

隧道群毗邻隧道上游出口污染空气 对下游隧道空气的影响

韩星¹, 杨洁¹, 张脩^{2,3}

(1 上海理工大学, 上海 200093; 2. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006;
3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 毗邻隧道上游隧道出口污染空气会对下游隧道产生影响, 恶化其运营环境。以 Realizable $k-\varepsilon$ 三维紊流模型及多组分扩散传输为物理计算模型, 采用 FLUENT 流体计算软件模拟了上下隧道间不同污染物的浓度分布以及上游隧道在不同间距不同风速时对下游隧道的影响, 同时, 根据贴壁射流理论, 对其进行了理论分析。结果表明: 当隧道距离大于 400 m, 风速小于 2 m/s 时, 毗邻隧道二次污染小于 5%。当上游隧道射流风速为 2.5 m/s 时, 由此计算的理论值和模拟值基本吻合。

关键词: 毗邻隧道; 污染物; 贴壁射流; 污染物扩散; 数值模拟

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0048-05

Impact of polluted air at upstream of adjacent tunnel in tunnel group on downstream air of tunnel

HAN Xing¹, YANG Jie¹, ZHANG Xiao^{2,3}

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Traffic Science Research Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China;
3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, MOE, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For adjacent tunnels, the pollution air at upstream of tunnel will affect the downstream tunnel and deteriorate its operation environment. Taking realizable $k-\varepsilon$ 3D turbulent model and multicomponent diffusion transfer as physical calculation model, the article used FLUENT calculation software to simulate the concentration distribution of different pollutants between the upstream and downstream of tunnel, and the impact of pollution air from upstream export on the downstream of tunnel in different distances and different air velocities. Meantime, it used theory of wall-attached jet to carry out theoretical analysis. The results showed that the rate of secondary pollution for adjacent tunnel is less than 5% when the distance between tunnels is longer than 400m and wind speed is lower than 2m/s. When the wind velocity of upstream tunnel is 2.5 m/s, the theoretical value by calculation is basically in agreement with simulation result.

Key words: adjacent tunnel; pollutant; wall-attached jet; pollutant dispersion; numerical simulation

目前在公路隧道群的通风及控制中, 对于相距较近的毗邻隧道, 其上游隧道出口排出的污染空气必然会对下游隧道产生影响。而在已有的隧道通风设计和规范中, 并未对隧道入口的污染物浓度进行研究。隧道通风设计中, 认为各个隧道都是相互独立的, 没有将上下游隧道之间的影响体现到通风中去, 如陕西

省西安—汉中高速公路上秦岭 I、II、III 号特长公路隧道群、319 国道长沙—浏阳段蕉溪岭隧道群、深圳坪西公路雷公山、造福山隧道群等, 在这些隧道群中各个隧道的通风设计是相互独立的。这样就不能保证下游隧道通风设计的准确性, 只有解决好隧道群的这种关系, 才能保证隧道群的运营安全。

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208298); 山西省交通建设科技项目(11-2-13); 上海市教委科研创新项目(13YZ070); 上海市教委重点学科建设项目(J50502)

作者简介: 韩星(1981-), 男, 山东人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为隧道污染物及隧道通风。

通讯作者: 杨洁(1988-), 女, 陕西人, 硕士研究生, 研究方向为隧道污染物及隧道通风。

在国内,从 20 世纪 80 年代开始出现针对污染物在隧道外扩散情况研究。徐丽等^[1]根据大气扩散方程建立公路隧道洞口污染物扩散的物理数学模型,并对某城市隧道洞口在冬、夏两季主导风向情况下 CO 扩散情况、浓度分布进行了数值模拟。杨玉容等^[2]在从不同自然风条件、洞外段设置挡风壁和两隧道洞口不同相对位置三个角度,数值模拟了出口废气的扩散情况,并得出对另一隧道入口污染的影响程度。黄哲学等^[3]针对公路隧道运营中近距离隧道污染空气窜流的二次污染问题,提出了通过错开隧道口出口、修筑中隔墙以及修筑通风横洞等减少污气窜流的对策。

