

长大双层隧道重点排烟系统可靠性研究

侯剑锋

[上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200335]

摘 要: 双层隧道受限于盾构尺寸及周边环境条件,其通风及排烟条件不佳。如何确保工程通风消防安全是确保工程运营安全必须要解决的问题。现通过目前已通车的国内长度最长的双层隧道工程——上海北横通道工程开展相关研究。该工程在阻塞工况下采用了重点排烟方案,特别是下层排烟风道受结构空间尺寸的制约,设置条件非常局促。为验证该重点排烟系统的可靠性,通过采用数值模拟、模型试验等手段进行多工况的计算、分析、对比,确定重点排烟相关设计参数,并验证了排烟效果,确保隧道火灾工况下人员疏散安全。

关键词: 双层隧道;重点排烟;通风;消防安全

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)05-0180-05

1 概 述

北横通道工程西起北虹路中环线,东至周家嘴路内江路,全长 19.1 km,是上海中心城区北部的小客车专用通道。北横通道主线规模为双向 4 车道+两侧集散车道或紧急停车带,全线地下隧道段长约 14.7 km,高架段长约 3.1 km;还有 1.3 km 为地面道路扩容+节点下立交段。主线隧道为外径 15 m 盾构法隧道实施,采用单管双层布置(见图 1)。

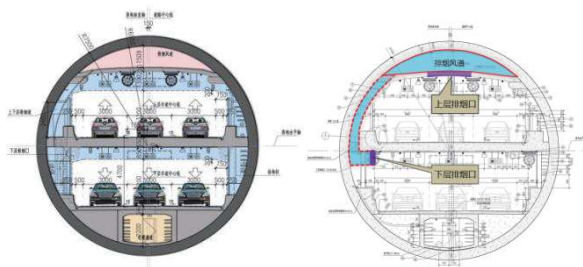


图 1 双层隧道断面图

隧道的消防排烟，根据车辆行驶条件分别采用不同的方案：

(1)当隧道内车流畅通时(车速 >20 km/h),采用常规的纵向排烟的模式(见图2)。

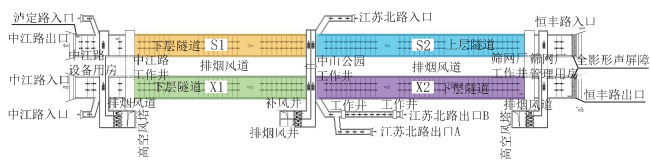


图2 车流畅通时火灾排烟区段划分示意图

(2)当隧道内车流阻塞时(车速 20 km/h),采用重点排烟的模式(见图 3)。双层隧道受结构空间的制约,排烟风道设置比较局促。北横通道利用顶部空间设置了集中排烟风道,风道面积 9 m²,上层车道通过顶部排烟口排烟,下层车道需通过穿越上层车道的排烟支管进行排烟。排烟道及支管上设可自动开启的排烟阀。火灾时,根据火灾发生地点打开相应区段的排烟阀,以及相应工作井内的重点排烟风机,进行重点排烟,控制烟气的蔓延,补风采用匝道、峒口自然补风与轴流风机机械补风相结合方式。

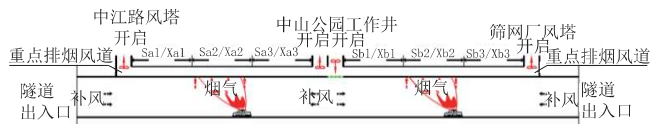


图 3 火灾工况重点排烟示意图

考虑到双层隧道的重点排烟模式应用案例较少,特别是采用支管排烟目前国内尚没有工程实例,是否能确保火灾工况的消防安全对于长大双层隧道工程运营安全至关重要。在工程研究过程中,通过采用数值模拟+模型试验等手段进行了多工况计算、分析。现就研究开展的相关工作及结论进行论述^[1-6]。

