

越江公路隧道逃生区段设计

姚聪璞, 黄宏伟, 袁 俊

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 如何在隧道设计阶段就考虑到运营中可能发生的火灾概率及损失, 结合人员逃生的速度及时间, 进行火灾逃生区段的设计成为一个亟待解决的问题。在城市公路隧道火灾条件下, 分析在一定时间内的三个关键影响因素——隧道内温度、有害气体浓度和能见度对疏散人员的生命造成的威胁, 以及安排疏散人员迅速撤离至安全区域的措施。以上海—越江隧道工程为例, 尝试运用火灾模拟软件 FDS 通过模拟隧道火灾发生时烟气状况, 得到危险条件临界时间 T_{fire} ; 结合隧道火灾时人员疏散模型 Tunev 模拟火灾发生时人员逃生所需要的安全疏散时间 $T_{evacuate}$ 与逃生滑梯通行能力, 并以此来确定隧道疏散口间距与口部尺寸的初步设计, 完成逃生区段的设计方案。研究旨在对隧道的逃生救援口部设计提供一定的指导。

关键词: 隧道工程; 隧道火灾; 逃生救援; 人员疏散; 逃生通道设计

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3659 - 09

FIRE-PROOF SECTION DESIGN OF RIVER-CROSSING ROAD TUNNELS

YAO Congpu, HUANG Hongwei, YUAN Jun

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Tunnel fire becomes a hot issue, and the problem how to consider the future fire probability during the design of the tunnel is needed to consider. The fire-proof section has to be planned according to staff escape speed, but also depending on the essential time of escape. Three important factors of tunnel fire, i.e. the temperature, concentration of carbon monoxide(CO) and visibility, which will threaten people's lives seriously, are analysed. It is a key of evacuation route design to make people escape from dangerous area safely in a certain time. So the time when temperature, visibility and consistency of carbon monoxide in tunnel menace people's lives is also studied. From this point of view, adopting computational fluent dynamics software FDS and evacuation model Tunev(tunnel evacuation), the available safety egress time(ASET)and required safety egress time(RSET) with the example of Shanghai river-crossing road tunnel are simulated. Then, the preliminary sketch of the distance of the tunnel evacuation section and the capacity of the escaping staircase are also presented. Finally, the fire-proof section is designed, which may provide some references to the escape-rescue design of tunnels.

Key words: tunneling engineering; tunnel fire; escape-rescue; staff escape; escape passage design

1 引 言

城市公路隧道作为立体交通方式之一, 可以缓解城市交通的压力, 解决公路、铁路等交通干线跨江越海的限制, 但由于隧道的一维效应以及入洞时

的黑洞黑框效应、洞内的边墙效应, 使其成为交通事故多发段, 极易引发火灾。根据欧洲隧道统计资料, 公路隧道发生火灾概率为 1 次/(10^7 车·km)^[1], 尽管其发生概率相对较小, 但火灾烟雾流程对人员的疏散造成了极大的困难, 所造成的影响和损害十分巨大。其主要原因^[2]在于: 火灾产生的高温烟气

收稿日期: 2007 - 06 - 13; **修回日期:** 2007 - 07 - 22

基金项目: 国家科技支撑计划——城市地下空间防灾减灾技术研究(2006BAJ27B04)

作者简介: 姚聪璞(1983 -), 女, 2005 年毕业于同济大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程风险管理、隧道火灾方面的研究工作。E-mail: congpu@163.com

在移动过程中,向周围不断辐射热量,对人员、结构造成损伤;同时由于火风压的作用,导致隧道内通风系统紊乱;浓烟使得隧道内的能见度降低,造成人员疏散时间延长,增大风险系数;含有有毒气体的烟雾会损害人的视力。因此,世界各国对公路隧道的火灾防治研究非常重视。

近年来国内外公路隧道火灾发生的概率和规模都在加大,造成的损失也在逐年增多。目前针对隧道防火设计的方式主要有2种——横通道与车道板下式逃生救援通道。横通道沿隧道线路方向每隔一定距离设置,通过横向联络通道与相邻主隧道相连通,作为躲避火灾的紧急疏散通道^[3],横通道对原隧道的受力机构不利,在结构上形成缺陷,地质条件较差的情况下应慎重选择。车道板下式逃生救援通道则利用隧道车道板下富余空间建造逃生救援通道,火灾发生时,通过滑梯、楼梯等方式进入逃生通道疏散。随着隧道直径增大与双层隧道应用,原本受隧道直径所制约的车道板下式逃生通道的疏散能力也随即得到改善,而且施工难度低、建造成本低,其逐渐被大量应用在隧道设计中。

目前国内外工程界对于隧道间横通道设置间距并没有统一标准,只是针对具体工程具体的分析。国内工程规范中也仅给出矿山法下公路隧道横通道设置的参考值250~500 m^[4]以及城市水下交通隧道规定的限值250~300 m,而对于车道板下式通道的设置间距及口部大小,国内外均没有相应的规范。

本文将着重于讨论研究车道板下式逃生救援通道的设计,旨在解决两类热点问题:如何才能避免或减少隧道火灾所造成的人员伤亡;怎样才能使人员在危险来临之前疏散到安全地点。本文将从隧道人流量、火灾危险时间的角度出发,对车道板下式逃生救援通道的设计做一些探索,为今后隧道设计提供理论参考,其结论也可沿用至隧道其他逃生救援方式中。

