

文章编号:1006-7321(2002)01-0023-06

公路隧道火灾事故污染数值模拟与分析

陈树汪

(重庆交通学院 桥梁及结构工程系, 重庆 400074)

摘要:建立了用于描述隧道内火灾事故污染物的一维扩散模型,并用此模型对公路隧道火灾事故在短时间内污染物的流态进行了数值模拟和分析。通过模拟分析结果和实验统计结果的对比,表明了模型的可行性。最后,给出了污染物浓度计算公式,以供参考。

关键词:公路隧道;火灾;污染物;数值模拟

中图分类号:U453.5

文献标识码:A

“九五”计划以来,我国公路隧道建设方兴未艾,已经建成和正在设计、施工的隧道,有上千座。短的几十米到百余米,中等的数百米,长的数公里,甚至十几公里、几十公里。这些公路隧道有海底隧道,如规划设计中的琼州海峡隧道,有过江隧道,如上海的外环隧道、宁波的甬江隧道,还有众多的穿山越岭的陆地公路隧道,如长达19 km的秦岭隧道。正是公路隧道建设的黄金时期。公路隧道发展迅速,但在消防安全上却存在许多不安全因素,急待研究解决。

隧道内发生火灾后产生高温和大量的有毒气体,造成巨大的人员伤亡和财产损失。据日本全国统计,每年公路隧道发生火灾事故在4 000~5 000起,居其他灾害事故之首。1979年日本坂隧道火灾、1996年英法海底隧道火灾、1999年法国及意大利间的Mont Blanc隧道火灾及澳大利亚Jauern隧道火灾都是震惊于世的。对此,公路隧道火灾研究工作已引起了国际上的高度重视。近二三十年来,日本、瑞士、奥地利等国纷纷进行研究和实地模拟隧道火灾试验,研究隧道火灾的危害性及其消防对策。我国城市建设等有关部门,也针对隧道防火设计问题开始进行研究。但由于各种原因,工作开展较缓慢。到目前为止,我国仍没有专门的公路隧道设计防火规范。因此,本文试图对短时间内的隧道内的空气动力学行为、火源的变化及污染物的变化等通过一维对流扩散方程进行数值模拟,并结合隧道火灾实验报告建议性给出一污染物浓度计算公式,以供参考。

1 模型的描述

公路隧道中,由于洞壁的限制,污染物只能沿洞轴方向作一维扩散,虽然污染物分布在隧道横断面的平面上,但它所代表的问题的性质和点源的一维扩散是相同的。因此,对于有一定长度的隧道,其内的污染物,无论是有害气体还是悬浮物,都可以由以下的一维对流扩散方程来描述:

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + u \frac{\partial(C)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [(\epsilon_m + \epsilon_r + D)A \frac{\partial C}{\partial x}] + SS \quad (1)$$

式中: C 为污染物浓度; u 为隧道内的纵向风速; A 为隧道横断面有效通风面积; ϵ_m 为分子扩散系数; ϵ_r 为紊流扩散系数; D 为弥散系数; SS 为污染物的源与漏; t 为时间变量; x 为距污染源的距离。

考虑公路隧道之特点,隧道横断面有效通风面积 A 可取为常数,并记 $SS/A=f$,即方程(1)可简化为:

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + u \frac{\partial(C)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [(\epsilon_m + \epsilon_r + D)A \frac{\partial C}{\partial x}] + f, \quad (2)$$

• 收稿日期:2001-11-19

作者简介:陈树汪(1978-),男,广西宾阳人,硕士生,主要从事公路隧道工程研究工作。

式中: $\epsilon_u, \epsilon_T, D$ 由经验公式事先给出。

据研究表明, ϵ_u 具有 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 的数量级, ϵ_T 具有 $10^{-2} \sim 1 \text{ m}^2/\text{s}$ 的数量级, 故常可忽略 ϵ_u, ϵ_T 不计。而弥散系数一般为 $10 \sim 103 \text{ m}^2/\text{s}$ 的数量级, 是不可忽略的。在方程(2)中重要的是如何正确地给出源与漏项 f , 这将直接影响模型适用性和预测性。很准确地给出源与漏项是很困难的, 它涉及到污染物的各种复杂的物理和化学过程。目前, 确定源与漏项的方法主要有反推法、实验室法等。本文先结合前人的工作和隧道内火灾的特点以下述经验公式给出源与漏项, 然后通过数值模拟和实验数据统计反过来验证了源与漏项的正确性。源与漏项描述下。

