

公路隧道行车及横通道间距的研究

杨高尚¹, 彭立敏¹, 安永林¹, 彭建国², 张进华²

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

摘要: 以雪峰山隧道为工程实例, 为避免隧道火灾时车辆间的引燃, 根据公路隧道火灾特点, 利用辐射传热原理, 对车辆间的火灾蔓延进行分析, 同时为确保隧道火灾时人员安全疏散, 利用火灾模拟软件 FDS4.0 及隧道疏散模拟软件 Tunev, 分别计算和比较了 4 种典型火灾场景在不同横通道间距情况下的危险时间及包含人员疏散行为特征的疏散时间, 并分析其经济性。结果表明: 火区上游客车最小引燃间距为 1 m, 油灌车最小引燃间距为 5 m, 隧道内安全行车间距应大于 65 m; 雪峰山隧道的最佳横通道间距为 270 m。该结论可为公路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: 公路隧道; 火灾; 行车间距; 安全疏散; 横通道间距

中图分类号: TP339; U495.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)02-0362-06

Study on spacing between vehicles and passages of road tunnel

YANG Gao-shang¹, PENG Li-min¹, AN Yong-lin¹, PENG Jian-guo², ZHANG Jing-hua²

1. School of Civil Architectural and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Hunan Province Communication Planning Survey and Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: Using Xuefeng tunnel as an object example, fire spreading to other vehicles was analyzed by radiation theory according to the fire characteristic of road tunnel for avoiding fire spreading between vehicles. Meanwhile, the typical natural evacuation process in four typical fire scenarios was analyzed, the danger times in the four fire scenes with different passage spacing and evacuation time combined with characteristic of people's evacuation behavior were calculated separately with fire simulation software FDS4.0 and tunnel evacuation software Tunev, its economical efficiency was also analyzed. The results show that the least safety spacing of traveling is 65 m, the least separation distance of carriage is 1 m and tank truck is 5 m at smoke removal ventilation speed upstream the fire, and the optimum passage spacing is 270 m. These results will provide theory gist for tunnel fire fighting design, the establishment of evacuation direction system and emergency scheme.

Key words: road tunnel; fire spread; vehicle spacing; safe evacuation; passage spacing

随着“西部大开发”战略的深入进行, 公路隧道数量不断增加, 其规模和结构形式也向长大方向发展, 由于隧道长度的增加、交通量的日益加大、运输物品复杂性提高等因素, 隧道发生火灾的概率也在上升,

隧道火灾不仅严重威胁人的生命和财产安全, 还对交通设施、人类的生产活动造成巨大的损坏, 降低使用者对隧道安全性能的信任, 造成不良的社会影响^[1-4]。

为避免或减少隧道火灾所造成的人员伤亡和财产

收稿日期: 2006-09-06

基金项目: 西部交通建设科技基金资助项目(20033179802)

作者简介: 杨高尚(1969-), 女, 湖南长沙人, 高级工程师, 博士研究生, 从事地下工程及其安全研究

通讯作者: 杨高尚, 女, 高级工程师; 电话: 0731-8876472; E-mail: ygaoshang@mail.csu.edu.cn

损失,努力采取行车安全措施预防连环火灾事故、火灾发生后确保人员疏散安全等问题,已越来越受到人们的重视^[5]。当1辆汽车燃烧时,相邻汽车所受的辐射热应小于可耐受值,否则其相邻汽车很有可能因辐射热过大而引燃,从而造成大规模连环火灾,因此,隧道内汽车应当保持适当的安全行车间距。此外,火灾发生后,人员疏散是否安全的一个很重要的标准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,其间距的设置人员在疏散中占重要地位^[6-7]。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安全的设计规范和标准作为设计依据,特别是对于临界引燃间距和横通道间距的确定,在我国公路隧道交通工程设计规范(JTG/T D71—2004)中只有推荐值^[8],没有具体的确定和验证方法,以借鉴国内外的经验数据为主,国内多数特长隧道的横通道间距^[9-10]取保守的较低值250 m。对于特长隧道,若能在确保人员疏散安全的基础上适当地延长横通道间距,则有可能减少横通道个数,其经济效益相当明显。

