

# 基于 FDS 仿真火灾温度下隧道衬砌安全评估<sup>\*</sup>

安永林, 彭立敏, 杨伟超

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 为了研究火灾下隧道衬砌的安全性, 首先采用火灾模拟软件 FDS4.0 模拟不同规模的火灾: 通过许多小的长方体堆砌建立隧道的实体模型, 并采用 FDS4.0 中的多重网格技术(Multiple Meshes)进行网格划分; 然后结合仿真得到横断面的温度场与相应温度下的材料参数, 应用荷载-结构模式(即直刚法)对二次衬砌的安全性进行评估。结果表明: 小规模火灾下( $<20\text{ MW}$ ), 衬砌的安全性能得到满足, 在较大火灾规模下( $\geq 20\text{ MW}$ ), 拱顶的安全性得不到满足, 而其余部位的安全性满足要求; 随着火灾规模的增大, 衬砌安全系数逐渐降低, 拱顶的安全系数降低梯度最大。最后, 对衬砌的耐火措施提出了一些建议。

**关键词:** 隧道火灾; 隧道衬砌; 安全评估; 直刚法

**中图分类号:** U459.2; U492.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)02-0096-05

## 1 概述

隧道与地下工程是“西部大开发”、“城市化进程”中的“交通血脉”, 是实现资源节约、环境友好、可持续发展、和谐发展、科学发展的主要途径<sup>[1]</sup>。但是, 由于隧道长度的增加、交通量的日益加大、运输物品越来越复杂和恐怖主义(人为纵火)等多种因素的作用, 隧道火灾风险概率不断上升, 无论是公路隧道、铁路隧道, 还是地铁都时有重大火灾发生<sup>[2,3]</sup>。隧道火灾温度高、升温速度快, 不仅会对衬砌结构造成严重的损坏, 还影响衬砌结构体系的可靠性与火灾中的人员疏散安全<sup>[4,5]</sup>。因此, 在地下空间大规模开发的背景下, 如何保证地下结构的火灾安全性并及时对火灾后衬砌损伤进行评估是目前亟待解决的问题。

近几年, 火灾下隧道衬砌的研究深受国内外学者和工程人员的重视: 彭立敏等首先探讨了隧道火灾后衬砌材料的物理力学性能, 并对衬砌损伤进行了模糊评估<sup>[6,7]</sup>; 马建秦等提出了铜-黄公路某通道衬砌混凝土在火灾中受损后的补强措施<sup>[8]</sup>; 黄红元等分析了隧道火灾衬砌失效的原因及危害<sup>[9]</sup>; 安永林等对衬砌损伤的规律进行了灰色预测与评估<sup>[4,5]</sup>; Anon 研究了 RWS 温升曲线下隧道衬砌混凝土的抗裂、抗剥落性<sup>[10]</sup>; Pichler

Christian 针对添加聚丙烯的衬砌混凝土的高温性能, 分析了火灾荷载与衬砌混凝土的脱水、混凝土的强度等关系<sup>[11]</sup>。

本文结合火灾模拟软件 FDS4.0 与直刚法, 对不同火灾规模下的二次衬砌进行安全评估, 并据此提出一些衬砌的耐火措施。

## 2 工程概况

邵怀高速公路是国家重点建设“五纵七横”国道主干线中上海至瑞丽高速公路的一部分, 路线以隧道穿过邵阳市与怀化市交界的雪峰山脉, 隧道进口距洞口县江口镇约 3 km, 隧道进口位于洪江市塘湾乡兰家村, 出口位于洪江市铁山乡小溪村。隧道上、下行线分离, 按两座独立隧道设计。隧道左洞长 7 305 m, 右洞长 7 350 m, 左右洞平均长度为 7 327.5 m, 按隧道分类属特长隧道, 其长度居我国公路隧道第 3。雪峰山隧道消防按 250 m 左右为标准设为若干分区, 便于事故检测定位及紧急状态的监控、救援控制。

## 3 隧道火灾温度场仿真

### 3.1 模型原理

采用适用于低马赫数的 Navier-Stokes 方程进行

\* 收稿日期: 2007-10-11

基金项目: 西部交通科技建设项目(20033179802)

作者简介: 安永林(1981-), 男, 安徽寿县人, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程结构与防灾方面的研究。

E-mail: anyongling@yahoo.com.cn

火灾的大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)。其控制方程包含火灾过程的质量、能量、动量和化学反应等方面,由于篇幅所限,具体的求解过程可参见相关方面的书籍<sup>[12]</sup>。

