

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.251009

漕宝路隧道消防疏散设计分析

王艺平

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 针对漕宝路隧道超长单孔双层结构的特性,消防疏散设计采用“竖向疏散+车行救援”的方案,但现行规范对竖向疏散楼梯间距没有明确规定。为解决楼梯间距量化问题,首先对漕宝路隧道消防疏散设计进行定性和定量分析,然后模拟不同疏散楼梯间距下人员疏散的情况。结果表明:在竖向疏散楼梯间距>92 m 的情况下,一旦发生火灾,在安全出口受火灾烟气影响失效前人员无法完成全部疏散。最后从项目整体消防安全角度出发,在维持现有主动与被动防火措施的基础上,提出消防疏散设计的建议。

关键词: 消防疏散;定性分析;定量分析;模拟分析

中图分类号: TU92 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)06-0290-06

Design and Analysis on Fire Evacuation of Caobao Road Tunnel

WANG Yiping

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Based on the characteristics of ultra-long single-bore double-deck structure of the Caobao Road Tunnel, the “vertical egress + vehicular rescue” scheme is adopted in the design of fire evacuation. However, there are no clear regulations on the spacing of vertical evacuation stairs in the current codes. To quantify the spacing of the stairs, firstly, the qualitative and quantitative analyses on the design of fire evacuation for Caobao Road Tunnel are conducted. And then the situation of personnel evacuation under different spacings of evacuation stairs is simulated. The result shows under the condition of the vertical evacuation stairwell spacing >92 m, all personnel cannot complete the evacuation before the safety exits fail due to the influence of fire smoke in the event of a fire. Finally, from the perspective of the overall fire safety of the project, the suggestions for fire evacuation design are put forward on the basis of maintaining the existing active and passive fire prevention measures.

Keywords: fire evacuation; qualitative analysis; quantitative analysis; simulation analysis

0 引 言

漕宝路快速路新建工程(见图 1)是上海市的重大工程之一,其全长约 7.2 km,采用“隧道+高架”的组合形式,其中隧道段长度为 5.1 km。主线设计车速为 60 km/h,采用双向 6 车道,快速路主线为小客车通行标准,通行净空高度为 3.2 m。

漕宝路隧道属于超长隧道,消防疏散设计需进行专题分析研究^[1]。由于漕宝路的盾构隧道具有单孔双层结构的特性,疏散横通道^[2]无法设置,因此,设计采用了“竖向疏散+车行救援”的消防疏散方案。然而,现行规范^[3-4]对单孔双层盾构隧道竖向疏散楼梯间距^[5]没有明确规定。为解决核心规范空白的问题,

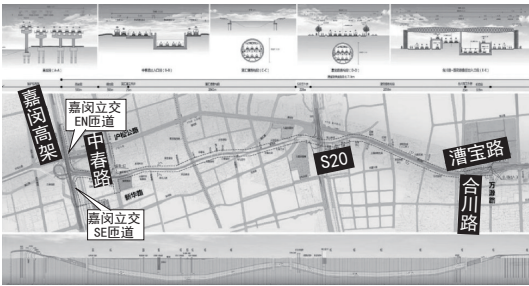


图 1 漕宝路快速路新建工程范围示意图

题,本研究采用“定性+定量+模拟”^[6]的综合分析方法,为该隧道疏散设计提供楼梯间距量化技术支撑。主要内容包括以下 5 个方面:一是工程概况介绍;二是消防疏散定性分析;三是消防疏散定量分析;四是人员疏散模拟分析;五是从项目整体消防安全角度出发,提出消防疏散设计的结论与建议。

1 工程概况

漕宝路隧道工程(见图 2),西起中春路,下穿蒲

收稿日期: 2025-10-27
基金项目: 上海市政总院科研项目(K2025J008-1A)——K25 低空飞行管理 A
作者简介: 王艺平(1977—),男,硕士,高级工程师,从事建筑设计工作。

汇塘河道及外环,东至万源路,主线为单孔双层隧道,上层为东向西3车道,下层为西向东3车道。



图2 隧道总体布置图

隧道全长约5.1 km,共设3组(4个)工作井(蒲汇塘工作井、外环1#工作井、外环2#工作井和合川路工作井),串联起主线的2段盾构和3段明挖。其中,盾构段总长约为4 194.1 m,其余为明挖段。