2 火灾模拟参数确定

考虑双层盾构隧道为小客车专用快速路,禁止货车、载重车等大型车辆通行,根据国际道路协会(PIARC)对不同火灾场景热释放率的推荐取值,计算中考虑3辆小轿车失火的不利工况,火灾热释放率取为8 MW。

根据美国消防协会标准(NFPA),将火灾定义为

收稿日期：2022-01-07

基金项目：上海市科研计划资助项目(15DZ1203802)

作者简介:侯剑锋(1977—),男,硕士,高级工程师,从事隧道地下工程研究、管理工作。

四种标准火源,即:慢速火、中速火、快速火和超快速火。根据隧道内火灾燃烧特点,火灾类别定为超快速火,结合 NFPA 火源功率发展规律公式 $Q=at^2$,按超快速火火灾增长系数 α 取为 0.187,经计算 $t=206\text{ s}$ 。

考虑北横通道限定通行汽车类型为城市小型汽车,数值模型中火源尺寸确定为 3.5 m(长)×1.5 m(宽)×0.5 m(高)。

根据上海市《道路隧道设计标准》(DG/TJ 08—2033—2017),火灾工况时,隧道内乘行人员的安全疏散时间不宜小于 15 min,数值模拟时间设定为 900 s。

3 隧道烟控系统环境安全评价指标

借鉴《公路隧道通风设计细则》和上海市《道路隧道设计规范》对隧道排烟系统的规定,确定数值模拟中隧道排烟系统有效性的判断标准为:

- (1)温度标准,在疏散时间内隧道 2 m 高度处的温度不大于 60℃。
- (2)能见度标准,在疏散时间内隧道 2 m 高度处能见度不小于 10 m。
- (3)烟气毒性标准,采用简化方式,即如果发射发光物体能见度不小于 10 m,可视各种毒性燃烧产物的体积分数在 30 min 内不会达到人体的耐受极限。
- (4)排烟系统排烟效率,即单位时间内排烟量之和占烟气总生成量的比值不低于 90%。

4 数值模拟计算

根据北横通道实际情况,按 1:1 建立隧道数据模型,采用 FDS(Fire Dynamics Simulator)软件进行数据模拟计算,如图 4 所示。

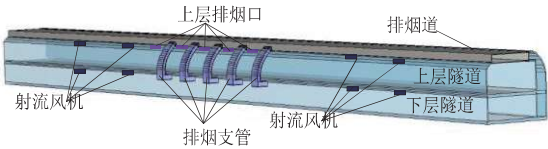


图 4 北横通道隧道火灾 FDS 数值模型

由于下层采用排烟支管进行排烟的方案为目前国内首次采用,且由于通行小车,结构净空小,如何确保采用排烟支管方案能达到可靠的排烟效果,相关排烟支管的间距、断面面积、开启数量等设计参数需要通过数值模拟计算进行对比分析后确定。因此,需要重点对下层隧道排烟方案进行模拟对比分析。以下是数据模拟计算所采用的工况以及相关计算结论。

4.1 排烟量大小

排烟量的大小与排烟风道的面积、风速等设计参数有关。考虑到隧道断面尺寸已确定,排烟风道面积调整余地不大,是否能在既有的排烟风道面积条件下,通过采取合适的风速确保排烟效果是隧道排烟方案能否成立的关键。计算中通过对 30 m³/s 及 45 m³/s 的排烟量进行了对比计算。计算结果表明,排烟量采用 30 m³/s 时,由于排烟量偏小,总体排烟率仅能达到 76.6%,烟气蔓延长度超过 380 m,2 m 高度处的温度出现大于 60℃的区域约 320 m,隧道内 2 m 高度处的能见度小于 10 m 的区域约 280 m,可以判断此种工况下,隧道内环境条件对人员安全疏散十分不利。模拟结果如图 5 及图 6 所示。

