

风口非对称布置排烟隧道耦合烟控参数 CFD 寻优分析

徐琳¹, 张旭²

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 济南 250101; 2. 同济大学暖通空调及燃气研究所, 上海 200092)

摘要:以上海某长大越江公路隧道为背景, 针对三个大尺度风口非对称布置在火源两侧的特殊情况, 借助经模型实验验证的 CFD 模拟, 详细分析多种纵向风速、排烟量组合下, 风口风量分配、排烟温度、烟气水平扩散距离等物理量的变化。进一步提出热烟气水平扩散不超过火源附近 3 个风口范围以及排烟量最小的排烟优化设计思路。借助 CFD 模拟通过反复计算比较, 得到不同火灾热释放速率、隧道坡度、坡向变化下优化耦合烟控参数, 并将优化结果整理得到适用于工程应用的无量纲准则关联式。

关键词:火灾; 寻优; 隧道; 排风口; 非对称布置; 纵向风速; 排烟量

中图分类号: U453.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)03-0119-05

CFD Optimization on Coupling Smoke Control Parameters in Tunnel with Non-symmetry-laid Damper

XU Lin¹, ZHANG Xu²

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China; 2. HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: With respect to three vents located on both sides of the fire source in an asymmetrical arrangement, series of CFD simulations and reduced-scale experimental tests are carried out. And further analysis is undertaken for several parameters, such as airflow distribution, flue gas temperature and smoke horizontal diffusion distance etc, with different combinations of the longitudinal velocity and exhaust rate. It is found that horizontal diffusion distance of smoke is confined in three vents bordering the fire source and optimization design with minimal exhaust rate is further proposed. With multiple CFD simulations, series of dimensionless correlations are recommended for further tunnel fire safety design with some parameters, such as heat release rate, tunnel inclination and optimized parameters with slope variation.

Keywords: fires; optimization; tunnel; exhaust vent; asymmetric case; longitudinal air velocity; smoke exhaust rate

随着城市发展对交通设施需求的快速增长, 隧道建成后普遍存在超负荷运转现象, 行车事故诱发火灾频率增加。1999—2001 年间, 欧洲相继发生 3 起特大隧道火灾事故, 引发各国对隧道火灾排烟设计理念的深刻反思。2004 年欧盟发布指令性文件 (Directive 2004/54/EC) 明确规定: 交通量较大的双

向交通隧道和长度超过 3 km 的单向交通隧道应采用集中排烟^[1]。据此, 参考勃朗峰隧道灾后通风改造、德国易北河第 4 座公路隧道排烟设计, 近年来国内在建大型盾构隧道尝试利用顶部富裕空间设置独立排烟道, 一旦发生火灾, 远程控制开启火源周围大尺度排风口, 通过岸边通风井内排烟风机将热烟气

收稿日期: 2008-12-09

基金项目: 上海市科技攻关重大专项 (04dz12020)

作者简介: 徐琳 (1979-), 女, 博士, 主要从事隧道通风及防灾研究, (Email) yaya_xlxq@126.com。

张旭 (联系人), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道通风及防灾研究, (Email) zhangxu-hvac@mail.tongji.edu.cn。

排出隧道^[2]。针对双风口对称布置在火源两侧情况, Vauquelin 等研究人员利用氦气-空气混合气体类比模拟火源, 探讨烟气扩散距离与排风诱导风速关系^[3]。胡隆华等在阳宗、大风垭口、元江 1# 隧道开展大尺寸火灾实验, 测量得到不同纵向风速下隧道火灾烟气层蔓延热物理特性^[4-5]。

针对 3 个风口非对称布置在火源两侧的情况, 如图 1 所示, 隧道内热烟气扩散将呈现完全不同特点, 此时应如何组织风流将热烟气控制在近火源 120 m 范围内, 则是一个急需解决的问题。现行的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)、《建筑设计防火规范》(GB50016-2006) 对公路隧道防火与疏散作了部分规定, 但对火灾排烟模式选择及设计参数的确定未有明确规定。为此, 尝试利用 CFD 模拟详细探讨不同纵向风速 v_m 、排烟量 G_e 下, 隧道内热烟气扩散规律, 并针对不同火灾热释放率 Q 、隧道坡度 J 、坡向情况, 完成集中排烟隧道烟控参数寻优。