### 3.2 几何模型与网格划分

雪峰山隧道横通道间距平均为 250 m,一个防火分区约为 700 m~800 m,因此,取隧道长 800 m 进行模拟,计算区域为 7 m×10 m×800 m。

因为在 FDS4.0 中,只能模拟边为直角的物体(长方体),所以对于隧道这样拱部为曲面的建模比较麻烦,多数研究者是对矩形隧道(一般为明挖的框架或者地下通道等隧道结构)或者根据水力半径等效原理将非矩形隧道简化为矩形进行模拟,这样建立的实体模型和实际相差较远,仿真的结果也值得商榷。为此,本文采用许多小的长方体进行堆砌的方法来模拟实际隧道(图 1a)。同时,为了消除由于长方体堆砌形成的锯齿状对气流的影响,以达到仿真的精确性、可靠性,在 FDS4.0 输入文件的建模语句中加“SAWTOOTH = . FALSE. /”,部分的建模语句如下:

“&OBST

XB = - 6.15, - 5.42, 0., 800., 0.25, 2.07,  
SAWTOOTH = . FALSE. /

&OBST

XB = - 5.85, - 5.1703, 0., 800., 2.07, 3.63,  
SAWTOOTH = . FALSE. /

&OBST

XB = - 5.17, - 4.5703, 0., 800., 3.63, 4.70,  
SAWTOOTH = . FALSE. /

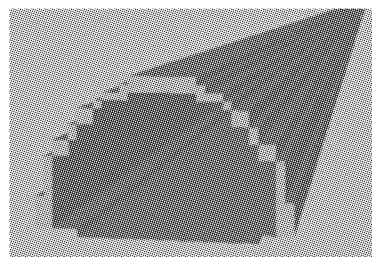
&OBST

XB = - 4.57, - 3.970, 0., 800., 4.70, 5.44,  
SAWTOOTH = . FALSE. /

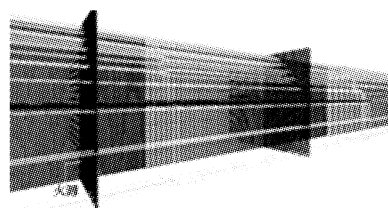
&OBST

XB = - 3.97, - 3.37., 800., 5.40, 6.14, SAW-  
TOOTH = . FALSE. /.....”

为了减少网格的数量,节约计算时间,采用 FDS4.0 中的多重网格技术(Multiple Meshes)<sup>[13]</sup>,将隧道模拟的区域按照离火源的远近,沿隧道轴线划分为若干个小区域,每个小区域采用不同的网格尺寸。网格划分在火源附近用较精细的网格划分:隧道宽度方向的网格为 0.2 m,高度方向的网格为 0.1 m,隧道轴线方向的为 0.1 m;在离火源较远处采用较粗的网格;共计划分了 70.5 万个(图 1 b)。



a. 实体模型



b. 模型的网格划分

图1 隧道模型图

### 3.3 火灾场景与模拟的工况

火灾场景设为通风失效下小轿车起火、客车(或货车)起火、油罐车起火三种场景,根据相关文献,即为小规模火灾(火源功率 5 MW)、中等规模火灾(火源功率 20 MW)、大规模火灾(火源功率 50 MW)。3 种工况均在大型计算机工作站上进行计算,每个工况计算时间约 6 d。因为本文重点是研究温度的横向分布,所以火灾发展模式设为稳态定常火源,且火源位于隧道的中线。

### 3.4 模拟结果

火源处不同火灾规模下横断面的温度场分布如图 2 所示。从图 2 中可以看出:①总体上,高温集中在拱顶附近,而下方温度较低,如 5 MW 时,下方的大部分温度低于 50℃。②随着火灾规模的增大,拱顶和下方的温度整体升高,如 5 MW 时,拱顶温度集中在 300℃;20 MW 时,拱顶温度集中在 800℃,下方温度约 50℃左右;50 MW 时,拱顶温度集中在 900℃,路面附近温度达到 100℃。③随着火灾规模的增大,温度场的分布越紊乱,即火灾时的涡流(紊流)程度越高。

## 4 火灾下衬砌安全评估

### 4.1 计算模型的参数

二次衬砌采用厚 40 cm 的 C25 混凝土,其弹性模量为 29.5 GPa,泊松比为 0.2,弹性抗力系数取为 IV 级围岩的小值 200 MPa/m。假定火灾下混凝土的泊松比与抗力系数不变,则参照文献<sup>[14]</sup>,可得参数如表 1 所示。