2 逃生救援通道设计原理

2.1 研究思路

本文将通过火灾模拟软件 FDS 进行隧道火灾建模,收集发生火灾时隧道内温度、能见度与 CO 浓度的变化,从而得到危险条件临界时间 T_{fire} 。而人员安全疏散时间 T_{evacuate} 则通过隧道人员疏散模型 Tunev 进行模拟计算,根据隧道内不同种类人群的参数设定,得到所需要的人员安全疏散时间 T_{evacuate} ,

通过调整逃生救援通道口宽度和间距使 $T_{\text{fire}} > T_{\text{evacuate}}$,疏散人员可以安全撤离至安全区域。

2.2 火灾危险临界条件及人员疏散安全性判据

(1) 火灾危险临界条件

在隧道火灾中,高温与烟气是威胁人员安全的主要因素。通过使用 FDS 火灾模拟软件,进行数值求解得到隧道内温度与烟气层各参数随时间的变化。当某些参数增大到一定值时,便会对人员构成危害,因此可以根据有关人员疏散安全的参数,如:烟气层高度、温度、可视度、有害气体浓度等,确定隧道内火灾对人员构成危险的条件^[5]。通过记录可视度、温度、有害气体浓度等关键参数达到危险条件所需的时间,取其中的最小值为危险来临时间 T_{fire} 。

由于人在烟气中的能见度下降,人们被迫在高温和含有有毒气体的环境中延长疏散时间。对于隧道这种狭大空间,可取 10 m 作为人眼特征高度处烟气危险临界能见度。当烟气界面下降到人眼特征高度时,对人的危害将是直接烧伤或吸入热气体引起的。当温度 ≤ 80 °C 时人员有生存可能性;温度 > 80 °C 具有潜在危险甚至死亡,因此可用 80 °C 作为人眼特征高度处烟气危险临界温度。当界面低于人眼特征高度时,也可根据其中有害燃烧产物的临界浓度判定是否达到了危险状态,例如当 CO 浓度达到 $2\ 500 \times 10^{-6}$ 就可对人构成严重危害。

取以上 3 个临界条件中最先达到的那一项作为隧道火灾危险临界条件判据,取 1.5 m 为人眼特征高度平均值^[6]。

(2) 人员疏散的安全性基本判据

隧道发生火灾后,人员能否安全疏散主要取决于两个时间^[7, 8]:一是火灾发展到对人构成危险所需的时间 T_{fire} ,另一是人员疏散到安全场所需要的时间 T_{evacuate} 。如果人员能在火灾达到危险状态之前全部疏散到安全区域,便可认为该隧道对于火灾中人员疏散是安全的。 T_{fire} 可用隧道火灾模拟软件 FDS 模拟得到, T_{evacuate} 由人员疏散模型 Tunev 模拟隧道火灾状态下的人员疏散过程计算得到。从火灾发生到人员疏散结束,一般要经过三个时间段:探测时间 T_{dct} 、反应时间 T_{response} 以及行动时间 T_{travel} 。因此从火灾发生到人员全部疏散为止,其总的疏散时间为

$$T_{\text{evacuate}} = T_{\text{dct}} + T_{\text{response}} + T_{\text{travel}} \quad (1)$$

人员疏散的安全性基本判据为

$$T_{fire} > T_{evacuate} \tag{2}$$

在隧道中每个可能受到火灾威胁的区域都应满足式(1), (2)。可以看出, T_{fire} 越大, $T_{evacuate}$ 越小, 则人员安全性越大, 反之, 安全性越小, 甚至不能安全疏散^[9, 10]。

2.3 FDS 火灾模拟模型的建立

FDS(fire dynamics simulator)模拟软件是美国国家标准研究所(NIST)建筑与火灾研究实验室(BFRL)开发的产品, 是以大涡模拟(LES)为基础的三维计算流体动力学软件(CFD), 可以模拟火灾湍流流动过程。该软件采用数值方法求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程, 重点计算火灾中的烟气和热传递过程。由于 FDS 程序是开放的, 其准确性得到了大量试验的验证。因此, 在火灾科学领域得到了广泛的应用^[11]。图 1 给出 FDS 建模的流程图。

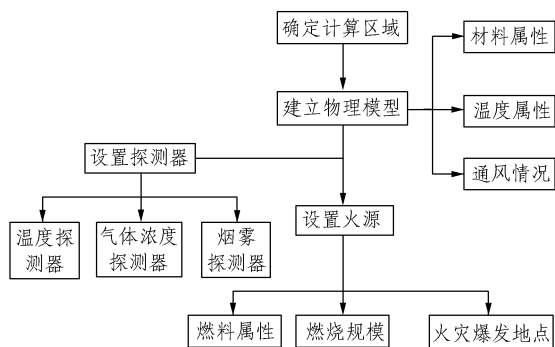


图 1 FDS 建模流程图

Fig.1 Flow chart of FDS modeling

(1) 确定计算区域

建立隧道火灾模拟模型, 首先需确定隧道模拟区段计算区域大小, 设定立方体有限单元分别在三个方向上的个数, 一般应根据计算区域空间尺寸不同而相应设置, 使有限元接近正立方体为最佳。每个方向上有限单元个数应为整数 $2^l 3^m 5^n$, 其中 l, m, n 为正整数。

