

公路隧道通风洞口与竖井交叉污染三维数值分析研究(修改稿)

夏永旭¹ 石平^{1,2}

(1. 长安大学公路学院 西安 710064)

(2. 湖北省交通规划设计院 武汉 513214)

摘要: 在竖井送、排式纵向通风以及近距离隧道通风时,会出现排出的污染空气被吸入到邻近的竖井或隧道中的交叉污染,影响了隧道通风的效果。通过 CFD 技术对竖井送、排风口和两个洞口交叉污染进行数值模拟分析发现,竖井送、排风口和两个隧道间的污染,随着送、排风口高差(或隧道出、入口纵向距离)的增大以及横向间距的增大逐渐减小。建议在进行隧道通风设计时,竖井送、排风口轴线间距不小于 50.0m,风口高差不小于 5.m;两隧道洞口轴线间距不小于 40.0m,纵向距离不小于 50.0m。

关键词: 公路隧道 交叉污染 数值模拟 优化

1. 引言

在竖井送排式纵向通风以及近距离隧道通风时,可能会出现排出的污染空气又被吸入到邻近的竖井或隧道,从而引起竖井及洞口的交叉污染,这样会严重影响隧道通风的性能和效率^{[1] [2] [3] [4]}。本文通过 CFD(Computational Fluid Dynamics)技术对交叉污染进行数值模拟分析,目的是获得一些有用的结论,为隧道设计及优化提供有益的帮助。

2. 交叉污染的 CFD 模型和模拟计算方法

1) 几何模型

为了对隧道的相邻洞口及竖井的交叉污染进行数值模拟分析,首先要建立实体模型,为了提高计算精度,经过试算,确定竖井和洞口交叉污染几何模型的大气区域分别取 100m×100m×100m 和 150m×150m×150m 的方形区域。模拟计算模型示意图如图 1 和 2 所示。送、排风口及洞口截面按照隧道实际尺寸取值。计算采用均分网格,最大边长取 4~5,为满足不同区域的精度要求,对区域网格剖分进行如下控制:

- a. 在出入口边界上,面边长控制在 0.2~0.5 之间;
- b. 在模型连接处进行点控制,以加密网格;
- c. 在模拟的大气模型区域,适当减少不必要的网格数量,以加快计算速度;
- d. 模型体网格单元总数控制在 20~30 万左右。

2) 物理模型

计算的物理模型按照标准状况下的空气考虑,不考虑由于温差引起的浮力影响。计算采用 K-ε 紊流双参数方程,并分别进行稳态和瞬态模拟计算。

3) 边界条件

所有边界条件值均参照实际隧道的的设计值取值。竖井交叉污染：送、排风口风速 V_1 和 V_2 取 10.38m/s ；排风口 CO 浓度取 0.00029kg/m^3 (250ppm)，烟雾浓度取 0.007m^{-1} ；大气边界为开放边界，取相对压力为 0.0Pa ，CO 为 0.0ppm ，烟雾浓度均为 0.0m^{-1} 。

洞口交叉污染：上行线隧道出口风速 V_{02} 取 2.88m/s ，下行线隧道入口风速 V_{01} 取 4.0m/s ；隧道出口 CO 浓度取 0.00029kg/m^3 (250ppm)，烟雾浓度取 0.007m^{-1} ；大气边界为开放边界，取相对压力为 0.0Pa ，CO 为 0.0ppm ，烟雾浓度均为 0.0m^{-1} 。

隧道参数基本参数：双洞单向交通，两洞轴线间距 $L=40\text{m}$ ；右线竖井送排式加射流风机纵向通风，送风塔和排风塔的轴线间距 $L=50\text{m}$ 。稀释 CO 的卫生标准 $\delta = 250\text{ppm}$ ，稀释烟雾浓度 $K=0.007\text{m}^{-1}$ 。