1.1 建筑限界

漕宝路隧道按城市快速路标准设计,为小车专用通道。主线设计时速为60 km/h,双向6车道(上层3车道、下层3车道),进、出口匝道建设规模为“单车道+紧急停车带”。

车行道建筑限界宽度为 $9\text{ m}+(0.25\text{ m}+0.5\text{ m})\times 2=10.5\text{ m}$;车行道建筑限界高度为3.2 m。

1.2 隧道横断面

隧道横断面形式根据施工方法和功能要求,分为圆形盾构断面形式和明挖矩形断面形式。主线主要采用圆形盾构断面形式,双层结构,双向6车道,盾构外径为15 m,管壁厚度为0.65 m,内径为13.7 m。出、入口敞开段和暗埋段,以及匝道段,均为明挖矩形断面形式。

2 消防疏散定性分析

2.1 基本分析前提

漕宝路快速路隧道消防疏散分析研究^[7]应基于以下4项基本前提:一是考虑同一时间只发生1处火灾情况;二是考虑分段纵向排烟系统无法启动时的最不利情况;三是依据《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014),阻塞车流密度指标取165 pcu/km;四是按照平均每辆车1.5人计算。

2.2 被动防火措施

2.2.1 耐火极限

隧道承重结构体的耐火极限,应符合《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014)(2018年版)附录C的规定。

隧道内的地下设备用房、风井和消防救援出入口的耐火等级为一级,地面设备用房、运营管理中心

及其他地面附属用房的耐火等级不低于二级。

除嵌缝材料外,隧道内部装修材料均采用不燃材料。

2.2.2 防火分区

(1)隧道主体:隧道上层和下层的车道分别为独立的防火分区,在S20救援坡道处设置3 h耐火极限特级防火卷帘。

(2)地下设备用房:1个分区面积不大于1 500 m²,防火分区的安全出口为2个。

(3)电缆通道层:每200 m设1道防火墙,墙上开甲级防火门。

2.2.3 消防疏散与救援

与其他隧道工程相比,漕宝路隧道工程在逃生救援方面具有特殊性。由于本方案采用单孔盾构双层结构形式,且在蒲汇塘河道下方有较长一段盾构隧道穿行,无法实现传统人行横通道的横向疏散逃生模式,因此,疏散设计采用了“竖向疏散+车行救援”的方案。但关于竖向疏散楼梯的间距,现行规范没有明确规定。

(1)人员疏散

解读上海市的地方标准《道路隧道设计标准》(DG/TJ-8-2033-2017)第17.3.2条的要求,当设置泡沫—水喷雾联用灭火系统时,应在上下2层车道之间设置封闭楼梯间,以应对灾时人员疏散(见图3)。楼梯间距不大于120 m,梯段净宽不应小于0.8 m,梯段坡度不大于60°。在矩形明挖段,也应设置上、下层疏散楼梯,楼梯净宽为1.2 m。

规范没有强制要求设置人行横通道,允许通过消防楼梯进行上下层之间的竖向疏散,同时设置泡沫—水喷雾联用灭火系统,最大限度地保障人员安全地疏散至另一层安全地带。

本研究假设:同一条隧道同一时间内只发生1次火灾,即当有某一层隧道孔发生火灾时,通过间隔小于120 m的封闭楼梯间,人员可以疏散到另一层车道内,然后通过最近的匝道和工作井内的消防楼梯,疏散到地面上的安全地带。

120 m楼梯间距为规范规定的最低要求,具体的设计数值成为分析的重点。

本研究对不同疏散楼梯间距下的人员疏散情况进行模拟分析,为漕宝路盾构隧道标准段的疏散设计提供关键的量化依据^[8]。

(2)车辆疏散

事故(包括非火灾事故)发生时,往往会阻塞某

3.3 火灾发生频率

隧道火灾与隧道规模、隧道内行车方式、隧道交通量、隧道管理方式及水平等因素有关。隧道火灾发生频率^[12]可以按公式(1)进行统计计算:

$$F_f = N_f / (365 \times T \times n) \tag{1}$$

式中: F_f 为隧道火灾频率; N_f 为统计期内隧道发生火灾事故的次数; T 为隧道日交通量; n 为统计年数。

目前,上海地区已投入使用的特长隧道,其火灾发生频率非常低,且发生的火灾均在可控范围内。综合考虑全球范围内隧道火灾发生数据,漕宝路快速隧道发生火灾的频率可能为 0.33 ~ 25 次/(亿车·km)。漕宝路快速隧道交通量取 2036 年嘉闵高架—外环高速(S20)交通量,即 3 168×24=76 032 pcu/d,隧道长度取 5 100 m,统计年限为 10 年。由此,计算出漕宝路快速隧道 1 年内发生火灾的频率可能为 0.05 ~ 3.7 次/(亿车·km)。