(2) 建立物理模型

物理模型是隧道火灾模拟的主体部分, 应在计算区域内, 根据实际隧道尺寸建立相应的模型。由于 FDS 仅能建立长方体构件, 当需建立斜面或者曲面时, 可采用多个长方体构件组合成锯齿状, 形成近似斜面或曲面, 单个锯齿的宽度越小, 锯齿数量越多, 所形成的表面越接近于原曲面。此外, 还需根据实际情况, 设定隧道的参数, 比如材料属性、温度属性及通风状况。

如果通风量足够, 则将所有的热气流流向下风方向; 如果风量不足, 上层的热气流将相反于机械通风的方向流动, 这种现象即为“回流现象”^[5], 如图 2 所示。无烟气回流的示意图如图 3 所示。为避免产生回流现象, 使火灾烟雾顺着下游方向扩散的最小风速称为“临界风速”。



图 2 通风量不足时的烟气回流现象^[5]

Fig.2 Smoke return induced by inadequate ventilation^[5]



图 3 无烟气回流的示意图

Fig.3 No smoke return chart

采用临界风速控制烟气的流动, 既能防止上游回流的烟雾危害阻塞的车辆和行人, 又能延长烟雾在隧道顶壁的贴附时间, 避免烟雾在下游扩散太长的距离, 从而增加人员逃逸时间和安全性。需要说明的是, 本模型建立在通风系统失效工况下^[12], 此为最不利工况, 故暂不考虑通风的影响。

(3) 设置火源

当隧道内发生火灾时, 火源位置距出口越远越不易被发现, 人员越难以疏散。因此, 火灾发生在隧道的中部对于人员的安全疏散而言是最危险的。此外车辆的类型也对火灾的规模有影响。

(4) 设置探测器

火灾发生后, 隧道内的温度、空气中各种气体含量、烟气层厚度与能见度都将随时间变化。为了能够得到火灾发展到对人构成危险所需的时间, 应对隧道火灾发生后, 对人员疏散造成危险的各种条件(温度、CO 含量及能见度)进行监控。每隔一段距离, 在人体特征高度设置各种探测器, 以记录一段时间内各种参数的变化, 得到火灾危险时间。

2.4 隧道人员疏散模型的建立

(1) 模型工作流程

Tunev 模型建立在 FDS 对隧道火灾工况动态数值模拟的基础上, 通过初步建立人员行为反应规律知识库, 采用适当的定性和定量分析方法, 对隧道人员疏散进行数值模拟和安全性判断。Tunev 模型

可以对隧道不同位置火灾情况下的疏散过程进行模拟，Tunev 模型的流程图见图 4。

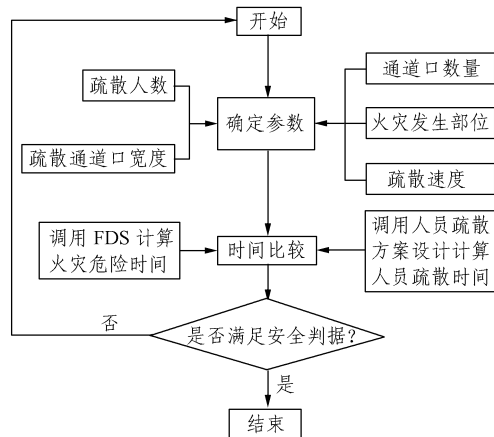


图 4 Tunev 隧道疏散模拟流程图

Fig.4 Flowchart of Tunev(tunnel evacuation) simulation

(2) 人员行为反应特征及人流在隧道内的疏散时间

由于人在火灾中的行为是十分复杂的^[13]，不同年龄、不同性别、不同文化背景的人在火灾中的逃生行为有很大差别，这主要体现在行走速度的差别上。为简化起见，Tunev 模型将疏散通道内的人群视为人流处理，认为人流具有一定的密度、速度及流量，而不单独考虑人流内各个人员的具体特征。因此本模型仅考虑人流的平均疏散速度，可认为人流在隧道内疏散时间仅与人流在隧道内的疏散距离有关。

人流平均疏散速度应考虑各类人员所具有的特点。城市隧道内司乘人员构成较为复杂，可以简化为成年男性、成年女性、儿童及老人四种。国内外常用于隧道内疏散分析的软件 Simulex 所建议的人员比例^[13]见表 1。

表 1 人员构成表
Table 1 People component

人员种类	所占比例/%
成年男性	40
成年女性	35
儿童	15
老人	10

各类人员的平面行走速度参考了 SFPE Handbook 及 Simulex 的建议^[13]，取值：成年男性，1.25 m/s；成年女性，1.0 m/s；儿童，0.80 m/s；老人，0.60 m/s。

行走速度已同时考虑了伤残人士的走动速度。根据英国调查结果，使用不同辅助工具的行走速度分别为：电动轮椅 0.89 m/s，手杖 0.81 m/s，手动轮椅 0.69 m/s，及行走辅助支架 0.51 m/s。因此，长者的行走速度已保守地考虑了使用电动/手动轮椅及持手杖人员的疏散。而且，模型只模拟有行动能力的人员，残障人士则假设由其他方式逃离，如由消防队员或隧道管理人员协助。人流平均行走速度的表达式为

$$\bar{v} = \sum_{n=1}^4 v_n \alpha_n \tag{3}$$

式中： \bar{v} 为人流平均行走速度， v_n 为各类人员群行走速度， α_n 为各类人员的百分比。

由式(3)可知，人流平均行走速度为 0.98 m/s，约为 1.0 m/s。考虑到火灾发生时，由于即将受到恶劣环境威胁，疏散人员可能加快步速甚至奔跑，因此可以认为疏散人员进入逃生救援通道前的疏散速度为 1.50~2.00 m/s。此外，研究显示，能见度的降低对人员疏散速度有一定程度的影响，当能见度低于可承受标准(5 m)时，人员在隧道内疏散速度约降低至 0.50 m/s。

