

# 地铁长大山岭隧道通风及防排烟系统方案

北京城建设计研究总院有限责任公司 郭爱东<sup>☆</sup> 刘磊 祝岚

**摘要** 结合中梁山地铁隧道工程,对地铁长大山岭隧道平时通风、火灾时通风和防排烟系统方案,以及人员疏散方案进行了探讨。消防性能化论证结果表明,中梁山隧道采用的无竖井通风及防排烟系统方案是合理可行的。

**关键词** 地铁 长大山岭隧道 火灾 通风 防排烟 消防性能化论证

## Ventilation and smoke control and extraction system scheme for underground railway long mountain tunnels

By Guo Aidong<sup>★</sup>, Liu Lei and Zhu Lan

**Abstract** With an example of Zhongliangshan underground railway tunnel, discusses the system scheme of ventilation in normal times and ventilation and smoke and extraction in the case of fire, and the evacuation scheme for the long tunnels. Performance-based fire protection demonstration shows that the scheme without vertical shaft adopted in Zhongliangshan tunnel is reasonable and practicable.

**Keywords** underground railway, long mountain tunnel, fire, ventilation, smoke control and extraction, performance-based fire protection demonstration

<sup>★</sup> Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing, China

### 郭爱东

#### 主要设计项目

- 广州地铁2号线江南西站
- 北京地铁5号线东单站
- 北京地铁8号线森林公园站
- 北京地铁1、2号线及复八线设备改造工程
- 重庆地铁3号线
- 重庆地铁1号线



目前国内外已建的公路隧道和铁路隧道有很多,如英吉利海底隧道、勃朗峰公路隧道、中国秦岭终南山隧道等,在通风、防排烟和人员疏散等防灾措施方面积累了宝贵的经验。而地铁长大山岭隧道的防灾工程是集技术和管理为一体的综合性的系统工程,与公路隧道和铁路隧道存在差异,目前尚无运行实例,不能直接照搬现有的防灾技术方案。笔者结合重庆轨道交通中梁山隧道的实际工程,对地铁长大山岭隧道平时通风、火灾时的通风和防排烟系统方案,以及人员疏散方案进行了探讨

和研究。

### 1 中梁山隧道概况

中梁山隧道为重庆市轨道交通一号线的一段独立的区间隧道,隧道两端洞口一端朝向双碑北站,一端朝向赖家桥站,隧道长 4.33 km,单洞双线,隧道中间设置中隔墙,最大埋深 290 m,两端洞口高差近 70 m,为目前我国最长的城市轨道交通山岭隧道。经过牵引计算,正常运营时,隧道内最多有两列列车同时出现,两列车的最大间距为 2.8 km 左右。

中梁山隧道穿越多种不良地质带,水文地质条件复杂,见图 1。根据地质详细勘察报告,隧道施工过程中将会遇到岩溶突水、煤层瓦斯、软弱夹层、

<sup>☆</sup> 郭爱东,女,1966年7月生,大学,高级工程师  
100037 北京市西城区阜成门北大街5号北京城建设计研究总院有限责任公司第五设计所  
(010) 88336680 (0) 13522289355  
E-mail: guoaidong@126.com  
收稿日期:2011-03-29  
修回日期:2011-05-10

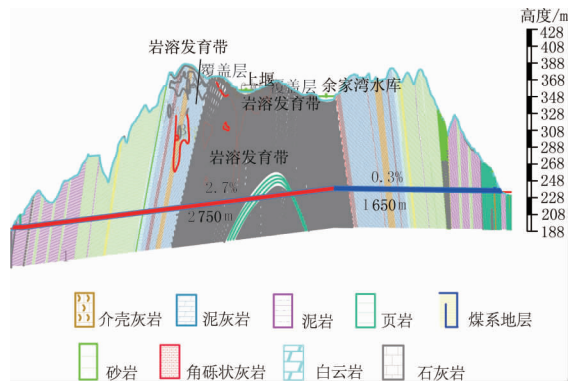


图1 中梁山隧道纵断面图

膏岩等不良地质现象,其中,隧道区域多处于岩溶发育带,可分为东、西两大槽谷区,均有岩溶泉涌出。在本隧道区附近 4.0~6.5 km 内有 3 条已建隧道,隧道施工后地下水已显疏干现象。

## 2 通风及防排烟方案选择

地铁通风及防排烟系统的设计原则是:正常运营时通风系统需满足列车人员的最小新风量要求;在列车阻塞和火灾发生的情况下,有组织地排除隧道内的烟气,并补充新风,以保证人员远离烟气,迎着新风方向疏散<sup>[1]</sup>。在正常运行时,地铁长大区间内有可能出现不只一列列车,其通风及防排烟系统通常采用纵向通风,通过设置中间竖井,可以保证在两竖井中间的区段不会有两列列车同时出现,保证“人烟分离”,为人员疏散创造有利条件。

