

文章编号:1671-8879(2014)06-0125-06

沉管隧道火灾烟气蔓延特性

徐 湃¹, 蒋树屏², 周 健², 陈大飞²

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘 要:为了深入了解沉管隧道火灾过程中烟气的蔓延规律,通过理论推导与足尺试验验证相结合的方法,建立烟气流动的数学模型,推导出烟气层温度及流速沿隧道纵向衰减的理论模型。在此基础上,以港珠澳沉管隧道为研究对象,建立 1:1 足尺沉管试验隧道,配备完善的机电系统与测量系统,开展隧道火灾试验,对不同火灾热释放速率和纵向风条件下的烟气层平均温度与平均流速的预测模型进行验证。研究表明:在忽略烟气层对下层冷空气的卷吸作用时,烟气温度沿隧道纵向呈指数衰减;同时,烟气蔓延速度的衰减与温度衰减成正比,沿隧道纵向也呈指数衰减。最终给出港珠澳大桥海底沉管隧道火灾工况下烟气运动的预测模型。

关键词:隧道工程;沉管隧道火灾;足尺试验;烟气层平均温度;烟气蔓延速度

中图分类号:U459.2

文献标志码:A

Smoke spread characteristic in immersed tube tunnel fire

XU Pai¹, JIANG Shu-ping², ZHOU Jian², CHEN Da-fei²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co Ltd, Chongqing 400067, China)

Abstract: This paper analyzed the fire smoke spread in immersed tube tunnel, established smoke movement control equation, and derived the theoretical model for predicting the smoke layer temperature and velocity decay in the longitudinal direction in tunnel fires. On this basis, taking Hongkong-Zhuhai-Macao immersed tube tunnel as the research subject, this paper carried out full-scale tunnel fire test, verified the forecasting model of mean temperature and mean spread speed of smoke layer under the condition of different heat release rate and longitudinal wind. The results show that when the entrainment effect of the smoke layer on ambient air is ignored, an exponential decay model of the smoke layer temperature and velocity can be found; meanwhile, the smoke velocity varies with the change of smoke temperature. Finally, the smoke movement prediction model of Hongkong-Zhuhai-Macao immersed tube tunnel fire is proposed. 6 tabs, 4 figs, 16 refs.

Key words: tunnel engineering; immersed tube tunnel fire; full-scale test; mean temperature of smoke layer; spread speed of smoke

0 引 言

近年来,国内外隧道火灾事故的频发引起了学

者们的高度重视。日前发生的山西晋济(济源—晋城)高速公路岩后隧道火灾爆炸事故导致 42 辆车被烧毁,31 人死亡,9 人失踪,火灾持续 73 h,造成了

收稿日期:2014-07-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAG07B05)

作者简介:徐 湃(1985-),女,黑龙江哈尔滨人,工学博士研究生,E-mail: xu_pai@126.com。

巨大的人员伤亡及财产损失; Mont Blanc 隧道、Tauern 隧道和 St. Gotthard 隧道火灾都是国外典型的重特重大事故。多年来,通过对事故的调查分析表明,不完全燃烧释放的大量有毒烟气是导致隧道火灾人员伤亡的致命因素^[1-2]。为了在火灾初期合理控制烟气,确保人员安全疏散,对火灾高温烟气的蔓延特性进行深入探讨显得尤为重要。

关于烟气蔓延特征参数的研究已有报道。Delichatsios 最早研究了顶棚下方两梁间烟气温度的纵向衰减规律,提出经验关系式,并得到了 Evers 和 Kim 等人的验证^[3-5];胡隆华通过理论推导,并进行了一系列大尺寸与全尺寸试验验证,提出温度衰减模型^[6];Bailey 等对于火灾烟气流速的研究提出忽略摩擦影响时的速度衰减规律^[7];在此基础上,胡隆华推导出分别以密度差和摩擦力为主要影响因素的烟气流速分布规律^[8]。

隧道火灾烟气蔓延过程中,温度与流速的变化密切相关,前人在研究温度沿隧道纵向衰减的过程中忽略了流速的变化,而且在较少的对烟气蔓延速度的研究中,未见进行全尺寸试验的相关验证。由此看来,对烟气蔓延特性的研究缺乏整体性。此外,前人研究的模型中大多包含了过多参数,不便于实际应用,而这些参数的变化对整体结果的影响却微乎其微。为此,本文在前人研究的基础上,以港珠澳大桥沉管隧道为研究对象,通过理论推导与足尺试验验证相结合的方法,对海底特长沉管隧道火灾烟气蔓延特性进行系统分析,提出特征参数温度与流速的预测模型并进行试验验证,为火灾初期烟气的有效管理及人员的安全疏散提供了参考。