1 安全行车间距

1.1 车辆火灾发展过程及临界引燃间距

车辆在隧道内由于碰撞或其他原因而引起火灾并释放出大量的热量,与其相撞的车辆和邻近车辆由于受热引燃的过程较为复杂,而隧道内环境特殊,车辆组成多样,因此,本文作者只对雪峰山隧道近期通过比例较高的大中型客车在排烟通风条件下位于火源上游的车辆临界引燃间距进行初步研究。

从火灾发展全过程看,火灾前期,与着火车辆相邻的车辆所受热量主要来源于着火车辆燃烧产生的高温火焰及烟气的热辐射;在排烟通风时,火源上游的车辆则仅受火焰热辐射;当热辐射达到并超过邻近车辆着火的临界热流量时,邻近车辆将被引燃。

相邻汽车所受的辐射热可计算为

$$I = \frac{\dot{Q}}{12\pi x^2} \quad (1)$$

式中: I 为相邻汽车所受的辐射热, kW/m²; x 为着火汽车中心到相邻汽车表面的距离, m; \dot{Q} 为火源的热释放速率, kW。目前大多数汽车都在表面涂上了聚氨酯之类的热塑性材料,因此,引燃的临界热流量可取值为16 kW/m²。

以客车为着火车辆,其发热功率按规范推荐设定

为20 MW,属中型火灾规模,按式(1)计算,当 $I < 16$ kW/m²时,临界引燃间距 $x > 5.76$ m。而一般客车车身长度约10 m,故隧道发生客车火灾时,考虑安全冗余,上游车辆不被引燃的最小安全停靠间距约为1 m。

同理,以油灌车为着火车辆,其发热功率按规范推荐设定为50 MW,属于大型火灾规模,由式(1)计算,当 $I < 16$ kW/m²时,临界引燃间距 $x > 9.11$ m。而一般油灌车车身长度为9 m左右,故隧道发生油灌车火灾时,考虑安全冗余,上游车辆不被引燃的最小安全停靠间距约为5 m。

1.2 安全行车间距

当隧道内的车辆火源燃烧时,其相邻的汽车很有可能受到辐射热而引燃,造成大规模连环火灾。因此从车辆间的临界引燃间距出发,考虑较为理想的车辆条件,设前、后车制动性能相同,由式(2)^[2-13]可以分析确定车辆的安全行车间距,即满足不被引燃要求而需要保持的最小车头间距。

$$L = v t_{\text{res}} + x + \frac{1}{2} l_v \quad (2)$$

式中: L 为车辆的安全行车间距; t_{res} 为司机的反应时间,其取值范围^[12]为0.5~2.0 s,在通常条件下对于标准客车,可取值1.4 s; v 为行车速度, m/s; l_v 为车身长。

式(2)反映了保证安全停车的最低要求,所以,满足式(2)的安全间距称为基本安全行车间距(即最小安全行车间距)。

雪峰山隧道设计行车速度为80 km/h,当客车为着火车辆时,其安全行车间距由式(2)计算为42.11 m。同理计算可得,当油灌车为着火车辆时,其安全行车间距为47.37 m。

综合考虑隧道内不同车种、行车速度、人员的反应时间、道路状况、车辆制动装置状况及安全冗余,雪峰山特长公路隧道内汽车安全行车间距应大于65 m。

2 横通道间距

横通道间距作为隧道火灾中确保人员疏散安全的重要因素,这里着重研究它的计算方法。首先基于可能的火灾场景,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^[14]FDS4.0计算4种火灾场景在不同横通道间距情况下的危险时间,然后与隧道疏散模拟软件^[4]Tunev计算出的包含人员疏散行为特征的疏散时间相比较,得出该隧道最适宜的横通道间距范围。

