m/s from both ends, there is an air flow with the velocity of 6 m/s to the tunnel on fire in the connected tunnel, so the smoke diffusion to the unfired tunnel is effectively prevented, and the security of evacuation is ensured.

Keywords underground railway tunnel fire, ventilation and smoke extraction mode, critical velocity, connected tunnel

★ Guangzhou University, Guangzhou, China

①

0 引言

地铁属于人员密集场所,一旦发生火灾,后果将不堪设想。针对地铁区间隧道火灾,目前规范要求司机应尽最大可能将列车驶出隧道进入前方站台后进行人员疏散,倘若列车无法驶入前方站台而被迫停靠在漆黑的隧道中,应启动地铁区间隧道通风排烟系统进行排烟,在这种情况下,确定合理的

通风模式至关重要。地铁区间隧道的火灾通风排烟模式是非常复杂的,它与列车的停靠位置、人员的疏散方向、火灾发生位置以及区间隧道是否设置

①☆ 周孝清,男,1964 年 8 月生,博士,教授,所长
510006 广州市番禺区大学城外环西路 230 号广州大学土木
工程学院建筑环境与设备工程研究所
(0) 13342884448
E-mail: zhou_xiaoqing03@163.com
收稿日期:2005-10-09
修回日期:2006-07-10

联络通道等因素有关。

目前,国内外已有很多人对地铁隧道火灾烟气的流动与控制作了大量的研究。P. J. Woodburn 等人把地铁火灾烟气的数值模拟值与实验值进行了对比,用来验证数值模拟的灵敏度和准确性,研究表明,除纵向通风速度对烟气回流扩散范围具有决定性影响外,火源的热释放速率以及湍流模型的选择对烟气回流扩散范围影响也较大^[1]。S. Kumar 等人对隧道火灾进行了三维数值模拟,并分别研究了辐射、热传导和壁面粗糙度等因素对火灾烟气的影响^[2]。卢平等人对纵向通风水平隧道火灾烟气的流动特性进行了模拟与分析^[3]。郑晋丽研究了隧道火灾中几种常用的数值模拟方法,提出了火灾发生后应采取的有效烟气控制措施^[4]。然而迄今,针对地铁区间隧道火灾通风排烟模式进行深入研究的文献不是很多。

本文通过分析研究,提出了地铁隧道火灾中几种复杂的通风排烟模式,选取了其中一种最复杂的模式,利用 CFD 方法进行了具体的数值模拟分析,得出了该模式下的最佳烟控送风速度。

1 地铁区间隧道火灾的通风排烟模式

《地铁设计规范》(GB 50157—2003)规定,当地铁区间隧道长度超过 500 m 时,在区间隧道中部应设置与另一条地铁区间隧道相通的联络通道。考虑到目前地铁区间隧道长度一般都会超过 500 m,因此本文研究区间隧道中部设有一个联络通道的情形。根据火灾发生位置和列车停靠位置的不同,分析发现该区间隧道的通风排烟模式主要有四种^[5],如图 1 所示。

