

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-577-05

# UTLT 类隧道半横向排烟方式下排烟阀参数及排烟量对排烟效果影响

李彪 冯炼

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 为了解和掌握半横向通风排烟模式下城市地下交通联系隧道的火灾工况变化规律, 基于 FDS 数值模拟软件, 以某城市地下交通联系隧道实际工程作为研究对象, 建立全尺寸的隧道物理模型。通过分析对比不同排烟阀面积、不同排烟阀开启个数、不同排烟阀间距及不同排烟速率大小的四种排烟方案下隧道内烟气温度场及烟气蔓延范围分布规律变化, 探究了不同工况下各参数对火灾烟流特性的影响。结果表明, 在半横向通风排烟模式下选取排烟阀面积大小为  $3\text{m}^2$ 、排烟阀间距为  $24\text{m}$ 、排烟阀开启个数为 6 个以及设置排烟速率为  $60\text{m}^3/\text{s}$  时, 隧道火灾烟流控制效果较好。

**【关键词】** UTLT 类隧道; 半横向通风排烟; 数值模拟; 烟流特性  
中图分类号 TU83 文献标识码 A

## The Parameters of Smoke Exhaust Valve and the Amount of Smoke Exhaust in UTLT Tunnel with Semi-horizontal Smoke Exhaust Mode Affect the Smoke Exhaust Effect

Li Biao Feng Lian

(Southwest Jiaotong University, School of Mechanical Engineering, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In order to understand and master the changing law of fire conditions in urban traffic link tunnel under semi-lateral ventilation mode, this paper based on FDS numerical simulation software, taking the actual project of urban traffic link tunnel of a city as the research object, and establishing full-scale tunnel physics Model. By analyzing and comparing the distribution of smoke temperature field and smoke spread range under the different smoke exhaust valve area, the number of different exhaust valve opening, the different exhaust valve spacing and the different smoke exhaust rate of the tunnel. The changes were explored to investigate the effects of various parameters on fire smoke characteristics under different working conditions. The results show that in the semi-horizontal ventilation and exhaust mode, the area of the exhaust valve is  $3\text{m}^2$ , the distance between the exhaust valves is  $24\text{m}$ , the number of exhaust valves is 6, and the exhaust rate is  $60\text{m}^3/\text{s}$ , the smoke flow control effect of tunnel fire is the best.

**【Keywords】** UTLT; Semi-lateral ventilation; Numerical simulation; Smoke flow characteristics

## 0 引言

随着城市化发展步伐的进一步加快, 城市人流量及车流量的急剧增长, 使得城市地面道路交通变得越来越拥挤, 大力发展城市地下交通方式是减缓地面交通拥堵现状的方法之一, 而城市地下交通联

系隧道 (以下简称: UTLT 类隧道) 就是其中的一种。该类隧道一般为环形结构, 位于城市核心区域, 隧道内的车流量较大且车速较慢, 使得该类隧道火灾排烟不同于一般公路隧道。

目前关于 UTLT 类隧道火灾研究主要对火灾

作者简介: 李彪 (1995.06-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 15983615289@163.com

通讯作者: 冯炼 (1964-), 女, 博士, 教授, E-mail: lancyfeng90@163.com

收稿日期: 2019-03-09

排烟方案做了系统的探讨<sup>[1-7]</sup>, 而对于该类隧道在采用半横向通风排烟方式下, 排烟阀参数、排烟速率对火灾烟流特性的影响研究还存在不足之处。因此, 本文基于 FDS 数值模拟软件对其进行了更为深入的分析研究, 探究半横向通风排烟模式下城市地下交通联系隧道火灾烟流特性。

目前国内已建成的部分 UTLT 类隧道工程, 如表 1 所示。

表 1 部分城市环隧及排烟方式统计<sup>[3,8]</sup>

Table 1 Part of the city UTLT project And smoke discharge way statistics<sup>[3,8]</sup>

隧道名称	隧道长度/km	并联环道个数	通风排烟方式
北京 CBD 核心区环隧	1.5	1	纵向式
北京通州北环环隧	1.5	3	全横向式
北京奥南环隧	5.5	1	半横向式+自然补风
苏州火车站环隧	2.2	1	纵向式
武汉 CBD 地下交通环廊	2.2	1	纵向式
重庆解放碑 UTLT	3.0	1	全横向式
成都大源环隧	2.8	1	半横向式