2.1 隧道火灾危险临界条件及人员疏散的安全性基本判据

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来确定危险临界条件,综合研究相关文献^[15-16],隧道内火灾危险临界条件可按以下情况确定。

a. 当烟气层下降到人眼特征高度时,对于隧道这种狭长大空间,可取 10 m 作为人眼特征高度处烟气危险临界能见度。

b. 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。

c. 当烟层界面低于人眼特征高度时,也可根据其有害燃烧产物的临界浓度判定是否达到危险状态,例如当 CO 浓度达到 2.5×10^{-3} 时就可对人构成严重危害。

对于以上 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。

隧道发生火灾后,人员能否安全疏散主要取决于 2 类时间^[17]: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} 。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:

$$t_{\text{evac}} = t_{\text{det}} + t_{\text{resp}} + t_{\text{trav}} \quad (3)$$

人员疏散的安全性基本判据为:

$$t_{\text{fire}} > t_{\text{evac}} \quad (4)$$

在隧道中每个可能受到火灾威胁的区域都应满足式(4)。

2.2 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 250 m,车行疏散通道间距平均 750 m。以左线为例,从最不利位置考虑,当火灾发生在进口段的任一横通道口附近,疏散距离最远,以此位置作为疏散安全性判断的分界线,若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。由于此位置离洞口较近,火灾时人员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。

由雪峰山隧道前期调研结果可知,近期大中型客

车所占比例较高,远期有少量油罐车,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罐车着火为火源类型,最大火灾功率分别为 20 MW 和 50 MW。由火灾分析软件 FDS4.0 对这二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,在排烟风速下,人往火区上游逃离是安全的;在自然风速下,人往火区上游逃离的安全性也大于朝下游逃离的安全性,若往下游逃离是安全的,则朝上游逃离也安全,故这里仅对向下游逃离进行分析。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。火灾发生位置的平面示意如图 1 所示,4 种火灾场景如表 1 所示。

表 1 火灾场景的设置

Table 1 Four fire scenarios

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

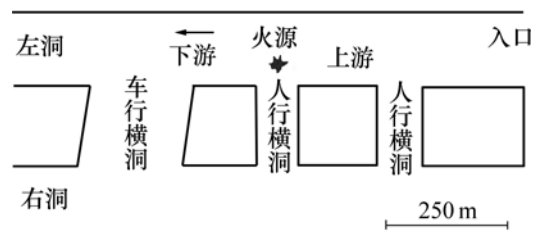


图 1 火灾发生通道口的平面示意图

Fig.1 Plan sketch of fire location in tunnel

2.3 火灾危险时间的计算模型

采用火灾分析软件 FDS4.0 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情况,从而获得达到危险临界条件的时间 t_{fire} 。由于人员疏散的最大距离为 250 m,故为了减少计算量,隧道模型取一个防火区段长度约为 800 m。将火源置于距隧道模型进口 25 m 的中线处,取离火源最近的横通道口位置 A,即火灾下游 250 m,模型上坐标为 $X=252$ m, $Z=1.5$ m(即人体特征平均高度), $Y=2.6$ m(即人流在隧道截面集中流动位置),以此说明该点烟气温度、CO 浓度及能见度随时间的变化规律。模拟计算模型如图 2 和 3 所示。

2.4 疏散时间的计算分析

本文作者在前人工作基础上,开发了专用于隧道

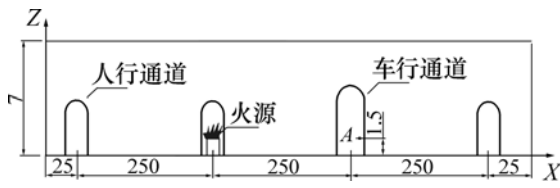


图 2 计算模型横断面

Fig.2 Cross section of simulation model (m)

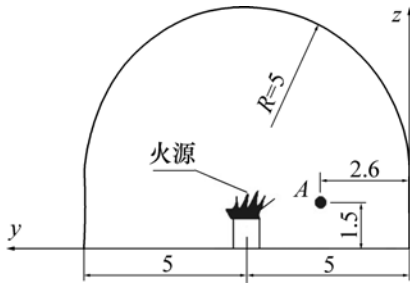


图 3 计算模型纵断面

Fig.3 Longitudinal section of simulation model (m)