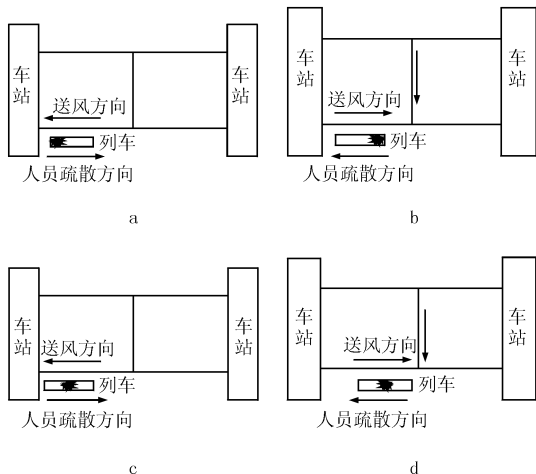


图 1 四种地铁区间隧道火灾的通风排烟模式

图 1a,1b 为火灾发生在列车端部的情形,此时的送风方向应本着与大多数人员的逃生方向相反的原则来确定,若联络通道处于上风侧(图 1a),则不需要考虑联络通道内的风向;若联络通道处于下风侧(图 1b),为防止烟气向另一条区间隧道扩散,则应该通过联络通道向着火隧道加压送风。图 1c,1d 为火灾发生在列车中部的情形,此时应根据列车的停靠位置来判断送风方向。当列车停靠在靠近车站位置时(图 1c),考虑到利用车站排烟更为有利,因此采用向车站方向送风的通风方式,此时联络通道处于上风侧,不需要考虑烟气的扩散;当列车停靠在靠近中间联络通道时(图 1d),为保证更多的人逃生,则应该采用向联络通道方向送风的通风方式,此时联络通道处于火灾下风侧,应保证联络通道内具有指向着火区间隧道的送风,从而可以保证人员通过联络通道逃生。通过对以上四种模式的分析,可以看出图 1d 对应的火灾通风模式为最不利模式。下面将对该种通风模式进行数值模拟分析,从而得出该模式下的临界风速以及保证联络通道内无烟的未着火区间隧道两端的最佳送风速度。

2 数值模拟分析

2.1 物理模型和边界条件

本文模拟的地铁隧道为单线盾构圆形隧道断面,断面直径 5.5 m,物理模型如图 2 所示。为研究方便,本文选取中部联络通道前后共 100 m 长的区间隧道作为研究对象,模拟时假设火灾发生在距离联络通道 20 m 处。

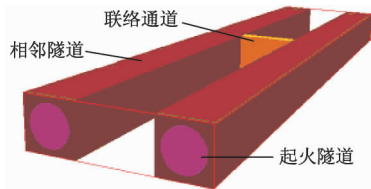


图 2 数值模拟物理模型

地铁隧道围护结构壁面采用无滑移边界条件,考虑到隧道轴向导热与径向导热相比可忽略不计,因此隧道围护结构的导热按径向导热处理,并假定围护结构外壁面温度与地面下深层土壤温度相同,取 20 ℃。隧道内气流通过对流换热和热辐射与隧道壁进行热量交换,近壁第一个节点的湍流黏度和换热系数等采用壁面函数法处理,辐射换热模型采用 PHOENICS 自带的 IMMERSOL 模型。隧道

入口给出速度和温度边界条件,入口送风温度为环境空气温度 20 ℃,出口给出压力边界条件。

2.2 火源设置

关于地铁火灾强度的设置,香港地铁工程技术人员保守估计最大值为 2 MW;而英美等国一般采用 5~50 MW,且重点研究 10 MW 情况下的火灾实验。因此,本文研究的火灾强度设为 10 MW。火灾的发烟量采用对应于 10 MW 火灾强度下的发烟量 $27 \text{ kg/s}^{[6]}$,火源大小设置为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。

2.3 数值计算方法

模拟采用 PHOENICS 软件。湍流模型选用带浮升力修正的 $K-\epsilon$ 两方程模型,动量方程采用交错网格方法进行离散,其余方程的离散采用有限容积法,网格划分个数为 $200(L) \times 50(W) \times 20(H)$,差分格式选用混合格式,求解方法为 SIMPLE 算法,计算终止时间为火灾发生后 600 s,时间步长为 1 s,迭代收敛判据为 10^{-3} 。边界条件的处理采用将其处理为各相应变量的源项的方法^[7],计算网格采用正交的结构化网格。

3 计算结果分析

3.1 临界风速的模拟结果分析

关于隧道火灾的烟气控制,临界风速一直是隧道防排烟系统设计的一个重要参数,它与火灾强度、隧道几何形状、隧道坡度、壁面粗糙度以及火源的大小形状等因素有关。当纵向通风速度大于临界风速时,隧道内的烟气由原来的双向扩散变为单向扩散,从而可以为人员疏散和消防救援提供一条无烟通道。为了确定固定火灾强度下的临界速度,笔者分别模拟研究了纵向通风速度为 2.0 m/s、2.3 m/s、2.6 m/s 和 2.9 m/s 时的烟气扩散情况(火灾强度为 10 MW),烟气层的边界由 0.1 kg/m^3 的等浓度线来确定,对应的烟气体积分数为 0.015。模拟结果如图 3 所示。

从图 3a、3b 可以看出,纵向风速为 2.0 m/s 和 2.3 m/s 时着火区间隧道内的烟气均有比较长的回流距离,这对人员疏散和消防救援是极为不利的。图 3c 中 2.6 m/s 的纵向风速下烟气的回流距离有所减小,但着火区域下游的烟气层的下降速度增加。图 3d 中 2.9 m/s 的纵向风速下烟气的回流现象完全得到了控制,烟气仅沿纵向通风气流向着火区下游扩散,从而使着火区上游成为安全的无烟