以上这些研究只局限于单个隧道洞口污染物的扩散以及双洞口公路隧道两洞口间的影响。目前尚未有学者对隧道群毗邻隧道间的污染物扩散进行研究。文章针对隧道群中上游出口与下游入口相距仅为几十米甚至十几米的毗邻隧道间的相互影响进行数值模拟及研究。选取具有代表性的某隧道群中毗邻隧道以 Realizable $k-\varepsilon$ 三维紊流模型及多组分扩散传输为物理计算模型,以 FLUENT 流体计算软件为平台,对隧道群毗邻隧道上游隧道在不同间距不同射流风速下对下游隧道的影响进行数值模拟,并对射流风速为 2.5 m/s 时,不同间距下“二次污染”量进行理论计算,得出毗邻隧道上游隧道对下游隧道的影响情况。为毗邻式隧道通风设计中各个段落的隧道需风量设计提供依据。

1 基本假设

在自然风、射流风机的作用下,隧道中的气流十分复杂,要将这样的气流按照现有的理论来分析处理具有相当的困难。并且影响污染物扩散情况主要因素包括:隧道出口污染物出射速度、排出废气温度与环境温度之间的差值而产生的浮升力、车辆交通引起的气体湍流和诱导、周围环境风速,当隧道修建完毕后,周围环境风速将成为影响扩散的最重要因素^[4-5]。因此,本文中作如下基本假定^[6-7]:

- (1) 流体是不可压缩的。
- (2) 隧道通风计算中所遇到的各种风流类型可简化成稳定流。
- (3) 流体按连续介质处理。
- (4) 能量守恒原理。
- (5) 车辆尾气和隧道出口周围大气之间存在小范围的温差,由于浮升力或重力的作用,会导致洞口出来的废气向上或向下扩散,但这种扩散作用相对

较弱,因此此后研究中忽略了温差的影响作用。

(6) 模拟中仅考虑左线隧道。

由以上假设可知,隧道洞口附近的车辆行驶状况可视为不随时间变化的连续稳定流。并且隧道中的空气与大气相连,变化状况也在常温常压下,可视为不可压缩的恒温流体,不随时间变化恒定流,这样从洞口处排出来的污染物气体可简化视为一股自由射流在隧道外环境中的扩散^[8]。

2 上游隧道出口污染空气对下游隧道影响的数值模拟

2.1 三维数值计算模型

2.1.1 数值模拟模型 根据工程隧道的布置,三维数值计算模型特点如下:

- (1) 取上下游隧道中间的大气作为计算流场。
- (2) 为简化起见,不考虑右线隧道,认为仅有左线隧道。
- (3) 洞口外部流场取高 13 m,半径为 16 m 的半圆柱体,这样能画出高质量的网格,对于数值计算的正确与稳定起着非常重要的作用。

利用 GAMBIT 软件建立的三维数值计算模型见图 1。上游隧道行车出口为计算区域内的进口,边界条件设为速度入口,射流出的气体为向外排出的污染物气体,在断面上的速度分布均匀。下游隧道行车入口为计算区域的出口,考虑到车辆行驶会在引道上和隧道入口处产生一定的风速对污染物扩散造成影响,将其设为压力边界条件。山体及地面采用标准壁面函数。边界层设为压力边界条件。

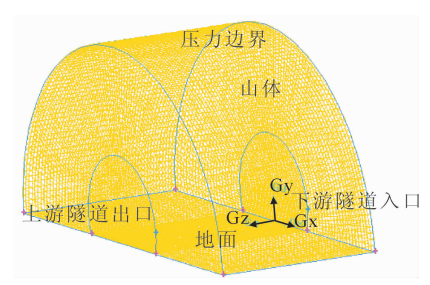


图 1 三维数值计算模型

2.1.2 模拟计算 模拟采用的是适用于低速、不可压缩流体的分离求解器,其在方程线性化时采用隐式格式。湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。使用有限体积分法中的 SIMPLE 方法对控制方程离散化^[9]。计算时先采用一阶精度格式获得初始流场,然后采用二阶精度格式,这样不仅可以保证计算的稳定性,又可以获得精度较高的流场计算结果。