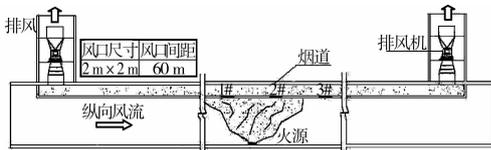


图 1 集中排烟隧道图示

1 寻优目标的提出

当热烟气与下部冷空气出现明显温度分层, 如热烟气在人头上方, 而热辐射处于耐受极限内, 此时选择热烟层高度、烟层温度组合为设计安全准则, 则可忽略能见度、烟气毒性影响。结合上海某长大越江公路隧道设计参数, 提出如下烟控参数寻优目标: 1#、3# 风口间区域为排烟设计不保证区域, 即 120 m 烟控制范围内火源上游 30 m、下游 90 m; 1#、3# 风口之外为排烟设计区域, 保证热烟层高度大于 2 m, 人员呼吸区空气温度低于 322 K; 同时尽可能降低纵向风速、排烟量^[6-7], 见图 1。

2 控制方程建立及边界条件的确定

火灾是一个涉及紊流、燃烧、传热的多相流动过程, 模拟采用浮力修正 $k-\epsilon$ 模型, 控制方程表述成如下通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho V\varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad}\varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

式中 φ 为待求通用物理量, Γ_φ 、 S_φ 为对应变量的输运系数及源项, 其数学表述参见表 1^[8-10]。

表 1 控制方程组通用变量

方程	φ	Γ_φ	S_φ
连续性	1	0	0
动量	u_i	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i$
焓	H	$\mu/Pr + \mu_t/\sigma_H$	S_h
组分	C	$\mu/Sc + \mu_t/\sigma_C$	S_c
湍动能	k	$\mu + \mu_t/\sigma_k$	$G_k + G_b - \rho\epsilon$
湍动能耗散率	ϵ	$\mu + \mu_t/\sigma_\epsilon$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1(G_k + C_3G_b) - C_2\rho\epsilon]$

其中, G_k 、 G_b 分别为剪切应力产生项、浮力产生项, 控制方程中常数取值参见表 2。此外, 在数值求解过程中还需附加状态方程。模拟考虑周围环境温度 $T=303$ K, 壁面采用 Launder 和 Spalding 推荐的标准壁面函数^[11], 不计与外界的换热。烟道出口、隧道入口分别考虑流量及速度边界。

表 2 控制方程中常数取值

C_μ	C_1	C_2	C_3	σ_k	σ_ϵ	σ_H	σ_C
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0	1.3	0.85	1.0

3 CFD 模拟的实验验证

3.1 计算模型及网格划分

隧道衬砌内、外径分别为 13.7 m、15 m, 属超大断面隧道, 取江中 300 m 长通风段为计算区域。x、y、z 轴依次沿隧道轴向、高度、宽度方向。假设火源位于计算区域中心 ($x=150$ m), 开启火源上游 1#、下游 2#、3# 风口 ($x=120$ m、 $x=180$ m、 $x=240$ m) 集中排烟。计算区间采用非均匀网格划分, 近火源温度梯度变化大的区域布置密集网格, 远离火源温度梯度变化小的区域布置稀疏网格。首次网格划分后依次增加 x、y、z 轴网格数目 50%, 保持边界条件不变, 观察顶棚最高温度的变化。当二者相差很小, 网格划分结束。

3.2 CFD 模拟的实验验证

以庚烷油池火为例, 根据燃烧反应及经典燃烧实验数据, 计算得到 20 MW 火灾强度对应燃烧参数, 包括油池面积、烟气流量、烟气温度等^[12-14], 将火源模化为一强热源诱导高温浮射流。根据密度修正 Fr 准则, 搭建 1/14 几何缩尺、1/8 温差缩尺、0.145 速度缩尺排烟实验模型。测量得到不同排烟量、纵向风速组合下, 隧道内热烟气扩散分布, 剖面测点布置见图 2、表 3。仅以临界风速送风情况下, 隧道中心断面温度分布为例, 见图 3, 除了火源局部外, CFD 预测结果与实验结果是吻合的。实验工况详细对比分析见文献^[13]。

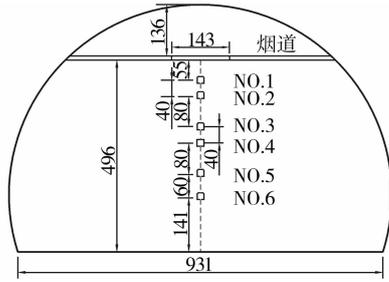


图 2 模型实验隧道横断面测点布置

表 3 测点距底板高度/mm

编号	模型	原型
NO. 1	441	6 180
NO. 2	401	5 620
NO. 3	321	4 500
NO. 4	281	3 940
NO. 5	201	2 820
NO. 6	141	1 980

