

# 从人员安全疏散的观点 研究特长隧道横通道间距

杨高尚<sup>1</sup>, 彭立敏<sup>1</sup>, 彭建国<sup>2</sup>, 张进华<sup>2</sup>, 安永林<sup>1</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院 长沙市 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院 长沙市 410075)

**摘 要:** 隧道的消防设计应以保护人员的生命安全为首要目标, 横通道作为隧道的安全地带, 其间距的设置  
在人员安全疏散中是至关重要的。本文以雪峰山隧道为工程实例, 阐述了一种计算横通道间距的方法, 并简述了该  
方法的应用。首先根据特长隧道火灾特点, 从人员安全疏散的观点出发, 模拟分析特长隧道 4 种不同火灾场景下的  
典型自然疏散过程, 并运用火灾模拟软件 FDS 计算不同火灾场景、不同横通道间距情况下的危险时间, 然后与相应  
的包含人员疏散行为特征的疏散时间相比较, 得出最适宜的横通道间距, 并分析其经济性。其方法和结论可为特长  
隧道消防系统的设计、紧急疏散方案和引导指挥体系的建立提供理论依据。

**关键词:** 特长隧道; 火灾; 人员安全疏散; 横通道间距

避免或减少隧道火灾所造成的人员伤亡, 除了  
努力采取消防安全措施预防火灾事故外, 火灾发生  
后如何安全地进行人员疏散, 已越来越受到人们的  
重视。人员疏散是否安全的一个很重要的标准便是  
人员能否在危险条件来临之前疏散到安全地点。横  
通道作为隧道的安全地带, 其间距的设置, 在人员疏  
散中占重要地位。然而, 隧道火灾的消防研究在我国  
仍处于初始阶段, 目前国内还没有专门针对长大隧

道消防的设计规范和标准作为设计依据, 特别是对于  
横通道间距的确定, 在我国公路隧道交通工程设  
计规范中只有推荐值, 即推荐供人员疏散的横通道  
间距为 200~400 m, 间距的设置以借鉴国内外的经  
验数据为主, 没有具体计算和验证的方法, 国内多数  
特长隧道的横通道间距取保守的较低值 250 m。对于  
特长隧道, 如果能在确保人员疏散安全的基础上,  
适当延长横通道间距, 则有可能减少横通道个数, 其

基金项目: 西部交通建设科技项目(编号 20033179802)子课题

收稿日期: 2006-05-08

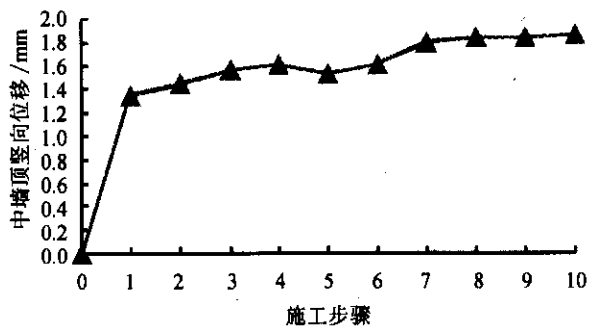


图 9 左洞下部开挖、支护前各步骤中墙顶部竖向位移

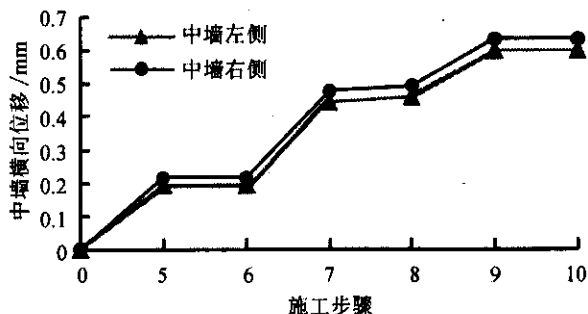


图 10 左洞下部开挖、支护前各步骤中墙顶部横向位移

程中的最不利情况, 施工时应予注意。

(3) 从计算结果来看, 拱顶锚杆拉力最大, 中墙顶部锚杆主要受压。

(4) 初期支护的轴力以受压为主, 施工时侧导洞

初期支护的轴力较大, 其安全应予以重视。

(5) 中墙的应力较小, 但是受到偏载作用, 中墙会产生偏转, 同时产生扭转, 引起墙体中部有向左侧凸出的弯曲变形, 故应对中墙的变形加强量测。

经济效益相当明显。为此,本文从人员安全疏散的角度出发,以雪峰山隧道为工程实例,阐述了一种计算横通道间距的方法,并简述了方法的应用。首先运用火灾模拟软件FDS(Fire Dynamics Simulator)计算不同火灾场景、不同横通道间距情况下的危险时间,然后分析不同火灾场景下的典型自然疏散过程,计算包含人员疏散行为的疏散时间,使之与危险时间相比较,得出最适宜的横通道间距范围。其方法和结论可为特长隧道消防系统的设计、制订合理可靠的人员疏散方案和消防救援对策提供科学依据。