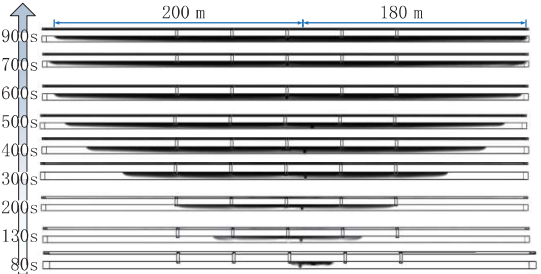
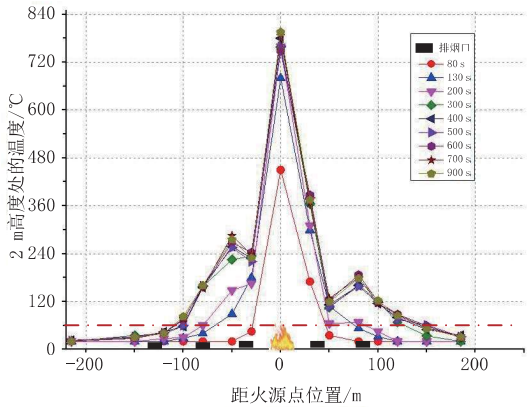
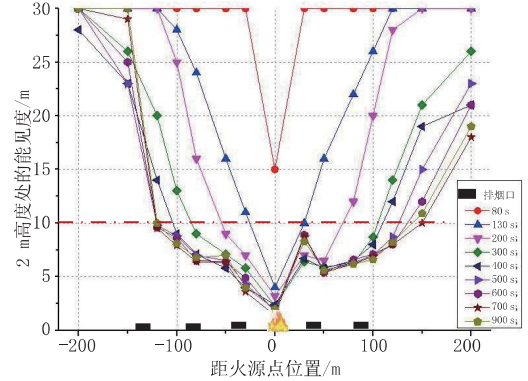


图 5 烟气蔓延分布模拟结果图示



(a) 温度分布



(b) 能见度分布

图 6 隧道 2 m 高度处温度和能见度分布模拟结果图示

考虑到 30 m³/s 排烟量效果不理想,通过加大排烟量至 45 m³/s,模拟计算后,总体排烟效率可以达到

91.9%,烟气控制情况明显好转,基本可满足人员安全疏散的要求。由此,确定隧道重点排烟量为 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算结果对比见表1所列。

表1 排烟量计算结果分析对比表

火源功率 /MW	集中排烟量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	总排烟效率 /%	烟气蔓延长度 /m	2 m 高度处 $>60^\circ\text{C}$ 范围 /m	2 m 高度处能见度 $<10 \text{ m}$ 范围 /m
8	30	76.6	380	320	280
8	45	91.9	315	145	120

4.2 排烟支管断面尺寸

隧道下层排烟风口设于侧墙上,受限于下层隧道的高度,排烟口的尺寸有限。因此,在确保效果的情况下要尽量减小排烟口高度。通过数据模拟分析排烟口不同大小对于烟气控制的影响,以此确定合理的排烟口大小。

实际计算中,在 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 排烟量及同时开启5组排风口条件下,对 $2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 及 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 两种排烟口尺寸进行了对比计算,计算结果见表2所列。

表2 排烟口尺寸计算结果分析对比表

排烟口尺寸	烟气向火源左侧蔓延距离 /m	烟气向火源右侧蔓延距离 /m	烟气蔓延总范围 /m	总排烟效率 /%
$2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$	145	170	315	91.9
$3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$	125	170	295	92.4

根据计算结果, $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 排烟口虽然排烟面积大了50%,但总体排烟效果并没有明显改善,确定排烟口面积采用 $2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。

