

文章编号:1671-8879(2006)06-0044-04

公路隧道通风空气交叉污染三维数值分析

夏永旭¹, 石 平^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘 要:在公路隧道的竖井送、排式纵向通风以及小近距隧道通风时,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。应用 CFD(Computational Fluid Dynamics)技术对竖井送、排风口以及两个隧道洞口的空气交叉污染进行了详细的数值模拟分析。结果表明,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)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 m,风口高差不小于 5 m;两隧道洞口轴线间距不小于 40 m,纵向距离不小于 50 m。

关键词:隧道工程;通风;空气;交叉污染;数值模拟;优化

中图分类号:U454

文献标识码:A

3D numerical analysis on air cross pollution of opening and shaft in ventilation of highway tunnel

XIA Yong-xu¹, SHI Ping^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Transportation Plan and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, Hubei, China)

Abstract: When the sending and exhausting shaft on the short distance tunnels is longitudinally ventilated, the exhaust air from a shaft will be absorbed into the proximity shaft or tunnel, so the cross pollution will occur, the ventilation effect will be 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 when 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 m and the air outlet should be 5 m higher than the air inlet at least, and the proper axial space length between the two tunnel openings should not be less than 40 m and the longitudinal space length should not be less than 50 m at least. 3 tabs, 6 figs, 6 refs.

Key words: tunnel engineering; ventilation; air; cross pollution; numerical simulation; optimization

0 引 言

近年来,中国的特长公路隧道越建越多,公路隧道的通风问题已经成为公路建设中一个十分重要的

研究课题。目前大部分的长大公路隧道都是采用斜竖井加射流风机的分段纵向通风。但是,在采用公路隧道的竖井送排式纵向通风以及小近距离隧道通风时,经常会出现排出的污染空气又被吸入到邻近

收稿日期:2005-12-11

基金项目:交通部行业联合科技攻关项目(200335331404)

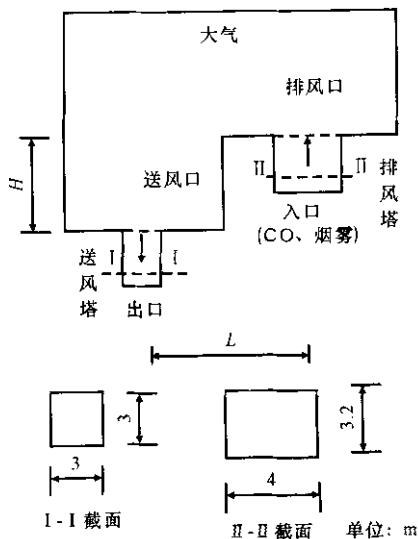
作者简介:夏永旭(1954-),男,陕西武功人,教授,博士研究生导师。

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^[1-6]。本文通过 CFD(Computational Fluid Dynamics)技术,对公路隧道竖井送排风口和小近距隧道通风的交差污染进行数值模拟分析,目的是研究竖井送排风口和小近距隧道避免通风交叉污染的最小距离,为隧道设计及优化提供有益的帮助。

1 CFD 模型和模拟计算方法

1.1 几何模型

经试算,确定竖井和洞口交叉污染几何模型的大气区域分别取 $100\text{ m}\times100\text{ m}\times100\text{ m}$ 和 $150\text{ m}\times150\text{ m}\times150\text{ m}$ 的方形区域。模拟计算模型如图 1 和



注: L 为两洞轴线间距; H 为排风口与送风口的高差。

图 1 两相邻竖井数值模拟模型

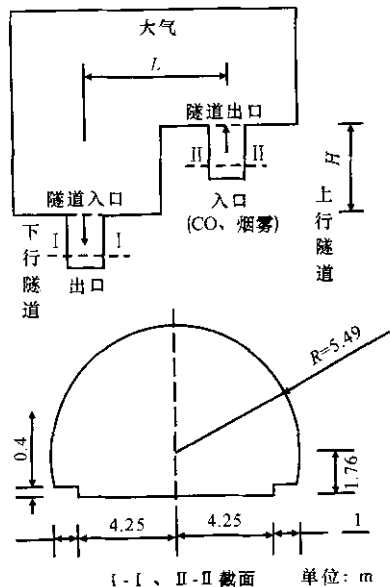


图 2 两相邻洞口数值模拟模型

图 2 所示。送、排风口及洞口截面按照隧道实际尺寸取值。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:

- (1) 出入口边界边长控制在 $0.2\sim0.5\text{ m}$ 之间。
- (2) 在模型连接处进行点控制,以加密网格。
- (3) 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。
- (4) 模型体网格单元总数控制在 $20\text{ 万}\sim30\text{ 万}$ 之间。

1.2 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 $K-\epsilon$ 紊流双参数方程,并分别进行稳态和瞬态模拟计算。

1.3 边界条件

竖井交叉污染:送、排风口风速 V_1 和 V_2 取 10.38 m/s ;排风口 CO 浓度取 $0.000\,29\text{ kg/m}^3$,烟雾浓度取 0.007 m^{-1} ;大气边界为开放边界,取相对压力为 0, CO 为 0,烟雾浓度均为 0。

洞口交叉污染:上行线隧道出口风速 V_{02} 取 2.88 m/s ,下行线隧道入口风速 V_{01} 取 4.0 m/s ;隧道出口 CO 浓度取 $0.000\,29\text{ kg/m}^3$,烟雾浓度取 0.007 m^{-1} ;大气边界为开放边界,取相对压力为 0, CO 为 0,烟雾浓度均为 0。

隧道基本参数: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 $\delta=250\times10^{-6}$,稀释烟雾浓度 $K=0.007\text{ m}^{-1}$ 。

2 两相邻竖井及洞口交叉污染分析

2.1 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风口的 CO 和烟雾浓度稳态模拟计算值见表 1。考虑自然风影响,风向从出口吹响入口,风速分别取 2.0 、 2.5 、 3.0 m/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见表 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 300×10^{-6} ,送风塔送风口及隧道入口的 CO 浓度瞬态模拟计算值见表 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			$\rho=1.205\text{ kg/m}^3, T=20^\circ\text{C}$		
模拟类别	组别	风口或出口纵向距离	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
				$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	$C_{\text{CO}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_{\text{VI}}/\text{m}^{-1}$	$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	$C_{\text{CO}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_{\text{VI}}/\text{m}^{-1}$
相邻竖井交叉污染	1	1	50	250	0.000 29	0.007	0.000 228 3	2.66×10^{-10}	6.41×10^{-9}
	2	3					0.000 196	2.28×10^{-10}	5.51×10^{-9}
	3	5					1.49×10^{-5}	1.74×10^{-11}	4.20×10^{-10}
	4	7					1.23×10^{-5}	1.44×10^{-11}	3.47×10^{-10}
	5	9					1.10×10^{-5}	1.28×10^{-11}	3.09×10^{-10}
	6	15					3.32×10^{-6}	3.86×10^{-12}	9.31×10^{-11}
	7	0	3.5	250	0.000 29	0.007	229.350 12	0.000 267	0.006 440 9
	8	5	3.5				204.499 85	0.000 238	0.005 743
	9		10				0.084 358	9.81×10^{-8}	2.37×10^{-6}
	10		25				1.57×10^{-5}	1.83×10^{-11}	4.42×10^{-10}
	11		50				1.49×10^{-5}	1.74×10^{-11}	4.20×10^{-10}
	12		60				1.47×10^{-5}	1.71×10^{-11}	4.14×10^{-10}
	13		70				3.23×10^{-6}	3.75×10^{-12}	9.06×10^{-11}
相邻洞口交叉污染	14	0	40	250	0.000 29	0.007	0.006 961 4	8.10×10^{-9}	1.95×10^{-7}
	15	5					0.002 007 3	2.34×10^{-9}	5.64×10^{-8}
	16	20					0.001 827 7	2.13×10^{-9}	5.13×10^{-8}
	17	50					0.001 771 5	2.06×10^{-9}	4.97×10^{-8}
	18	60					0.001 718 2	2.00×10^{-9}	4.83×10^{-8}
	19	80					0.000 136 8	1.59×10^{-10}	3.84×10^{-9}
	20	0	13	250	0.000 29	0.007	4.788 627 1	5.57×10^{-6}	0.000 134 48
	21	50	13				0.006 570 9	7.64×10^{-9}	1.85×10^{-7}
	22		20				0.003 204 8	3.73×10^{-9}	9.00×10^{-8}
	23		40				0.001 771 5	2.06×10^{-9}	4.97×10^{-8}
	24		60				0.001 313 9	1.53×10^{-9}	3.69×10^{-8}
	25		80				0.000 140 3	1.63×10^{-10}	3.94×10^{-9}