(3) 人员体积

Simulex 建议的人员体积数值^[13]可取为：成年男性，0.52 m(宽)×0.32 m(厚)×1.75 m(高)；成年女性，0.46 m(宽)×0.28 m(厚)×1.65 m(高)；儿童，0.38 m(宽)×0.24 m(厚)×1.20 m(高)；老人，0.48 m(宽)×0.30 m(厚)×1.60 m(高)。

(4) 疏散通道有效宽度

有效宽度是疏散通道被实际利用的那部分宽度。由于隧道两侧可能放置一些障碍物；人员沿隧道行走时，出于本能也总是习惯于与边墙保持一定的距离；此外人员在行走时，摆动的双臂，也要求与边墙保持一定的距离，因此在疏散通道或出口的边界存在一个不能被人员疏散利用的边界层。在进行疏散计算时应扣除边界层的宽度。研究结果表明，疏散通道的有效宽度，是从距离边墙 150~200 mm 处算起；本模型中假设人流的宽度约等于疏散通道的有效宽度。

(5) 离车门最远的人员疏散时间

在座椅密集的车辆内，人的行走比较困难。不同人的行为特点不同，本文以正常人情况考虑。研究表明，人员在车内的疏散速度为 0.2~0.4 m/s。计算中按不同的车种设定其尺寸大小，并按间距为

0.5~1 m 停满车辆。不同种类车辆外廓尺寸可参见表 2; 车内人员构成见表 3。

表 2 设计车辆外廓尺寸
Table 2 The size of vehicles

车辆种类	总长/m	总宽/m	总高/m
小客车	6	1.8	2.0
载重汽车	12	2.5	4.0
半挂车	18	2.5	4.0
大客车(公交车)	12	2.5	3.5

表 3 车内人员构成表
Table 3 People component in vehicles

车辆种类	构成取值/(人·辆 ⁻¹)	满员系数
大巴(大客)	50	0.6~1.0
小巴(中客)	20	0.6~1.0
小客	4	0.5~1.0
货车	2~4	0.8~1.0

从大量行为反应统计研究可知, 由于着火车辆内人们可很快直视火源, 其探测及行为反应总时间可取平均值为 60 s, 实际疏散行动时间应包括这种探测及反应时间。一般情况下乘客开始疏散前所需的反应时间见表 4。

表 4 一般情况下乘客开始疏散前所需的反应时间
Table 4 Reaction time of passage before evacuation under normal situation

乘客所在位置	火灾报警时间/min	乘客所需反应时间/s	乘客行动所需时间/s
离火源 0~20 m	-	30	30
离火源 20~50 m	3.0	60	240
离火源 50~300 m	3.0	90	270
停车 4.5 min 后	-	5	5

(6) 疏散通道口前的人群阻塞

隧道的疏散通道口宽度一般小于隧道的总宽度, 因此大批人员拥到疏散通道口可能会受到阻塞, 同时疏散通道口宽度不能完全用于人员通行, 有效宽度大约比实际宽度窄 300~400 mm。若隧道内临危区域人数为 P , 单位疏散通道口宽度单位时间通过的人数为 r , 疏散通道口宽度为 w , 出口数为 n , 则人员全部通过疏散横通道口所需时间^[14, 15]为

$$t_1 = \frac{P}{nr(w-0.4)} \quad (4)$$

式(4)中, 取 $r = 1.2 \sim 1.5$ 人/(m·s), 最不利情况下取值为 1.2 人/(m·s)。由于人员使用逃生滑梯进行逃生的能力是一般连接通道的 1/2~1/3, 取 $r = 0.4$ 人/(m·s)。

3 实例应用

3.1 工程概况及火灾场景设置

上海市翔殷路隧道总长 2 600 m, 外径 $\phi 11.0$ m, 内径 $\phi 10.5$ m, 车道板宽 8.6 m, 净高 4.5 m, 双向四车道。根据前期调研, 预测隧道通行以载客车辆为主, 有少量货运汽车。考虑到大中型客车内的待疏散人数较多, 拟采用大中型客车和油灌车着火为火源类型, 最大火灾功率为 50 MW。

3.2 火灾危险时间的计算模型

采用 FDS 软件进行动态模拟计算。建立隧道物理模型, 模拟段长 200 m, 高 4.5 m, 宽 8.6 m。混凝土壁厚 0.25 m, 见图 5。设置火源于隧道中部, 最大火灾功率 50 MW, 间距 10 m, 取人体特征高度 1.5 m 处, 设置烟雾探测器、温度监测器, 检测人体特征高度周围 1 m³ 范围内 CO 含量变化。隧道截面见图 6。