本文将横通道间距作为隧道火灾中确保人员疏散的重要性能因素,着重研究它的计算。这种方法是基于可能的火灾场景,并运用了2种模拟软件,对一个实际工程的4个火灾场景的计算分析,得出了最适宜的间距,并分析了经济性,其结果反映了横通道间距的重要性。

## 1 人员疏散安全性判据及隧道火灾危险临界条件

### 1.1 人员疏散的安全性判据

隧道发生火灾后,人员能否安全疏散主要取决于两个时间。一是火灾发展到对人构成危险所需的时间(即危险时间) $T_{fire}$ ,一是人员疏散到安全场所需要的时间(即疏散时间) $T_{evac}$ 。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。 $T_{fire}$ 可用隧道火灾模型FDS模拟得到; $T_{evac}$ 则通过模拟分析人员疏散行为综合计算得到。

人员疏散并不是伴随着火灾的发生而进行的,从火灾发生到人员疏散结束,一般来说要经过3个时间段:探测时间 $T_{det}$ 、反应时间 $T_{resp}$ 、行动时间 $T_{trav}$ 。所以,从火灾发生到人员全部疏散为止,总的疏散时间为:

$$T_{evac} = T_{det} + T_{resp} + T_{trav} \quad (1)$$

人员疏散的安全性基本判据为:

$$T_{fire} > T_{evac} \quad (2)$$

在隧道中,每个可能受到火灾威胁的区域都应满足式(2)。且从式(2)可以看出 $T_{fire}$ 越大, $T_{evac}$ ( $T_{det} + T_{resp} + T_{trav}$ )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。

### 1.2 隧道火灾危险临界条件

在隧道火灾中,烟气是威胁人员安全的主要因素。当烟气层某些参数增大到一定值时,便会对人员构成危害。因此可以根据影响人员疏散安全的参数,如:烟气层温度、CO浓度、可视度等,确定隧道内火

灾对人员构成危险的条件。综合研究资料,隧道内火灾危险临界条件可按以下情况确定。

(1)由于人在烟气中的能见度下降,使人们被迫在高温和含有毒气体的环境中延长疏散时间。当烟气层面下降到人眼特征高度时,对于隧道这种狭长的大空间,可取10 m作为人眼特征高度处烟气危险临界能见度。

(2)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 $\leq 80^\circ\text{C}$ 时,人员有生存可能性;温度 $> 80^\circ\text{C}$ 时,具有潜在危险甚至死亡,因此可用 $80^\circ\text{C}$ 作为人眼特征高度处烟气危险临界温度。

(3)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 ppm就可对人构成严重危害。

以上3个临界条件,哪一项先达到,就取该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。

## 2 实例计算过程

### 2.1 工程概况及火灾场景设置

雪峰山隧道是上瑞高速邵怀段控制性工程,总长约7 km,为国内第二长隧道。初步设计人行疏散通道间距平均为250 m,车行疏散通道间距平均为750 m。每条隧道按每3个疏散通道之间的距离作为一个防火区段,即每个防火区段约750 m。以左线为例,从最不利位置考虑,当火灾发生在任一横通道口附近,疏散距离最远,即火源离前后2个通道口各距250 m左右,以此位置作为疏散安全性判断的分界线,如果火灾发生在任一横通道口能安全疏散,则分界线前、后方任一位置发生火灾都能安全疏散。

当火灾发生在进口段的第一防火分区时,由于此位置离洞口较近,火灾时人员疏散行为特点中对安全疏散有利的习惯性、回返性以及趋光性都表现较强,故以该区为疏散区段,简要说明横通道间距的计算步骤。雪峰山隧道横通道平面布置、火灾发生位置的平面示意分别如图1、图2所示。