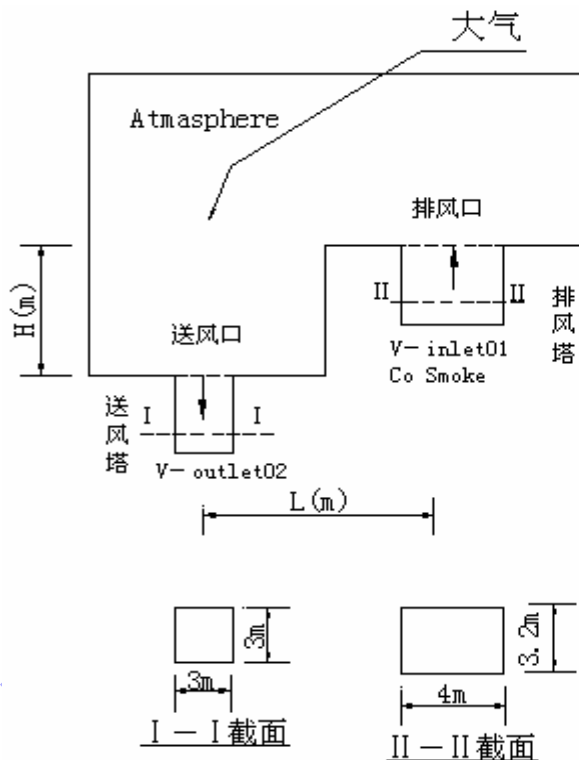


图 1 两相邻竖井数值模拟模型示意图

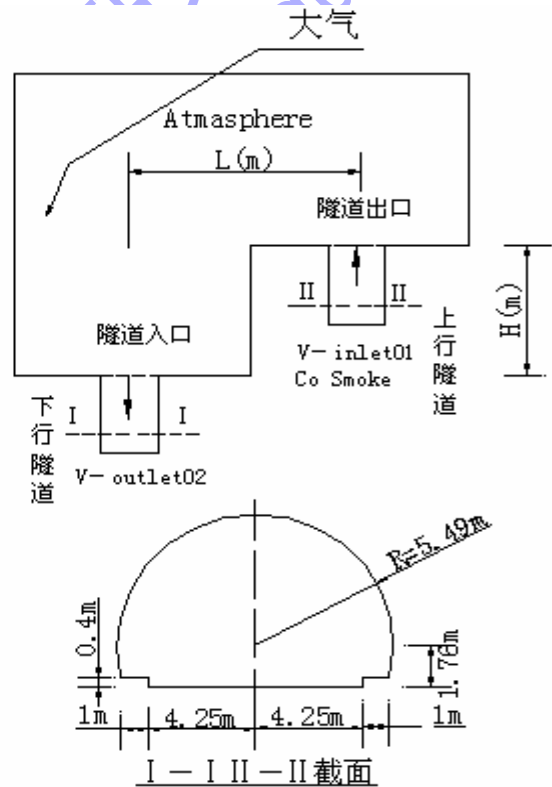


图 2 两相邻洞口数值模拟模型示意图

3. 两相邻竖井及相邻洞口交叉污染分析

3.1 计算方案与结果

为考察两相邻竖井及洞口的交叉污染情况，保持竖井排风口或隧道出风口的风速、CO 和烟雾浓度不变，分别改变送、排风口或隧道出入口的纵向及横向间距，计算稳态和瞬态以及有自然风影响的条件下，竖井送风口或隧道入风口吸入

的 CO 和烟雾浓度值。

通过数值模拟计算，不考虑自然风影响时送风塔送风口及隧道入口的 CO 和烟雾浓度稳态模拟计算值汇总于表 1。考虑自然风影响，风向从出口吹向入口，风速分别取 2.0、2.5 和 3.0m/s 时送风塔送风口及隧道入口的 CO 和烟雾浓度稳态模拟计算值汇总于表 2。不考虑自然风影响时，污染气体只考虑 CO，取排风塔排风口及隧道出口的 CO 浓度最大值为 300ppm，送风塔送风口及隧道入口的 CO 浓度瞬态模拟计算值汇总于表 3。