1.1 源

隧道内火源主要是随时间 t 而变化。在一维的情况下, 火源可简化为一点源或线源(可用一系列点源模拟)。为此, 按点源情况给出以下火源变化函数:

$$f_t = f_0 \exp(-t/N) \quad (3)$$

式中: f_0 为 $t=0$ 时的火源工况; f_t 为 t 时刻的火源工况; N 为一常数。

为便于分析, 把火源等效为污染源处理, 则有:

$$C_t = C_0 \exp(-t/N) \quad (4)$$

式中: C_0 为 $t=0$ 时污染源某污染物的浓度; C_t 为 t 时刻的污染源某污染物的浓度; N 为一常数。

1.2 漏

“漏”在隧道内主要表现为污染物的沉积与黏附。为此, 可采用一衰减系数 K 来对污染物浓度“漏”的变化率进行描述, 即对“漏”函数 $\text{sink}(x, t)$ 有

$$\text{sink}(x, t) = KC(x, t) \quad (5)$$

式中: $C(x, t)$ 为 t 时刻 x 处的污染物浓度。

隧道内污染物的“漏”主要属于一级衰减反应。一级衰减反应, 衰减速率为常数, 即 K 可取为常数。

经以上分析, 得出源与漏项关系式后就可求出各时刻、位置下的污染物各参数值了。

2 计算结果分析

本文算例取 $C_0 = 50 \text{ ppm}$, $K = 0.00002$, $D = 5000 \text{ m}^2/\text{s}$, 隧道内风速 $u = 2.5 \text{ m/s}$ (按交通阻滞工况计)。隧道断面当量直径 $D_r = 8.17 \text{ m}$, 排烟洞口距离火源为 1500 m 。采用 MATLAB5.3 编程进行模拟分析, 分析时间过程长 $T = 900 \text{ s}$ 。由于篇幅所限, 仅列出部分分析结果, 如图 1~8。

从图 1~8 中可以看出, 在开始分钟内, 污染物浓度急剧增加, 之后随时间的推移而逐步下降, 约 15 min 以后逐渐趋零。这表明火灾时事故通风具有较强的净化能力。

隧道内污染物的浓度受多种因素影响, 主要因素有: (1) 污染物自身不断的增加, 汽车废气的排

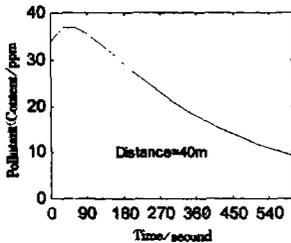


图1 距火源 40 m 处, 污染物浓度随时间变化

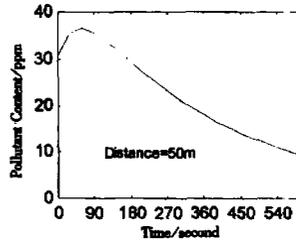


图2 距火源 50 m 处, 污染物浓度随时间变化

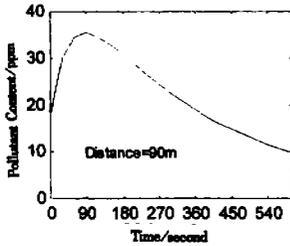


图3 距火源 90 m 处, 污染物浓度随时间变化

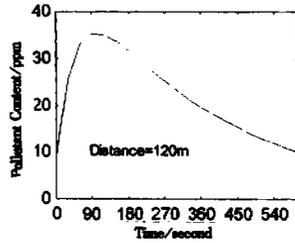


图4 距火源 120 m 处, 污染物浓度随时间变化

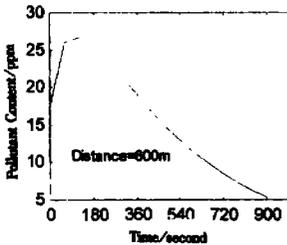


图5 距火源 600 m 处, 污染物浓度随时间变化

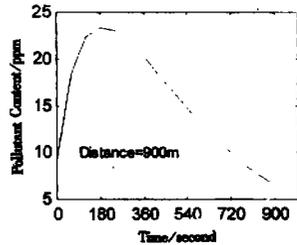


图6 距火源 900 m 处, 污染物浓度随时间变化

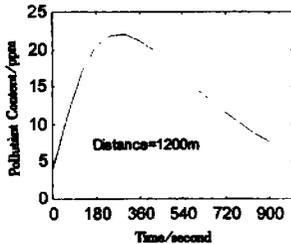


图7 距火源 1 200 m 处, 污染物浓度随时间变化

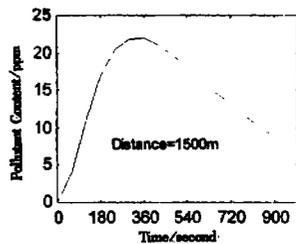


图8 距火源 1 500 m 处, 污染物浓度随时间变化

放、火灾事故时产生的烟雾等。本文仅单独考虑火灾事故因素;(2)物理性的消失,如烟尘的黏附、沉降和随隧道通风排出洞外等;(3)化学性的消失,如被氧化成无毒、无害的物质,这一点本文没有给出模拟公式。以上各种因素的总和决定了污染物的浓度,当消失率大于增加率时,隧道内将进行净化作用。反之亦然。