4.3 排烟支管开启数量

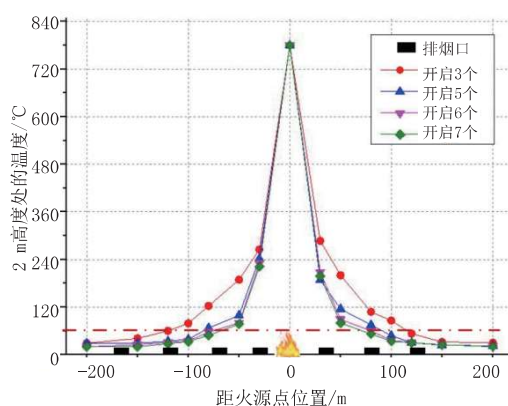
火灾工况下,排烟口开启数量取决于烟气蔓延长度及排烟量。开启数量过少,可能造成烟气排放率过低,排烟效果不理想;开启数量过多,又可能造成误导抽吸,反而扩大烟气蔓延范围。通过对火灾工况下排烟口开启数量多少进行模拟计算分析,以确定火灾工况下合理的排烟口开启数量。

计算中,对火灾工况下开启3、5、6、7个排烟口四种工况下的烟气情况进行了模拟。计算结果如图7所示,汇总结果见表3所列。

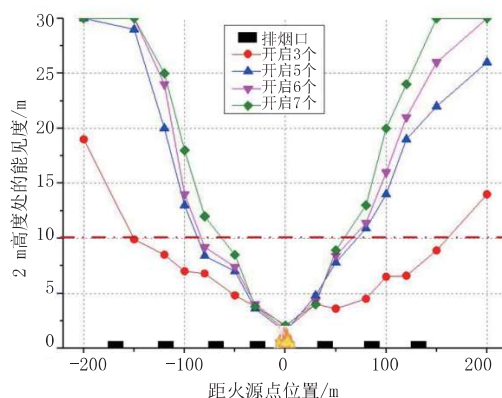
计算结果表明,排烟口需开启5个以上方可满足安全疏散要求;排烟口开启数量过多对总排烟效率提升不大,建议按开启5~6个排烟口制定排烟方案。

5 模型试验

北横通道下层隧道采用侧排烟口和排烟支管的集中排烟系统形式在国内尚属首次。为更加科学准



(a)温度分布对比



(b)能见度分布对比

图7 隧道2 m高度处温度和能见度分布对比图

表3 排烟口开启数量计算结果汇总表

排烟口开启个数 /个	烟气向火源左侧蔓延距离 /m	烟气向火源右侧蔓延距离 /m	烟气蔓延总范围 /m	总排烟效率 /%
3	>200	>200	>400	71
5	145	170	315	91.9
6	135	145	280	93.2
7	155	145	300	94.5

确验证该排烟系统的有效性,又采用了缩尺实体模型试验进行验证研究。

5.1 试验模型及工况

根据数值模拟计算,烟气扩散范围一般要到300 m。为完整模拟烟气情况,模型尺寸长度需达到300 m以上。考虑到试验场地条件限制,确定模型比例采用1:15,总体模型长度为20 m,隧道直径为1 m,试验材料考虑到试验温度达到 600°C 以上,采用了钢化玻璃材料,隧道缩尺模型见图8所示。

5.2 数值模拟对比

考虑到模型试验尺寸小,虽根据相似准则进行了模型尺寸及相关试验参数的计算,为进一步验证模型试验相关参数及试验结果与全尺寸模型的一致性,通过对模型试验尺寸进行数值模拟,并与全尺寸模型数值模拟结果对比的方法进行验证。



图 8 隧道缩尺模型(1:15)之实景

当排烟量为 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 时(缩尺排烟量为 $124\text{ m}^3/\text{h}$),缩尺模拟烟气扩散 50 s 、 100 s 、 200 s 结果如图 9 所示,小尺寸模型在 $100\text{ s}\sim 200\text{ s}$ 左右烟气扩散即达到稳定阶段。