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。

2.4.1 疏散速度分析

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^[7, 18]可在 1.0~1.5 m/s 范围取值, 且不同的火灾场景决定了人流的疏散速度。

2.4.2 车内的疏散时间计算

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^[12, 18]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^[12, 19]为:

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

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 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(5)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 类时间, 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。

2.4.3 横通道口前的阻滞

利用式(5), 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。

2.5 计算结果及讨论

根据 4 种火灾场景下位置 A 处的动态模拟拟合曲线, 结合隧道火灾危险临界判据可以得出: 在位置 A 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的拟合曲线如图 4 和 5 所示。

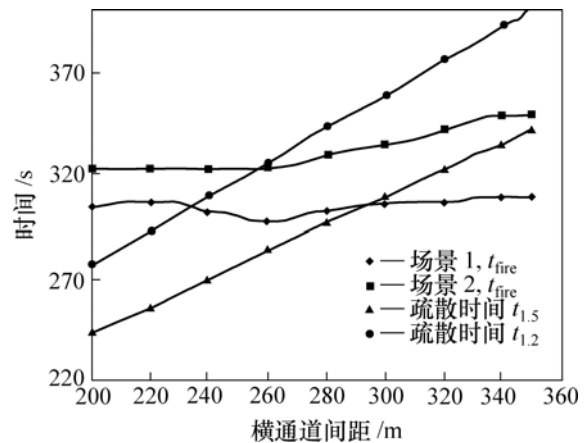


图 4 不同横通道间距下的疏散时间

Fig.4 Escape time danger time under different interval

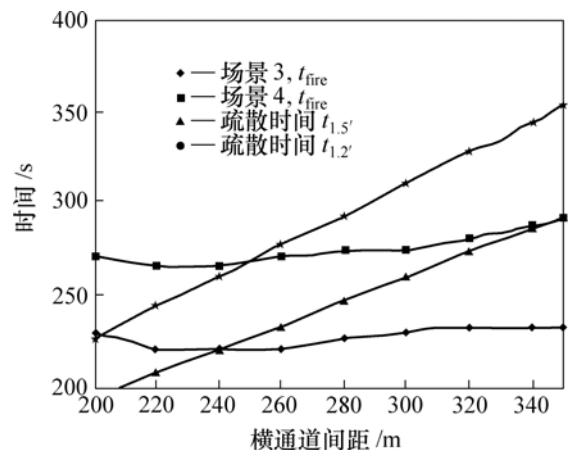


图 5 不同横通道间距下的疏散时间

Fig.5 Escape time danger time under different interval

从图 4 和 5 所示曲线的变化趋势可以得出: 当 20 MW 的客车发生火灾时, 人员疏散速度应大于 1.2 m/s, 在通风失效情况下, 最大横通道间距应小于 240 m, 危险时间大于疏散时间, 朝火源下游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 260 m 时, 危险时间大于疏散时间, 朝火源下游疏散的人员才能安全疏散。当 50 MW 的油罐车发生火灾时, 人员疏散速度应大于 1.2 m/s, 在通风失效情况下, 最大横通道间距小于 220 m 时, 危险时间大于疏散时间, 朝火源下游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, 朝火源下游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; 同理, 对于远期的少量油罐车火源, 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, 但不合算。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 1 条横通道, 其经济性十分明显, 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, 若 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 所减少的设备和土建费用大约为 300 万元, 经济效益明显。

通过与几个实际工程^[20-21]的比较, 证实了所提出的计算方法的可行性和正确性。

3 结 论

a. 雪峰山隧道内发生中等规模 20 MW 的客车火灾时, 最小引燃间距为 1 m, 当较大规模 50 MW 的油罐车发生火灾时, 隧道内最小临燃间距为 5 m, 考虑到隧道内不同车种、行车速度、人员的反应时间、道路及车辆制动装置状况和安全冗余, 建议隧道内车行间距至少保持 65 m 的安全行车距离, 以免着火车辆引燃其后停下的车辆, 扩大火灾规模, 从而减少火灾损失。

b. 横通道间距对人员疏散的安全性影响显著, 安全疏散的计算时间是判断消防设计安全性的关键值, 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计算最适宜的横通道间距。对于雪峰山隧道, 最佳横通道间距为 270 m。运用该方法可减少按经验取值的盲目性, 节省开支, 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。