3.4 火灾规模和场景设计

3.4.1 火灾规模

本研究保守考虑火灾未及时得到有效控制的情况,此时,火灾规模将主要取决于火灾荷载的种类、数量等。基于《道路隧道设计标准》(DG TJ 08—2033—2017 J11197—2017)的规定,本研究中火灾规模取值为 8 MW。

3.4.2 火灾场景分析

火灾场景通常考虑 2 种情况:A 类火灾场景(火灾发生几率较高);B 类火灾场景(火灾发生危害最大)。

A 类火灾场景为可信火灾场景,即在隧道内最有可能发生的火灾场景,其分析结果对隧道及消防系统设计参数选取具有指导意义。B 类火灾场景为最不利火灾场景,一般为极端情况下,某个重要消防系统失效时的火灾场景,其分析结果对隧道抗风险能力起到预测和评估作用。

由于隧道人员疏散的特点,本研究考虑灭火系统和纵向排烟不启动时的最不利(B 类)火灾场景,结合隧道的结构特征和疏散出口设置进行消防疏散设计。设计火灾场景情况如表 1 所示。

在场景一至场景八中,火源位置设计为 S20 主线和匝道明挖段(见图 6);在场景九中,火源位置设计为中春路明挖段;在场景十中,火源位置设计为合川路明挖段;在场景十一和场景十二中,火源位置设计分别为盾构隧道标准段下层和上层。

表 1 各区域设计火灾场景情况

编号	功能区	火灾发展速率/ (kW·s ⁻²)	火灾规模/MW	分析目标
场景一	S20 主线 下层明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景二	S20 主线 上层明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景三	S20 合流 匝道明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景四	S20 分流 匝道明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景五	SWS 匝道 明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景六	SNW 匝道 明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景七	SSW 匝道 明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景八	SWN 匝道 明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景九	中春路下层 主线明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景十	合川路下层 主线明挖段	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯或洞口 可用疏散时间
场景十一	盾构隧道 下层	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯可用疏 散时间
场景十二	盾构隧道 上层	0.046 9 快速火	8.0	疏散楼梯可用疏 散时间

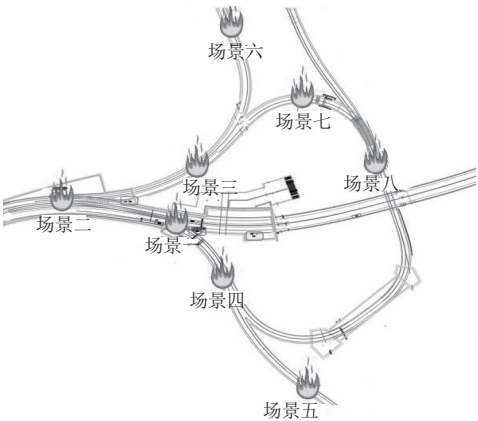


图 6 S20 主线和匝道明挖段火源位置示意图

4 人员疏散模拟分析

本研究采用 Pathfinder 软件对人员疏散进行模拟分析,在分析结果的基础上,对疏散出口设置的合理性和人员疏散的安全性进行评估。

将隧道的 CAD 图纸和一些疏散数据,如疏散人员构成、行为模式、人员密度与行走速度、疏散出口与路径分布等输入 Pathfinder 软件,作为模型构建的参数。关于人员的运动模式,采用行为模型(Steering 模式)进行疏散模拟。该模式是把路径规划、指导机制、碰撞处理结合起来控制人员的运动行

为,它综合考虑了人与人、人与建筑之间的相互作用,能够较为准确地反映火灾发生时人员疏散的真实情景。

4.1 疏散参数设定

4.1.1 疏散人员构成

为表征各类群体在紧急情况下疏散和避难的行为和心理,同时考虑最不利情况,本研究将隧道内发生火灾时逃生人员的构成比例简化为成年男性、成年女性、老年人和儿童各占25%。人体尺寸参考中国人员的体型数据。疏散人员的习惯行为模式是在火源附近楼梯处排队疏散