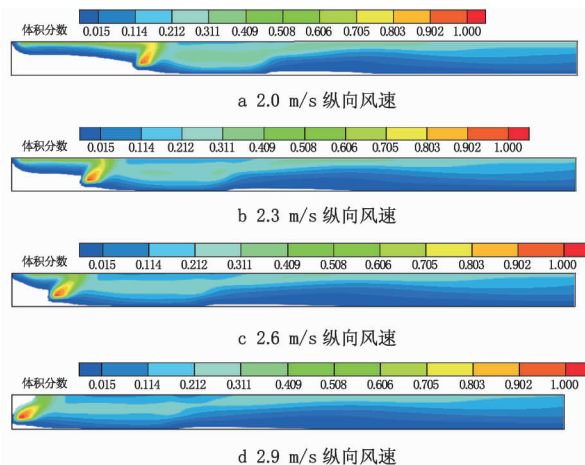


图 3 着火区间隧道中心纵断面的烟气体积分数分布

区。因此,通过对以上模拟结果的分析,本文所研究的隧道对应于 10 MW 火灾强度下的临界风速大约在 2.6~2.9 m/s 之间。

3.2 临界风速下相邻区间隧道和联络通道内的烟气分布

在隧道发生火灾时,联络通道对人员疏散起着重要的作用,可作为疏散通道考虑,为研究火灾条件下联络通道的安全性,以 2.9 m/s 作为着火区间隧道的纵向通风速度,在未着火区间隧道两端不送风、两端对送风速度 0.5 m/s、两端对送风速度 1 m/s 以及两端对送风速度 1.5 m/s 四种情况下,研究分析烟气通过联络通道向未着火区间隧道的扩散情况,模拟结果如图 4~7 所示。

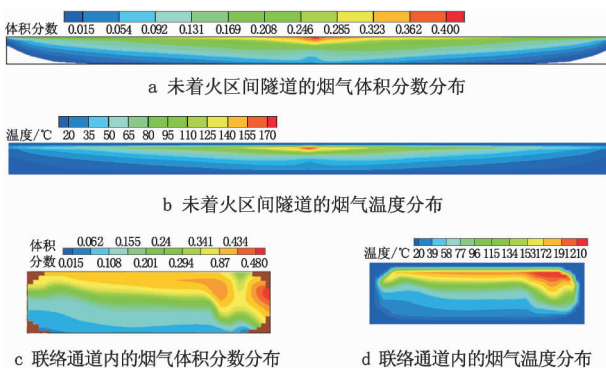


图 4 未着火区间隧道两端不送风时烟气通过联络通道向未着火区间隧道蔓延的情况

从图 4 可以看出,在未着火区间隧道两端不送风的情况下,大量烟气将通过联络通道进入未着火区间隧道,并以联络通道为中心向两端对称扩散。图 4a、4b 中烟气已经充满整个未着火区间隧道,并且呈现明显的分层现象,烟气的最大体积分数和温

度位于未着火区间隧道中心的顶部,体积分数最大值为 0.4 左右,温度最高值为 170 °C,烟气在该隧道内的温度和浓度均已达到了对人员生命构成危险的程度。从图 4c 可以看出,整个联络通道已经充满了烟气,烟气的体积分数最大值为 0.4 左右,联络通道底部的烟气体积分数也已达到了 0.1。图 4d 中联络通道顶部烟气温度的最高值为 210 °C 左右,联络通道底部的烟气温度在 70~80 °C 之间,人员将无法安全通过联络通道进行疏散。