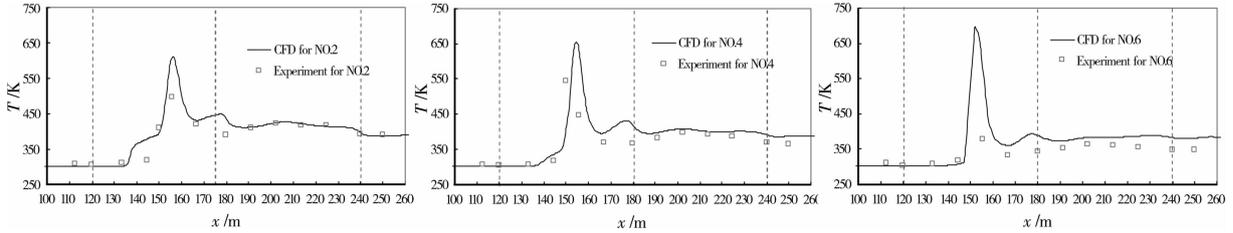


图 3 临界风速送风隧道中心断面温度分布实验与 CFD 对比 ($Q=20\text{ MW}, v_{in}=2.36\text{ m/s}, G_e=173\text{ m}^3/\text{s}$)

4 三风口非对称排烟特性分析

度逼近环境温度,说明排风全部来自下游洞口补风,并未真正参与排烟,见图 5。相比较而言,2#风口排烟更为稳定,是非对称风口中最重要排烟承担者。

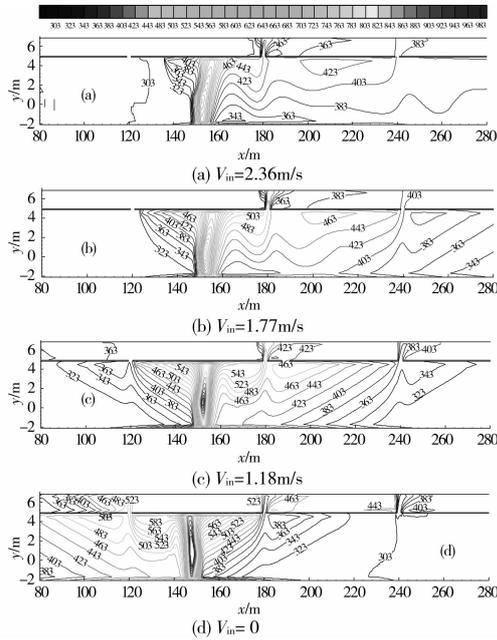


图 4 纵向风速对水平隧道温度分布影响 ($J=0, Q=20\text{ MW}, G_e=173\text{ m}^3/\text{s}$)

如图 4(a)所示,临界风速较好地抑制了火源上游烟气逆流现象,其下游断面上烟气掺混作用强烈,2#、3#风口位置排烟温度较高,3 个风口风量分配较为稳定,见图 5。而随着纵向风速的减小,火源下游断面烟气沉降速度趋缓,高度方向逐渐呈现温度分层。当 $v_{in}=0$ 时,烟道排烟不断诱导气流从下游洞口自然补风,在其推动下热烟气不断向上风方向挤压,结果造成 2# 风口上游区域热环境恶化,见图 4(d)。此时,尽管 3# 风口排风比例最大,但其排风温

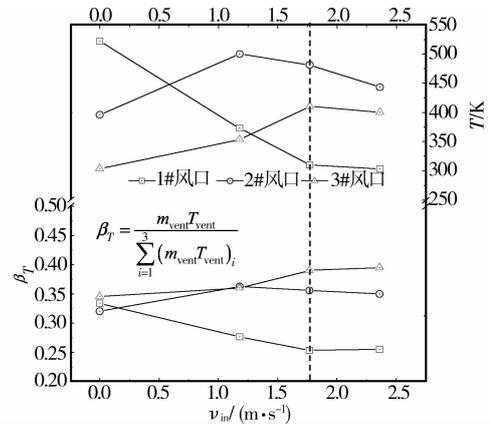


图 5 风口排烟特性 ($J=0, Q=20\text{ MW}, G_e=173\text{ m}^3/\text{s}$)

考虑人员疏散卫生标准,呼吸区空气温度应低于 322 K。图 6 列举了人员呼吸高度(2 m)火源上下游热烟气水平扩散距离随纵向风速的变化。显然,在上述 4 种组合下,仅当 $v_{in}=1.18\text{ m/s}$,上游烟气扩散距离小于 30 m,下游烟气水平扩散距离小于 90 m,满足排烟设计要求。