1 理论模型的建立

在火灾烟气纵向蔓延阶段,假设不考虑烟气层竖向热物理特性的变化,认为烟气层横截面热参数均匀一致。于是,烟气羽流控制体的连续性方程和能量方程构成一维偏微分方程组, x 表示隧道长度方向。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{h} (T - T_a) \quad (2)$$

式中: ρ 为烟气密度 (kg/m^3); u 为烟气蔓延速度 (m/s); c_p 为定压比热 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T 为烟气温度 (K); λ 为导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); h 为烟气层厚度 (m); α 为换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); T_a 为空气温

度 (K)。

1.1 烟气温度的纵向衰减模型

注意到式(2)右边第一项为高阶项,且该项数量级较小,忽略该项能够使方程得到合理简化。同时,本文只考虑火源功率和烟气温度均达到稳定状态的阶段。于是,式(2)可简化为

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\alpha}{h} (T - T_a) \quad (3)$$

在忽略烟气层对下层冷空气卷吸作用的情况下,有 $\rho h u = \text{const}$, 即 $\rho_0 h u_0 = \text{const}$ ^[9]。于是,对式(3)在 $x = x_0, T = T_0$ 的条件下进行定积分,获得温度衰减模型,即

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T}{\Delta T_0} &= e^{-K(x-x_0)} \\ T &= T_a + (T_0 - T_a) e^{-K(x-x_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Delta T = T - T_a$; $\Delta T_0 = T_0 - T_a$; $K = \frac{\alpha}{c_p \rho_0 h u_0}$; T_0 、 u_0 、 ρ_0 分别为参考断面的平均温度、流速和密度, x_0 为参考断面位置。

式(4)表明火灾烟气温度沿隧道纵向呈指数衰减。

1.2 烟气蔓延速度的预测模型

从另一角度分析控制方程组。

由状态方程 $pV = nRT$, 得

$$\rho T = \rho_0 T_0 \quad (5)$$

上式两端分别对 t 求偏导后,将连续性方程代入,得

$$T \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

将其带入能量方程,即

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho_0 T_0 u)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{c_p h} (T - T_a) \quad (7)$$

有

$$\frac{du}{dx} = -\frac{\alpha \Delta T}{c_p \rho_0 T_0 h} \quad (8)$$

当 $\Delta T = 0$, 即烟气温度与周围环境无温差,则由密度差产生的烟气流速也将不复存在,即 $u = 0$ 。

当 $\Delta T \neq 0$, 有

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = -\frac{\alpha \Delta T_0}{c_p \rho_0 T_0 h} e^{-K(x-x_0)} \\ x = x_0, u = u_0 \end{cases} \quad (9)$$

即

$$u - u_0 = \frac{\alpha \Delta T_0}{K c_p \rho_0 T_0 h} e^{-K(x-x_0)} - 1$$

与温度衰减模型联立,化简得

$$\frac{u}{T}=\frac{u_0}{T_0}=C$$

(10)

式中: u_0 、 T_0 分别为参考位置的平均流速与平均温度; C 为已知常数,取决于隧道结构型式和火灾热释放速率等因素。

综上,根据式(4)与式(10),已知参考断面 x_0 位置的参数,即可确定参考点下游任意位置的烟气层平均温度与蔓延速度。值得注意的是,当给出不同火灾热释放速率所对应的参考位置处的参数值时,即可获得该火源规模下的烟气温度和流速的分布情况,有利于实际应用。

2 足尺沉管隧道火灾试验

2.1 试验隧道简介

试验隧道按照港珠澳沉管隧道 1:1 等截面建造,主体隧道长 150 m,净宽 14.55 m,净高 7.1 m,壁面为钢筋混凝土结构。试验过程中,隧道外界环境温度为 20 ℃ 左右,自然风速接近于 0。隧道外景如图 1 所示。该试验隧道为目前世界上断面最大的沉管试验隧道,配置有完善的机电系统和测量系统。



