

FDS6 对隧道火灾温度场模拟的适用性研究

钟 委, 李兆周, 吕金金, 梁天水

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 采用火灾动力学软件 FDS6 对隧道火灾开展数值模拟, 得到不同火源功率下羽流区温度分布和纵向风作用下羽流撞击区最高温度. 将模拟结果与 FDS5 的模拟结果进行对比发现, 采用了新的湍流燃烧模型后, FDS6 模拟的火源高温区集中在火羽流底部, 燃烧产生的热量有相当部分通过热辐射的形式向周围空气传递, 并导致隧道顶棚下方羽流撞击区温度明显低于 FDS5 的模拟结果. 对纵向风作用下羽流撞击区最高温度的模拟结果表明, FDS6 的预测值明显低于 Kurioka 模型预测值和隧道火灾实验值.

关键词: FDS; 隧道火灾; 羽流区温度; 最高温度

中图分类号: U458.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.009

0 引言

在隧道火灾的相关研究中, FDS 作为国内外学者普遍认可的分析和验证性工具得到了大量运用, 如研究隧道火灾羽流撞击区最高温度^[1], 抑制烟气逆流临界纵向风速^[2], 隧道自然排烟效果^[3]等. 因此, FDS 对隧道火灾温度场模拟的准确性尤为重要. Chen^[4]通过实验和 FDS5 研究了隧道内烟气流动和温度分布; Hu^[5]针对隧道顶棚下方最高温度开展了全尺寸火灾实验模拟, 并将 FDS5 模拟的最高温度与实验值进行了对比. 研究表明, FDS5 的模拟值与实验值吻合得相当好, 可以有效地模拟火灾中烟气流动和热传递过程. 2012 年 12 月, NIST 发布了最新版 FDS6, 在原有模型的基础上进行了许多重要改进. 其中, 在原 LES 模型的混合分数燃烧模型基础上, 采用了部分扰动分批处理反应器模型 (Partially - Stirred Batch Reactor), 目的是为了地更好地模拟湍流燃烧. 当然, 增加新特性后, 软件对隧道火灾的模拟效果还有待进一步验证. 因此, 笔者采用 FDS6 中 LES 模型模拟隧道火灾场景, 研究隧道内火源区域温度分布和纵向风作用下顶棚下方最高温度.

1 理论基础

FDS5 包括两种燃烧模型: 混合分数燃烧模型和有限速率多步反应模型. FDS6 在 FDS5 燃烧模型的基础上进行了较大改进. 无化学反应发生时,

网格内局部质量分数如下:

dy_alpha/dt = 1 / tau_mix * (Y_bar_alpha - Y_alpha) (1)

式中: Y_alpha 为初始物质 alpha 的质量分数; tau_mix 为网格内特征混合时间; Y_bar_alpha 为网格内物质 alpha 的平均质量分数.

在模型中, 网格内某一个时刻只存在两种状态: 完全未混合和完全混合.

次网格的概率密度函数 (PDF) 如下:

f(psi_alpha) = w1 * delta(0 - psi_alpha) + w2 * delta(1 - psi_alpha) + w3 * delta(Y_bar_alpha - psi_alpha) (2)

式中: delta(x) 为单位脉冲函数; psi_alpha 为组成的样本空间且 psi_alpha in (0, 1); w1, w2, w3 为权重.

只有在燃料和氧气混合后的区域才可能发生化学反应. 这里分为两个部分: 混合 (质量从未混合区到混合区) 与反应. 在 FDS 每一步计算完后, 混合区和未混合区重新产生最终的网格内平均质量分数, Y_bar_alpha(t).

dm_alpha/dt = M * dY_hat_alpha/dt + Y_hat_alpha * dM/dt = M * dY_hat_alpha/dt - Y_hat_alpha,0 * dU/dt (3)

Y_hat_alpha(t) = m_alpha(t) / M(t) (4)

式中: m_alpha 为物质 alpha 的质量; M(t) 为已混合质量; U(t) 为未混合质量. 一旦知道最后混合区域的质量, 通过重组混合区和非混合区的份额, 计算区域的结构为

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-09-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51104132); 火灾科学国家重点实验室开放课题 (HZ2012-KF01)
作者简介: 钟委 (1978-), 男, 重庆江津人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事地下建筑火灾防治及化工安全技术研究, E-mail: zhongwei@zzu.edu.cn.

$\bar{Y}_\alpha(t) = \zeta(t) \bar{Y}_{\alpha,0} + (1 - \zeta(t)) \hat{Y}_\alpha(t).$ (5)

式中: ζ 为未混合分数.

