

集中排烟公路隧道入口段火灾下诱导风速研究^{*}

徐志胜¹, 于年灏¹, 张 新^{1,2}, 姜学鹏^{1,2}, 赵红莉¹, 李伟平³

(1. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075; 2. 中国人民武装警察部队学院
灭火救援技术公安部重点实验室, 河北 廊坊 065000; 3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 为研究集中排烟模式下公路隧道入口段发生火灾时的合理诱导风速, 以某公路隧道为背景, 运用火灾动力学模拟软件 FDS 对隧道入口段火灾时不同坡度、不同诱导风速的 16 组火灾工况进行模拟研究, 通过对各工况下隧道内的温度场分布及烟气控制效果模拟结果的分析, 得到了各工况下的合理诱导风速, 研究结果可为公路隧道集中排烟系统关键设计参数提供参考。

关键词: 隧道火灾; 集中排烟; 诱导风速; 烟气蔓延; 排烟效率

中图分类号: TU988.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)03-0097-05

2000 年以来, 我国公路隧道的数量和长度与日俱增, 截至 2010 年底, 全国公路隧道已达 7 384 处、512.26 万 m^[1]。由于隧道结构和环境条件的特殊性, 其消防安全问题日益严峻^[2-4], 隧道火灾时通风排烟系统对降低火灾损失、减少人员伤亡起着至关重要的作用。目前, 在国内外公路隧道中普遍采用纵向排烟模式和集中排烟模式, 吴德兴等对这两种排烟模式的设计理念做了研究, 指出集中排烟模式的排烟效果及防灾能力具有明显的优越性^[5-6], 但目前集中排烟模式在我国的应用及相关研究较少。当公路隧道入口段发生火灾时, 如果采用纵向排烟模式将烟气通过中部竖井或隧道出口排出, 烟气将流经隧道大部分空间, 对隧道结构破坏很大^[7]。同时, 由于公路隧道入口段多为负坡度, 纵向排烟需要的通风风速较大^[8], 不但会增加通风设备的成本, 而且较大的通风风速容易扰乱烟气分层, 不利于人员疏散及救援。如果采用集中排烟模式, 开启离火源较近的排烟阀及排烟风机, 同时开启入口段的射流风机提供一定的诱导风速, 将烟气诱导至排烟阀开启段, 通过排烟阀进入排烟道从而被排烟风机排出, 这样既能保证人员的安全疏散, 又能将高温烟气对隧道结构的破坏范围大大减小。笔者在前人研究的基础上, 对集中排烟模式下不同坡度公路隧道入口段火灾时的合理诱导风速进行研究, 为公路隧道集中排烟模式关键设计参数的确定提供依据。

1 物理模型建立

1.1 数值模拟软件介绍

采用由美国国家标准研究院(NIST)开发的火灾动力学模拟软件 FDS, 该软件理论基础坚实, 采用数值方法求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程, 能够描述很宽范围的火灾现象, 而且其准确性得到了大量试验验证^[9-10], 可以说 FDS 代表了目前火灾烟气运动模拟的世界领先水平。

1.2 物理模型及尺寸

以钱江隧道为背景建立隧道物理模型。钱江隧道是高速公路项目“钱江通道及接线工程”下穿钱塘江的控制性工程, 位于钱江观潮胜地盐官以西 2.5 km 处, 由江中段、两岸工作井、两岸明挖暗埋段和两岸敞开段等几个部分组成, 其中江中段采用东、西线分离的结构, 盾构法施工, 每管隧道内布置单向 3 车道。左线隧道建筑长度 4 450 m, 右线隧道建筑长度 4 447.36 m。隧道段设计行车速度 80 km/h, 车道宽度组成为 2 × 3.75 m + 3.5 m, 车道高度 5.0 m。整个隧道的纵坡呈“V”字形^[11]。

为了精确地得出隧道内火灾蔓延规律并尽量减小出口边界条件的影响, 数值模拟中隧道模型总长度取为 600 m (x 方向), 其中明挖暗埋段

^{*} 收稿日期: 2012-02-17 修回日期: 2012-03-19

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2010H01); 中国人民武装警察部队学院灭火救援技术公安部重点实验室开放课题(KF2011003); 中南大学研究生教育创新工程项目(2010ssxt217); 中南大学研究生教育创新工程项目(2011ssxt164)