图 1 1:1 足尺沉管试验隧道

Fig. 1 Full-scale immersed experimental tunnel

2.2 隧道火灾试验测量系统

2.2.1 温度测量系统

隧道空间内共采集了 330 个位置的温度信息,其分布情况如下^[10-11]:沿隧道纵向设置了 9 个监测断面,断面编号依次为 A1~A9,其中 A6 断面位于隧道中央(75 m 处),各监测断面沿隧道纵向的分布如图 2 所示。每个断面设置 5 根纵向热电偶束,用以测试整个断面温度分布,每根热电偶束距地面 1.6 m 起,每间隔 1 m 布置一个热电偶。

测试过程中,由于烟气层不同竖向高度处的温度值,随着离顶棚距离的不断增加而逐渐降低,故取烟气层内各测点温度的平均值作为该纵向位置烟气层的平均温度较为合理。

2.2.2 烟气蔓延的观测系统

燃料点燃后,烟气受浮力作用向拱顶运动形成烟羽流。烟气由火源处向上运动时,近似呈轴对称分布,直径由于卷吸作用逐渐加粗,直至撞击拱顶。

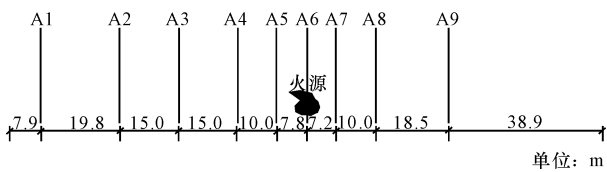


图 2 温度监测断面布置图

Fig. 2 Temperature monitoring section layout

而后向四周扩展成顶棚射流并伴有局部漩涡,厚度逐渐增加。顶棚射流遇到横向壁面阻挡后向纵向流动,先下降一段距离,随后又上升,形成反浮力壁面射流。随后,烟气浓度加大,高度趋于均匀,烟气前沿由半圆弧形形成平直线,最终形成清晰界面,如图 3 所示。通过试验现象可以看出,随着烟气向远离火源处不断蔓延,烟气层出现振荡现象,总体而言厚度不断增加。然而,为使模型简化,认为烟气层厚度沿隧道纵向不变。

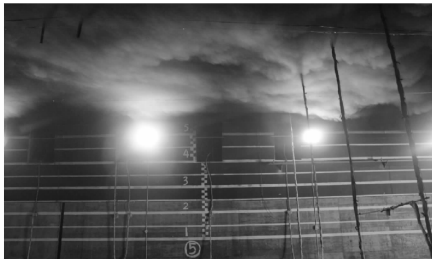


图 3 烟气层厚度

Fig. 3 Thickness of smoke layer

注:壁面排烟口为排烟试验所用,本试验排烟口关闭

对于烟气层厚度的测量,主要是通过安装于隧道侧壁的摄像机对试验过程中烟气的蔓延形态进行实时录像,通过反复观看读取不同位置处隧道侧壁烟气层稳定时的高度数据。为精确读取,在隧道壁面每间隔 0.5 m 处绘制一条高度标线。

2.2.3 烟气流速测量系统

烟气蔓延速度主要通过便携式风速仪进行测量。由于壁面粘性的影响,贴近隧道拱顶处,烟气流速较低;而烟气层下端贴近冷空气,烟气流速也较低。因此,烟气流速沿烟气层竖向先增大后减小,呈近似抛物线分布。在足尺火灾试验中,取烟气层竖向测点平均值作为该位置处的烟气蔓延速度。

2.2.4 测量系统的误差

考虑到系统误差对试验结果将造成的影响,各试验系统的误差见下页表 1。

2.2.5 数据监测系统

港珠澳大桥海底沉管隧道火灾试验数据监测系统,对火灾试验测量系统的数据进行采集并做简单的数据分析。该系统在火灾试验时可对隧道内火源

表 1 系统误差分析

Tab. 1 System error analysis

测量系统	误差/%
温度	±3~8
辐射	±5
流速	±2.5
烟气流态	±5

燃料质量、空间温度、热辐射值、烟雾成分、烟雾流速等试验参数进行监测,通过对数据的自动分析,获得火源规模、火灾工况下隧道空间的温度及烟雾分布规律等,为火灾工况下组织救援及逃生提供有效的指导。