通过 CO 浓度等值面云图,对相邻竖井和洞口交叉污染情况,可以很直观发现污染气体 CO 和烟雾影响的范围及程度。无自然风和不同自然风速条件下 CO 浓度的等值面云图,如图 3~图 6 所示。

2.2 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。

表 2 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			$\rho=1.205\text{ kg/m}^3, T=20^\circ\text{C}$		
模拟类别	组别	风口或出口纵向距离	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
					$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	$C_{\text{CO}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$		$C_{\text{VI}}/\text{m}^{-1}$	$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	
		N	H/m	L/m	$V_n/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$					
竖井	1	5	50	0	250	0.000 29	0.007	0.000 014 9	1.74×10^{-11}	4.20×10^{-10}
	2			2.0				0.000 582 3	6.77×10^{-10}	1.64×10^{-8}
	3			2.5				0.002 000 0	2.33×10^{-9}	5.62×10^{-8}
	4			3.0				0.003 258 7	3.79×10^{-9}	9.15×10^{-8}
洞口	5	50	40	0	250	0.000 29	0.007	0.001 771 5	2.06×10^{-9}	4.97×10^{-8}
	6			2.0				0.002 066 0	2.40×10^{-9}	5.80×10^{-8}
	7			2.5				0.002 840 1	3.30×10^{-9}	7.98×10^{-8}
	8			3.0				0.011 367 8	1.32×10^{-8}	3.19×10^{-7}

表 3 不考虑自然风影响时 CO 浓度的瞬态模拟计算结果

项目		模拟类型		瞬态		$\rho=1.205\text{ kg/m}^3, T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	
模拟类别	组别	风口或出口纵向距离	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	
				$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	$C_{\text{CO}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_{\text{CO}}/10^{-6}$	$C_{\text{CO}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
	N	H/m	L/m				
竖井	1	5	50	83	9.65×10^{-5}	3.29×10^{-5}	3.82×10^{-11}
	2			145	1.68×10^{-4}	1.025×10^{-3}	1.19×10^{-9}
	3			189	2.20×10^{-4}	5.08×10^{-3}	5.91×10^{-9}
	4			221	2.57×10^{-4}	1.14×10^{-2}	1.32×10^{-8}
	5			300	3.5×10^{-4}	6.10×10^{-2}	7.10×10^{-8}
洞口	6	50	40	79	9.17×10^{-5}	3.42×10^{-5}	3.98×10^{-11}
	7			141	1.65×10^{-4}	8.28×10^{-4}	9.63×10^{-10}
	8			186	2.17×10^{-4}	3.70×10^{-3}	4.30×10^{-9}
	9			219	2.55×10^{-4}	7.91×10^{-3}	9.20×10^{-9}
	10			300	3.5×10^{-4}	3.82×10^{-2}	4.44×10^{-8}