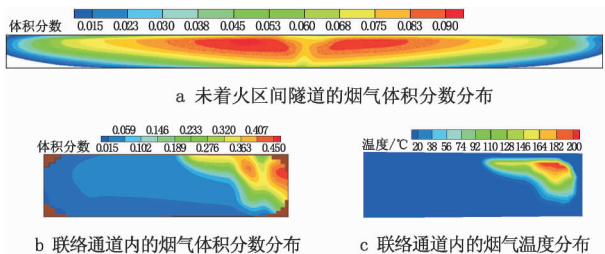


图 5 未着火区间隧道两端对送风速度为 0.5 m/s 时烟气通过联络通道向未着火区间隧道蔓延的情况

从图 5a 可以看出,在 0.5 m/s 的两端对送风速度下,未着火区间隧道内仍然布满了大量的烟气,只是烟气的体积分数最大值为 0.09 左右,比图 4a 中的有所减小。此时未着火区间隧道内烟气的温度与送风气流温度差不多,为 20 °C 左右,不会对人员生命构成危险。从图 7b,7c 可以看出,烟气在联络通道内的温度和体积分数平均值比两端不送风时大大减小,高温区位于联络通道顶部,影响距离大约为一个隧道宽度,其他大部分区域的温度值在 20 °C 左右。

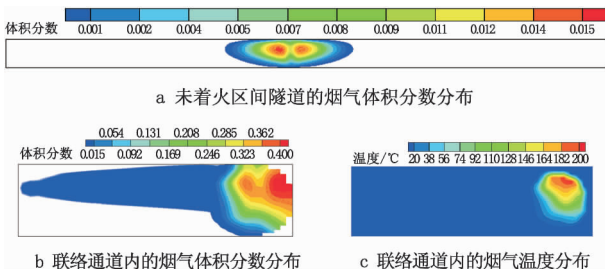


图 6 未着火区间隧道两端对送风速度为 1 m/s 时烟气通过联络通道向未着火区间隧道蔓延的情况

从图 6a 可以看出,在两端对送风速度为 1 m/s 的情况下,未着火区间隧道仅在中央很小一部分范围内有烟气分布,但烟气体积分数最大值也仅有 0.015 左右,此时未着火区间隧道内烟气的温度为 20 °C 左右,从温度和浓度两方面来考虑可以认

为该区间隧道是安全的。图 6b 中联络通道内绝大部分区域的烟气体积分数为 0.015 左右,烟气主要分布在联络通道上部区域。图 6c 中联络通道内绝大部分区域的温度为 20 °C 左右,已无法对人员生命构成危险。

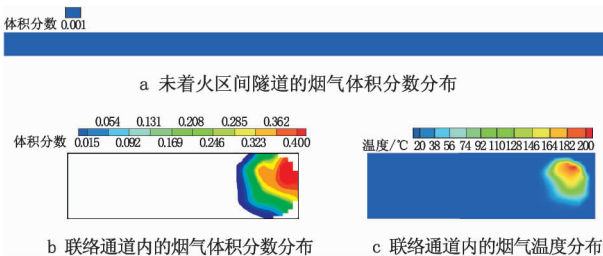


图 7 未着火区间隧道两端对送风速度为 1.5 m/s 时烟气通过联络通道向未着火区间隧道蔓延的情况

从图 7a 可以看出,在 1.5 m/s 的两端对送风速度下,未着火区间隧道内已经没有烟气,此时该区间隧道内的温度为 20 °C 左右。从图 7b,7c 可以看出,联络通道内已基本成为安全的无烟区,人员可以安全地通过联络通道进入未着火区间隧道进行避难。此时,未着火区间隧道内完全没有烟气进入,可以作为安全的人员避难通道使用。

3.3 临界风速下联络通道中心断面的速度分布

图 8 给出了未着火区间隧道四种不同通风方式下联络通道内的速度分布情况。从图 8a 可以看

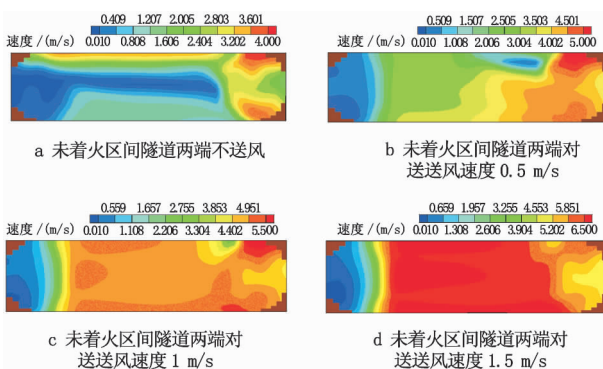


图 8 联络通道中心断面的速度分布

出,在未着火区间隧道两端不送风的情况下,烟气沿联络通道顶端以较大的速度从着火区间隧道进入未着火区间隧道,联络通道内的速度最大值为 3 m/s 左右。图 8b 中由于未着火区间隧道两端对送风形成正压,导致联络通道内下部有通向着火区间隧道的气流,但联络通道上部仍有部分烟气扩散进入未着火区间隧道。图 8c 中联络通道内指向着