### 1 基本理论方程

隧道火灾研究一般采用实体试验和数值模拟两种方法, 由于数值模拟计算较实体试验有着成本低、操作简单和缩短研究周期等优点, 使得数值模拟在隧道火灾研究中应用较为广泛。火灾发生后隧道内烟气流动是一个复杂的三维非稳态流动过程, 其遵循流体动力学基础方程。

(1) 质量守恒方程:

参加化学反应各物质的质量总和, 等于反应后生成各物质的质量总和。

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

(2) 组分守恒方程:

系统内某种化学组分质量对时间的变化率, 等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分生产率之和。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i \vec{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + m_i''' \quad (2)$$

(3) 动量守恒方程:

系统相互作用开始时的总动量等于相互作用

结束时(或某一中间状态时)的总动量。

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] + \nabla p = \rho \vec{g} + \vec{f} + \nabla \cdot T \quad (3)$$

(4) 能量守恒方程:

微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热量加上外界对微元体所做的功。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p - \nabla \cdot \vec{q}_r + \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_i \nabla \cdot (h_i \rho D_i \nabla Y_i) \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $h$  为比焓,  $\text{J/kg}$ ;  $\nabla$  为 Hamilton 算子,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ ;

$\vec{u}$  为速度矢量,  $\text{m/s}$ ;  $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$  为第  $i$  种组分的质量分数;  $D_i$  为第  $i$  种组分的扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $m_i'''$  为单位体积内第  $i$  种组分的质量生成率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $G$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\vec{f}$  为作用于流体上的重力除外的外力,  $\text{N}$ ;  $T$  为粘性力张量,  $\text{N}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $h_i$  为组分气体的焓,  $\text{J/kg}$ ;  $q_r$  为化学反应项。

本文设置火源为面火源模型, 大小为  $4\text{m} \times 2\text{m}$ , 火灾规模设为  $7.5\text{kW}$ , 其发展速率为超快速增长方式, 模拟采用丙烯作为代替火源, 碳烟粒子产量系数按软件默认值设置。

### 2 计算模型

#### 2.1 隧道物理模型建立

计算模型截取实际地下交通联系隧道工程的一段, 全长约为  $700\text{m}$ , 本文主要考虑火灾发生在主隧道直线段时的情况, 一旦发生火灾, 立即开启排烟风机, 将火灾烟气通过拱顶排烟道排至外界。考虑到隧道物理建立的可行性, 对主隧道截面做简化处理, 如忽略送风管道、消防栓管、喷淋主管及桥架等结构, 如图 1 所示。本文采用 Pyrosim 软件建立隧道物理模型, 隧道物理模型如图 2 所示。

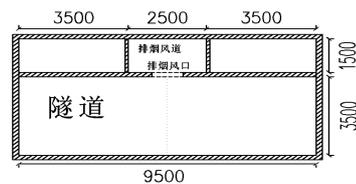


图 1 简化后的隧道断面图

Fig.1 Simplified tunnel section

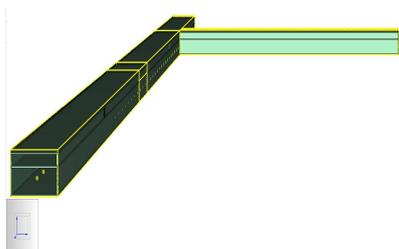


图 2 隧道物理模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of tunnel physical model

### 2.2 工况设置

在半横向通风排烟方式下, 设置三种不同的排烟阀面积, 分别为  $1.0\text{m}^2$ 、 $2.0\text{m}^2$ 、 $3.0\text{m}^2$ ; 以及设置三种不同的排烟阀间距, 分别为  $24\text{m}$ 、 $30\text{m}$ 、 $40\text{m}$ ; 火源附近排烟阀开启个数分别为 2、4、6; 设置两种不同排烟速率分别为  $50\text{m}^3/\text{s}$ 、 $60\text{m}^3/\text{s}$ 。具体模拟工况设置如表 2 所示。

表 2 模拟工况设置

Table 2 Simulated operating condition setting

编号	火源位置	排烟阀设置情况	排烟速率
a-1	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $1.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-2	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $2.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-3	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-4	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $30\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-5	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $40\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-6	直线段中心点处	排烟阀开 2 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-7	直线段中心点处	排烟阀开 4 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $50\text{m}^3/\text{s}$ ;
a-8	直线段中心点处	排烟阀开 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 排烟阀面积 $3.0\text{m}^2$	排烟速率 $60\text{m}^3/\text{s}$ ;