2.3 总体试验方案

足尺隧道火灾试验的目的在于对沉管隧道火灾烟气的蔓延特性进行充分研究,重点对描述烟气运动的关键参数作定量分析;同时,试验结果将为理论模型提供有力的数据支撑。包括火源标定试验和温度场与烟雾场试验。

2.3.1 沉管隧道火源标定试验

沉管隧道火源标定试验旨在确定试验中所采用火源(油池火、木垛火)的热释放速率,同时对试验设备(热电偶、热辐射计、热流计、风速仪、烟气分析仪、摄像设备、射流风机等)的工作性能进行测试,使试验人员熟悉操作流程,并对试验隧道火灾现场的防护设备进行检验,对试验过程中可能发生的紧急情况 况进行模拟演练。

火灾热释放速率(HRR)是指单位时间内材料燃烧所释放的热量,它是定量分析隧道火灾危险程度的重要依据^[12]。试验通过失重法和热辐射法相互印证以确定火灾规模,选取具有代表性的火灾规模:根据国际道路学会的建议值,小汽车(2.5~5 MW)、巴士(20 MW)、货车(20~30 MW)、载重货柜(30 MW),试验选用 5、10、20、40 MW 这 4 个特征火灾规模,如图 4 所示^[13]。

2.3.2 沉管隧道温度场与烟雾场试验

试验任务旨在研究适用于港珠澳大桥沉管隧道工程火灾规模、能反映火灾温度、烟雾随时间、空间变化的完整火灾场景。通过足尺沉管隧道火灾试验测定描述烟气蔓延特性的关键参数,以对理论模型进行试验验证。

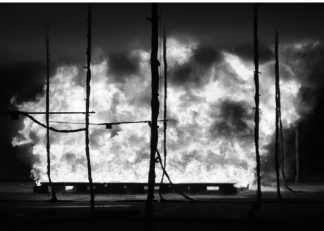
3 烟气运动模型的试验验证与应用

3.1 模型中关键参数的讨论

沉管隧道火灾烟气温度与流速的理论预测模型



(a) 5 MW火灾



(b) 40 MW火灾

图 4 试验火源

Fig. 4 Test fire

中,涉及到的相关参数包括换热系数 α 、烟气比热 c_p 及空气特性参数 ρ_0 等。其中,重点讨论换热系数的取值及其影响因素。

隧道火灾烟气与壁面之间的换热主要包括对流换热和辐射换热。对流换热系数 h_c 采用如下经验预测关系式进行计算^[14-15]

$$h_c = 2K'\sqrt{u} \tag{11}$$

式中: K' 为经验常数,取 $7.5 \times 4.186 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$ ($7.5 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$)。

根据相关文献,当烟气温度的在 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,辐射换热系数处于 $4 \sim 5.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[6]。

结合对流换热系数 h_c 与辐射换热系数 h_r ,隧道火灾总换热系数 α 为^[6]

$$\alpha = \begin{cases} h_c + h_r & \text{(烟气降至地面)} \\ h_c + h_r \frac{B + 2h + B}{B + 2h} & \text{(烟气未降至地面)} \end{cases} \tag{12}$$

式中: D 为烟流与壁面接触的长度, $D = B + 2h$; B 为沉管隧道净宽; h 为烟气层平均厚度。

另外,烟气密度 ρ_0 和比热 c_p 均随温度的变化而有所差异,具体数值可查询烟气物性参数图^[16]。

对于隧道火灾烟气一维蔓延阶段,温度在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时,密度通常取 $0.8 \sim 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$,比热取值为 $1 \sim 1.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

综合分析理论模型中的关键参数发现,影响模型结果的参数主要是烟气层平均温度、流速、烟气层

厚度和换热系数,而以上参数取决于隧道断面的结构尺寸、火灾规模和纵向风速等因素。本文以港珠澳大桥海底沉管隧道为研究对象,对不同火灾工况下的理论值与试验值进行对比验证。

3.2 足尺试验验证

假设隧道内的环境温度为 20 ℃,试验测量不同

工况参考位置的温度、密度、流速及烟气层平均厚度,如表 2 所示。参考断面的位置应选择位于隧道火灾烟气的一维蔓延阶段。根据参考位置的实测值,通过理论模型计算预测位置的温度与流速,与预测位置实测值进行对比,并计算其误差,如表 3 所示。同理,纵向风速为 1.5 m/s 时,计算结果如表 4 和表 5 所示。