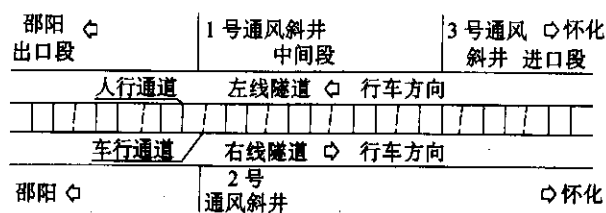


图1 横通道分布平面示意

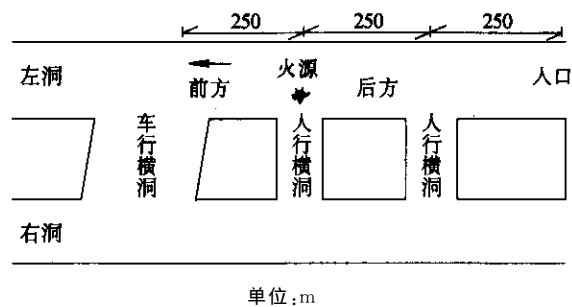


图2 通道口火灾发生的平面示意

根据雪峰山隧道前期调研可知,近期大中型客车所占比例较高,远期有少量油灌车,自然风速为1.5 m/s。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,最大火灾功率分别为20 MW和50 MW。由火灾分析软件FDS对这2种隧道火灾工况的数值模拟可知,这2种火灾功率下的通风排烟风速至少都为3 m/s;即使通风失效,在自然风速下烟气的回流也是有限的。因此在排烟风速下,人往火区后方逃离是安全的;在自然风速下,人往火区后方逃离的安全性也大于朝前方逃离。如果往后方逃离是安全的,则朝前方逃离也安全,故下文仅对向前方逃离进行分析。针对雪峰山隧道,至少有4种火灾场景以及检验标准需要考虑。采用自然风速1.5 m/s(即通风失效)和临界风速(即排烟风速)下的2种火灾功率的4种火灾场景进行疏散模拟,见表1。

表1 火灾场景的设置

场景编号	火灾场景
1	20 MW,1.5 m/s, 通风失效
2	20 MW,3 m/s, 排烟风速
3	50 MW,1.5 m/s, 通风失效
4	50 MW,3 m/s, 排烟风速

2.2 火灾危险时间的计算模型

现在,用CFAST、FDS等计算程序来计算烟的传输并完成火灾安全设计。设计师只需指定最可能的火灾过程并假如相关几何参数就可得到答案。这些程序可计算可用安全时间即危险时间,与已计算的疏散时间比较,当危险时间超过疏散时间,就能确保人员安全。

本文采用美国NIST开发的火灾分析软件FDS进行动态模拟计算,可以得到烟气层内各参数随时间的变化,从而获得达到危险临界条件的时间 $T_{fire}$ 。由于横通道间距即人员疏散的最大距离为250 m,故为减少计算量,隧道模型长度取一个防火区段长

度约为800 m。将火源置于距隧道模型275 m的中线处,运用FDS软件对雪峰山隧道4种火灾场景分别进行动态模拟。取离火源下游最近的横通道口位置A,即火源下游275 m,模型上坐标为 $X=525\text{ m}$ , $Z=1.5\text{ m}$ (即人体特征平均高度), $Y=2.6\text{ m}$ (即人流在隧道截面集中流动位置),来说明该点烟气温度的、CO浓度及可见度随时间的变化规律。模拟计算模型如图3、图4所示。

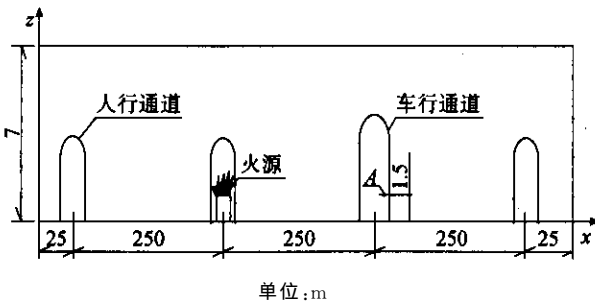


图3 计算模型的横断面

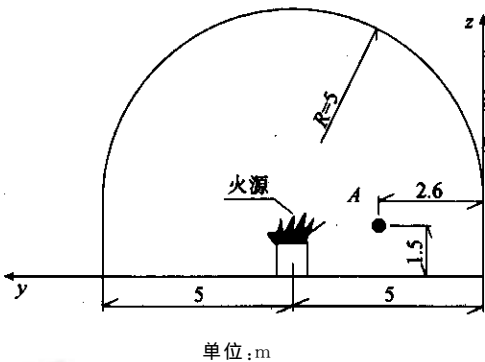


图4 计算模型的纵断面

从动态模拟结果,结合隧道火灾危险临界判据可以得出,在A位置处4种火灾场景下的火灾危险时间。同样原理设置模型,改变横通道间距,可得出不同横通道间距情况下,A位置处4种火灾场景下的火灾危险时间。危险时间数据见表2。

