

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-232-05

# 地形对连续隧道洞口间污染物窜流的影响

唐莎<sup>1</sup> 韩晓阳<sup>1</sup> 曾仕豪<sup>2</sup> 袁中原<sup>2</sup> 雷波<sup>2</sup>

(1. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100120;  
2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 隧道上下游洞口间距较短时, 从上游排出的污染空气来不及完全扩散便被吸入下游隧道, 造成二次污染, 这种现象被称作污染物窜流, 会降低通风效率增大运营成本。此前研究较少涉及地形对窜流的影响, 本研究采用 CFD 数值模拟方法建立连续隧道模型, 对不同深度山谷以及不同坡角山坡下的污染物窜流情况进行模拟分析。结果表明山谷存在时窜流现象有所减弱, 在间距 250m 时 10m 深山谷使窜流比相对减少 13.30%, 而山谷深度对窜流影响不大; 设置明洞结构时山坡对窜流基本没有影响, 不设明洞结构时山坡对窜流的影响可近似考虑为纵向间距变化造成的影响。

**【关键词】** 污染物窜流; 连续隧道; 地形; 数值模拟

中图分类号 U459.2 文献标识码 A

## The Influence of Topography on Pollutant Crossflow between Openings of the Continuous Tunnels

Tang Sha<sup>1</sup> Han Xiaoyang<sup>1</sup> Zeng Shihao<sup>2</sup> Yuan Zhongyuan<sup>2</sup> Lei Bo<sup>2</sup>

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd, Beijing, 100120;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** When the distance between the upstream and downstream openings of the tunnel is short, the polluted air discharged from the upstream is sucked into downstream tunnel before it spread completely causing secondary pollution. This phenomenon is called pollutant crossflow, and reduces ventilation efficiency and increases operating costs. Previous researches rarely study the influence of topography on crossflow. CFD numerical simulation is adopted to build the model of continuous tunnels, and crossflow situation with valleys of different depths and hillsides of different slope angles are analyzed. Results show crossflow is weakened when the valley exists. When the spacing is 250m long and the valley is 10m deep, the crossflow ratio is relatively reduced by 13.30%, while valley depth has little effect on crossflow. With the special structure, hillside has little effect on crossflow, and the influence of hillside without the special structure on crossflow can be approximately considered as the influence caused by the change of longitudinal spacing.

**【Keywords】** pollutant crossflow; continuous tunnels; topography; numerical simulation

作者(通讯作者)简介: 唐莎(1991-), 女, 博士研究生, 工程师, E-mail: tangsha@hpdi.com.cn  
收稿日期: 2022-01-22

## 0 引言

随着我国经济的高速发展, 公路进入一个快速发展的阶段, 隧道建设规模也不断扩大, 公路隧道的建设成为需要重点攻关的工程建设项目<sup>[1]</sup>。公路隧道通风经过长时间发展, 已经有横向式、半横向

式、纵向式以及组合式等多种系统<sup>[2]</sup>, 纵向式对整个火灾区域的烟雾控制能力较好, 并且建设成本低、控制方便<sup>[3]</sup>, 所以目前大部分隧道采用的通风系统均为纵向式<sup>[4]</sup>。

公路路段上会出现两座或两座以上纵向间隔

距离较短的隧道, 被称作连续毗邻隧道<sup>[5]</sup>, 下文简称连续隧道。由于洞口间距较小, 上下游轴线保持一致, 在纵向通风作用下从上游隧道排出的污染空气未完全稀释又被吸入下游隧道, 这种现象被称作污染物窜流。窜流现象造成二次污染, 降低隧道通风效率, 增大运营成本<sup>[6]</sup>。被吸入下游的污染物占上游排出污染物的比例称作窜流比, 有学者针对连续隧道进行数值计算, 分析窜流比随上下游隧道风速及隧道间距的变化特性, 并拟合出窜流比计算式<sup>[7]</sup>。彭建康<sup>[8]</sup>等人研究发现自然风向以及风速对窜流现象的影响很大, 且在大部分风向下窜流现象会受到减弱。韩星<sup>[9]</sup>等人利用模型试验验证了数值计算的可信性, 并发现错开隧道洞口可有效减小窜流比。还有学者提出修筑明洞设置天窗以及修筑通风横洞的方法来减小窜流比<sup>[10]</sup>。

在利用数值计算研究隧道洞口污染物窜流现象中, 大部分学者都忽略了地形的影响, 取路面之上的矩形空间作为计算域, 洞口处山坡简化为垂直平面。而实际上很多隧道建设在山腰高度, 道桥横跨山谷连接洞口, 且山坡都具有一定坡角, 这些都会对窜流现象产生一定影响。有学者<sup>[11]</sup>依据实际地形建立计算模型, 但并未研究地形对污染物窜流造成的影响。