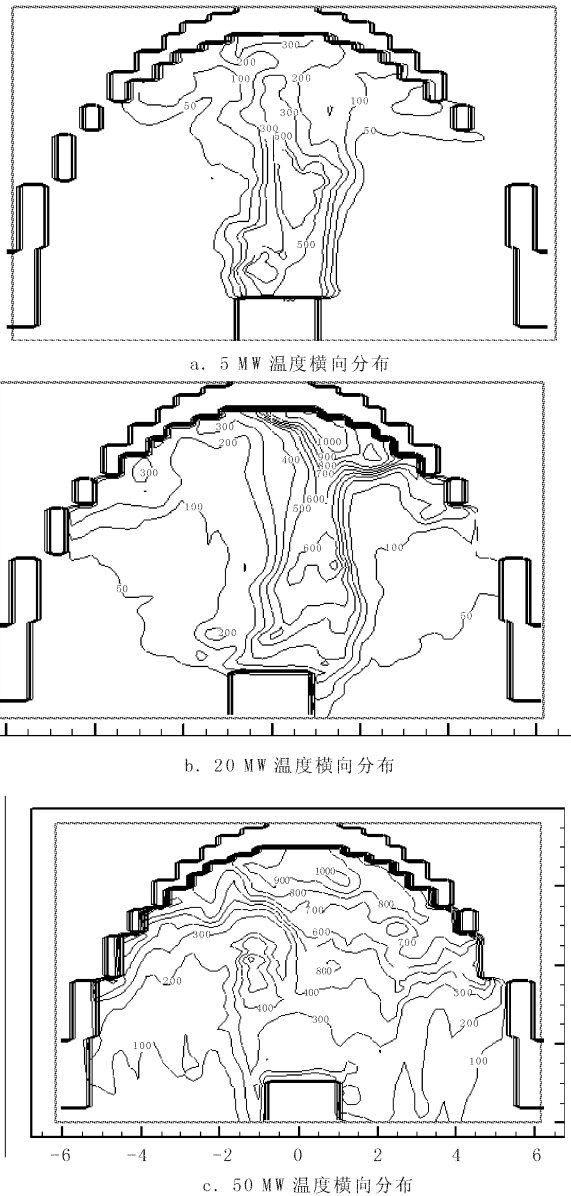


图2 火源处的温度场横向分布

表1 计算考虑的参数损失

温度量级/℃	混凝土弹性模/GPa	混凝土的抗压强度/MPa	混凝土的抗拉强度/MPa
常温	29.5	19	2
100	28.32	18.24	1.88
200	27.14	17.48	1.77
300	25.96	16.72	1.65
500	23.38	15.12	1.31
600	21.13	13.73	1.11
700	18.39	11.97	0.94
800	15.16	9.85	0.78
900	11.43	7.36	0.64

4.2 计算模型与荷载

计算模型采用荷载－结构模式，因为隧道是运营状态时发生火灾，所以同时考虑仰拱回填和路基的重量(图3)。荷载取为深埋地段的，根据新奥法原理，以围岩和初期支护为承载主体，二次衬砌为围岩压力的20%，则按规范可得：竖向荷载 $q=23.04\text{ kPa}$ ，水平荷载 $e=4.61\text{ kPa}$ 。

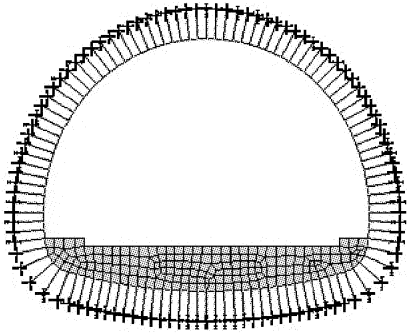


图3 荷载－结构模式的计算模型

4.3 安全性判定的原理

安全性的判断原理可参见公路隧道设计规范<sup>[15]</sup>。

4.4 计算结果

为节省篇幅，图4给出了20 MW时二次衬砌的弯矩、轴力、位移。从图4中可以看出：①拱顶和拱腰处的弯矩较大，而二次衬砌下方的弯矩较小；②总体上，二次衬砌的轴力为上部小，下部大，其中仰拱部的轴力较大；③二次衬砌整体位移向下，其中拱顶部位的向隧道内部移动，而墙角部位的向围岩方向移动，位移最大的也发生在此处。