若中梁山隧道采用排烟竖井通风方案,至少需要设置一个排烟竖井,井深 260 m,且竖井位于岩溶区,穿越岩溶水的垂直渗流带、水平流动带、岩溶裂隙水带,因此,竖井施工中遭遇岩溶洞穴或岩溶管道的可能性较大,易直接将地表水和不同层位的地下水与隧道连通,将上方的地表水、地下水导入隧道中,可能使隧道大量涌水、突泥及井壁垮塌,给竖井和隧道施工带来很大困难和危害。

仔细分析,中梁山隧道有以下特点:

- 1) 隧道两端均为洞口,出洞口外距离两端的高架车站各有 1.3 km 和 1.1 km 左右,便于倒车;
- 2) 隧道内呈“人”字形坡度,也便于列车前行和倒车;
- 3) 隧道为单洞双线,上、下行之间设有中隔墙,两条隧道可以互为安全区域;
- 4) 供电方式为接触网,即便在未断电的情况下对人员疏散影响也不大。

根据以上特点,在选择中梁山区间隧道通风及防排烟方案时,同时考虑人员的疏散情况,采用无竖井通风及防排烟系统方案:隧道内中部设置中隔墙,中隔墙设置防火门,以便事故状态下的人员疏散。经过行车牵引计算,隧道内出现两列列车的情况集中在各距离两端洞口 1.1 km 范围内,同时参考了 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》<sup>[2]</sup>,最终设定中隔墙防火门间隔为:距离两端隧道洞口各 1.1 km 范围内为 40 m,其余为 200 m,见图 2。在靠近隧道两端的隧道顶部吊装了若干组耐高温的射流风机,见图 3。通过射流风机的作用和采取相应的疏散模式,满足中梁山隧道平时通风时隧道内的温度及 CO<sub>2</sub> 浓度要求和火灾时排烟通风及人员疏散要求。

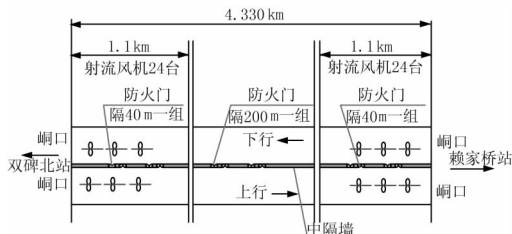


图2 隧道纵断面原理图

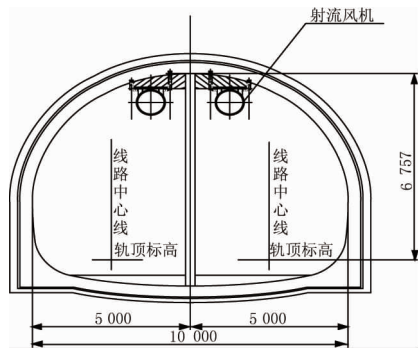


图3 隧道横断面示意图

## 3 通风及防排烟模式

### 3.1 通风模式

采用 STESS3.0 软件对正常运行时隧道的风量和温度进行模拟计算,结果见图 4,5。从图 4,5

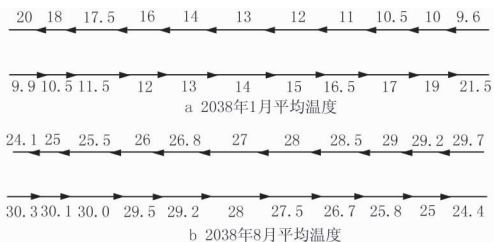


图4 正常运行时隧道内温度分布(单位:℃)

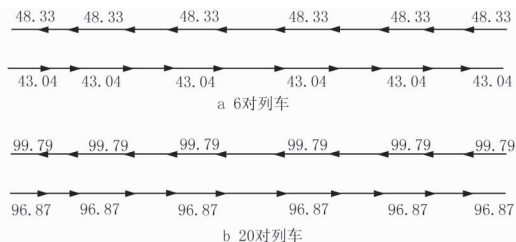


图5 正常运行时隧道内活塞风量(单位: $\text{m}^3/\text{s}$ )