致谢:

感谢湖南省交通规划勘察设计院的大力支持。

参考文献:

- [1] 彭立敏, 刘小兵. 交通隧道工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
PENG Li-min, LIU Xiao-bing. Transportation tunnel engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2003.
- [2] 王新钢, 毛朝军. 浅谈公路隧道火灾及其结构防火保护措施[J]. 消防技术与产品信息, 2005(3): 65-67.
WANG Xin-gang, Mao Chao-jun. Study on tunnel fires and fire protection measures of lining structure[J]. Fire Technology and Product Information, 2005(3): 65-67.
- [3] YANG Gao-shang, AN Yong-ling, PENG Li-min, et al. Simulation of smoke flow and longitudinal ventilation in tunnel fire[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(3): 741-746.
- [4] YANG Gao-shang, PENG Li-min, ZHANG Jing-Hua, et al. Simulation of people's evacuation in tunnel fire[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(3): 307-312.
- [5] 李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LI Yin-qing. Performace-based fire design in buildings[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [6] 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): 6-7.
HU Zhong-ri. The Current situation and development tendency of the fire evacuation[J]. Fire Science and Technology, 2001(6): 6-7.
- [7] Bendelius A G. Tunnel fire and life safety within the world road association (PIARC)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002(17): 159-161.
- [8] JTG/T D71—2004. 公路隧道交通工程设计规范[S].
JTG/T D71—2004. Traffic Engineering Design Specification of Highway Tunnel[S].
- [9] 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): 56-63.
FU Xiu-hua, YANG Qi-xing, LIU Hua-bing. Discussion on the safety maneuver about fire prevention and succor of long

- highway tunnel[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(3): 56-63.
- [10] 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*, 2005, 42(4): 72-78.
CHEN Guang-ming, HU Yi-hua, CHEN Zhang, et al. Design of the fire protection and the rescue measures in Wuchiba super long road tunnel[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2005, 42(4): 72-78.
- [11] 李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LI Yin-qing. *Performance-based Fire Design in Buildings*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [12] 贾志绚, 李亚娟, 卢兰萍. 高速公路安全行车间距的探讨[J]. *太原重型机械学院学报*, 2001, 22(1): 78-81.
JIA Zhi-xun, LI Ya-juan, LU Lan-ping. Study on safety distance of traffic flow on expressway[J]. *Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute*, 2001, 22(1): 78-81.
- [13] 孙家骊. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
SUN Jia-si. *Road reconnaissance design*[M]. Beijing: People Traffic Press, 2000.
- [14] McGrattan K. *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*[R]. New York: National Institute of Standards and Technology(NIST), Department of Commerce, 2004.
- [15] Hartell G E. Engineering analysis of hazards to life safety in fires: the fire effluent toxicity component[J]. *Safety Science*, 2001, 38(2): 147-155.
- [16] Purser D A, Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations[J]. *Safety Science*, 2001(38): 157-182.
- [17] 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.
Japan Construction Department. *The Building Synthetic Fire Prevention Design*[M]. SUN Jin-xiang, GAO Wei, translate. Tianjin Science and Technology Translation Press, 1994.
- [18] 张祉道. 公路隧道的火灾事故通风[J]. *现代隧道技术*, 2003, 40(1): 36-37.
ZHANG Zhi-dao. Fire disaster ventilation of highway tunnel[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2003, 40(1): 36-37.
- [19] 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 Yuan-zhou. *Safety engineering introduction*[M]. Hefei: China Science Technique University Press, 1999.
- [20] Eisner H S. The channel tunnel safety authority[J]. *Safety Science*, 2000, 36: 1-18.
- [21] Jurij M. Fire simulation in road tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003(18): 525-530.