4.5 安全判定

弯矩最大的在拱顶和拱腰，因此，以拱顶和拱腰的安全性作为判据。表2给出了不同火灾规模下拱顶和拱腰的弯矩、轴力、安全系数、位移。从表2中分析可知：①对于弯矩，拱顶和拱腰的弯矩都随着火灾规模的提高而减小，这是由于火灾高温的作用，衬砌受到损伤，减少了衬砌拱顶附近的刚度，另外，对于拱顶弯矩下降的幅度要大于拱腰的，且减小幅度最多的阶段是0~20 MW。②对于轴力，拱顶轴力随着火灾规模的提高而提高，而拱腰的轴力随着火灾规模的提高而略微减小。③对于安全系数，拱腰的安全系数始终大于规范的数值3.6，满足要求；而拱顶，当火灾规模<20 MW时，安全性满足要求，而当火灾规模较大时，安全性不满足。④对于拱顶沉降，数值不大，50 MW时，沉降为2.2 mm，比无火灾时增加22%。

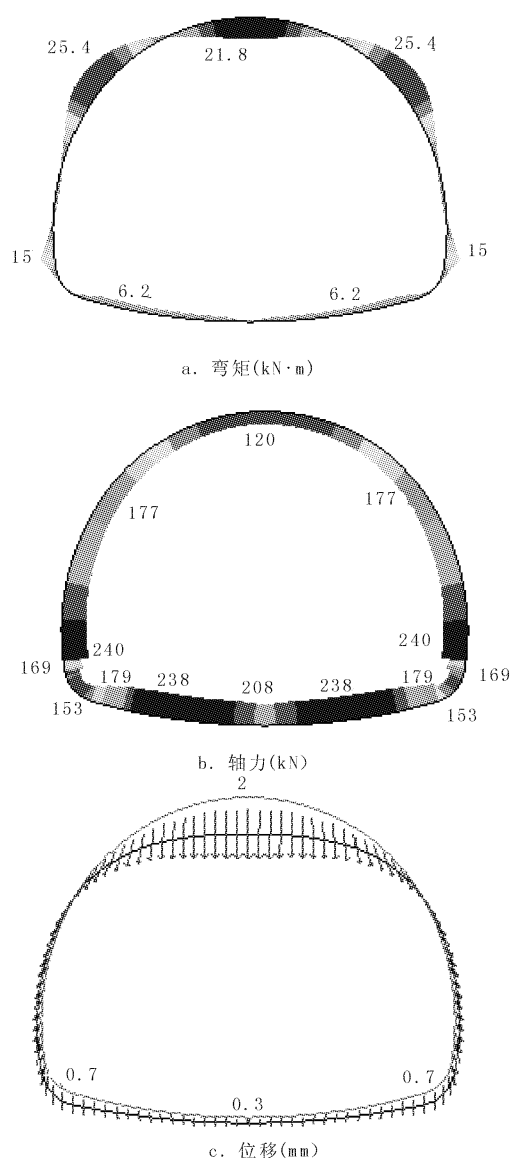


图4 20 MW 时二次衬砌的弯矩、轴力和位移

表2 不同火灾规模下衬砌的内力、位移与安全系数

火灾规模/MW	弯矩/kN·m		轴力/kN		安全系数		拱顶沉降/mm
	拱顶	拱腰	拱顶	拱腰	拱顶	拱腰	
0	30	-25	116	175	4.2	7.0	1.8
5	28	-25	117	175	3.8	6.6	1.8
20	22	-25	121	172	2.6	5.7	2.0
50	20	-22	123	170	2.5	4.1	2.2

## 5 隧道衬砌耐火建议

(1) 二次衬砌尽量采用低膨胀、小粒径的骨料以减轻高温下混凝土的爆裂性剥落; 在隧道的拱部喷涂隧道专用防火涂料, 且耐火极限不小于 2 h<sup>[16]</sup>。

(2) 在经济条件允许的情况下加大通风排烟

量, 以达到扑灭火灾和降低隧道火灾对内部的温升作用。

(3) 进行防火分隔<sup>[17]</sup>, 为了控制火势, 防止蔓延, 应在隧道内部划分防火分区, 划分防火分区的原则应结合隧道自身结构特点将隧道、风井、电缆或通信沟(桥架)、机房间、逃生通道等部位分开设为独立的防火分区。

## 6 结论

(1) 基于 FDS4.0 中的大涡模拟方法仿真隧道火灾, 并用许多小的长方体堆砌的方法来建立实际隧道的形状, 克服了 FDS4.0 模拟曲面隧道的困难; 同时为了减少网格的数量, 节约计算时间, 采用 FDS4.0 中的多重网格技术(Multiple Meshes)进行网格划分, 模拟结果表明这种处理是合理可行的。