作者简介: 徐志胜(1962-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师, 主要从事火灾科学、城市公共安全及综合防灾、土木工程防灾减灾等方面的研究和教学工作。E-mail: zhshxu82@163.com

200 m, 盾构段 400 m。明挖暗埋段及盾构段的断面尺寸如图 1 所示, 明挖暗埋段隧道模型断面尺寸为宽度(y 轴)方向 13.35 m, 高度(z 轴)方向 6.35 m。盾构段隧道模型断面为内径 13.7 m 的圆形断面, 即模型宽度(y 方向)及高度(z 方向)均为 13.7 m(以上数据均为净尺寸)。

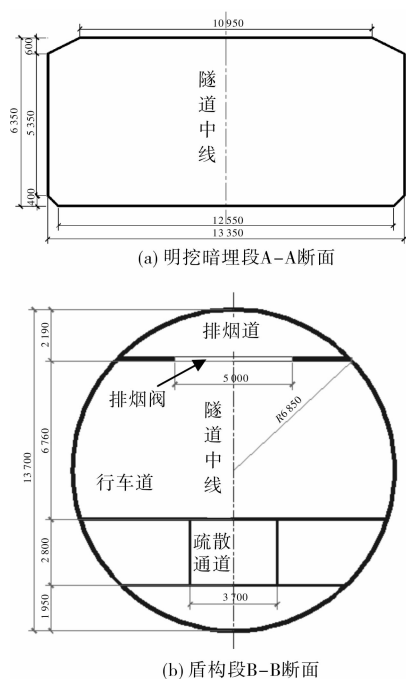


图 1 隧道模型断面尺寸示意图

2 模拟条件及工况设置

2.1 模拟条件设置

2.1.1 火源位置

由于隧道属于半封闭狭长空间, 火灾发生的位置不同, 集中排烟模式下的通风排烟方案也需做相应的调整才能更好地控制烟气的蔓延范围。本文主要考虑火灾发生在隧道入口段明挖暗埋段内, 位于隧道入口及北岸工作井之间, 距离工作井 60 m 处, 如图 2 所示。

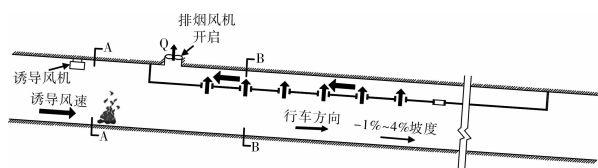


图 2 火源位置示意图

2.1.2 设计火源功率及火源类型

设计火源功率时, 考虑到虽然隧道内发生大

型火灾的概率比较低, 但是一旦发生, 其后果将不堪设想。因此, 本文模拟计算时参考国内外有关行车隧道、桥梁及高速公路的设计中规定的不同种类的汽车的火灾规模, 保守地将火源功率取为 50 MW。同时, 本文主要研究火灾稳定后的烟气控制效果, 因此在数值模拟中采用稳态火源, 火源功率在起火后迅速达到最大值, 不考虑增长阶段和衰减阶段。

2.1.3 网格划分

划分网格时, 需同时考虑计算成本和计算结果的精度。由于火源区、浮力羽流区、烟气层区对于网格密度的敏感程度依次递减, 故而采用火源段一定范围内局部加密的方法可以在控制计算时间的同时保障计算精度。本文模拟计算时网格设置为高度方向上取 0.4 m, 宽度方向上取 0.685 m, 火源中心附近 4.0 m 范围内加密至 0.40 m, 长度方向上, 火源前后各 160 m 取 0.4 m, 其他区域取 0.8 m。

2.2 数值模拟工况

设置数值模拟工况时, 考虑了不同隧道坡度(-4% , -3% , -2% , -1%)、火源上游不同诱导风速(0 m/s , 1 m/s , 2 m/s 和 3 m/s), 共设置了 4 组 16 个模拟工况, 计算时间取为 15 min。