2.3 疏散时间的计算分析

国外有很多软件<sup>[11]</sup>可以计算复杂结构建筑物火灾时的疏散时间,有些改进后也可用于计算隧道内的疏散时间,例如EXODUS、Simulex<sup>[12]</sup>,本文作者在前人工作的基础上,开发了专用与隧道疏散时间计算的模拟程序Tunev,在此就如下几个关键问题作简单说明。

(1)疏散速度的分析。

人在火灾中的逃生行为十分复杂、差别很大,主要体现在疏散速度的差别上。为简化计算量,可将疏散通道内的人群视为人流处理,认为人流具有一定的

表 2 不同横通道间距的火灾危险时间与疏散时间

横通道间距/m	场景 1 危险 时间/s	场景 2 危险 时间/s	疏散时间 T <sub>1.5</sub> /s	疏散时间 T <sub>1.3</sub> /s	场景 3 危险 时间/s	场景 4 危险 时间/s	疏散时间 T' <sub>1.3</sub> /s	疏散时间 T' <sub>1.5</sub> /s
200	305	325	243	264	230	270	214	242
220	308	325	257	279	220	265	229	260
240	304	325	270	295	220	265	245	278
260	297	325	283	310	220	270	260	296
280	303	330	297	325	225	273	275	315
300	306	335	310	341	230	273	291	333
320	308	343	323	356	233	280	306	351
340	309	350	337	372	233	287	322	369
350	310	350	343	379	233	290	329	378

密度、速度及流量,而不考虑个体行为。研究表明,隧道内人流的平均疏散速度可在 1.0~1.5 m/s 范围取值。

由于隧道内只有 2 个疏散方向,可以根据不同的火灾场景及人员行为特征来确定人流的疏散方向,因此以最不利位置考虑时,人员在隧道内的疏散时间与人流在隧道内的疏散速度和疏散距离有关。疏散速度作为疏散行为特征的体现,主要受火灾事故现场热物理环境、烟气流动状态、隧道空间结构特点、疏散人员的分布及生理心理特征等因素的影响。因此,可以根据火源功率、人员密度、事故现场的烟层状况等,确定疏散人员的疏散速度。模拟推断如下。

当横通道口位置发生 20 MW 的客车火灾时,由于此处与隧道进口距离仅 500 m 左右,大多数人员受习惯性、回返性这两种最可能行为反应影响较大,作逆向返回的逃生疏散,即朝火源后方安全疏散,少数人受恐慌性、混乱性这 2 种行为反应影响,害怕越过火灾产生的高温火焰及火灾烟气,选择了朝火源前方疏散,且通风失效和排烟风速时的疏散速度(1.3~1.5 m/s)差别不大;当发生 50 MW 的油灌车火灾时,油灌车后方的客车中几乎所有人受恐慌性和从众性影响都将朝火源后方安全疏散,而油灌车内的人,受上述最可能行为影响有可能朝火源前方疏散,但受较大的火源功率影响,其通风失效和排烟风速时的疏散速度(1.5~1.3 m/s)差别较大。因此,不同的火灾场景决定了人流的疏散速度。

(2) 车内疏散时间计算。

从大量行为反应统计研究可知,由于着火客车及油灌车内人们可很快直视火源,故其探测及行为反应总时间可取平均值为 60 s 计算。以着火车辆为大中型客车为例,设车身长度为 10 m,人员在车内

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

$$t_2=\frac{p}{nr(w-0.4)}$$

(3)

以最不利情况取值,式(3)中单位车门宽度单位时间通过的人数 $r$ 为 1.2 人/ m·s,车内待疏散人数 $p$ 为 45 人,车门宽度 $w$ 为 0.8 m,车门数 $n$ 为 1,由式(3)计算得到 $t_2=94$  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 2 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。由于油灌车上的人员少,且没有车内疏散时间,油灌车内的人则经过 60 s 的探测及反应时间后,直接下车沿隧道向横通道疏散。

(3) 横通道口前的阻滞。

利用式(3),其中 $r$ 为 1.2 人/ m·s,疏散人数 $p$ 为 45 人,横通道口宽度 $w$ 为 2.2 m,横通道口数 $n$ 为 1,可算出人流经过疏散通道口必需的疏散时间约为 21 s。显然,此疏散时间相对人流在隧道内的疏散时间很小,可以忽略,即在通道门口人群无阻滞现象。