### 2.3 烟气有效控制指标

城市地下交通联系隧道烟控目标, 主要是为隧道内滞留人员提供安全的疏散环境, 由隧道火灾实验结论, 确定安全疏散时间为  $6\text{min}$ 。结合目前对于该类隧道的研究成果<sup>[9,10]</sup>及世界道路协会 PIARC 标准, 设置  $6\text{min}$  疏散时间内距离火源点  $30\text{m}$  外区域的火灾烟气控制效果指标:

- ①人员高度处烟气温度不得超过  $60^\circ\text{C}$ ;
- ②火灾烟气控制在火源附近  $300\text{m}$  范围内。

## 3 顶部排烟口参数研究

### 3.1 排烟阀面积大小影响

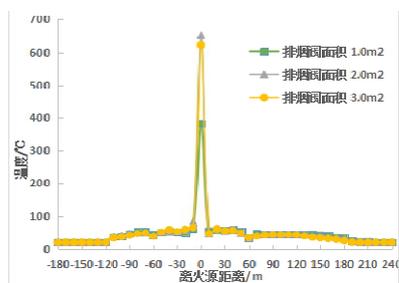


图 3 不同排烟阀面积下人员高度处烟气温度分布

Fig.3 Flue gas temperature distribution at height of personnel under different smoke exhaust valve areas

图 3 为不同排烟阀尺寸面积下火源附近人员

高度处烟气温度分布情况, 及火源上下游烟气蔓延距离对比如表 3 所示。

表 3 不同排烟阀面积尺寸下烟气蔓延距离

Table 3 Smoke spreading distance under different smoke exhaust valve area sizes

编号	参数设置情况	烟气蔓延距离 (m)
a1	开启 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 面积 $1.0\text{m}^2$ ; 排烟速率为 $50\text{m}^3/\text{s}$	338
a2	开启 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 面积 $2.0\text{m}^2$ ; 排烟速率为 $50\text{m}^3/\text{s}$	315
a4	开启 6 个, 间距 $24\text{m}$ , 面积 $3.0\text{m}^2$ ; 排烟速率为 $50\text{m}^3/\text{s}$	295

由模拟结果可知, 火灾烟气蔓延范围随着排烟阀面积的增大而缩短, 当排烟阀尺寸面积为  $3\text{m}^2$  时, 火灾烟气蔓延距离为  $295\text{m}$ , 且人员高度处烟气温度小于  $60^\circ\text{C}$ , 均满足烟气控制指标, 而当排烟阀面积为  $1\text{m}^2$  及  $2\text{m}^2$  时, 火源上下游烟气蔓延距离均超过了  $300\text{m}$ , 不满足烟气控制指标。故排烟阀面积取  $3\text{m}^2$ , 烟气控制效果更好。

### 3.2 排烟阀间距影响

图 4 为不同排烟阀间距下火源附近人员高度处烟气温度分布情况及火源上下游烟气蔓延范围

的对比情况，如表 4 所示。

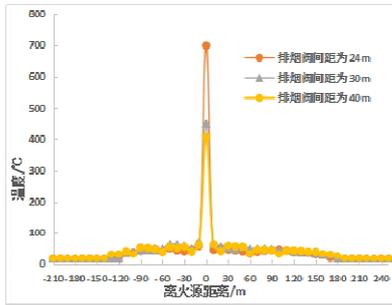


图 4 不同排烟阀间距下人员高度烟气温度分布

Fig.4 Flue gas temperature distribution at height of personnel under different smoke valve spacing

表 4 不同排烟阀间距下烟气蔓延范围

Table 4 Smoke spread range under different exhaust valve spacing

编号	参数设置情况	烟气蔓延范围 (m)
a2	开启 6 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	270
a4	开启 6 个, 间距 30m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	290
a5	开启 6 个, 间距 40m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	320

通过分析三种不同排烟阀间距下烟流扩散情况，可知排烟阀间距为 30m 时，火源 30m 外区域内人员高度处烟气温度超过了 60℃，不满足烟气控制指标；排烟阀间距为 40m 时，烟气蔓延距离为 320m，不满足烟气控制指标；排烟阀间距为 24m 时，烟气蔓延距离及人员高度处温度均满足烟控指标，故选取排烟阀间距为 24m，火灾烟控效果更好。

### 3.3 排烟阀开启个数影响

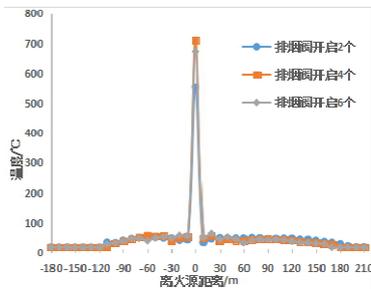


图 5 不同排烟阀开启个数下人员高度处温度分布

Fig.5 Flue gas temperature distribution at height of personnel under different numbers of smoke exhaust valve opening