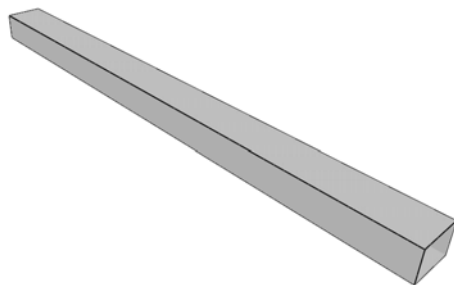


图 5 隧道物理模型
Fig.5 Tunnel model

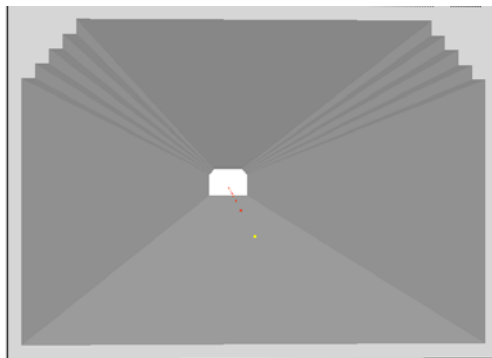


图 6 隧道物理模型截面
Fig.6 Tunnel section model

(1) 隧道火灾温度变化

根据隧道火灾模拟温度检测所得到的数据,得到火灾爆发后,隧道内火源附近温度变化情况,隧道内温度随着火灾爆发,时间越久,温度越高。隧道内距火源 60 m 以外处温度受火灾影响较小,始终十分稳定,处于 20 °C~40 °C,温度十分适宜,基本对人体无有害影响。因此距火源 60 m 之外的温度条件将不作为人员疏散的安全性判据。10, 20 min 时隧道火灾温度情况见图 7, 8 所示。图 9, 10 显示距火源 20, 40 m 时的温度变化曲线。

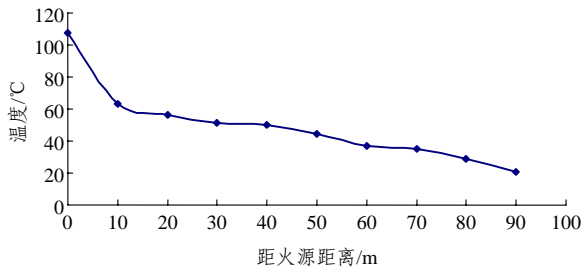


图 7 10 min 时隧道火灾温度

Fig.7 Tunnel temperature distribution caused by fire in 10 min

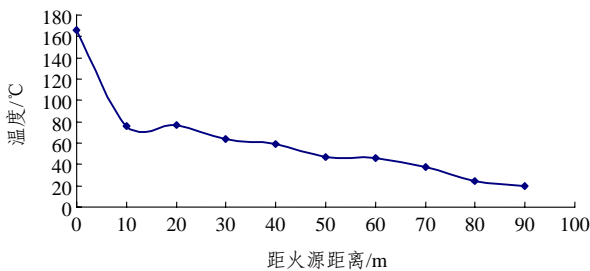


图 8 20 min 时隧道火灾温度

Fig.8 Tunnel temperature distribution caused by fire in 20 min

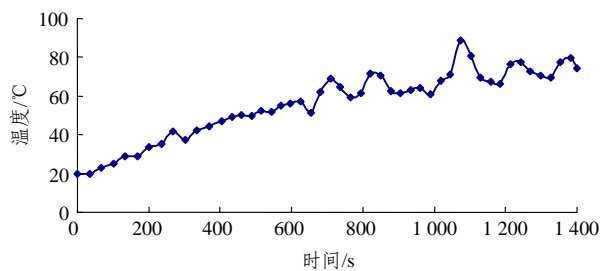


图 9 距火源 20 m 处温度变化曲线

Fig.9 Temperature variation curve of 20 m away from fire source

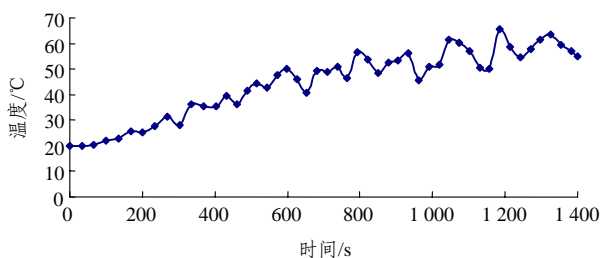


图 10 距火源 40 m 处温度变化曲线

Fig.10 Temperature variation curve of 40 m away from fire source

上述结果说明,距火源 20 m 处于 1 000 s 时到达危险温度临界点。距火源 40 m 处温度在 60 °C 左右徘徊,对疏散人员生命并没有很大威胁。

(2) 隧道内 CO 含量变化

隧道中部高 1.5~2.5 m 的空间内,气体浓度受火灾影响较小,在火源附近 1~3 m 处有明显变化,4 m 以外基本不受火灾影响,将不作为疏散人员主要安全判据。建议火灾发生后,以湿润的棉布覆住口鼻远离火源,以避免吸入过量有害气体。1~3 min 时隧道 CO 的浓度情况如图 11~13 所示。