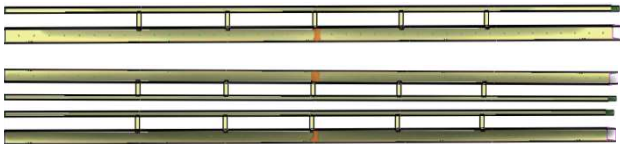


图 9 缩尺模型数值模拟烟气流动图

全尺寸模型在 0 s 、 300 s 、 600 s 时的烟气扩散见图 10 所示。 600 s 时已进入稳定阶段。



图 10 全尺寸模型数值模拟烟气流动图

同时,对模拟计算结果中温度及烟气蔓延速度进行对比,对比结果见表 4 及表 5 所列。

表 4 温度对比表

距离 /m	-90	-60	-30	0	30	60	90
全尺寸模型温度 / $^{\circ}\text{C}$	30.8	35.7	32.2	849.3	30.6	36.5	31.2
缩尺模型温度 / $^{\circ}\text{C}$	28.8	35.8	39.0	481.4	38.5	36.9	29.2
温差 / $^{\circ}\text{C}$	2.0	0.1	-6.8	367.9	-7.9	-0.4	2.0

表 5 蔓延速度对比表

排烟量 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	蔓延距离 /m	时间 /s	速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
缩尺	10	90	0.111
30 对应全尺寸	150	348.6	0.430
全尺寸	150	408	0.368

模拟对比计算表明,稳定时间与中心最高温度两者计算结果有所差异,其余包括蔓延范围、总体模型温度、蔓延速度等指标基本与相似准则计算结果一致,可认为缩尺模型可以反映实体情况。

5.3 模型试验结果

考虑到模拟试验中,排烟支管位置可以方便调整,试验中增加了对不同排烟支管间距的对比试验。同时考虑排烟口尺寸及排烟速率的不同组合,共进

行了 13 个不同工况的试验。
以下试验结果为选取 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 排烟量工况下,支管间距为 30 m 时的试验结果。其中,左图为近端视角,右图为远端视角(见图 11、图 12)。



图 11 点火后 78 s(实际火灾发展 5 min)试验结果图示

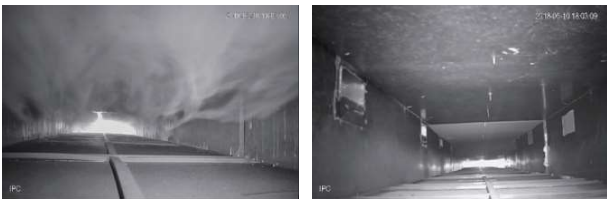


图 12 点火后 155 s(实际火灾发展 10 min)试验结果图示

该工况试验结果表明,点火初期阶段(点火后 78 s ,实际火灾发展 5 min),火焰明晰且烟气传播距离较小,烟气层稳定,烟气流动均到达近端摄像头(5 m)处,各工况烟气未见明显差异;点火后 155 s (实际火灾发展 10 min),近端视角层状烟气愈加明显,烟气已产生一定程度的扰动,对能见度产生了一定影响。远端视角各试验工况均未见明显烟气。

同时,通过模型试验结果与数值模型模拟结果对比,两者数值形态及规律基本一致,选取通风量 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 、支管间距 30 m 工况对比结果见图 13 所示。其中,上图为模型试验结果,下图为数值模型模拟结果。