火区间隧道的风速较大,最大值为 5 m/s 左右,仅有极少量烟气从联络通道顶部进入未着火区间隧道内。图 8d 中联络通道内的风速为 6 m/s 左右,烟气在联络通道内的扩散完全得到了抑制。考虑到 6 m/s 的风速人是可以承受的,因此未着火区间隧道两端的最佳送风速度应该控制在 1~1.5 m/s 之间。

4 结论

4.1 比较分析了带有一个联络通道的区间隧道火灾常见的四种通风排烟模式,得出了当列车停靠在靠近中部联络通道位置,并且火灾发生在列车中部时对应的火灾通风排烟模式为该区间隧道的最复杂模式。

4.2 对于 10 MW 火灾强度的地铁区间隧道火灾,保证着火区间隧道烟气不发生回流的临界风速范围为 2.6~2.9 m/s。

4.3 在着火区间隧道保持 2.9 m/s 的纵向通风速度下,未着火区间隧道两端的最佳送风速度范围为 1~1.5 m/s,在此送风速度范围内,联络通道内具有速度为 6 m/s 左右的指向着火区间隧道的气流,既保证了烟气无法通过联络通道扩散进入未着火

区间隧道,又不会影响人员的安全疏散。

参考文献

- [1] Woodburn P J, Britter R E. CFD simulation of a tunnel fire—part I [J]. Fire Safety Journal, 1996, 26(1): 35–62
- [2] Kumar S, Cox G. Mathematical modeling of fires in road tunnels[C]// 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 1985
- [3] 卢平, 丛北华, 廖光煊, 等. 纵向通风水平隧道火灾烟气流动特性研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(10): 59–64
- [4] 郑晋丽. 隧道火灾模拟和烟气控制[J]. 地下工程与隧道, 1999(2): 38–47
- [5] 张悦, 贺利工. 火灾运行模式模拟计算中最复杂模式的确定[J]. 制冷与空调, 2005(1): 19–21
- [6] Ingason H. Heat release rate measurements in tunnel fires[C]// Proc Int Conf on Fires in Tunnels, Boras, Sweden, 1994: 86–103
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- [8] 国家统计局. 中国统计年鉴(2001)–(2005)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2005
- [9] 北京市地方志编纂委员会. 北京年鉴(2001)–(2005)[M]. 北京: 北京年鉴社, 2001–2005
- [10] 温权, 李敬如, 赵静. 空调负荷计算方法及应用[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(4): 16–18
- [11] 王忠锋, 张旭. 长江中下游地区高层住宅建筑空调负荷特点研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2003, 24(1): 11–14
- [12] 刘迎云, 王汉青, 汤广发. 住宅建筑空调动态负荷计算及其分析[J]. 流体机械, 2003, 31(3): 47–49
- [13] 陈刚, 刘泽华, 宁勇飞. 住宅建筑空调负荷分析与同时使用系数的计算[J]. 流体机械, 2003, 31(7): 47–49
- [14] 简毅文, 江亿. 住宅供暖空调能耗计算模式的研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(2): 11–14
- [15] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第一讲 建筑模拟技术与 DeST 发展简介[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 48–56
- [16] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [17] 杨善勤. 民用建筑节能设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [18] 北京市建筑设计研究院. DBJ 01–602–97 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [19] 北京市建筑设计研究院. DBJ 01–602–2004 民用建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
- [20] 简毅文, 江亿. 住宅房间空调器运行状况的调查分析[J]. 中国建设信息供热制冷, 2005(6): 66–68
- [21] 周子成. 定转速压缩机的房间空调器的季节能效比(续)[J]. 制冷, 1995(3): 19–24
- [22] 赵军朋, 王智忠, 束鹏程. 空调用滚动转子式压缩机的变工况特性研究[J]. 家电科技, 2004(2): 92–93
- [23] 国家技术监督局. GB 12021.3–2004 房间空气调节器能效限定值及能源效率等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004

(上接第 6 页)

参考文献