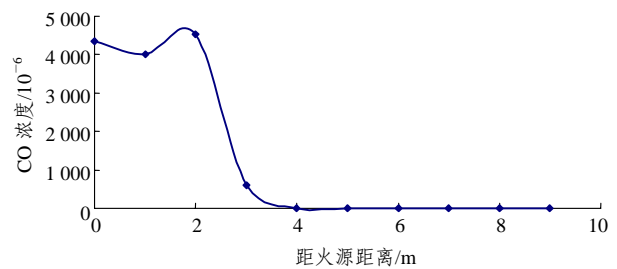


图 11 1 min 时隧道 CO 浓度

Fig.11 Carbon monoxide density of tunnel in 1 min

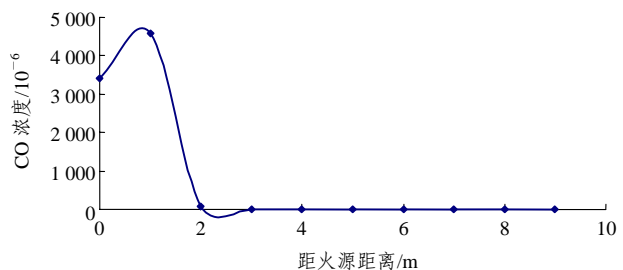


图 12 2 min 时隧道 CO 浓度

Fig.12 Carbon monoxide density of tunnel in 2 min

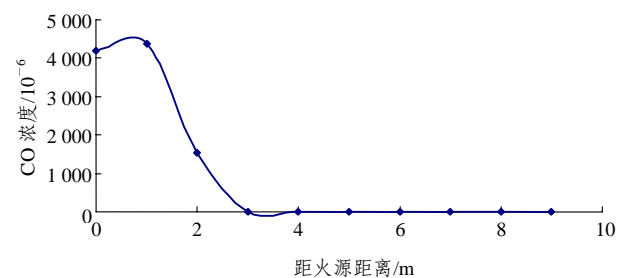


图 13 3 min 时隧道 CO 浓度

Fig.13 Carbon monoxide density of tunnel in 3 min

(3) 隧道内能见度变化

隧道中部高 1.5 m 平面内,能见度受到火灾烟气影响极大。火灾发生后,距火源 20 m 范围内,在 70 s 达到能见度危险临界条件;距火源 20~40 m,在 100 s 后达到能见度危险临界条件;距火源 40~70 m,危险能见度临界时间为 120 s;距火源 80 m

处, 由于烟尘回流现象, 导致能见度降低, 则危险能见度临界时间为 100 s。图 14~16 所示为距火源 20, 40, 80 m 时能见度的变化。图中的波动是由于烟雾的不连续性, 导致的短期内的能见度的变化。

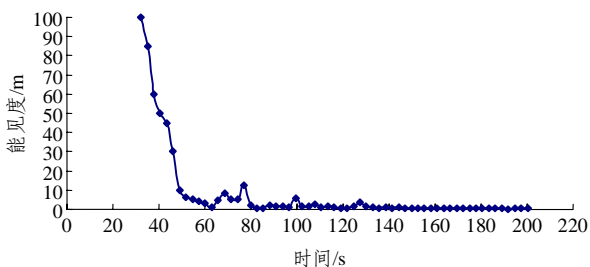


图 14 距火源 20 m 处能见度变化

Fig.14 Visibility of tunnel 20 m away from fire source

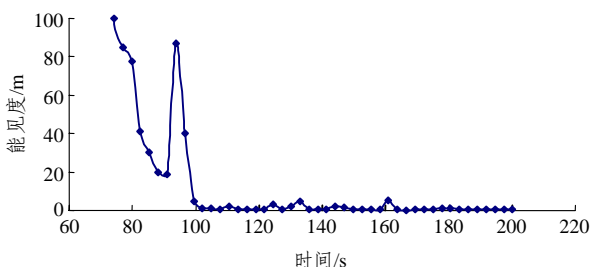


图 15 距火源 40 m 处能见度变化

Fig.15 Visibility of tunnel 40 m away from fire source

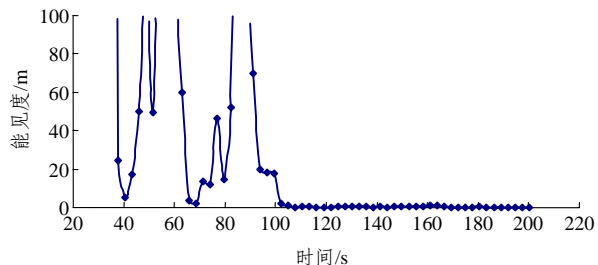


图 16 距火源 80 m 处能见度变化

Fig.16 Visibility of tunnel 80 m away from fire source

3.3 疏散时间的计算分析

由于隧道火灾爆发后, 危险能见度临界时间远小于危险温度临界时间与危险有害气体浓度临界时间, 故本文将以危险能见度临界时间作为 T_{fire} 。得到 $T_{fire1} = 70\text{ s}$, $T_{fire2} = 100\text{ s}$, $T_{fire3} = 120\text{ s}$ 。

(1) 疏散速度

由节 2.4 所述, 将疏散通道内的人群视为人流处理, 取隧道内人流的平均疏散速度 1.5 m/s。

(2) 车内的疏散时间计算

由节 2.4 所述, 取着火车辆内人员探测及行为反应总时间为 60 s。以着火车辆为大中型客车为例, 车身长度为 10 m, 人员在车内的疏散速度, 可取最

小值 0.2 m/s。行动最慢的人员从车尾到达前车门的疏散时间为: $t_1 = 10/0.2 + 60 = 110\text{ s}$ 。全部人员从车前门完全疏散出来的时间为

$$t_2 = \frac{P}{nr(w-0.4)} \tag{5}$$

以最不利情况取值, 式(5)中单位车门宽度单位时间通过的人数 $r = 1.2\text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 车内待疏散人数 $P = 45\text{ 人}$, 车门宽度 $w = 0.8\text{ m}$, 车门数 $n = 1$, 由式(5)计算得到 $t_2 = 94\text{ s}$ 。由 $t_2 < t_1$ 可知, 人员不会在车门口处出现阻滞现象。对于这两个时间, 取较长时间 t_1 作为人员从客车厢内全部疏散出来的时间, 即经过 110 s 后客车内的人员才完全从车厢内疏散出来, 再沿隧道向横通道疏散。由于油罐车上人员少, 且无车内疏散时间, 油罐车内的人则经过 60 s 的探测及反应时间后, 直接下车沿隧道向逃生通道口。