表 1 不考虑自然风影响时 CO 和烟雾浓度稳态模拟计算结果

项目		模拟类型		稳态			$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3 \quad T = 20^\circ\text{C}$		
模拟类别	组别	风口或出入口纵向距离	横向间距	排风口或隧道出口 CO 浓度		排风口或隧道出口烟雾浓度	送风口或隧道入口 CO 浓度		送风口或隧道入口烟雾浓度
		N	H (m)	L(m)	C_{CO} (ppm)	C_{CO} (kg/m^3)	C_{VI} (m^{-1})	C_{CO} (ppm)	C_{CO} (kg/m^3)
相邻竖井交叉污染	1	1	50	250	0.00029	0.007	0.0002283	2.66E-10	6.41E-09
	2	3					0.000196	2.28E-10	5.51E-09
	3	5					1.49E-05	1.74E-11	4.20E-10
	4	7					1.23E-05	1.44E-11	3.46740-10
	5	9					1.10E-05	1.28E-11	3.08980-10
	6	15					3.32E-06	3.86E-12	9.31E-11
	7	0	3.5	250	0.00029	0.007	229.35012	0.000267	0.0064409
	8	3.5	204.49985				0.000238	0.005743	
	9	10	0.084358				9.81E-08	2.37E-06	
	10	25	1.57E-05				1.83E-11	4.42E-10	
	11	50	1.49E-05				1.74E-11	4.20E-10	
	12	60	1.47E-05				1.71E-11	4.14E-10	
	13	70	3.23E-06				3.75E-12	9.06E-11	
相邻洞口交叉污染	14	0	40	250	0.00029	0.007	0.0069614	8.10E-09	1.95E-07
	15	5					0.0020073	2.34E-09	5.64E-08
	16	20					0.0018277	2.13E-09	5.13E-08
	17	50					0.0017715	2.06E-09	4.97E-08
	18	60					0.0017182	2.00E-09	4.83E-08
	19	80					0.0001368	1.59E-10	3.84E-09
	20	0	13	250	0.00029	0.007	4.7886271	5.57E-06	0.00013448
	21	13	0.0065709				7.64E-09	1.85E-07	
	22	20	0.0032048				3.73E-09	9.00E-08	
	23	40	0.0017715				2.06E-09	4.97E-08	
	24	60	0.0013139				1.53E-09	3.69E-08	
25	80	0.0001403	1.63E-10				3.94E-09		

表 2 考虑自然风影响时 CO 和烟雾浓度稳态模拟计算表

项目		模拟类型			稳态			$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3 \quad T=20^\circ\text{C}$		
类别	组别	风口或出入口纵向距离	横向间距	自然风	排风口或隧道出口 CO 浓度		排风口或隧道出口烟雾浓度	送风口或隧道入口 CO 浓度		送风口或隧道入口烟雾浓度
	N	H (m)	L (m)	Vn (m/s)	C _{CO} (ppm)	C _{CO} (kg/m ³)	C _{VI} (m ⁻¹)	C _{CO} (ppm)	C _{CO} (kg/m ³)	C _{VI} (m ⁻¹)
竖井	1	5	50	0	250	0.00029	0.007	0.0000149	1.74E-11	4.20E-10
	2			2.0				0.0005823	6.77E-10	1.64E-08
	3			2.5				0.0020000	2.33E-09	5.62E-08
	4			3.0				0.0032587	3.79E-09	9.15E-08
洞口	5	50	40	0	250	0.00029	0.007	0.0017715	2.06E-09	4.97E-08
	6			2.0				0.0020660	2.40E-09	5.80E-08
	7			2.5				0.0028401	3.30E-09	7.98E-08
	8			3.0				0.0113678	1.32E-08	3.19E-07

表 3 不考虑自然风影响时 CO 浓度的瞬态模拟计算表

项目		模拟类型		瞬态		$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3 \quad T=20^\circ\text{C}$	
类别	组别	风口或出入口纵向距离	横向间距	排风口或隧道出口 CO 浓度		送风口或隧道入口 CO 浓度	
	N	H (m)	L (m)	C _{CO} (ppm)	C _{CO} (kg/m ³)	C _{CO} (ppm)	C _{CO} (kg/m ³)
竖井	1	5	50	83	9.65E-5	3.29E-05	3.82E-11
	2			145	1.68E-4	1.025E-3	1.19E-9
	3			189	2.20E-4	5.08E-3	5.91E-9
	4			221	2.57E-4	1.14E-2	1.32E-8
	5			300	3.5E-4	6.10E-2	7.10E-8
洞口	6	50	40	79	9.17E-5	3.42E-05	3.98E-11
	7			141	1.65E-4	8.28E-04	9.63E-10
	8			186	2.17E-4	3.70E-03	4.30E-9
	9			219	2.55E-4	7.91E-03	9.20E-9
	10			300	3.5E-4	3.82E-02	4.44E-8

借助于洞口 CO 的分布云图，可以很直观地了解相邻竖井和洞口交叉污染情况，即污染气体 CO 和烟雾影响的范围及程度。图 3~6 给出了无自然风和自然风条件下 CO 浓度的分布情况图。