(2) 运营状态下, 拱顶和拱腰处的弯矩较大, 而二次衬砌下方的弯矩较小; 二次衬砌的轴力为上部小, 下部大, 其中仰拱部的轴力较大。

(3) 小规模火灾下(<20 MW), 衬砌的安全性能够得到满足, 在较大火灾规模下(≥20MW), 拱顶的安全性得不到满足, 而其余部位的安全性满足要求; 随着火灾规模的增大, 衬砌安全系数逐渐降低, 拱顶的安全系数降低梯度最大。

## 参考文献:

- [1] 彭立敏, 安永林, 杨高尚. 雪峰山特长公路隧道火灾时人员疏散风险性评估[C]//2006 年公路隧道运营管理与安全国际学术会议. 重庆: 重庆大学出版社, 2006, 120-125.
- [2] 彭立敏, 安永林, 杨高尚. 隧道火灾调研及其对雪峰山隧道防灾设计的启示[J]. 灾害学, 2006, 21(3): 103-106.
- [3] 安永林, 彭立敏, 杨高尚. 特长公路隧道内的横通道间距和车行间距研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 128-131, 136.
- [4] 安永林, 彭立敏, 杨高尚. 用 GM(1, 1) 预测隧道火灾后衬砌的损伤[J]. 山西建筑, 2006, 32(2): 259-260.
- [5] 安永林, 彭立敏, 杨高尚. 隧道火灾后衬砌损伤的灰色综合评判[J]. 地下空间与工程, 2006, 2(2): 163-165.
- [6] 胡自林, 彭立敏, 余晓琳. 隧道火灾后衬砌材料物理力学性能变化试验[J]. 火灾科学, 2002, 11(3): 186-190.
- [7] 彭立敏, 王薇, 王英. 隧道火灾后衬砌损伤等级的模糊评判方法探讨[J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16(2): 11-16.
- [8] 马建秦, 陈万春. 衬砌混凝土火灾损伤调查分析及处置措施[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(4): 50-54.
- [9] 黄红元, 刘伟, 赵明阶, 等. 厦门东通道隧道的衬砌保护措施初探[J]. 公路交通技术, 2005, (6): 111-113.
- [10] Anon. High-temperature fire resistance for concrete [J]. Con-

- crete Construction-World of Concrete, 2004, 49( 8): 50.
- [11] Pichler Christian. Safety assessment of concrete tunnel linings under fire load [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(6): 961–969.
- [12] Kevin McGrattan. Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide [R]. National Institute of Standards and Technology(NIST), U. S. Department of Commerce. USA, 2004 (in English).
- [13] Kevin McGrattan. Fire Dynamics Simulator (Version 4) Users' Reference Guide [R]. National Institute of Standards and Technology(NIST), U. S. Department of Commerce. USA, 2004.
- [14] 彭立敏. 隧道火灾后衬砌结构力学特性及损伤机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [15] JTGD70–2004. 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [16] 安永林, 彭立敏. 火灾荷载下南京盾构隧道衬砌与行车道板的安全性评估[C]//2007 年全国公路隧道学术交流会征集论文. 重庆: 重庆大学出版社, 2007, 123–128.
- [17] 杨毅, 宋早雪, 周丽萍, 等. 大型建筑构件在突发性事件中的抗火性能分析[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 114–119.

## Assessment of Tunnel Lining Damage Based on High Temperature Derived from FDS Simulation

An Yonglin, Peng Limin and Yang Weichao

(College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** FDS4.0 (Fire Dynamic Simulator) is firstly used to simulate fire with different heat release rate (5MW, 20MW and 50MW) under no ventilation. Small cuboids are heaped to build curve tunnel, and multiple meshes technology is used to establish grids. Then, based on the transverse distribution of temperature derived from fire simulation and material properties from relative experiments, lining safety is assessed by load-structure model, that is direct stiffness method. Results show: under small fire scales, lining safety can meet requirement, but under large fire scales, only lining safety of crown can not meet requirement; with fire scale increasing, safety coefficient decreases, especially in crown. Some suggestions on fire prevention of lining are finally given.

**Key words:** tunnel fire; tunnel lining; safety assessment; direct stiffness method

(上接第 95 页)

## Fire Forces Optimizing in Freeway Tunnel Groups Based on Emergency Rescue Risk

Jiang Xuepeng and Xu Zhisheng

(Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute,  
Central-South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The layout of fire forces in freeway tunnel groups has become an important effect on efficiency of emergency rescue. The idea and method of the optimized disposition of fire forces are put forward in terms of emergency rescue risks based on the response time of fire engine. Taking Cangling tunnel groups as an example, some optimized suggestions are presented to improve the time-efficiency of emergency rescue.

**Key words:** tunnel groups; fire safety; fire forces; optimization