结合 T_{fire} , 可得到能够保证人员疏散安全的最长车内疏散时间 T_{max} :

$$T_{max} = T_{fire} - \frac{L}{\bar{v}} \tag{6}$$

式中: L 为疏散距离, 取 $\bar{v} = 1.5\text{ m/s}$ 。

乘客人数为 45 人的大客车疏散情况为隧道火灾疏散最不利情况, 由表 5 可知, 45 人无法完全安全撤离, 而油罐车上的人员可安全撤离。由于在城市交通隧道通行车辆中, 小客车所占比例远远高于大客车, 受灾的可能性也远高于大客车。下文将以小客车人员疏散为例进行研究, 4 人座的小客车内人员疏散可看作与油罐车相同。

表 5 最长车内疏散时间

Table 5 Longest evacuation time from vehicles

距火源距离/m	危险临界时间/s	最长车内疏散时间/s
10	70	63.33
20	70	56.67
30	100	80.00
40	100	73.33
50	100	86.67
60	120	80.00
70	120	73.33

(3) 最长疏散距离

由于疏散人员经过 60 s 的探测及反应时间后,

才能够下车。因此可以假设火源处,第1名疏散人员自火灾爆发第60秒起,向逃生救援通道口疏散。取隧道内人流平均疏散速度为1.5 m/s,此人在 $t = 107$ s时到达距火源70 m处,插值得到最长疏散距离为75 m。

(4) 隧道逃生救援通道口部最大间距

隧道火灾爆发后,疏散人员所需要经过的疏散距离与火灾爆发的地点有密切关系。当火灾爆发在逃生救援通道口部时,可认为最长疏散距离为逃生救援通道口部间距;当火灾发生在逃生救援通道口之间时,可认为最长疏散距离为逃生救援通道口部间距的1/2。因此,隧道逃生救援通道口最大间距应小于或等于疏散人员最长疏散距离,当计算所得间距大于隧道逃生救援通道口最大间距时,取最大间距。本文中取75 m。

(5) 隧道内人数

应根据隧道预计车流量、通行车辆种类、各种类型车辆乘客人数等估计交通繁忙时段在某一时刻隧道内人员数量。本文以1200人计算。

(6) 逃生救援通道口部间距

利用式(4),取 $r = 0.4$ 人/(m·s);疏散人数 $P = 1200$ 人;考虑到滑梯进入逃生救援通道的安全性与经济性,结合各类型疏散人流宽度,设置通道口宽度 $w = 1$ m。当人员疏散时间小于疏散阻滞时间时,最大疏散时间为疏散阻滞时间,反之亦然。

取逃生救援通道口部间距为70 m时,得到通道口数 $n = 37$,可算出人流经过疏散通道口必需的疏散时间约为135 s,大于距火源70 m处的危险能见度临界时间120 s。

取阻滞时间为120 s时,可算出通道口数 $n = 42$,得到通道口间距为60 m,小于隧道内人员最长疏散距离75 m,但不满足60 m处的危险临界时间100 s。

取阻滞时间为100 s时,可算出通道口数 $n = 50$,得到通道口间距为51 m,小于隧道内人员最长疏散距离75 m,且满足50 m处的危险临界时间100 s。该处人员的疏散时间为94 s,所以51 m间距时人员需要100 s才可安全撤离。

取阻滞时间为80 s时,可算出通道口数 $n = 63$,得到通道口间距为41 m,小于隧道内人员最长疏散距离75 m,满足40 m处的危险临界时间100 s,且该处的人员疏散时间为87 s。因此通道口间距为

41 m时,疏散人员需87 s方可安全撤离。

当人员疏散时间等于疏散阻滞时间时,取 $t = L/\bar{v} + 60$ s,通道口数为 $2600/L - 1$,得到通道口间距为46.5 m。此时的疏散时间为91 s,满足该处的危险临界时间为100 s,与通道口间距为51 m,与41 m的情况相比较,同样满足人员安全疏散要求。51 m间距设置更经济,为最优化解,因此选用51 m作为该隧道逃生通道的合理间距。

3.4 模型应用讨论

在设计通道口部大小过程中,作者认为应考虑以下两个要点:通道宽度应大于通道口部宽度,便于疏散人员迅速撤离,以免造成二次拥堵,同时,还应兼顾隧道内管线布置空间和维护空间,以及隧道远期发展的预留空间。因此,在隧道实例设计中采用了2.0 m×2.7 m的断面,可供两个成人并排通过。同时,为了防止疏散人员从逃生滑梯进入逃生通道时,阻碍通道人员疏散,影响逃生通道通行能力,在通道右侧设置了5.0 m×1.3 m(长×宽)的缓冲区域,使得逃生救援行进有序、迅速,无任何阻碍。

本文分析的结果,车道板下式逃生通道的间距为51 m,与翔殷路隧道的车道板下式逃生通道设计距离60~80 m基本吻合,说明本模型具有其可取之处。不足之处在于没有考虑通风方式的选用。本模型可以推而广之到其他工程,为隧道工程防火设计作一指导。