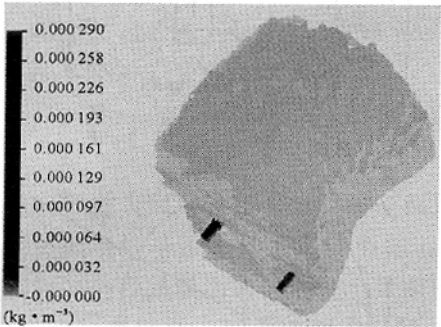


图 3 自然风 $V_n=0$, 送、排风口 $H=5\text{ m}$,

$L=50\text{ m}; C_{\text{CO}}=1\times10^{-10}\text{ kg/m}^3$ 的等值面云图

(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

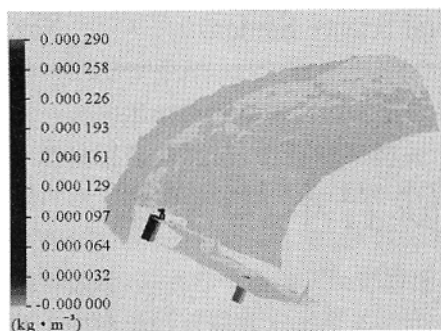


图4 自然风 $V_n=2.5$ m/s,送、排风口 $H=5$ m,
 $L=50$ m; $C_{CO}=1 \times 10^{-10}$ kg/m³ 的等值面云图

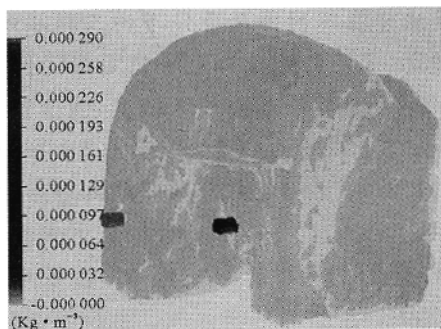


图5 自然风 $V_n=0$,出、入口 $H=50$ m,
 $L=40$ m; $C_{CO}=1 \times 10^{-10}$ kg/m³ 的等值面云图

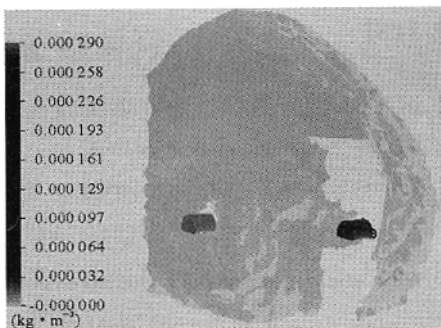


图6 自然风 $V_n=2.5$ m/s,出、入口 $H=50$ m,
 $L=40$ m; $C_{CO}=1 \times 10^{-10}$ kg/m³ 的等值面云图

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 m,风口高差不小于5 m;两隧道洞口轴线间距不小于40 m,纵向距离不小于50 m。

3 结 语

(1)竖井送、排风口和两个隧道间的通风污染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 m,风口高差不小于5 m;两隧道洞口轴线间距不小于40 m,纵向距离不小于50 m。

参考文献:

References:

- [1] 杨玉容. 室内气流通风效率的三维数值分析[D]. 重庆:重庆大学,2002.
YANG Yu-rong. Three-dimensional numerical analysis of ventilation efficiency of indoor air flow [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [2] JTJ 026.1-1999. 公路隧道通风照明设计规范[S].
JTJ 026.1-1999. Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel[S].
- [3] 陈树汪. 公路隧道火灾事故污染数值模拟与分析[J]. 重庆建筑大学学报,2002,24(1):23-28.
CHEN Shu-wang. Analysis and simulation of the highway tunnel fire contamination [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002,24(1):23-28.
- [4] 夏永旭,王永东,赵 峰. 秦岭终南山公路隧道通风方案探讨[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22(5):48-50.
XIA Yong-xu, WANG Yong-dong, ZHAO Feng. Ventilation scheme of Zhongnanshan highway tunnel in Qinling[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002,22(5):48-50.
- [5] 夏永旭,张进县,王永东,等. 雁门关公路隧道通风方案研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(4):46-50.
XIA Yong-xu, ZHANG Jin-xian, WANG Yong-dong, et al. Ventilation scheme of Yanmenguan highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003,23(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[D]. 西安:长安大学,2004.
SHI Ping. Three-dimensional numerical simulation analysis and research of the local effect of highway tunnel ventilation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.