表 2 参考位置参数实测值(风速 0)

Tab. 2 Measured value of reference position parameter

试验火源规模 Q/MW	烟气层平均 厚度 h/m	换热系数 $\alpha/$ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	参考位置 x_0/m	参考位置流速 $u_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	参考位置 温度 $T_0/^\circ\text{C}$	参考位置密度 $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K
5	2.0	30.02	28.0	2.0	54.00	1.10	0.006 2
10	2.5	32.82	32.8	2.5	69.04	1.08	0.004 4
20	3.5	37.66	32.8	3.5	102.74	1.00	0.002 8
40	4.0	39.83	32.8	4.0	185.00	0.79	0.002 8

表 3 预测位置的理论值与实测值(风速 0)

Tab. 3 Theoretical and measured value of prediction position

试验火源规模 Q/MW	预测位 置 x/m	环境温 度 $T_a/^\circ\text{C}$	温度理 论值/ $^\circ\text{C}$	温度实 测值/ $^\circ\text{C}$	误差/ $\%$	速度理论 值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	速度实测 值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	误差/ $\%$
5	73.0	20	45.72	45.81	0.20	1.69	1.69	-0.19
10	67.5	20	62.07	60.89	-1.93	2.24	2.12	6.02
20	67.5	20	95.09	97.05	2.02	3.24	3.15	-2.84
40	67.5	20	169.39	172.90	2.03	3.66	3.89	5.85

表 4 参考位置参数实测值(风速 1.5 m/s)

Tab. 4 Measured value of reference position parameter

试验火源规模 Q/MW	烟气层平均 厚度 h/m	换热系数 $\alpha/$ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	参考位置 x_0/m	参考位置流速 $u_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	参考位置 温度 $T_0/^\circ\text{C}$	参考位置密度 $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K
10	3.8	32.82	32.8	2.8	45.78	1.08	0.002 7
20	3.5	37.66	32.8	3.8	125.74	0.90	0.003 0
40	4.3	39.83	32.8	4.5	180.36	0.80	0.002 5

表 5 预测位置的理论值与实测值(风速 1.5 m/s)

Tab. 5 Theoretical and measured value of prediction position

试验火源规模 Q/MW	预测位 置 x/m	环境温 度 $T_a/^\circ\text{C}$	温度理 论值/ $^\circ\text{C}$	温度实 测值/ $^\circ\text{C}$	误差/ $\%$	速度理论 值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	速度实测 值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	误差/ $\%$
10	67.5	20	43.47	40.25	-8.01	2.66	2.89	8.00
20	67.5	20	115.37	110.56	-4.35	3.49	3.42	-1.98
40	67.5	20	167.24	161.89	-3.30	4.17	4.08	-2.27

由表 2~表 5 可知,当已知参考位置的烟气流速与温度,便可确定参考断面下游 x 位置处的烟气特征参数。理论值与实测值之间存在些许误差,主要是由于在理论推导过程中忽略了烟气层对下层冷空气的卷吸作用,于是,理论模型计算的烟气层温度衰减程度小于实测值,即导致了温度分布误差的产生,进一步影响了烟气流速值。理论值与实测值尽管在个别点处存在差异,但整体趋势一致,吻合程度良好,均表明烟气温度和流速沿隧道纵向是呈指数

分布的,说明了理论模型的有效性。

综上所述,通过足尺试验验证表明,理论模型能够较好地预测港珠澳沉管隧道火灾烟气的运动参数,为火灾的防治与救援提供了良好的理论基础。

3.3 港珠澳沉管隧道火灾烟气运动的预测

为计算方便,将港珠澳沉管隧道火灾不同工况的烟气温度的预测模型列于下页表 6。

通过港珠澳沉管隧道火灾烟气运动模型,能够

预测各火灾工况的烟气温度蔓延情况,为防灾与救援提供数据支撑。

表 6 烟气温度衰减模型

Tab. 6 Decreasing model of smoke temperature

火源规模/MW	纵向风速/(m·s ⁻¹)	温度模型
5	0	$T=20+34e^{-0.006\,2(x-30)}$
10	0	$T=20+49e^{-0.004\,4(x-30)}$
20	0	$T=20+83e^{-0.002\,8(x-30)}$
40	0	$T=20+165e^{-0.002\,8(x-30)}$
10	1.5	$T=20+26e^{-0.002\,7(x-30)}$
20	1.5	$T=20+106e^{-0.003\,0(x-30)}$
40	1.5	$T=20+160e^{-0.002\,5(x-30)}$
50	3.0	$T=20+83e^{-0.006\,4(x-30)}$
50	5.0	$T=20+83e^{-0.005\,4(x-30)}$