2 模拟试验设计

2.1 模型参数设定

隧道尺寸为 60 m × 10 m × 5 m (长 × 宽 × 高). 火源设置在隧道中心 30 m 处, 尺寸为 1 m × 1 m × 0.2 m (长 × 宽 × 高). 在距隧道入口 30 m 处的火源中心线上, 每隔 0.2 m 设置一个热电偶, 共设置 24 个. 在距隧道顶部 0.2 m 处, 设置的第一个热电偶距中心线为 0.5 m, 设置其它热电偶的间距为 1 m, 共设置 20 个, 如图 1 所示.

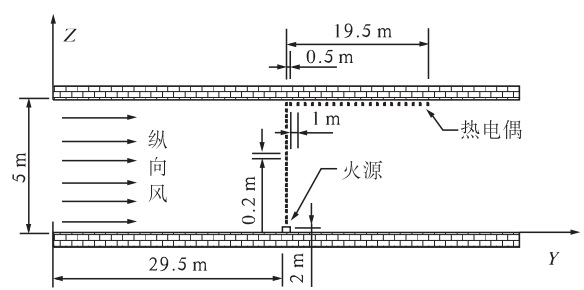


图 1 隧道模型示意图
Fig. 1 Schematic view of tunnel model

2.2 网格设置

FDS 用户指南^[6]建议在计算网格系统时可以参考特征火源直径与网格尺寸的比值, 即 $D^* / \delta(x)$. 其中, 特征火源直径定义为

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}.$$
 (6)

式中: \dot{Q} 为火源热释放速率; ρ_∞ 为空气密度; c_p 为空气比热容; T_∞ 为环境温度; g 为重力加速度.

研究表明, 当 $D^* / \delta(x)$ 的取值在 4 ~ 16 时, 数值模型可以很好地解决火灾烟气中的湍流问题. 经计算, 火源功率 5 MW 较适合的网格大小在 0.10 ~ 0.45 m 之间.

7 种不同网格大小模拟的火源上方温度如图 2 所示. 从图可知, 当网格密度大于 0.1 m 时, 隧道高度 4 ~ 5 m 处温度变化不大. 因此, 网格选取 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m 时符合网格独立性要求.

2.3 试验算例设置

模拟的算例可以分为 2 个系列, 隧道尺寸、热电偶布置、网格设置都相同, 火源燃料均为煤油, 环境温度为 20 ℃. 在系列 1 中分别利用 FDS6 和 FDS5 模拟火源功率为 5 MW, 无纵向风时隧道火灾羽流区温度分布; 系列 2 中分别利用 FDS6 和 FDS5 模拟工况 4 ~ 25, 所有工况都考虑热辐射效应, 如表 1、表 2 所示.

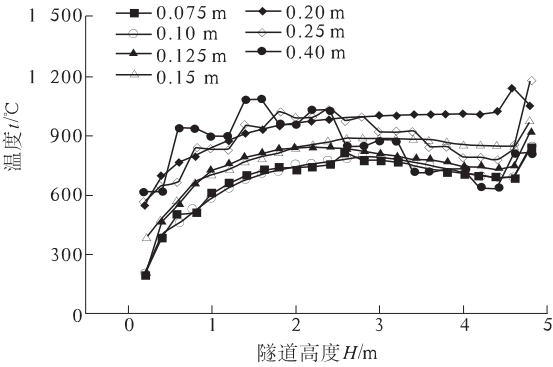


图 2 火源上方垂直温度分布
Fig. 2 The vertical temperature distribution above the fire source

表 1 系列 1 工况的参数设置
Tab. 1 Parameter settings of series 1

工况	版本	火源功率 \dot{Q} / MW	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	热辐射
1	FDS6	5	0	开启
2	FDS5	5	0	开启
3	FDS6	5	0	关闭

表 2 系列 2 工况的参数设置
Tab. 2 Parameter settings of series 2

工况	火源功率 \dot{Q} / MW	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	工况	火源功率 \dot{Q} / MW	纵向风速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
4	5	0.1	15	5	4.0
5	5	0.2	16	5	4.5
6	5	0.3	17	5	5.0
7	5	0.4	18	5	5.5
8	5	0.5	19	5	6.0
9	5	1.0	20	1	2.0
10	5	1.5	21	7	2.0
11	5	2.0	22	10	2.0
12	5	2.5	23	15	2.0
13	5	3.0	24	20	2.0
14	5	3.5	25	30	2.0

3 结果与讨论

3.1 火源区温度分布

图 3 给出了火源功率为 5 MW 时, 采用 FDS6 和 FDS5 模拟得到的火源区温度分布. 从图 3 可以看出, FDS6 模拟的火源高温区主要集中在火源底部, 出现了温度超过 1 000 ℃ 区域, 而温度超过 800 ℃ 的区域主要集中在 2 m 以下, 顶棚下方出现了 470 ℃ 的温区. FDS5 模拟的羽流底部温度不高于 600 ℃, 而 800 ℃ 高温区出现在羽流中部, 并在顶棚下方出现了 1 000 ℃ 的高温.