3 数值模拟结果及分析

3.1 温度场分布规律

当隧道入口段发生火灾, 火源功率为 50 MW, 开启离火源最近的 6 个排烟阀及排烟风机时, 进行单向排烟, 不同诱导风速时隧道内顶隔板下方温度分布如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 火源上游 2 m 高度处的温度随着诱导风速的增大先升高后降低, 这是由于在火源上游, 火灾热烟气在浮力效应和烟囱效应的共同作用下向隧道入口蔓延, 其蔓延方向与诱导风速的方向相反, 二者之间的作用表现为反向流剪切^[12], 当诱导风速较小时, 这种反向流剪切起到了一个集热障碍物的效果, 导致火源上游 2 m 高度的温度比没有诱导风速高, 随着诱导风速的增大, 火灾热烟气逐渐被吹向火源下游, 火源上游 2 m 高度处的温度又随之下降, 当诱导风速为 3 m/s 时, 火源上游 2 m 高度处的温度基本上降为环境温度; 火源下游段隧道内 2 m 高处温度基本上随着诱导风速的增大而升高。

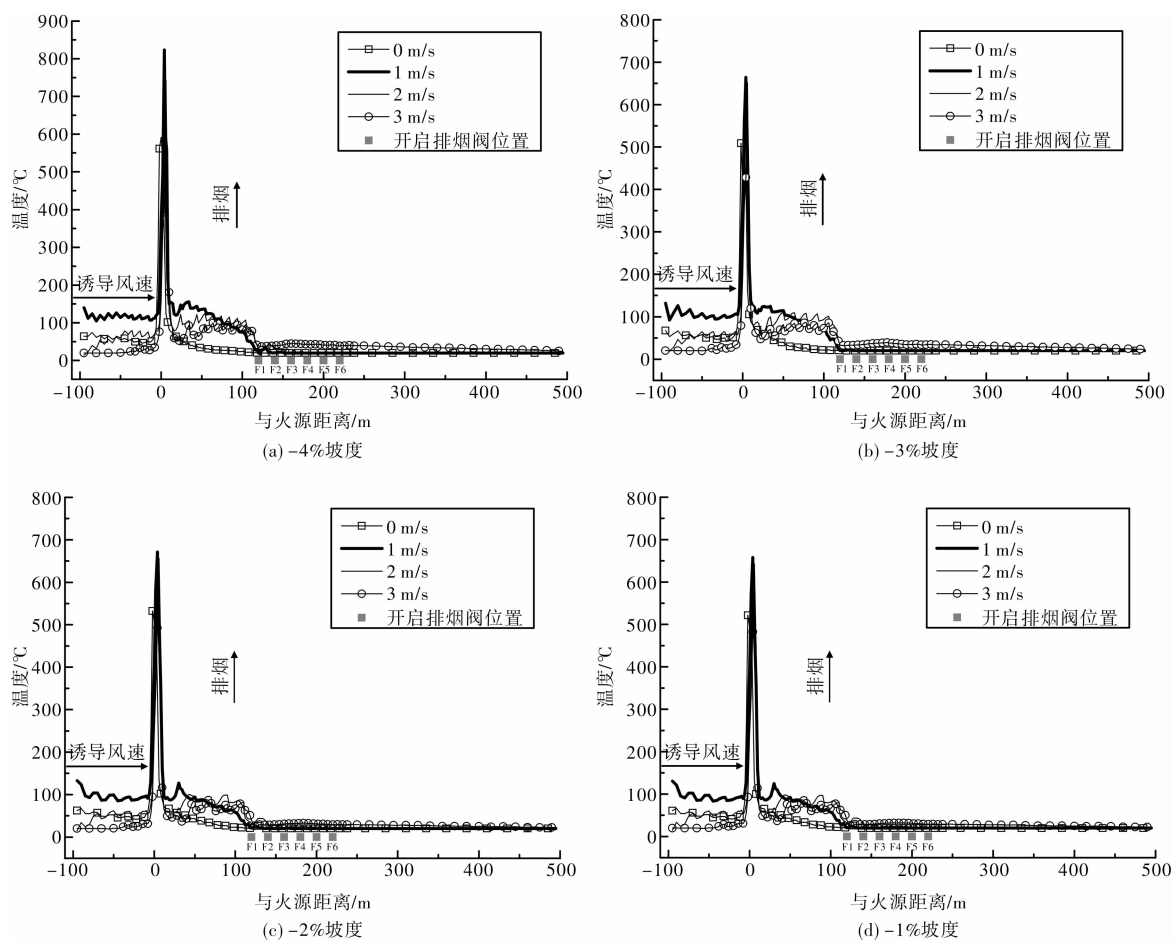


图3 不同诱导风速下坡度隧道内2 m高度处温度分布

3.2 合理纵向诱导风速分析

在集中排烟模式下,诱导风速的作用是通过一定的风速引导高温的火灾烟气向排烟阀打开段内,让烟气更好地通过排烟道排出行车道,将烟气控制在一定的范围内,更好地确保在隧道火灾中车辆和人员安全,以及避免设备和设施的损坏。因此,在不同的火源位置下排烟方式的合理诱导