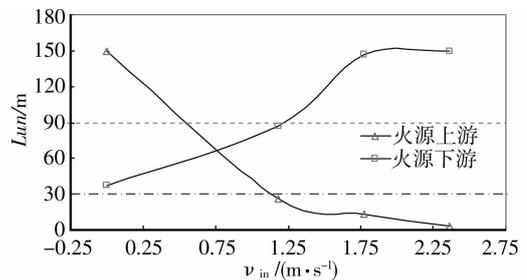


图 6 烟气水平扩散范围 ($J=0, Q=20\text{ MW}, G_e=173\text{ m}^3/\text{s}$)

根据前述寻优目标,除了满足隧道内烟气水平扩散距离要求外,还应尽可能降低纵向风速、排烟量。那么究竟二者应如何匹配,则是一个典型数学寻优问题。针对不同隧道坡度、坡向、火灾强度等,借助 CFD 模拟优化耦合参数。

5 耦合烟控参数寻优确定

5.1 火灾热释放速率的影响

隧道火灾场景,一般可假设为小汽车、公共汽车、载货卡车、可燃液体或石油气槽车火灾等。参考尤里卡火灾试验、PIARC 布鲁塞尔报告、法国隧道研究中心最新建议,模拟火灾热释放速率峰值介于 10~50 MW。根据寻优目标,可得水平隧道不同火灾强度 Q 对应纵向风速 v_{in} 、排烟量 G_e 。优化设计参数,见图 7,其中临界风速 v_{cri} 数据见文献[15]。

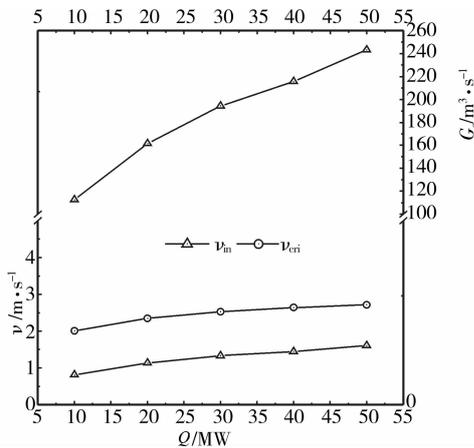
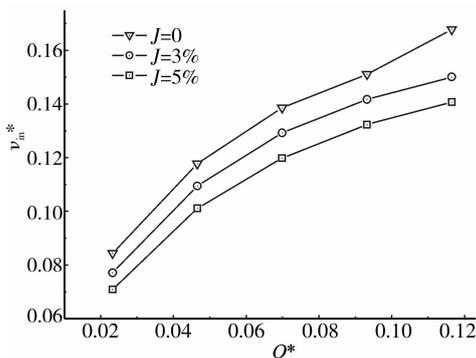


图 7 水平隧道优化烟控参数与临界风速的比较

显然,对于集中排烟隧道而言,理想的纵向控制风速远小于临界风速。而由于缺乏规范指导及相关技术研究,目前中国隧道工程设计多采用临界风速送风,势必造成较大浪费。下面根据因次分析,以断面水力高度 D_e 为特征尺寸,将水平隧道优化烟控参数整理如下成无量纲形式 ($R^2=0.996$):



$$\begin{cases} v_{in}^* = \frac{v_{in}}{\sqrt{gD_e}} = 0.19193 - \frac{1.00402}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.1095}{0.06238}\right)} \\ G_e^* = \frac{G_e}{\sqrt{gD_e^5}} = 0.34959 - \frac{1.48421}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.10432}{0.07191}\right)} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q^* = \frac{Q_c}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{gD_e^5}} \quad 0.023 \leq Q^* \leq 0.117 \quad (3)$$

5.2 隧道坡度、坡向的影响

越江隧道结构深埋于海(河)底地质层内,存在一定纵坡是不可避免的。现行公路工程技术标准(JTGB 01-2003)对纵坡限制有明确要求:长大隧道最小纵坡 $J \geq 0.3\%$,最大纵坡 $J \leq 3\%$,经经济论证,隧道最大纵坡可适当加大,但不宜大于 4%。模拟适当放宽纵坡范围,考虑水平 ($J=0$)、上坡 ($J=3\%$ 、 $J=5\%$)、下坡 ($J=-3\%$ 、 $J=-5\%$) 5 种情况。