4 结 论

为达到隧道内火灾发生时最少的人员伤亡以及最小的经济损失,本文在分析、总结相关研究的基础上,结合人员疏散的理念及概念,运用FDS软件进行模拟,给出安全疏散设计的思路。即通过对危险条件临界时间 T_{fire} 及人员安全疏散时间 T_{evacuate} 的比较,调整逃生救援通道口宽度和间距使 $T_{\text{fire}} > T_{\text{evacuate}}$,疏散人员可以安全撤离至安全区域。并结合一隧道的实例对这种设计思路进行了验证,与实际隧道的逃生区段设计基本吻合。但是由于建模是对隧道火灾实景的一种简化,隧道的边界条件与实际情况相比存在一定的误差,而且模型没有考虑隧道内的通风状况对于烟雾及人员疏散的影响,需要在后续工作中予以完善。

参考文献(References):

- [1] 国外道路标准规范编译组. 公路隧道火灾及烟气控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.(Standard Code Interpretation Group for Road Abroad. Fire and smoke control in road tunnels[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.(in Chinese))
- [2] 闫治国, 杨其新, 朱合华. 火灾时隧道内烟流流动状态试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 95 - 99.(YAN Zhiguo, YANG Qixin, ZHU Hehua. An experimental study on smoke flow in tunnel fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 95 - 99.(in Chinese))
- [3] 贺春宁, 乔宗昭, 沈婕青. 隧道横向连接通道设置[J]. 地下工程与隧道, 2005, (3): 53 - 56.(HE Chunng, QIAO Zongzhao, SHEN Jieqing. Law of setting connection tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2005, (3): 53 - 56.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. JTGD70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTGD70 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.(in Chinese))
- [5] 安永林, 杨高尚, 彭立敏. 隧道火灾浅谈[J]. 采矿技术, 2006, 6(1): 38 - 39, 126.(AN Yonglin, YANG Gaoshang, PENG Limin. On tunnel fire[J]. Mining Technology, 2006, 6(1): 38 - 39, 126.(in Chinese))
- [6] 杨高尚, 彭立敏, 彭建国, 等. 从人员疏散的角度研究公路隧道的横通道间距[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 44 - 49.(YANG Gaoshang, PENG Limin, PENG Jianguo, et al. Optimization of the passageway interval in tunnels from a point of view of people evacuation[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 44 - 49.(in Chinese))
- [7] 日本建筑省. 建筑物综合防火设计[M]. 孙金香, 高伟译. 天津: 天津科技翻译出版社公司, 1994.(Ministry of Architecture of Japan. Fire-proof design of building[M]. Translated by SUN Jinxiang, GAO Wei. Tianjin: Tianjin Technology Interpreter Company, 1994.(in Chinese))
- [8] 阎卫东, 陈宝智, 钟茂华. 建筑物火灾时人员疏散时间模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2): 19 - 23.(YAN Weidong, CHEN Baozhi, ZHONG Maohua. Research on time model of personal evacuation in building fires[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(2): 19 - 23.(in Chinese))
- [9] 杨高尚, 安永林, 彭立敏, 等. 隧道火灾时人员安全疏散的模拟研究[J]. 灾害学, 2006, 21(4): 8 - 13.(YANG Gaoshang, AN Yonglin, PENG Limin, et al. Simulation of how people escape from tunnel fire[J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21(4): 8 - 13.(in Chinese))
- [10] 喻波, 杨高尚, 彭立敏, 等. 隧道火灾时人员安全疏散的模拟研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 158 - 166.(YU Bo, YANG Gaoshang, PENG Limin, et al. Simulation research on safe evacuation from tunnel in case of fire[J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 158 - 166.(in Chinese))
- [11] 薛伟, 张光俊. FDS 火灾模型与应用[J]. 吉林林业科技, 2006, 35(6): 18 - 20.(XU Wei, ZHANG Guangjun. FDS fire simulation and application[J]. Jilin Forestry Science and Technology, 2006, 35(6): 18 - 20.(in Chinese))
- [12] 陈咏军, 龚啸, 徐志胜. 南京过江隧道中部火灾风机失效模式的安全疏散研究[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(3): 351 - 354.(CHEN Yongjun, GONG Xiao, XU Zhisheng. Study on the safe evacuation for across Nanjing Yangtze River tunnel under an under-ventilated fire[J]. Fire Science and Technology, 2006, 25(3): 351 - 354.(in Chinese))
- [13] 黄宏伟. 钱江通道及接线工程——过江隧道综合防灾与救援专题研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2006.(HUANG Hongwei. The risk evaluation of Qiantang river tunnel—fire prevention and evacuation research report[R]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese))
- [14] 霍然, 胡源, 李元洲. 安全工程导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 131 - 135.(HUO Ran, HU Yuan, LI Yuanzhou. Introduction to the safety engineering[M]. Hefei: Science and Technology University of China Press, 1999: 131 - 135.(in Chinese))
- [15] 霍然, 金旭辉, 梁文. 大型公用建筑火灾中人员疏散的模拟计算分析[J]. 火灾科学, 1999, 8(2): 8 - 14.(HUO Ran, JIN Xuhui, LIANG Wen. Simulation analysis of people's escape in large public building fire[J]. Fire Safety Science, 1999, 8(2): 8 - 14.(in Chinese))