风速的确定,应结合2 m高度处的温度、能见度和排烟效率的数值模拟结果来进行确定。

篇幅有限,以-4%坡度为例,分析火源位于隧道入口段时,单向集中排烟模式下合理的诱导风速。

3.2.1 隧道内2 m高处60℃烟气前锋蔓延范围
-4%坡度不同诱导风速下烟气蔓延稳定后2 m高处60℃烟气前锋蔓延范围如表1所示。

表1 不同诱导风速下2 m高处60℃烟气前锋蔓延范围

编号	火源功率/MW	坡度/%	火源位置	排烟量/(m ³ /s)	诱导风速/(m/s)	排烟阀开启情况	向火源上游蔓延距离/m	向火源下游蔓延距离/m	蔓延范围/m
S40	50	-4	隧道入口 明挖暗埋段	200	0	开6个,	>100	107	>207
S41	50	-4		200	1	间距	>100	137	>237
S42	50	-4		200	2	20 m, 面积	>100	155	>255
S43	50	-4		200	3	1.2 m×5 m	63	159	222

由表1可见,当诱导风速为0 m/s、1 m/s和2 m/s时,隧道内60℃烟气前锋向上游蔓延的距离较大,均蔓延至隧道模型入口处,在实际隧道中总蔓延范围可能超过300 m;当诱导风速为3 m/s时,60℃烟气前锋向上游蔓延的距离为63 m,总的蔓延范围为222 m,60℃烟气前锋控制在300 m

范围内。

3.2.2 隧道内2 m高处能见度分布规律

50 MW火灾下,烟气蔓延稳定后,诱导风速分别为0 m/s、1 m/s、2 m/s、3 m/s,隧道内2 m高处能见度分布,如图4所示。

从2 m高度处能见度数值模拟结果可以看出,

50 MW 情况下,当纵向诱导风速为 0 m/s 时,火源附近的很小范围内和下游区域存在 2 m 高度处能见度小于 10 m 情况;当纵向诱导风速为 1 m/s 时,离火源最近的排烟阀 F1 上游范围内 2 m 高度处能见度均小于 10 m, F1 下游范围内 2 m 高度处能见度基本为 30 m;当诱导风速为 2 m/s,

火源附近的很小范围内存在 2 m 高度处能见度小于 10 m 情况,火源上游和下游的 2 m 高处能见度在 10 m 附近波动;当诱导风速为 3 m/s 时,只在火源附近的很小范围内存在 2 m 高度处能见度小于 10 m 情况,且火源上游 2 m 高度处能见度基本为 30 m。