同理,以断面水力高度 D_e 为特征尺寸,进一步将上坡隧道优化烟控参数整理成无量纲关联式: $J=3\%$ ($R^2=0.999$)

$$\begin{cases} v_{in}^* = \frac{v_{in}}{\sqrt{gD_e}} = 0.16071 - \frac{0.56675}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.05214}{0.04295}\right)} \\ G_e^* = \frac{G_e}{\sqrt{gD_e^5}} = 0.30998 - \frac{1.26552}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.06989}{0.05119}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

$$J=5\% (R^2=0.999)$$

$$\begin{cases} v_{in}^* = \frac{v_{in}}{\sqrt{gD_e}} = 0.15235 - \frac{0.53814}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.05479}{0.04524}\right)} \\ G_e^* = \frac{G_e}{\sqrt{gD_e^5}} = 0.30556 - \frac{1.2822}{1 + \exp\left(\frac{Q^* + 0.07308}{0.05226}\right)} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $0.023 \leq Q^* \leq 0.117$ 。

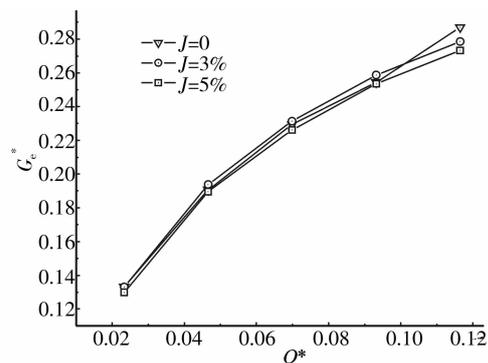


图 8 上坡隧道无量纲优化烟控参数随坡度变化

如图8所示,对于上坡隧道,随着坡度的增加,无量纲纵向风速将减小,相比较而言,无量纲排烟量的变化则不大。而对于下坡隧道,烟囱效应将推动烟气向上风方向扩散,为了维持火源上游30 m控制范围,自然需要更大的纵向风速。此时可通过切换风口开启位置来避免,如开启火源上游2个风口、下游1个风口的模式即可充分利用烟囱效应升压力作用,有效降低纵向风速。为此,不同火灾热释放速率下,其耦合参数可参考对应上坡隧道取值,见式(4)、(5)。

6 结 论

综合考虑隧道水平烟气控制范围、人员维生环境标准,首先提出烟控参数寻优目标,借助经模型实验验证的CFD模拟详细分析了多种纵向风速、排烟量组合下,隧道内热烟气扩散情况、风口风量分配、排风温度、排风效率等。结果表明,二者影响耦合相关。如果适当降低纵向风速,下游烟气沉降速度将减缓,这对于火灾下游控制较为有利,但同时上游烟气控制必将受到影响。为此,基于烟控参数寻优目标,借助CFD模拟通过反复计算比较,得到水平($J=0$)、上坡($J=3\%$ 、 $J=5\%$)、下坡($J=-3\%$ 、 $J=-5\%$)5种隧道,不同火灾热释放速率 Q 下最优火灾烟气控制参数,并将优化结果进一步整理得到适用于工程应用的无量纲准则关联式。

参考文献:

- [1] The European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and the Council on Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Networks [S]. Brussels: The European Parliament and Council of European Union, 2004.
- [2] 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.
WU DE-XING, LI WEI-PING, ZHENG GUO-PING. Comparison of domestic & overseas design concepts for smoke exhaust in expressway tunnels fires [J]. Technology of Highway and Transport, 2008(5):113-117.
- [3] VAUQUELIN O, TELLE D. Definition of experimental evaluation of the smoke confinement velocity in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(4): 320-330.
- [4] HU LH, HUO R, CHOW WK. Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1468-1483.
- [5] HU LH, FONG NK, YANG LZ, et al. Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: fire dynamics simulator comparisons with measured data [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1-2): 293-298.
- [6] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels[M]. Paris: PIARC Committee on Road Tunnels, 2002.
- [7] NFPA 502: Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways [S]. 2008 ed. Massachusetts: National Fire Protection Association.
- [8] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] HUANG CC, EDWARDS JC. The critical ventilation velocity in tunnel fires-a computer simulation [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(3): 213-244.
- [10] WU Y, BAKER MZA. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(4): 363-390.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [12] MEGRET O, VAUQUELIN O. A model to evaluate tunnel fire characteristics [J]. Fire Safety Journal, 2000, 34(4):393-401.
- [13] 徐琳. 长大公路隧道火灾热烟气面控制理论分析与实验研究[D]. 上海: 同济大学暖通空调及燃气研究所, 2007.
- [14] ROH JS, YANG SS, RYOU HS, et al. An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptane pool fire case [J]. Building and Environment, 2008, 43(7): 1225-1231.
- [15] 徐琳,张旭. 超大断面水平隧道纵向通风临界风速 CFD 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1):124-127.
XU LIN, ZHANG XU. CFD analysis on critical velocity of longitudinal ventilation for super large horizontal tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1):124-127.

(编辑 胡英奎)