2.2 模拟工况及结果分析

2.2.1 上下游隧道间不同污染物的浓度分布 对于毗邻隧道,由于相距较近,其上游隧道污染物很容易进入下游隧道造成二次污染。无风时,当上游出口射流风速为 1 m/s 时,经模拟计算污风进入下游隧道入口的比例为 92.73% 。因为人的主要活动区域为距地面 $1.5\sim 2\text{ m}$ 左右,因此取 $Y = 1.5\text{ m}$ 处的速度分布图(图 2),以及 CO 、 NO_x 、 SO_2 浓度分布图

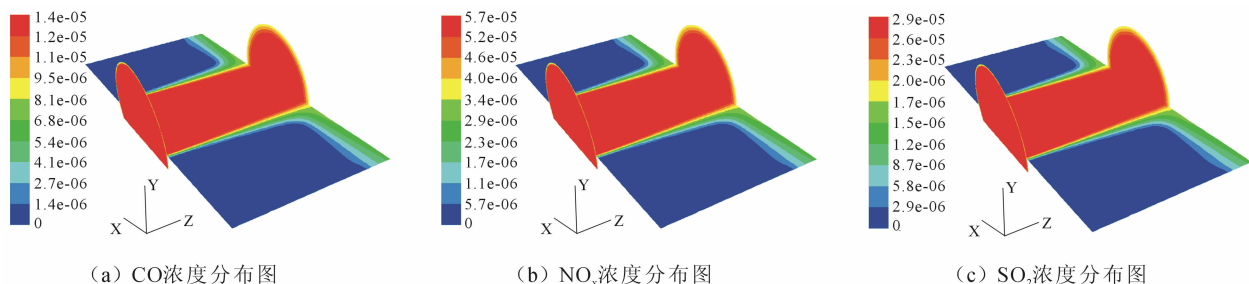


图 3 $Y = 1.5\text{ m}$ 处 CO 、 NO_x 、 SO_2 浓度分布图(单位: mg/m^3)

由图 2 可以看出到下游隧道时,风速几乎没有什么变化,这是由于两隧道距离较近,射流风还处在射流起始段。上游隧道主要采用的是自然通风,其风速越大则进入下游隧道的污风越多,这对于下游隧道产生的二次污染应予以重视。而影响污染物输送扩散以及稀释的主要因素是隧道射流风,且污染物成分是标量其组成成份分布形态相似,因此到下游隧道 3 种污染物浓度分布应该相同,说明其扩散规律基本上是一致的,由图 3 可验证。

2.2.2 上游隧道在不同间距不同风速时对下游隧道的影响 由以上分析可知,在隧道射流风的作用下,不同污染物扩散规律是一致的,因此以 CO 的浓度分布来代表污染物的扩散分布, CO 浓度取隧道设计阈值 250 ppm ,山间没有风时,模拟间距为 $13, 50, 100, 200, 400\text{ m}$ 时,毗邻隧道上游出口在射流风速为 $1, 2, 3, 4, 5\text{ m/s}$ 时,污染空气对下游隧道的影响,计算结果见图 4、5。由图 4、5 中可以看出:

(1) 当隧道距离大于 400 m ,风速小于 2 m/s 时,毗邻隧道污风混入率小于 5% 。这对于公路隧道群中毗邻隧道和连续隧道的划分提供了依据。公路隧道群包括连续隧道和毗邻隧道^[10],而连续隧道和毗邻隧道的划分主要应结合通风、照明、交通安全、防火安全等因素统筹考虑。在通风因素中,连续隧道和毗邻隧道通风的最大区别在于是否考虑上游隧道出口污染物对下游隧道入口空气的影响。模拟中隧道采用典型的断面尺寸,具有普遍代表性,对于