4 结 语

(1)通过隧道火灾烟气控制方程,建立烟气层温度与流速的衰减模型。研究表明,在忽略烟气层卷吸作用时,烟气温度沿隧道纵向呈指数衰减;蔓延速度与温度衰减成比例,也呈指数衰减。

(2)建立足尺隧道火灾试验平台,对理论模型进行验证。结果表明,理论模型与实测结果误差在±5%以内,具有较好的可靠度,建议推广到实际应用中。

(3)对于特征火灾规模 5、10、20、40、50 MW,预测了港珠澳大桥沉管隧道火灾参考位置下游任意位置的烟气层温度与蔓延速度。

(4)足尺试验的测量设备布置较稀疏,在今后的研究中,条件允许的情况下,可增加设备的布置密度、工况的完善程度和重复次数,以期获得更全面的基础数据。

参考文献:

References:

[1] Babrauskas V,Gann R G,Levin B C,et al. A Methodology for obtaining and using toxic potency data for fire hazard analysis[J]. Fire Safety Journal,1998,31(4):345-358.

[2] Besserre R,Delort P. Toxicité systémique de la fumée de feux ruraux;uncas clinique,deux expérimentations en laboratoire[J]. Urgences Médicales,1997,16(2):77-80.

[3] Delichatsios M A. The flow of fire gases under a beamed ceiling[J]. Combust and Flame,1981(43):1-10.

[4] Black W Z. Use of air-handing equipment to manage smoke movement during a high-rise fire [J]. ASHRAE Transactions,2009,115(1):165-181.

[5] Kim M P,Han Y S,Yoon M O. Laser-assisted visual-

ization and measurement of corridor smoke spread [J]. Fire Safety Journal,1998,31(3):239-251.

[6] 胡隆华.隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D].中国科学技术大学,2006.

HU Long-hua. Studies on thermal physics of smoke movement in tunnel fires [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2006. (in Chinese)

[7] Bailey J L,Forney G P,Tatem P A,et al. Development and validation of corridor flow submodel for CFAST[J]. Journal of Fire Protection Engineering,2002(22):139-161.

[8] Hu L H,Huo R,Li Y Z. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2005,20(3):223-229.

[9] Kursch J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel[J]. Atmospheric Environment,1998. 33(1):13-24.

[10] Li S,Zong R,Zhao W,et al. Theoretical and experimental analysis of ceiling-jet flow in corridor fires[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2011,26(6):651-658.

[11] Liu Z G,Kashef A H,Lougheed G D,et al. Investigation on the performance of fire detection systems for tunnel applications - part 2:full-scale experiments under longitudinal airflow conditions[J]. Fire Technology,2011,47(1):163-189.

[12] 钟 委,霍 然,史聪灵. 热释放速率设定方式的几点讨论[J]. 自然灾害学报,2004,13(2):64-69.

ZHONG Wei,HUO Ran,SHI Cong-ling. Some discussion on methodology to design heat release rate [J]. Journal of Natural Disasters,2004,13(2):64-69. (in Chinese)

[13] PIARC. Fire and Smoke Control in Road Tunnels [M]. Ed Rodriguez: World Road Association,1999.

[14] Huang H D. Variation of smoke temperature and smoke pressure and the corresponding fire protection engineering for underground fires [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering,1995,17(1):68-73.

[15] Tong Y,Shi M,He J. Two-layer zonal modeling of smoke movement in single fire room [J]. Dongnan Xuebao,2008,38(3):449-453.

[16] 洪荣华,吴 杰,屠传经. 烟气物性的直接计算方法 [R]. 无锡:第五届全国热管会议论文集,1996.

HONG Rong-hua,WU Jie,TU Chuan-jing. Direct calculation of flue gas properties [R]. Wuxi: Fifth National Conference on Heat Pipe,1996.