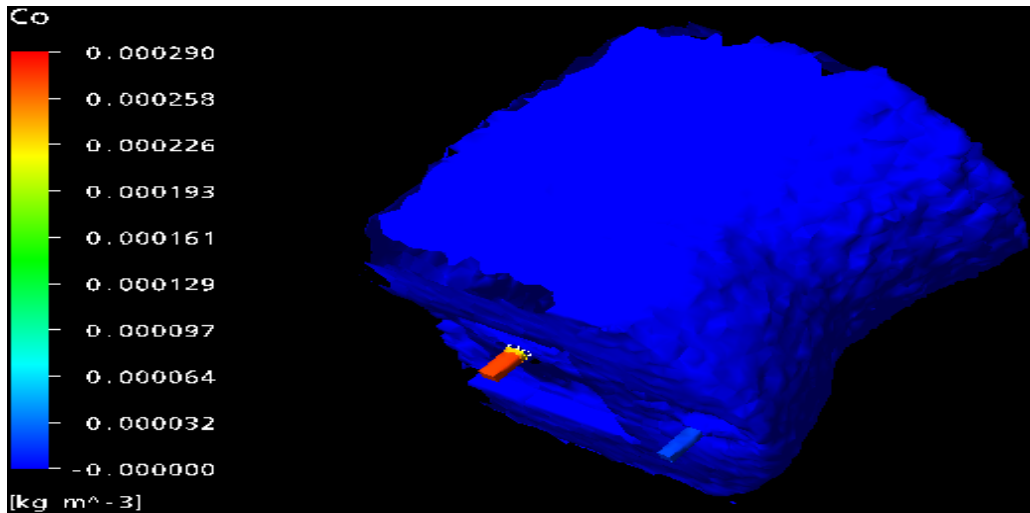


图3 自然风 $V_n=0$, 送、排风口 $H=5\text{m}$, $L=50\text{m}$; $C_{CO}=1\text{e}-10\text{kg/m}^3$ 的 CO 云图

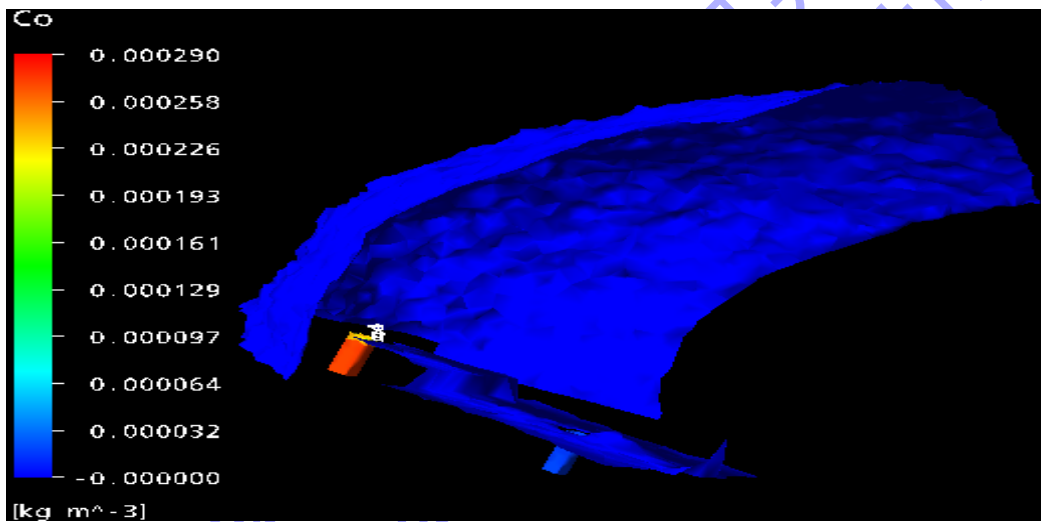


图4 自然风 $V_n=2.5\text{m/s}$, 送、排风口 $H=5\text{m}$, $L=50\text{m}$; $C_{CO}=1\text{e}-10\text{kg/m}^3$ 的污染物云图