图 3。

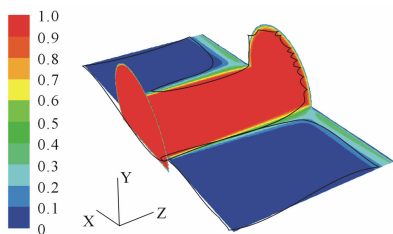


图 2 $Y = 1.5\text{ m}$ 处速度分布图(单位: m/s)

毗邻隧道可根据上游隧道对下游隧道影响的百分比来划分,所以本模拟对毗邻隧道的界定给了一个定量的参考。

(2) 随着风速的增加,污风混入率会有增加,但幅度并不高,说明在某一确定的距离下,风速的变化对毗邻隧道污风混入率影响不大。且随着距离的增加,其影响有逐渐变小的趋势。

(3) 随着距离的增加,下游隧道污风混入率会有增加,取风速为 2.5 m/s ,则不同间距下的污风混入率如图 5 所示,可以看出,当隧道间距达到 400 m 时,污风混入率仅 6% ,此时可认为上游隧道对下游隧道没有影响。通过对不同间距毗邻隧道污染物扩散情况的模拟,可以看出,间距处于射流主体段时,上游隧道对下游隧道的影响还是相当大的,达 73.5% 以上;间距处于射流发展段时,污风混入率会下降较快,间距达 400 m 时,污风混入率降至 6% ,认为对下游隧道没有影响。由以上分析可知,毗邻隧道相距应大于 400 m 以上,才不会对下游隧道造成污染。如果不能达到 400 m ,就应该对二次污染予以重视。

3 隧道出口污染物扩散的理论计算

对于隧道群毗邻隧道的相互影响,数值模拟得到了一些基本的理论,为了进一步完善毗邻隧道通风理论,根据贴壁射流理论,对射流风速为 2.5 m/s 时,污风进入下游隧道的总量定量计算,并和模拟结

果比较,验证了数值模拟的可信性。

3.1 理论依据

贴附射流是指流体以均匀流速从一定宽度的出口沿着一光滑平面切向流进半有限区域。假设壁面对射流的摩擦阻力可以略去不计,那么由于壁面处不可能混入静止空气,也就是卷吸量减少了,所以贴附射流的射程比自由射流更长。这时射流断面的最大速度在靠近壁面处。如果忽略空气在壁面上流动的附壁层,可以认为:贴壁射流就是把喷口面积扩大一倍后再取半个射流^[11]。这一点已被许多前人做过的实验所证明。在隧道通风中,隧道口射流属于贴附射流,由以上理论可根据完整射流的规律进行研究。此处对无风时,射流出口风速为2.5 m/s时不同间距隧道污风混入率进行计算。

3.2 污风混入率计算

先按照圆断面自由射流计算射流规律^[12],然后计算断面处进入下一隧道洞口的污风。隧道断面简

化图及贴附射流边界图见图6,7。

计算过程如下:

取射流轴线方向为 x 方向,则沿 x 方向,射流不断带入周围介质,使边界扩张,使射流主体速度逐渐降低。对于圆形出口,求核心长度。

$$S_n = 0.671 \frac{R_0}{K} = 0.671 \times \frac{5.43}{0.076} = 47.94$$

式中: S_n 为核心长度,m; $R_0 = 5.43$ m,为出口半径; $K = 0.076$,为紊流系数。

因此,对于两隧道间距小于起始段核心长度47.94m的情况,应根据射流起始段理论计算。当毗邻隧道间距大于47.94 m时,射流进入主体段,按照主体段理论计算。主体段风量计算略有不同。已知条件和起始段的一样。起始段隧道断面与射流断面以及隧道断面风量计算区域的划分图如图8所示,主体段隧道断面与射流断面以及隧道断面风量计算区域图如图9所示。