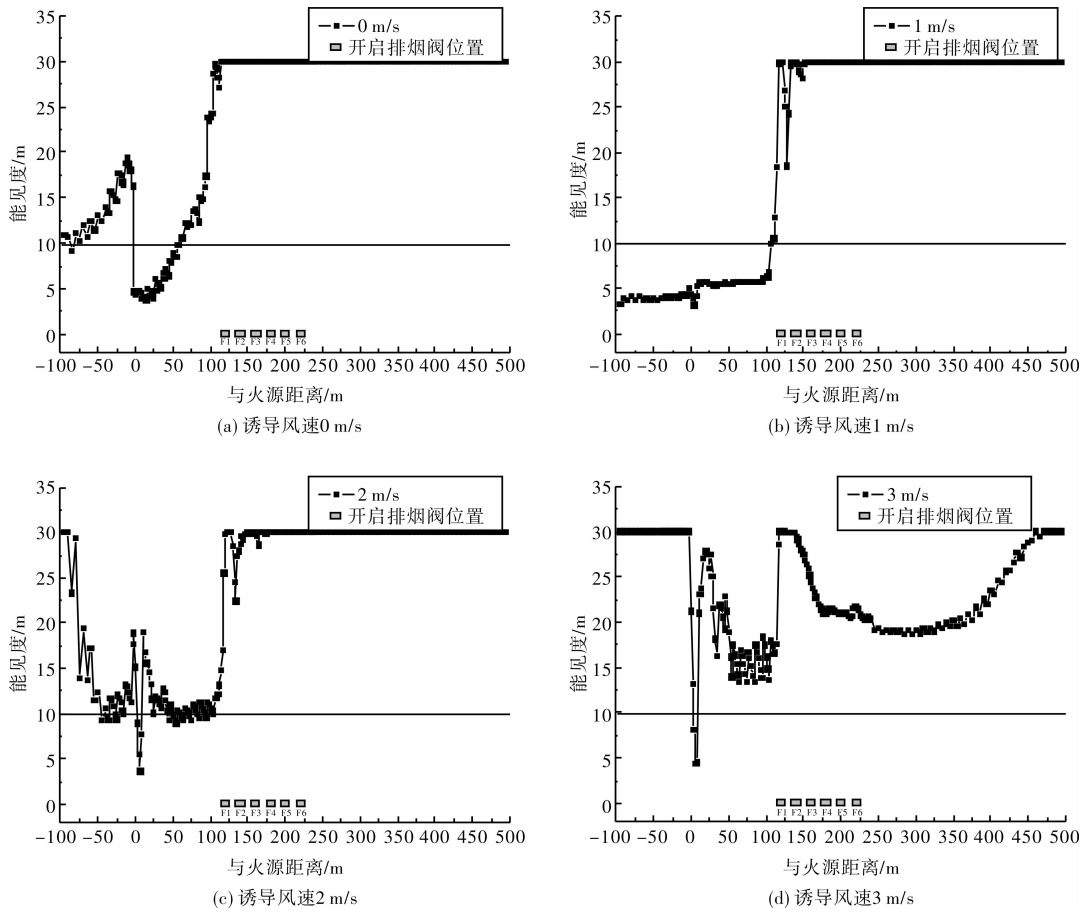


图4 不同纵向诱导风速下隧道内 2 m 高度处能见度随距离的变化

3.2.3 排烟效率分析

排烟效率是评价隧道集中排烟系统烟气控制效果的重要参数,排烟系统的排烟效率用单位时间内所有排烟阀的排烟量总和占火灾烟气生成总量的百分数表征,在数值模拟时,通过火源生成的 CO₂ 量和排出的 CO₂ 量表征火源的烟气生成量和烟气的排出量,火源生产的 CO₂ 量通过火源燃烧化学方程式求得,各排烟阀排出的 CO₂ 量通过

FDS 模拟计算得出^[13]。-4% 坡度不同纵向诱导风速下烟气蔓延稳定后各排烟阀排烟效率和总排烟效率如表 2 所示。

诱导风速为 0 m/s 时的排烟效率只有 6.7%,且只有离火源最近的排烟阀 R1 处有烟气排出;当纵向诱导风速为 1 m/s 和 2 m/s 时,总排烟效率达到 100%;当纵向诱导风速增大到 3 m/s 时,总排烟效率又降至 94.5%。

表 2 不同诱导风速下排烟效率数值模拟结果

编号	火源功率/MW	坡度/%	火源位置	排烟量/(m ³ /s)	诱导风速/(m/s)	排烟阀开启情况	各开启排烟阀排烟百分数/%						合计/%
							F1	F2	F3	F4	F5	F6	
S40	50	-4	隧道入口 明挖暗埋段	200	0	开 6 个,	6.7	0	0	0	0	0	6.7
S41	50	-4		200	1	间距 20 m,	70.6	29.1	0.3	0	0	0	100
S42	50	-4		200	2	面积	55.5	27.4	9	5.2	2.2	0.7	100
S43	50	-4		200	3	1.2 m×5 m	57	18.7	10.2	4.7	2.5	1.4	94.5

3.2.4 合理诱导风速确定

综合考虑隧道内温度场分布、2 m 高处能见度分布以及排烟效率, 当火源位于 -4% 坡度段时, 合理的烟控气流组织模式为: 开启离火源最近的排烟风机和 6 个排烟阀进行上游端单向排烟, 单向交通前方无堵塞时可取 3 m/s 的纵向诱导风速, 单向交通有堵塞或双向交通时可取 2.5 m/s 的纵向诱导风速。该隧道不同坡度 (-4% , -3% , -2% , -1%) 下对应的合理诱导风速如表 3 所示。