可以看出,隧道内远期最热月平均温度为  $24.1 \sim 30.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,最冷月平均温度为  $9.6 \sim 21.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,满足温度要求;远期隧道内活塞风量为  $43.04 \sim 48.33\text{ m}^3/\text{s}$ (6对列车),  $96.87 \sim 99.79\text{ m}^3/\text{s}$ (20对列车),满足人员新风量要求。在实际运行中,可根据实际监测的温度及  $\text{CO}_2$  浓度,调整运行模式。

### 3.2 防排烟模式

1) 隧道内仅有一列列车并发生火灾,被迫停在隧道内无法行驶。

首先,非火灾隧道内的列车全部驶出隧道后停止全线运营。根据火灾部位,开启火灾隧道内的射流风机进行排烟,使隧道内形成大于烟气临界风速的气流,乘客从列车的端门下车,迎着气流方向,通过隧道内中隔墙上的防火门向另一侧隧道疏散。以列车从赖家桥站到双碑北站行驶为例,当列车行驶到坡度为  $2.7\%$  的下坡时,列车的尾部发生火灾,烟气沿着隧道的坡度方向蔓延,如果列车的燃烧发热量取  $7.5\text{ MW}$ ,经计算烟气的临界风速约为  $2.30\text{ m/s}$ 。

2) 隧道内有两列列车,以列车由赖家桥站向双碑北站行驶为例,首先经历  $1\ 650\text{ m}$  长的上坡(坡度为  $0.3\%$ ),然后持续  $2\ 750\text{ m}$  长的下坡(坡度为  $2.7\%$ ),此种情况列车发生火灾为最不利工况。

① 当后方列车发生火灾被迫停在隧道内时,前方列车迅速驶出隧道后,按照 1) 的防排烟模式执行。

② 当前方列车发生火灾被迫停在隧道内时,后方列车可以倒出隧道,按照 1) 的防排烟模式执行。

以上两种情况发生时,两列列车无论向前驶出隧道还是向后驶出隧道,理论上均处在向下的顺坡状态,有利于列车滑行。

③ 如果前方列车发生火灾而后方列车因故确实无法倒出隧道,此时待另一侧非火灾隧道内的列车全部驶出隧道后全线停运。前方列车根据火灾部位按照 1) 的防排烟模式执行,后方非火灾列车

乘客迅速从列车前后两端的端门同时疏散,下车后根据疏散指示标志通过最近的中隔墙防火门(间隔  $40\text{ m}$ ),疏散到另一侧隧道。

## 4 消防性能化论证

上述通风及防排烟模式能否保证区间隧道内的人员生命安全,需要进行论证和分析。

### 4.1 论证内容

1) 采用火灾专用模拟软件 FDS (fire dynamics simulator),模拟隧道内的烟气流动状况,分析现有的通风设计方案是否能够达到初始设计的要求,控制烟气不会向烟流上游回流,并控制烟流向下蔓延的速度不宜过大,保证隧道下游的列车乘客有充分的时间进行逃生。

2) 采用疏散专用模拟软件 STEPS (simulation of transient evacuation and pedestrian movements),模拟起火后起火列车和起火点下游列车的疏散状况,结合烟流分析,确定列车内的人员是否能够安全疏散。

### 4.2 最不利工况的确定

根据通风及防排烟模式确定最不利工况,选定最不利的“隧道内存在两列列车,且起火列车的起火部位‘靠近’非起火列车方向的后 3 节车厢”工况(见图 6)。进行火灾烟气流动量化模拟分析,考虑起火列车因故障停滞在距离出口  $300\text{ m}$  的范围内,而此时非起火列车位于隧道中部,防火门的间距为  $200\text{ m}$ ,对疏散最为不利。

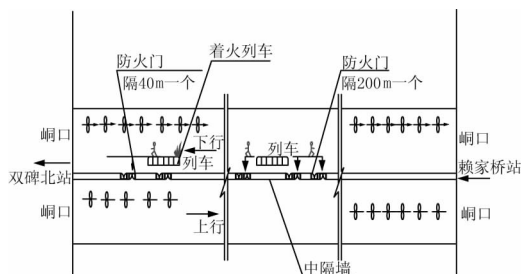


图6 火灾场景示意图

#### 4.2.1 边界条件

列车车体采用不锈钢材质,车内的材料采用不燃或难燃材质。参考国内外其他地铁,确定火灾热释放量为  $7.5\text{ MW}$ 。模拟时间为  $900\text{ s}$ 。

人员无法忍受状态(耐受极限)的判断由下列标准组成:

1) 如果热烟层距隧道路面高度大于  $2\text{ m}$ ,则热烟层的温度不超过  $180\text{ }^\circ\text{C}$ ;

2) 如果热烟层距隧道路面高度小于 2 m, 则热烟层的温度不超过 60 ℃, 且能见度不小于 10 m;