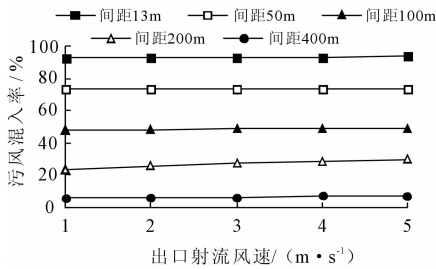


图4 不同间距不同出口射流风速下毗邻隧道污风混入率

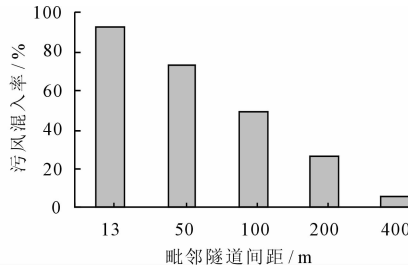


图5 射流风速为2.5 m/s时,不同间距毗邻隧道污风混入率

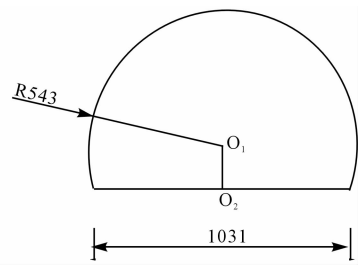


图6 隧道断面简化图

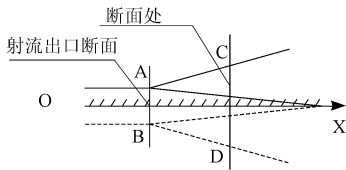


图7 贴附射流边界图

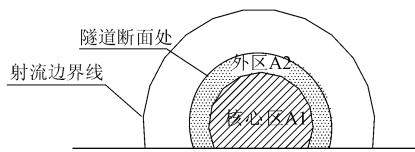


图8 起始段隧道断面与射流断面以及隧道断面风量计算区域的划分图

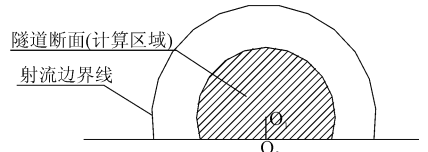


图9 主体段隧道断面与射流断面以及隧道断面风量计算区域图

(1)起始段污风混入率计算:

$$R = 31.4 R_0 \left(\frac{KS}{R_0} + 0.294 \right) \quad (1)$$

$$r = R_0 \left(1 - 1.49 \frac{KS}{R_0} \right) \quad (2)$$

$$V' = V_0 \left[1 - \left(\frac{L}{R} \right)^{1.5} \right]^2 \quad (3)$$

$$Q_1 = V_0 \times A_1 \quad (4)$$

$$Q_2 = \int_{-0.158\pi}^{1.158\pi} \int_{3.96}^{5.43} 2.5 \left[1 - \left(\frac{\rho - 3.96}{8.787} \right)^{1.5} \right]^2 \rho d\rho d\theta \quad (5)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

$$L = R_0 - r = 5.43 - r \quad (7)$$

式中: R 为断面处射流层半径,m; r 为核心半径,m; V' 为外区 A_2 各点风速,m/s; Q_1 为核心区风量, m^3/s ; Q_2 为外区风量, m^3/s ; Q 为总风量, m^3/s ; G 为污风混入率; S 为毗邻隧道间距; $L = R_0 - r = 5.43 - r$ 为 A_2 区边界上点至核心边界的距离。如图8所示隧道断面风量计算区域分为两部分: A_1 区为断面核心区, A_2 区为外区; $V_0 = 2.5$ m/s为出口速度; A_1 为断面核心区面积, m^2 ; Q_0 为上游隧道出口污风量。