综上所述,在不同的火灾场景下,人员具有不同的疏散速度,改变横通道间距即改变疏散距离,运用模拟软件可得出不同横通道间距的疏散时间。

2.4 计算结果及讨论

根据 4 种火灾场景下,位置 A 的动态模拟拟合曲线,结合隧道火灾危险临界条件判据可以得出:在 A 位置处 4 种火灾场景下的火灾危险时间 $T_{fire}$ ,改变横通道口位置 A 与火源的距离即横通道间距,同样可得不同横通道间距情况下的火灾危险时间。不同



横通道间距的火灾危险时间与疏散时间计算结果见表 2 所示,图 5 为根据表 2 结果绘制的不同横通道间距下发生火灾场景 1、2 及 3、4 的疏散时间与危险时间的比较曲线。

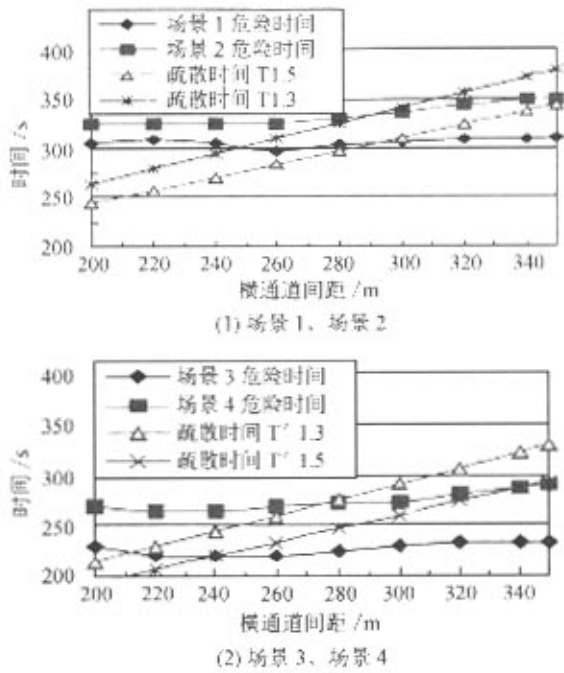


图 5 不同横通道间距下的疏散时间

从图 5 曲线的变化趋势可以得出:当发生 20 MW 的客车火灾,人员疏散速度以大于 1.3 m/s,在通风失效情况下,最大横通道间距应小于 250 m,危险时间大于疏散时间,朝火源前方疏散的人员才能安全疏散;在排烟风速情况下,最大横通道间距小于 290 m 时,危险时间大于疏散时间,朝火源前方疏散的人员才能安全疏散;当发生 50 MW 的油罐车火灾,人员疏散速度以大于 1.3 m/s,在通风失效情况下,最大横通道间距小于 210 m 时,危险时间大于疏散时间,朝火源前方疏散的人员可安全疏散;在排烟风速情况下,最大横通道间距小于 280 m 时,危险时间大于疏散时间,朝火源前方疏散的人员可安全疏散。

由于雪峰山隧道近期大中型客车较多,远期才有少量油罐车,因此近期考虑以客车为主要火源,设置横通道间距。由上述结论可知,考虑通风失效的概率,最适宜的横通道间距可在 270 m 左右取值;同样理由,对于远期的少量油罐车火源,则最适宜的横通道间距只能在 250 m 左右取值,这与初步设计中的取值一致,但不经济。如果从人员安全疏散的角度出

发,综合考虑通风失效的概率及经济因素,同时兼顾地质状况,雪峰山隧道最适宜的横通道间距仍可按 270 m 左右取值,这样可减少一条横通道,其经济性就十分明显;同时,采取适当增加消防喷淋设备等设施来延长危险时间,增加火灾报警、引导疏散等设施来缩短疏散时间,一旦发生油罐车火灾,仍可保证人员疏散安全。

在隧道火灾中,如果 1 台满载客车上的人需要疏散,则最危险的时期是离开车厢后,大群人流以平均速度沿隧道向最近的横通道疏散,此时横通道间距更为重要,无论其值最终如何,但从 250 m 增加到 270 m 所减少的设备和通风费用大约为 200 百万元,经济效益明显。