在火羽流周围空气区温度分布方面, FDS5 模

拟结果中火羽流附近空气温升不明显,图 3(b)中 25 ℃ 等温线高度在 4 m 左右,这表明火源对周围空气的加热作用不明显,绝大部分热量在羽流内部传递.而 FDS6 的模拟结果中火羽流附近空气有明显温升,图 3(a)中 25 ℃ 等温线高度降到了 1.5 m.

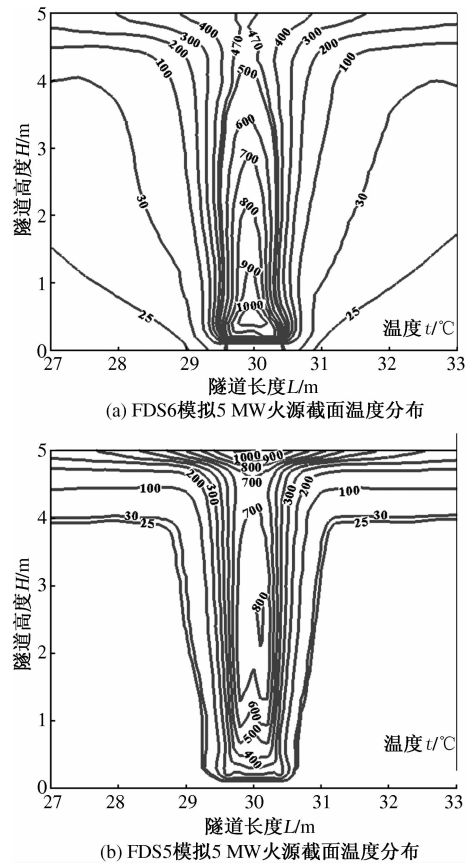


图 3 过火源截面温度分布
Fig.3 The temperature distribution of fire section

由以上分析可知,FDS6 对燃烧模型的算法改进后,模拟的燃烧反应主要集中在火羽流底部,且辐射热损失较大,而 FDS5 模拟的燃烧反应主要集中在羽流中上部.因此,隧道顶棚下方羽流撞击区的温度必然低于 FDS5 的模拟结果.

3.2 热辐射对羽流温度的影响

为了验证热辐射对羽流温度分布的影响,在算例 3 中关闭了 FDS6 中的热辐射选项,对火源功率为 5 MW 时羽流温度分布进行了模拟,结果如图 4 所示.可以看出,在不考虑羽流热辐射的情况下,羽流周围空气温度有明显的降低,其中 25 ℃ 等温线升高至 4 m 左右;而羽流高温区也升温明显,800 ℃ 高温区超过了 2 m,顶棚下方出现了 500 ℃ 以上的高温.对比图 3(a)可见:FDS6 中由于热辐射作用,导致羽流内部温度下降.

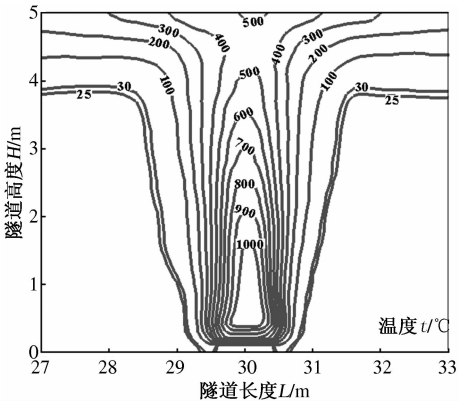


图 4 不考虑热辐射时羽流温度分布
Fig.4 The plume temperature distribution without radiant heat

3.3 顶棚下最高温度

在隧道火灾中,火源上方及近火源区域产生的高温常常对隧道拱顶结构产生严重破坏,因而对隧道顶棚下方烟气最高温度的研究具有重要意义.Kurioka^[7]通过小尺寸试验,对不同纵向风速下隧道内火源区温度进行了研究,建立了经验关系式预测顶棚下最高温度.将 Kurioka 最高温度模型的预测值与 FDS6、FDS5、Li^[8](FDS5)、周湘川^[9](FDS5)的模拟值及 Liu^[10]、Ingason^[11]、王彦富^[12]的实验结果进行比较,如图 5 所示.