4.1.2 疏散人员密度与行走速度

各类群体在紧急事件下的疏散速度^[13]与敏捷度存在一定程度的不同,在进行人员疏散模拟分析时,本研究采用国际普遍的建议值^[14](见表2)。

表2 人员疏散行走速度		单位:m/s
人员类型	行走速度	
成年男性	1.25	
成年女性	1.15	
儿童	0.9	
老年人	0.8	

城市隧道的核心功能是通行车辆,人员密度较低,疏散场景楼梯间的人员密度一般为0.37~0.93 m²/人(即1.08~2.70 人/m²),以确保人员安全。基于人员密度与行走速度的关系,楼梯间行走速度按0.5 m/s计算。

4.1.3 疏散出口与路径

疏散出口与路径设置如表3所示,其中,S20主线和匝道明挖段的疏散出口设置如图7所示。

4.2 场景疏散时间模拟结果

场景一至场景十为明挖段,场景十一和场景十二为盾构段,由于盾构内部附属工程均按4 m模数设计,因此,本研究分别选取80、84、88、92、96、100 m的疏散楼梯间距进行模拟。各场景人员疏散时间总结如表4所示。

模拟时,考虑到隧道交通阻滞的情况,以及灭火系统和纵向排烟无法启动的最不利(B类)火灾场景。

由表4可知,盾构段下层所需的疏散时间远长于上层,上层隧道人员疏散较快。这主要原因是上层隧道层高较高(见图3),上部空间起到蓄烟仓的作用,烟气沉降速度较慢,对疏散影响小。

疏散人员的习惯行为模式是在火源附近楼梯处

表3 疏散出口与路径

疏散场景	研究区域	疏散出口与路径
场景一	S20 主线 下层明挖段	人员可从 A、B、C、E、F、G、H、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SWS 和 SWN 洞口疏散
场景二	S20 主线 上层明挖段	人员可从 A、C、D、E、I、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SSW 和 SNW 洞口疏散
场景三	S20 合流 匝道明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、I、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SSW 和 SNW 洞口疏散
场景四	S20 分流 匝道明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、F、G、H、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SWS 和 SWN 洞口疏散
场景五	SWS 匝道 明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、G、H、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SWN 和 SWS 洞口疏散
场景六	SNW 匝道 明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、I、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SSW 和 SNW 洞口疏散
场景七	SSW 匝道 明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、I、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SSW 和 SNW 洞口疏散
场景八	SWN 匝道 明挖段	人员可从 A、B、C、D、E、F、G、H、DD1、DX1 疏散楼梯以及 SWN 和 SWS 洞口疏散
场景九	中春路 明挖段	人员可从 A、B、C、D、DX1 疏散楼梯以及 ZCX 洞口疏散
场景十	合川路 明挖段	人员可从 A、B、DX1 疏散楼梯以及 HCX 洞口疏散
场景十一	盾构隧道 下层	人员经疏散楼梯就近疏散至上层
场景十二	盾构隧道 上层	人员经疏散楼梯就近疏散至下层

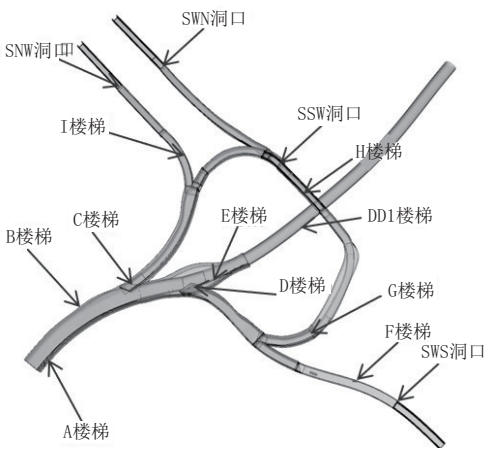


图7 S20 主线和匝道明挖段疏散出口设置

排队疏散。当下层隧道楼梯间距设计为96 m时,模拟中有人不能在烟气沉降前就近安全地疏散,从而寻找离火源较远的楼梯进行疏散,导致疏散时间产生显著差异。

通过人员疏散模拟软件的分析,本研究得到火灾发生时所需的总安全疏散时间(RSET),将其与可提供安全时间(ASET)进行比较后可知:在96 m楼梯间距和100 m楼梯间距情况下,在安全出口受火灾烟气影响失效之前,人员无法完成全部疏散。