3) 在烟气的吸入高度内, CO<sub>2</sub> 体积分数不得超过 1%, CO 体积分数不得超过  $2.500 \times 10^{-6}$ 。

#### 4.2.2 场景的选择

在最不利工况下选择了两个火灾场景:

1) 起火点位于靠起火列车疏散端门最近的第 4 节车厢, 用于分析起火后烟气是否会对起火列车疏散端门的人员疏散造成影响。

2) 起火点位于距非起火列车最近的最后一节车厢, 用于分析起火后烟气向下蔓延是否会威胁到下游的非起火列车的人员疏散安全。

列车乘客疏散主要通过列车的前后两个端门, 疏散场景选择两个:

1) 起火列车一端被烟气覆盖, 乘客从迎风面一端的端门疏散至轨面, 再通过隧道中隔墙防火门疏散至另外一条隧道, 防火门之间的间隔为 40 m。

2) 列车起火后, 需要经过一段时间方才蔓延至非起火列车所在的位置, 非起火列车在火灾初期阶段两个端门均处于安全状态, 乘客通过前后两个端门疏散至轨面, 再通过中隔墙防火门疏散至另外一条隧道, 防火门之间的间隔为 200 m。

### 4.3 论证结果

#### 4.3.1 FDS 烟流模拟

图 7~9 给出了火灾场景 2) 起火列车不同区域的烟流风速矢量分布图。从图中可以看出, 火灾发生 300 s 时, 列车上游的风速为 2.5 m/s 左右, 无回流; 起火区域附近的风速较为稳定, 列车所在

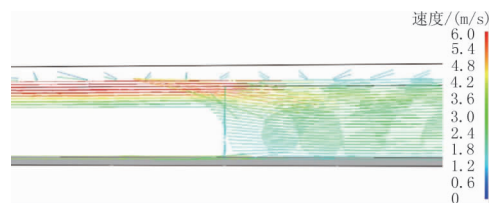


图 7 起火列车上游附近的风速分布 (300 s)

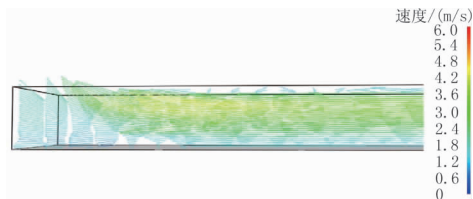


图 9 隧道尾部的烟流风速分布 (300 s)

区域受列车的截流效应, 风速较大, 达到了 6.0 m/s, 烟气受送风气流的抑制, 流向隧道下游, 隧道下游截面增大, 烟气流速迅速减小; 隧道尾部区域的风速较为稳定, 平均风速约为 3.5 m/s。

经过模拟计算得到烟气从起火列车蔓延至非起火列车的时间为 859 s<sup>[3]</sup>。

#### 4.3.2 STEPS 疏散模拟

对非起火列车在两个端门开启情况下的疏散完成过程进行疏散模拟, 得到非起火列车人员疏散完毕所需时间为 743 s。即在烟气到达非起火列车之前, 非起火列车的人员可以通过防火门疏散到另一安全隧道内。

#### 4.3.3 结论

经过 FDS 烟流模拟及 STEPS 疏散模拟, 得出以下消防性能化论证结论:

1) 对于中梁山地铁长大山岭隧道, 采用射流风机能够有效抑制烟气回流, 起火列车上的乘客可以从起火列车上游进行安全疏散。

2) 在最不利情况下, 非起火列车乘客在烟气前锋面尚未到达前可全部疏散至另一非火灾隧道。

### 5 结语

中梁山地铁长大山岭隧道的通风及防排烟系统方案经过消防性能化论证, 证明是合理可行的, 同时这个方案的实施关键是防灾预案及运营管理的支持。对于地势复杂、山体较多的城市, 类似的地铁长大山岭隧道将日益增多, 本工程在通风及防排烟系统方案方面开拓了设计思路, 提供了新的设计理念, 可供参考借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 北京城建设计研究总院. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003
- [2] 中华人民共和国公安部. GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006
- [3] 谢元一. 中梁山隧道火灾通风排烟数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(9): 765—767

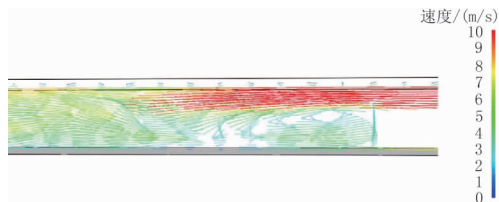


图 8 起火区域附近的风速分布 (300 s)