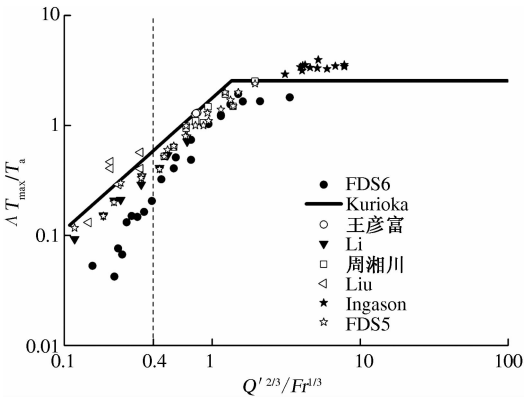


图 5 Kurioka 最高温度模型与模拟值和实验值比较
Fig.5 Comparison of maximum temperature by the model of Kurioka, simulations and previous experiments

从图 5 可知,FDS5 模拟的羽流撞击区最高温度与 Kurioka 模型的预测值符合的较好,Liu、王彦富和 Ingason 的实验也验证了 Kurioka 模型的有效性.FDS6 模拟的最高温度增长趋势与 Kurioka 模型基本一致,也可分为增长段和稳定段.然而 FDS6 模拟的最高温度明显低于 Kurioka 模型的预测值,当火源功率较小或者纵向风较大,即 $Q^{1/2/3}/Fr^{1/3} < 0.4$ 时,二者的偏差尤为严重.

4 结论

(1)采用新的湍流燃烧模型后,FDS6 模拟的燃烧反应主要集中在火羽流底部,且辐射热损失较大,羽流的热量有相当部分通过热辐射的形式向周围空气传递,导致以对流形式在羽流内部传递的热量减少。

(2)FDS5 模拟的隧道顶棚最高温度值与 Kurioka 模型的预测值及实验值符合较好;而 FDS6 模拟的最高温度值则明显低于 Kurioka 模型的预测值,在火源功率较小或者纵向风较大的情况下,FDS6 的模拟结果与 Kurioka 模型预测值偏离较为严重,在使用 FDS6 对隧道火灾进行数值模拟计算时应注意。

参考文献:

- [1] JI Jie, FAN Chuan-gang, ZHONG Wei, et al. Experimental investigation on influence of different transverse fire locations on maximum smoke temperature under the tunnel ceiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(17): 4817–4826.
- [2] DENG Jun, MA Li, WANG Zhen-ping, et al. Simulation study on critical velocity of longitudinal ventilation tunnel fire[J]. Procedia Engineering, 2013, 52: 67–71.
- [3] JI Jie, GAO Zi-he, FAN Chuan-gang, et al. A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21): 6032–6041.
- [4] CHEN Xiao-jun. Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(1): 75–79.
- [5] HU Long-hua, HOU Ran, PENG Wei, et al. On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 650–655.
- [6] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R. Fire dynamics simulator (version 6) user's guide[R]. Washington DC: NIST Special Publication, 2013: 37.
- [7] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 319–340.
- [8] LI Li-ming, LI Sen, WANG Xue-gui, et al. Fire-induced flow temperature along tunnels with longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 44–51.
- [9] 周湘川. 特长公路隧道现场火灾试验与衬砌结构抗火性能研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2011.
- [10] 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): 191–220.
- [11] INGASON H, LI Ying-zhen. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(6): 371–384.
- [12] 王彦富, 蒋军成, 龚延凤, 等. 隧道火灾拱顶附近烟气最高温度的研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 17(10): 39–44.

Study on Applicability of FDS 6 to Simulate the Fire in Horizontal Long Tunnel

ZHONG Wei, LI Zhao-zhou, LV Jin-jin, LIANG Tian-shui

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Fire dynamics software FDS6 is used to simulate the scenarios of tunnel fire, the temperature distribution of the plume and the maximum temperature of plume impingement zone under the action of longitudinal wind are obtained with different fire power. With a new turbulent combustion model, the results of FDS6 show that the high temperature zone of fire source focus on the bottom of plume and a considerable part of plume heat transfer to ambient by thermal radiation. The heat transferred by convection in plume is reduced, and the temperature of the plume impact region under tunnel ceiling is obviously lower than the results of FDS5. The maximum temperature of plume impingement zone under the action of longitudinal wind obtained by FDS6 is significantly lower than the Kurioka model predictions and the tunnel fire experimental values.

Key words: FDS; tunnel fire; plume zone temperature; maximum temperature