图 5 为不同排烟阀开启个数下火源附近隧道

拱顶处烟气温度分布情况及火源上下游烟气蔓延距离的对比情况，如表 5 所示。

表 5 不同排烟阀开启个数下烟气蔓延范围

Table 5 Smoke spreading range under different Numbers of smoke exhaust valve opening

编号	参数设置情况	烟气蔓延范围 (m)
a6	开启 2 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	345
a7	开启 4 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	280
a3	开启 6 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	270

对比分析不同排烟阀开启个数下的烟流扩散情况，当排烟阀开启个数为 2 个时，烟气扩散范围为 345m，不满足烟控指标；当排烟阀开启个数大于 4 个时，火灾烟气扩散范围及人员高度处温度分布情况均满足烟控指标，综合分析，选取排烟阀开启个数为 4 个较为合理。

### 3.4 排烟速率影响

图 6 为不同排烟速率下火源附近人员高度处烟气温度分布情况及火源上下游烟气蔓延距离的对比情况，如表 6 所示。

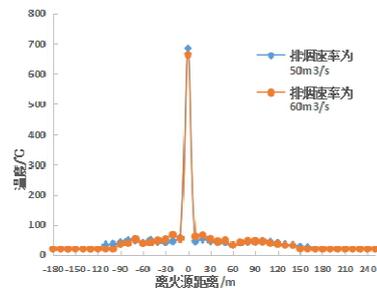


图 6 不同排烟速率下人员高度处烟气温度分布

Fig.6 Flue gas temperature distribution at height of personnel under different smoke exhaust rates

表 6 不同排烟速率下烟气蔓延范围

Table 6 Flue gas spread range under different smoke exhaust rates

编号	参数设置情况	烟气蔓延范围 (m)
a3	开启 6 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 50m <sup>3</sup> /s	270
a8	开启 6 个, 间距 24m, 面积 3.0m <sup>2</sup> ; 排烟速率为 60m <sup>3</sup> /s	240

对比发现,两种不同排烟速率下烟气蔓延范围及人员高度处温度分布均满足烟控指标,在满足烟控要求的前提下,选取排烟速率为 $50\text{m}^3/\text{s}$ 时更为经济合理。

#### 4 结论

本文针对城市地下交通联系隧道半横向通风排烟模式下,在主隧道直线段内发生火灾时,对不同排烟阀面积大小、间距及开启个数及不同排烟速率对隧道内火灾烟气流动特性影响进行研究分析,研究表明,在满足火灾烟气控制指标的情况下:

(1) 选取排烟阀尺寸面积为 $3\text{m}^2$ 时,具有更好的烟控效果。

(2) 排烟阀间距为 $24\text{m}$ 时,有利于火灾烟气控制,继续增大间距时,反而导致排烟效果降低。

(3) 当排烟阀开启个数为4个时的烟流控制效果较好。

(4) 排烟道内的排烟速率取 $50\text{m}^3/\text{s}$ 时,对于火灾烟气控制更为有利。

#### 参考文献:

[1] 华高英.城市地下交通联系隧道性能化防火设计研究

[D].北京:北京工业大学,2009.

- [2] 李乐.地下环形隧道集中排烟模式的试验研究[J].消防科学与技术,2014,33(12):1373-1376.
- [3] 董兴国.UTLT类隧道纵向通风火灾排烟效果的数值模拟研究[D].北京:北京工业大学,2014.
- [4] 夏勇,王伟,华高英,等.城市地下交通联系隧道排烟方式探讨[J].建筑科学,2016,32(2):92-98.
- [5] GUO X J, YUAN J P, FANG Z, et al. Study on smoke control of Wuhan CBD Urban traffic link tunnel[J]. Procedia Engineering, 2013,52(52):124-130.
- [6] 张满可,陈荣恒.多环道城市环隧纵向排烟模拟研究[J].消防科学与技术,2015,34(9):1162-1166.
- [7] 李明轩,李乐,卢国建,等.环形公路隧道火灾集中排烟试验研究[J].消防科学与技术,2015,34(1):38-41.
- [8] 刘克,王旭.多环城市环隧连接道纵向排烟方案研究[J].消防科学与技术,2015,34(3):325-328.
- [9] 张志刚.某城市地下交通联系隧道火灾烟气控制研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [10] 廖曙江,林昊宇,翁庙成,等.城市地下交通联系隧道烟气控制探讨[J].安全与环境学报,2017,17(2):546-552.