3 实验报告统计

模型的可行性必须以实验进行验证。为此,本文引用日本建设省土木研究所的隧道内火灾实验报告并对其进行统计处理。本实验火源燃料为汽油,在实体隧道内进行。实验隧道横断面简图及实验条件如下图9~10、表1。隧道内均采用纵向通风方式。表1中的NO CASE=4~5对应图12的隧道。

表1 火灾实验条件

序号	NO CASE	火器面积(m ²)	汽油量(L)	风速(m/s)	水喷雾
1	4G-0.65	4	288	0.65	无
2	6G-3	6	432	2.0	无
3	4G-5	4	288	5.0	无
4	4G-2	4	288	2.5	无
5	4G-5	4	288	4.5	无

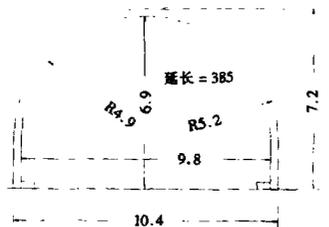


图9 实验隧道1横断面简图(m)

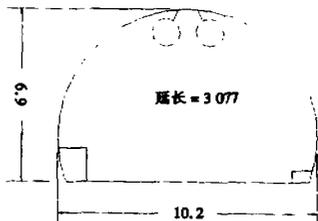


图10 实验隧道2横断面简图(m)

为了探求火灾时污染物分布的规律,本文采用美国的 MATLAB 软件在最小二乘的意义上,对实验测定所得数据进行了多项式曲线拟合逼近。采用的多项式形式为:

$$\lg(y) = [\text{Coefficient}][X] \quad (6)$$

式中:[Coefficient]=[$a_n \ a_{n-1} \ \dots \ a_1 \ a_0$],为多项式的系数向量, n 为多项式次数;

[X]=[$x_n \ x_{n-1} \ \dots \ x \ 1$],为多项式的自变量的幂向量, n 为多项式次数。

与实验测定数据相对应, y 值对应测定的 CO 浓度, x 对应时间变量 t 。

通过对拟合逼近程度及误差大小的对比分析,可以发现 $n=8$ 时,逼近较好。图 11~14 是部分实验测定数据拟合逼近及误差图,左边图为拟合逼近图,右边为对应的误差图。拟合逼近图中 y 轴取对数坐标。

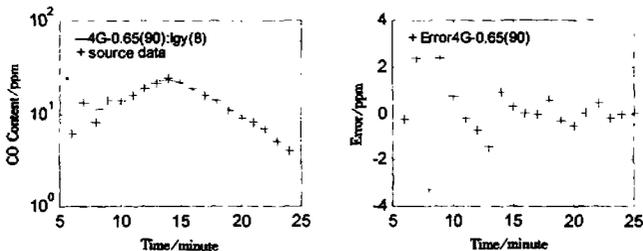


图11 拟合逼近及误差图

在以上各拟合逼近图中,标注条的第一个括号内的值表示实验测定断面距离火源的距离,第二个括号内的值表示多项式的次数。第一括号前的项表示对应的 NO CASE。“lg y ”表示 y 轴取对数坐标,“source data”表示实验测定的数据。通过对比分析,可知道实验测定的污染物的流态分布形态和模型数值模拟的结果是基本吻合的,这也说明了模型的正确性。