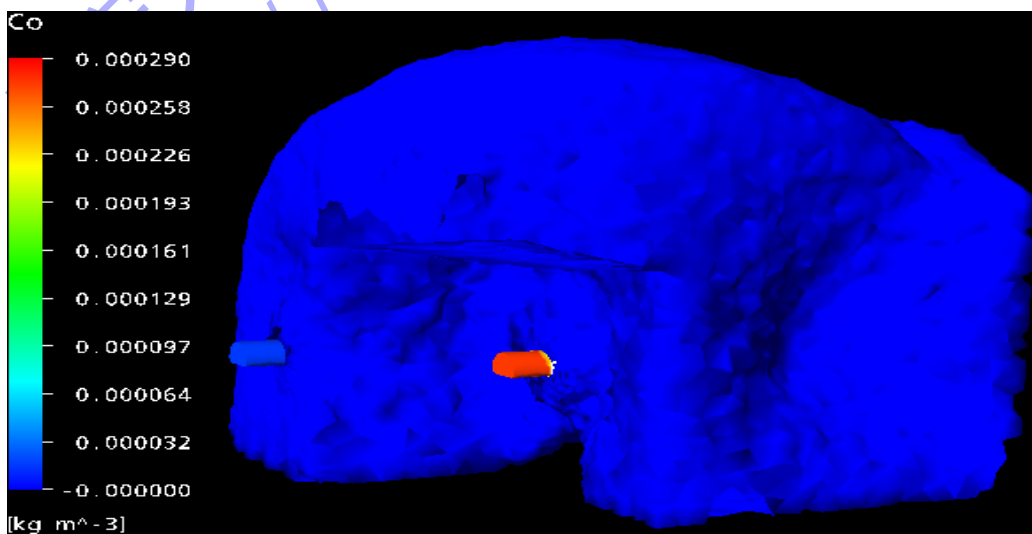


图5 自然风 $V_n=0$, 出、入口 $H=50\text{m}$, $L=40\text{m}$; $C_{CO}=1\text{e}-10\text{kg/m}^3$ 的 CO 云图

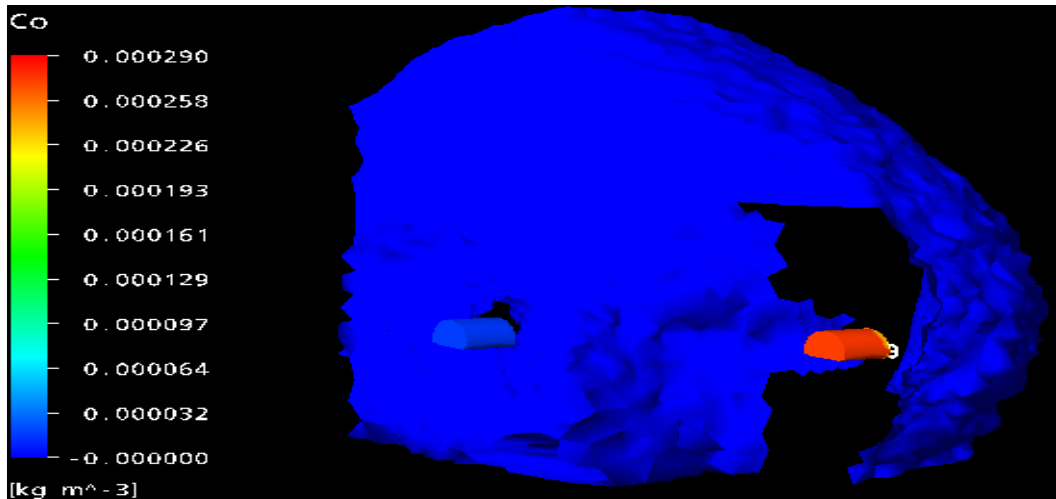


图6 自然风 $V_n=2.5\text{m/s}$, 出、入口 $H=50\text{m}$, $L=40\text{m}$; $C_{CO}=1e-10\text{kg/m}^3$ 的 CO 云图

3.2 主要结果

- (1) 随着排风塔排风口与送风塔送风口高差（或隧道出、入口纵向距离） H 的增大，由大气进入送风口（或隧道入口）的 CO 和烟雾浓度逐渐减小；随着送、排风塔（或隧道出、入口）的横向间距 L 的增大，进入送风口（或隧道入口）的 CO 和烟雾浓度也逐渐减小，而且，这种变化幅度较高差的变化影响更为显著；
- (2) 在送、排风口（或隧道出、入口）相对位置不改变时，随着从排风口（或隧道出口）吹向送风口（或隧道入口）的自然风速的增大，送风口（或隧道入口）污染物浓度显著增大；
- (3) 在送、排风口（或隧道出、入口）相对位置不改变时，随着排风口（或隧道出口）污染物浓度的增加，送风口（或隧道入口）污染物浓度也相应增大，而且变化幅度非常显著；
- (4) 建议竖井送、排风口轴线间距不小于 50.0m ，风口高差不小于 5.0m ；两隧道洞口轴线间距不小于 40.0m ，纵向距离不小于 50.0m 。