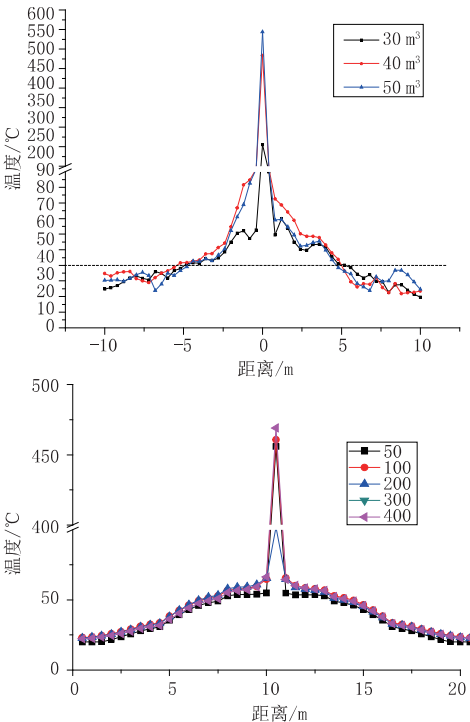


图 13 点火后 155s 沿隧道纵向温度分布结果对比图

通过多工况模型试验,验证了排烟支管在火灾工况下的试验结果与数值模拟计算结果基本一致,证明通过数值模拟可以有效地分析火灾工况下隧道烟气扩散情况,并通过多工况的模拟对比分析,确定最优工程控烟方案。同时,模型试验也可以直观了解在火灾工况下的烟气扩散、分层情况,为制定及验证人员疏散方案提供依据。在无法进行实体试验时,通过缩尺模型试验已达到模拟实际火灾工况的精度要求。

6 结 语

北横通道工程在研究过程中,为设计出合理可靠的排烟方案,采用数值模拟、缩尺模型试验等多种手段,通过对不同的火灾释放率、多组合排烟支管方案、多种控烟方案等多种火灾工况的模拟分析,

确定了隧道重点排烟量为 $45 \text{ m}^3/\text{s}$,排烟口断面采用 $2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,火灾时开启 5~6 个排烟口。该消防排烟能力可满足规范规定的人员安全疏散要求。

参考文献:

- [1] 王兆阳,朱合华,闫治国,郭庆华,王曦.双层盾构隧道支管排烟量数值模拟[J].消防科学与技术,2018,37(2):177-180.
- [2] 温竹茵.双层盾构隧道火灾排烟方式研究[J].城市道桥与防洪,2017(4):240-244+24.
- [3] 沈奕.城市长大公路隧道火灾纵向排烟分析研究[J].低温建筑技术,2017,39(11):33-37.
- [4] 王曦.长大隧道的安全疏散设计.地下工程与隧道[J],2007(3):27-28.
- [5] 胡滢之.双层双向盾构法隧道横断面的创新设计[J].中国市政工程,2010(S1):1-3+142.
- [6] 曹文宏,郑晋丽.长大隧道全比例火灾试验[C]//地下工程建设与和谐发展—第四届中国国际隧道工程研讨会文集,2009:110-123.

~~~~~  
(上接第 167 页)

员包括各单位负责人与相关工艺(管线)、土建、设备、仪表自控等技术专业人员。负责设备调试、试运行工作的技术总工应具备 15 年以上设备调试经验,现场调试操作人员应接受过相关岗位培训,同时成立设备保障、配合小组,确保调试工作顺利进行。操作班组根据运行需要确定人数与班制,本次初步采用三班二运制,每班 12 人。

## 4 结 语

前期试验确定了  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{CaO}$  的最佳投加量以及最佳脱水性能时的污泥含水率等,为工程建设及处理工艺提供了理论数据基础和技术支持;整机吊装

解决了工期紧、现场干扰多、设备部件组装受限等问题;调试工作确保了系统的稳定运行与自动控制的可靠性。希望以上内容能为今后污泥深度脱水工程提供借鉴与参考。

### 参考文献:

- [1] 潘旭东.对城市污水污泥的深度脱水技术的探讨[J].能源与节能,2021(12),74-76.
- [2] 施横寿.污泥深度脱水药剂及其在改善污泥脱水性能中的应用[J].化工设计通讯,2021(12),74-76.
- [3] 姜惠民,朱芬芳,梁远,等.市政污泥深度脱水药剂优化研究[J].环境工程学报,2014,8(2):701-702.
- [4] 严卓军.污水处理厂提标改造中关键设备设计、选型、安装及运行调试[J].节能与环保,2021(47),178-179.