表 4 各疏散场景下疏散时间总结

疏散场景	研究区域	探测报警时间/s	疏散预动作时间/s	疏散行动时间/s		总疏散时间/s
				模拟结果	1.5 安全系数	
场景一	S20 主线下层明挖段	60	120	137	205.5	385.5
场景二	S20 主线上层明挖段	60	120	88	132	312
场景三	S20 合流匝道明挖段	60	120	88	132	312
场景四	S20 分流匝道明挖段	60	120	95	142.5	322.5
场景五	SWS 匝道明挖段	60	120	38	57	237
场景六	SNW 匝道明挖段	60	120	88	132	312
场景七	SSW 匝道明挖段	60	120	39	58.5	238.5
场景八	SWN 匝道明挖段	60	120	180	270	450
场景九	中春路明挖段	60	120	126	189	369
场景十	合川路明挖段	60	120	110	165	345
场景十一 92 m 间距	盾构隧道下层	60	120	154	231	411
场景十一 96 m 间距	盾构隧道下层	60	120	282	423	*603
场景十一 100 m 间距	盾构隧道下层	60	120	295	442.5	*623
场景十二 92 m 间距	盾构隧道上层	60	120	107	160.5	340.5
场景十二 96 m 间距	盾构隧道上层	60	120	116	174	354
场景十二 100 m 间距	盾构隧道上层	60	120	116	174	354

注:“*”表示失效场景。

4.3 敏感性分析

上述模拟结论是基于 2.1 节的基本分析前提、3 节的定量分析、4.1 节的疏散参数设置,以及 4.2 节的探测报警时间 60 s 和疏散预动作时间 120 s,通过分析软件计算得出。在维持现有主动与被动防火措施的条件,该结论是稳健的;若以上分析条件发生变化,则需重新模拟分析。

5 分析结论与建议

5.1 结论

通过“定性+定量+模拟”^[6]的综合分析,结果表明:在隧道盾构标准段竖向疏散楼梯间距>92 m 的情况下,在安全出口受火灾影响失效前人员无法完成全部疏散。

隧道具有结构狭长、净空高度相对较小、蓄烟能力较差的特性,本研究通过分析 12 种火灾场景下受影响区域每部楼梯的可用安全疏散时间,可知火源附近的疏散楼梯受火灾烟气影响较快,可用安全疏散时间一般不超过 5 min。因此,拥堵路段内的人员应尽可能避免在火源附近的楼梯处排队,以防延误最佳逃生时机。火源附近的疏散楼梯可用疏散时间较少,若楼梯间距较大,则将导致人员无法在烟气下降前完成疏散,此时,在模型内增加合理的诱导系统,让人员向离火源较远的楼梯处疏散,能够降低人员疏散所需的总时间。

当楼梯间距>92 m 时,若火源点正好位于 2 部

楼梯之间,人员到达最近的安全出口的疏散距离为 46 m,模型显示的最不利情况下,人员行动时间约为 60 s(考虑老年人疏散速度为 0.8 m/s),基于报告的参数设置,此时整体人员疏散所需的时间为 60 s+120 s+60 s×1.5=270 s,非常接近平均临界时间 5 min(300 s);若火源不是均匀分布,则离火源较近一侧的楼梯疏散情况会更加不利。因此,建议隧道盾构标准段内的楼梯间距设计为 92 m。

5.2 建议

从项目整体消防安全角度出发,在维持现有主动与被动防火措施的基础上,基于以上分析,本研究对漕宝路隧道消防疏散设计提出 3 点建议。

5.2.1 加强隧道内火灾探测报警系统设置

目前,隧道内车行道区域设置了“感温光纤+火焰探测器”组合布置的探测系统。基于模拟分析及类似的隧道设计,建议隧道内每隔 200 m 设置电子信息板,当火灾发生时,将其与消防系统联动,提示附近楼梯的拥堵情况,并通过语音提示:“避免就近楼梯排队,请速向前疏散!”提示音量不低于 85 dB。

5.2.2 加强疏散应急照明和疏散指示标志设置

为便于人员疏散,疏散应急照明的地面最低水平照度不低于 5 lx;疏散标志应选用大型或特大型规格;配合电子信息板设置显示安全距离的标志。

5.2.3 制订不同情况下的应急预案

在隧道运营^[15]中,应制订不同情况下的应急预案并配备微型消防站。综合考虑人员疏散与车辆救(下转第 376 页)