现实中的地形非常复杂, 为了分析地形对连续隧道洞口间污染物窜流的影响, 本文将地形分为山谷以及山坡两个因素并作一定简化, 参考某连续隧道建立模型, 采用 STAR CCM+ 软件进行数值模拟。

## 1 数值计算模型

### 1.1 含有山谷的模型

本文将隧道做一定简化, 隧道断面矩形和半圆组成, 如图 1 所示, 矩形尺寸为 12m×1.4m, 半圆的半径为 6m。

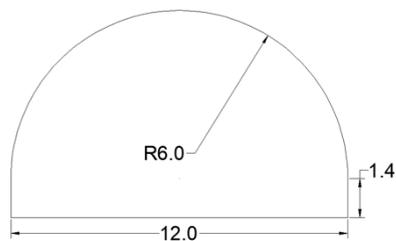


图 1 隧道截面

Fig.1 Tunnel section

建模时将山谷简化为洞口下的矩形空间, 设置

洞口纵向间距 150m, 隧道长度 120m, 计算域取洞口两侧和上方 60m, 以及洞口下方山谷部分, 设置山谷深 10m, 桥厚 0.5m, 建立的三维模型如图 2 所示。

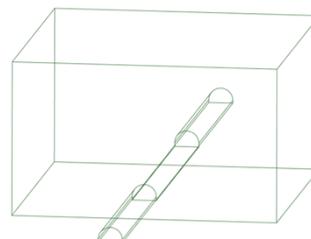


图 2 含有 10m 深山谷的连续隧道模型

Fig.2 Model of continuous tunnels with 10m deep valleys

### 1.2 含有山坡的模型

大部分隧道洞口面积相对于山体表面是很小的, 在洞口附近将山坡简化为平壁不会引起很大误差, 但是山坡具有一定坡角, 简单的将其考虑为垂直面可能引起一定误差。本研究设置 90°、75°、60°、45° 和 30° 这 5 种角度研究山坡角度对污染物窜流的影响。纵向间距 100m 且 60° 坡角山坡的连续隧道模型垂直于隧道方向视图如图 3 所示。



图 3 含有 60° 坡角山坡的连续隧道模型

Fig.3 Model of continuous tunnels with 60° slopes angle hillside

许多隧道进出口的边、仰坡高陡, 存在落石危害, 此时可采用接长明洞的方式进行预防<sup>[12]</sup>。设置明洞的隧道洞口模型如图 4 所示。图中显示, 设置明洞时, 隧道洞口形状与山坡为 90° 的情形类似。

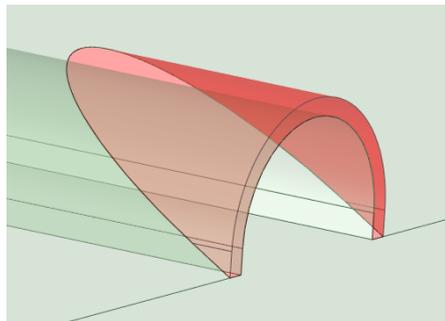


图 4 含有特殊结构的隧道洞口模型

Fig.4 Model of tunnel opening with special structure

### 1.3 基本假设

隧道中气流运动十分复杂，为解决主要问题，本文在进行隧道通风模拟时做如下假设：

(1) 流体是不可压缩的，风流类型属于稳定流，流体按连续介质处理<sup>[7]</sup>。

(2) 采用 CO 的浓度分布来代表污染物的扩散分布<sup>[13]</sup>。隧道上游处流入气体中 CO 浓度设置为 100ppm<sup>[14]</sup>，计算域内除此以外无任何污染源。

(3) 计算域内无热源，不考虑温度的影响，不考虑自然风的影响。

## 2 计算结果分析

### 2.1 山谷对污染物窜流的影响

根据文献<sup>[7]</sup>对窜流比  $\lambda$  的定义式，并考虑到上下游隧道断面面积一样，可以推得：

$$\lambda = \frac{c_{下}v_{下}}{c_{上}v_{上}} \quad (1)$$

式中， $c$  和  $v$  分别表示污染物 CO 浓度以及隧道风速，下标分别表示上游或下游隧道。

设置上下游隧道风速均为 5m/s，改变纵向间距，计算得到各工况中窜流比，如图 5 所示。在纵向间距较小时，山谷对窜流影响不大；而间距达到 250m，存在山谷时窜流比相对减少了 13.30%，山谷对窜流有比较明显的影响。