4. 结语

(1) 竖井送、排风口和两个隧道间的通风污染是存在的，并且随着排风塔排风口与送风塔送风口高差（或隧道出、入口纵向距离） H 的增大，由大气进入送风口（或隧道入口）的 CO 和烟雾浓度逐渐减小；

(2) 随着送、排风塔（或隧道出、入口）的横向间距 L 的增大，进入送风口（或隧道入口）的 CO 和烟雾浓度也逐渐减小，而且，这种变化幅度较高差的变化影响更为显著。

(3) 为了尽可能降低送、排风口和隧道洞口的交叉污染，建议在进行隧道通风设计时，竖井送、排风口轴线间距不小于 50.0m，风口高差不小于 5.0m；两隧道洞口轴线间距不小于 40.0m，纵向距离不小于 50.0m。

(4) 对于双连拱隧道，为了避免两个隧道通风时的相互污染，可以在洞外专门设置高于隧道几何高度的隔墙。

参考文献

- [1] 杨玉容，室内气流通风效率的三维数值分析，重庆大学硕士学位论文，2002.11,1~8
1. Yang Yu-rong, Three-dimensional Numerical Analysis of Ventilation Efficiency of Indoor Air Flow, Master's Degree Thesis of Chongqing University, 2002.11,1~8
- [2] 中华人民共和国交通部，公路隧道通风照明设计规范（JTJ 026.1—1999），北京：人民交通出版社，2000
2. Ministry of Communications of the People's Republic of China, Specifications for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel (JTJ 026.1—1999), Beijing, Press of the People's Communication, 2000
- [3] 陈树汪，公路隧道火灾事故污染数值模拟与分析，重庆建筑大学学报，2002.2, 25~28
3. Chen Shu-wang, Analysis and Simulation of the Highway Tunnel Fire Contamination, Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002.2,25~28
- [4] 夏永旭、王永东、赵峰，秦岭终南山公路隧道通风方案探讨，长安大学学报，Vol.22(2002).5, 49~50
4. Xia Yong-xu, Wang Yong-dong, Zhao Feng, Discuss of Ventilation Scheme of Qinling Zhongnan Mountain Highway Tunnel, Journal of Chang'an University, Vol.23(2003).4, 49~50
- [5] 夏永旭、张进县、王永东、胡学富、赵峰、靖博，雁门关公路隧道通风方案研究，长安大学学报，Vol.23(2003).4, 46~50
5. Xia Yong-xu, Zhang Jin-xian, Wang Rong-dong, Hu Xue-fu, Zhao Feng, Jing Bo, Research of Ventilation Scheme of YanMenGuan Highway Tunnel, Journal of Chang'an University, Vol.23(2003).4,46~50
- [6] 石平，公路隧道通风局部效应三维数值模拟分析与研究，长安大学硕士学位论文

论文, 2004. 5, 62~69

6. Shi Ping, Three-dimensional Numerical Simulation Analysis and Research of the Local Effect of Highway Tunnel Ventilation, Master's Degree Thesis of Chang'an University, 2004.5,62~69~

[7]中交第一公路勘察设计研究院, 雁门关隧道通风技术设计, 2001. 6

7. China Communications First Highway Survey Design and Research Institute, Technique Design of Ventilation of YanMenGuan Tunnel, 2001.6

Three-dimensional Numerical Analysis and Research of Cross Pollution of Opening and Shaft in the Ventilation of Highway Tunnel

XIA Yong-xu¹, SHI Ping^{1,2}

(1.Highway Institute, Chang'an University, Xi'an 710064,China)

(2.Communication Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051,China)

Abstract: When the sending and exhausting shaft and short distance tunnel is longitudinally ventilated, the cross pollution of exhaust air intook into the proximity shaft or tunnel can be appeared, the ventilation effect is impacted. The numerical simulation and analysis by CFD software shows that the pollution between inlet and outlet of shaft or tunnel will be reduced gradually as the distance between inlet and outlet of shaft or tunnel is increased. It is suggested that the proper axial space length between the air outlet and inlet of the shaft should not be less than 50 meters and the air outlet should be 5 meters higher than the air inlet at least, and the proper axial space length between the two tunnel opening should not be less than 40 meters and the longitudinal space length should be less than 50 meters at least.

Keywords: Highway Tunnel Cross Pollution Numerical Simulation Optimization

夏永旭, 长安大学桥梁与隧道专业教授、博导; 石平, 长安大学桥梁与隧道专业硕士研究生。

联系电话: 02988498307 (H) /13709258640

Email: yongxuxia@sohu.com/ XYX@gl.chd.edu.cn