3 结论

安全疏散的计算时间是判断消防设计安全性的关键值,研究结果表明,这种时间分析对比的计算方法可用来可靠地预测人员疏散的安全性和最适宜的横通道间距。通过理论计算结果与几个实际工程<sup>[19,20]</sup>的比较,证实了该方法的可行性和正确性。研究还表明了,横通道间距对人员疏散安全性的显著影响。运用该方法可减少按经验取值的盲目性,增加经济性;既节省了造价,又保证了人员安全。其计算方法和结论可为特长隧道消防系统的设计、制订合理可靠的人员疏散方案和消防救援对策提供科学依据。

由于这种计算方法只需要几何信息和火灾规模,可用于草图阶段的计算分析,这种方法能节省间距的设置时间,减少人为错误,本文介绍的方法是基于疏散分析的,该方法不仅用于疏散分析,还能用于造价估算和其他工程分析。未来的发展,要求所有隧道在施工和投入使用之前,必须接受消防设计的检测,将该计算方法编制成计算机程序,提高计算速度,可作为一种检测手段用于消防设计。

参考文献:

[1] Barth U. Managerial and technical aspects of tunnel safety regarding normal and emergency mode [C]. International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Austria, Proceeding, 2002.

[2] 胡忠日. 安全疏散研究的动态和发展趋势[J]. 消防科学与技术, 2001, (6).

[3] Bendelius A G. Tunnel fire and life safety within the world road association (PIARC) [J]. Tunnelling and

Underground Space Technology, 2002, 17.

- [4] JTG/T D71—2004, 公路隧道交通工程设计规范[S].
- [5] 付修华, 杨其新, 刘化冰. 对特长公路隧道火灾防灾救援安全策略的思考[J]. 公路交通科技, 2004, 21(3).
- [6] 陈光明, 胡益华, 陈璋, 等. 乌池坝特长公路隧道消防与防灾救援设计[J]. 现代隧道技术, 42(4).
- [7] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3), Technical Reference Guide[Z]. NISTIR 67~83, NIST, 2002.
- [8] 日本建筑省, 编. 孙金香, 高伟, 译. 建筑物综合防火设计[M]. 天津科技翻译出版社公司, 1994.
- [9] Hartell G E. Engineering analysis of hazards to life safety in fires: the fire effluent toxicity component [J]. Safety Science, 2001, 38(2).
- [10] Hwang C C, Edwards J C. The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40.
- [11] Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment[J]. Building and Environment, 1999, 34.
- [12] Bendelius G. Simulation of escape from road tunnels using Simulex[C]. International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Austria, Proceeding, 2002.
- [13] 张祉道. 公路隧道的火灾事故通风[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1).
- [14] PIARC. Fire and Smoke Control in Road Tunnels [S]. PIARC Committee on Road Tunnels, C5, 05.05.B, Paris, France, 2002.
- [15] John L Bryan. Human behavior in fire: the development and maturity of a scholarly study area [C]. Human Behavior in Fire Proceedings of the First International Symposium, University of Ulster, Northern Ireland, 1998.
- [16] Fraser-Mitchell J N. Modelling human behavior within the fire risk assessment tool CRISP[J]. Fire and Materials, 1999, 23(6).
- [17] 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.
- [18] 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, (2).
- [19] Eisner H S. The Channel Tunnel Safety Authority [J]. Safety Science, 2000, 36.
- [20] Jurij Modic. Fire simulation in road tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18.

## A Study on Cross Passage Interval of Super Long Tunnel from Viewpoint of People's Safe Escape

*YANG Gao-shang<sup>1</sup>, PENG Li-min<sup>1</sup>, PENG Jiao-guo<sup>2</sup>, ZHANG Jin-hua<sup>2</sup>, AN Yong-lin<sup>1</sup>*

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Communications Planning and Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The chief goal of tunnel fire fighting design is to ensure the people's life safety. Cross passage, qua the safety zone of tunnel, its interval is crucial to people's safe escape. A calculate method of cross passage interval in detail using Xuefengshan Tunnel as an object example is described, and the application of the calculate method is also given out briefly. Firstly, typical natural escape process under four fire scenarios is analyzed according to the fire characteristics of super long tunnel from the viewpoint of people's safe escape, the danger times under four fire scenarios with different cross passage intervals are calculated by fire simulation software FDS. Then, compared with escape time which combined with characteristics of people's escape behavior, the optimum cross passage interval is obtained and economical efficiency analyzed. The calculate method and its results would provide theory gist of tunnel fire fighting design, the establishment of the escape direction system and the emergency scheme.

**Key words:** super long tunnel; fire; people's safe escape; cross passage interval