(2) 主体段污风混入率计算。

$$R = 3.14R_0\left(\frac{KS}{R_0} + 0.294\right) \tag{8}$$

$$V_m = v_0\left\{\frac{0.48}{as/d_0 + 0.147}\right\} \tag{9}$$

$$V = V_m\left\{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^{1.5}\right\}^2 \tag{10}$$

$$Q = \int_{-0.158\pi}^{1.158\pi} \int_0^{5.43} 2.5\left[1 - \left(\frac{\rho}{8.787}\right)^{1.5}\right]^2 \rho d\rho d\theta \tag{11}$$

$$G = Q/Q_0 \tag{12}$$

式中： V_m 为轴心速度，m/s； V 为射流截面上速度，m； y 为横截面上任意点至轴心距离，m； R 为该截面上射流半径，m。

3.3 模拟结果比较

由以上公式计算间距分别为 13, 50, 100, 200, 400 m 下游隧道的污风混入率。并和模拟结果对比，见表 1。

表 1 不同间距污风混入率理论计算值和模拟值对比

m, %			
间距	计算值	模拟值	相对误差
13	96.63	92.90	3.86
50	79.56	73.50	7.62
100	49.32	48.60	1.46
200	28.63	26.50	7.44
400	6.50	6.00	7.69

通过理论计算的断面处污风混入率和模拟值的相对误差最大为 7.69%，说明模拟值和理论值基本上是接近的。由此验证了模拟方案的可信度。

4 结 语

文章采用三维数值模拟的方法，对隧道群中毗邻隧道上游隧道出口排放的污染物对下游隧道的影响进行了预测和分析并针对不同隧道间距下污染物的扩散情况进行模拟和理论计算。得出以下结论：

(1) 影响污染物输送扩散以及稀释的主要因素是隧道射流风，污染物浓度差，重力等因素对污染物的扩散影响不大。

(2) 当隧道距离大于 400 m，风速小于 2 m/s

时，毗邻隧道污风混入率小于 5%。这对于毗邻隧道在考虑通风因素时的界定给了一个定量的参考。

(3) 毗邻隧道相距应大于 400 m 以上，才不会对下游隧道造成污染。如果不能达到 400 m，就应该对二次污染予以重视。

(4) 当上游隧道射流风速为 2.5 m/s 时，由此计算的理论值和模拟值相对误差最大仅为 7.69%，从而验证了数值模拟的可信性。

目前，在公路隧道群中对于毗邻隧道并没有确定概念，文章对其做了定量分析，给出了毗邻隧道在考虑通风因素时的界定以及毗邻隧道二次污染的条件。进一步完善了隧道群通风理论。

参考文献：

[1] 徐 丽. 城市公路隧道洞口污染物扩散数值模拟[D]. 成都:西南交通大学,2007.

[2] 杨玉容,何 川,曾艳华. 双洞公路隧道洞口废气污染影响的数值模拟[J]. 现代隧道技术,2009,46(2):94-98.

[3] 黄哲学,曾兰舒,姚 虎. 近距离公路隧道污染空气窜流数值分析[J]. 华东公路,2012(3):81-84.

[4] 杜 峰,张春峰,鲁 钢. 公路隧道内废气分布规律的研究[J]. 公路隧道,2012(2):27-30.

[5] Chang T Y, Modzelewski S W, Nordeck J Metal. Tunnel air quality and vehicle emission. Atmos Environ[J]. 1982,16(6):1011-1016.

[6] IDEY, UEYAMAS, KOBAYASHI K. Wind tunnel modeling of gas dispersion from a road portal outlet [J]. The Sci of the Total Enviro, 1987, 59:211-222.

[7] 余 快,刘 宏,王晓雯,等. 中梁山隧道洞口窜流二次污染数值分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(2):225-228.

[8] 王婉娣. 长大公路隧道火灾通风三维数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学,2004.

[9] 王瑞金,张 凯,王 刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[10] 王少飞. 公路隧道分类及公路隧道群概念探讨[J]. 公路隧道,2009(2):10-14.

[11] 魏润柏. 通风工程空气流动理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.

[12] 蔡增基,龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.