为了对实际工程设计有所帮助,根据实验数据统计结果,本文给出一污染物浓度计算公式,以供参考。表 2 为 $n=8$ 时的多项式系数表。

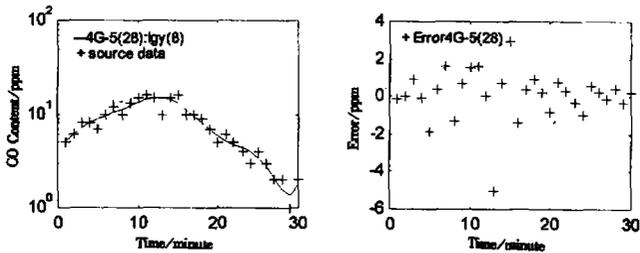


图12 拟合逼近及误差图

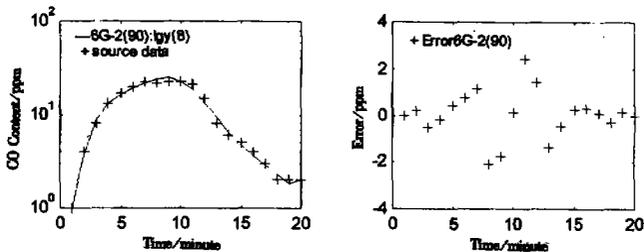


图13 拟合逼近及误差图

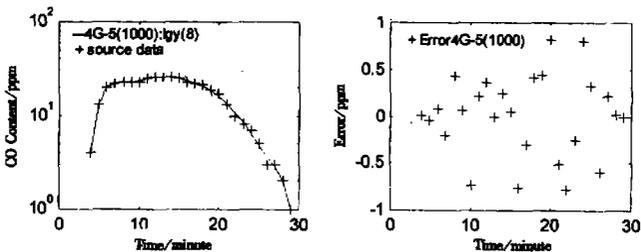


图14 拟合逼近及误差图

综上,给出污染物浓度计算公式如下:

$$\lg(C) = K_0 \cdot (a_6 \cdot t^6 + a_5 \cdot t^5 + a_4 \cdot t^4 + a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0) \quad (7)$$

式中: K_0 为火源强度系数,反映火灾的规模大小,火灾越大其值越大。系数 $a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ 主要与火源(即污染源)的强度、隧道的纵向风速以及断面的位置、大小等有关。可参照上表类取值。

4 总结

本文根据气体动力学的质量守恒定理建立了隧道内火灾事故时污染物的扩散模型,并运用MATLAB软件编程对模型进行了数值模拟。实验结果统计表明模型是正确、可行的。在数值模拟

表2 多项式系数($n=8$)

NO CASE	Coefficient									
4G-5(90)	-0.000 0	0.000 0	-0.000 0	0.000 3	-0.005 4	0.051 5	-0.271 8	0.762 5	-0.246 6	
4G-5(28)	0.000 0	-0.000 0	0.000 0	-0.000 2	0.002 9	-0.019 4	0.063 3	-0.021 7	0.684 4	
6G-2(28)	-0.000 0	0.000 0	-0.001 2	0.018 4	-0.169 0	0.916 4	-2.850 6	4.721 8	-1.932 1	
6G-2(90)	0.000 0	-0.000 0	0.000 1	-0.002 0	0.017 2	-0.071 0	0.030 5	0.773 1	-0.742 3	
4G-0.65(28)	-0.000 0	0.000 0	-0.000 1	0.002 8	-0.052 6	0.603 7	-4.126 8	15.447 7	-22.856 4	
4G-0.65(90)	-0.000 0	0.000 0	-0.000 2	0.006 1	-0.121 1	1.477 7	-10.825 9	43.472 3	-72.280 6	
4G-2(120)	0.000 0	-0.000 0	0.000 1	-0.001 4	0.016 0	-0.096 3	0.263 9	-0.135 3	0.079 3	
4G-2(1 000)	-0.000 0	0.000 0	-0.000 0	0.001 6	-0.044 6	0.736 0	-7.236 0	38.756 3	-85.213 9	
4G-5(1 000)	-0.000 0	0.000 0	-0.000 1	0.001 6	-0.031 6	0.372 7	-2.645 4	10.316 4	-15.599 4	

和实验统计的基础上,建议性地给出了一污染物浓度计算公式,希望对我国公路隧道工程防火设计工作有所帮助。

本文在撰写的过程中,得到了重庆交通科研设计院蒋树屏研究员的热心帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] [联邦德国]W. Kofang Kinzelbach, 汤汝均等编著. 水环境数学模型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [2] 李引擎, 等. 建筑安全防火设计手册[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1998.
- [3] 蒋水璠, 等. 高层建筑和地下工程防火设计问答[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [4] [美]T. J. Chung. 流体动力学的有限元分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [5] [日本]建设省土木研究所トンネル研究室. トンネル内火災実験報告書(Ⅰ)(縦流換気における火災実験) [R]. 昭和 58 年.
- [6] 张宜华. 精通 MATLAB5[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

Analysis and Simulation of the Highway Tunnel Fire Contamination

CHEN Shu-Wang

(Department of Bridge & Structure Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A one-dimensional contamination diffusion model for tunnel fire is presented. Based on this model, a highway tunnel fire within a short time course was simulated and analyzed. Compared to the test results, the simulation result demonstrates that the model is feasible. In the end, it suggests a formula for highway tunnel fire contamination. The author hopes that this analysis will be available as the foundation of highway tunnel fire control.

Keywords: highway tunnel; fire; contamination; simulation