表 3 不同坡度隧道入口段火灾时合理诱导风速

火源功率/MW	坡度/%	火源位置	合理诱导风速/(m/s)
50	-4		2.5~3
50	-3	隧道入口明	2.5~3
50	-2	挖暗埋段	2.5~3
50	-1		1.5~2

4 结论

通过对集中排烟模式下不同坡度隧道入口段火灾时合理诱导风速的数值模拟分析, 主要有以下结论。

(1) 当火灾发生在坡度隧道入口处, 集中排烟 + 诱导风速模式下, 火源上游 2 m 高度处的温度在火灾热烟气在浮力效应和烟囱效应的共同作用下随着诱导风速的增大先升高后降低, 火源下游段隧道内 2 m 高处温度基本上随着诱导风速的增大而升高。

(2) 当坡度隧道入口段发生火灾时, 开启离火源最近的排烟风机和 6 个排烟阀进行上游端单向集中排烟, 综合考虑隧道内温度场分布、2 m 高处能见度分布以及排烟效率可知, 隧道坡度为 $-4\% \sim -2\%$ 时, 合理的诱导风速为: 单向交通前方无堵塞时可取 3 m/s , 单向交通有堵塞或双向交通时可

取 2.5 m/s 。隧道坡度为 -1% 时, 合理的诱导风速为: 单向交通前方无堵塞时可取 2 m/s , 单向交通有堵塞或双向交通时可取 1.5 m/s 。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2010 年公路水路交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2011-04-28]. http://www.moc.gov.cn/zhuazhan/tongjigongbao/fenxigongbao/hangyegongbao/201104/t20110428_937558.html.
- [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] 杨高尚, 彭立敏, 安永林. 公路隧道火灾起因及预防研究[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 85-90.
- [4] 杨高尚, 彭立敏, 安永林. 长大隧道消防安全评价的新思路[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 86-90.
- [5] 吴德兴, 李伟平, 郑国平. 国内外公路隧道火灾排烟设计理念比较[J]. 公路交通技术, 2008(5): 113-117, 127.
- [6] 浙江省交通规划设计研究院, 中南大学. 公路隧道火灾纵向排烟模式与独立排烟道集中排烟模式模型试验研究[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2010.
- [7] 康晓龙, 王伟, 赵耀华, 等. 城市地下快速通道入口段排烟方案研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8): 1353-1356.
- [8] 周庆, 倪天晓, 周湘川. 纵向通风下坡度隧道火灾烟气特性数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(3): 42-47.
- [9] 高晓明, 崔峰青, 韩新, 等. 地铁隧道不同排烟风速对火灾烟气控制的模拟分析[J]. 灾害学, 2010, 25(S0): 150-153.
- [10] 刘涛. 狭长隧道施工中火灾事故风险防范的数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [11] 李伟平, 吴德兴, 郭敏, 等. 钱江盾构隧道设计速度标准及交通安全分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 94-100.
- [12] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [13] 浙江省交通规划设计研究院, 中南大学. 大断面公路盾构隧道火灾烟气控制关键技术研究[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2011.

Study on Induced Velocity of Highway Tunnel Entrance Fire in Centralized Smoke Exhaust Mode

Xu Zhisheng¹, Yu Nianhao¹, Zhang Xin^{1,2}, Jiang Xuepeng^{1,2}, Zhao Hongli¹ and Li Weiping³

(1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Department of Fire Command, The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: To study the reasonable induced velocity of highway tunnel entrance fire in centralized smoke exhaust mode, using a certain highway tunnel as background, 16 groups of fires conditions of different slope and induced velocity within the entrance section of tunnel are simulated with software of the Fire Dynamics Simulation (FDS). Based on the analysis of simulation results of the temperature distribution and effect of smoke control in tunnel under respective fire conditions, the reasonable induced velocity of fire conditions are worked out, which would provide reference for key design parameters of centralized smoke exhaust system in highway tunnel.

Key words: tunnel fire; central smoke exhaust; induced velocity; smoke velocity; exhaust efficiency