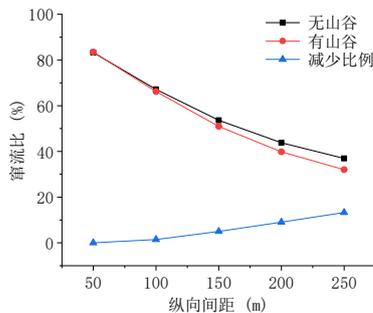
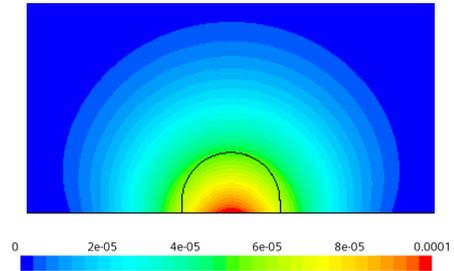


图 5 不同纵向间距下窜流比计算结果

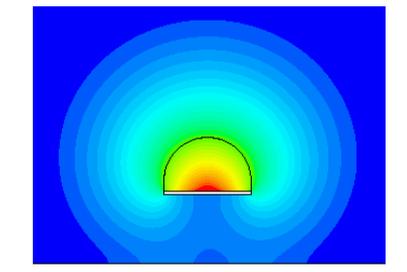
Fig.5 Results of crossflow ratio in different longitudinal spacings

选取纵向间距 200m 的模型，截取两个工况中两洞口中间处 CO 浓度云图如图 6 所示。在气流上部及中心，浓度分布两个工况差异不大，而存在山谷时原本靠近地面的污染气体则有部分向山谷扩散。说明存在山谷时污染气体有更大的扩散空间，但由于桥面的阻隔，只有气体扩散范围超过桥面后

才能向山谷扩散，所以在间距较小的模型中是否存在山谷对计算结果影响不大。



(a) 无山谷



(b) 有山谷

图 6 CO 浓度云图

Fig.6 CO concentration contours

不考虑自然风和温差影响，污染物窜流比与上下游隧道的风速比值相关<sup>[10]</sup>，设置山谷深度 10m，纵向间距为 200m，改变上下游隧道风速比，计算得到各工况中窜流比，如图 7 所示。在不同隧道风速比下，存在山谷时窜流比都会减少，但减少比例变化不大。

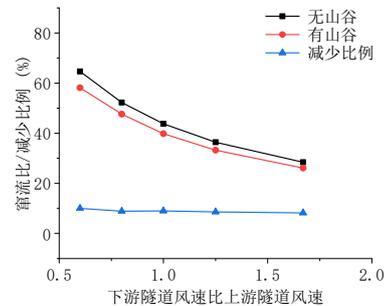


图 7 不同隧道风速比下窜流比计算结果

Fig.7 Results of crossflow ratio in different tunnel wind speed ratio

设置上下游隧道风速均为 5m/s，纵向间距为 200m，改变山谷深度，计算得到各工况中窜流比如图 8 所示。图中显示，窜流比随山谷深度增加而减小，但是变化幅度很小，因为污染气体只有小部

分向山谷扩散, 山谷空间的限制对窜流情况影响不大。实际上山谷普遍较深, 一般不用考虑山谷深度对污染气体扩散的限制。

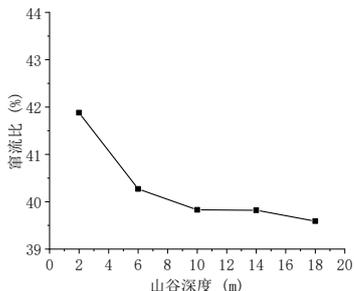


图 8 不同山谷深度下窜流比计算结果

Fig.8 Results of crossflow ratio in different valley depths

### 2.2 山坡对污染物窜流的影响

建立上、下游隧道洞口存在坡角为  $30^\circ$  的山坡模型, 并在对应洞口构建如图 4 的明洞结构, 上下游隧道洞口纵向间距为 50m, 改变上下游隧道风速比, 将窜流比的计算结果与垂直山壁的结果相对, 如图 9 所示。图 9 显示, 在相同隧道风速比的条件下, 当隧道洞口设置明洞时, 山坡对窜流基本没有影响。

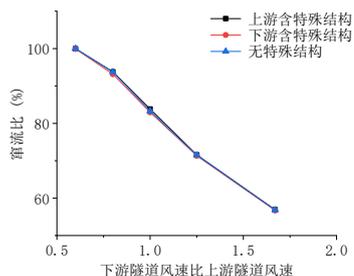


图 9 不同隧道风速比下窜流比计算结果

Fig.9 Results of crossflow ratio in different tunnel wind speed ratios

选取上下游风速比均为 1 的三个工况, 截取 CO 浓度云图如图 10 所示。

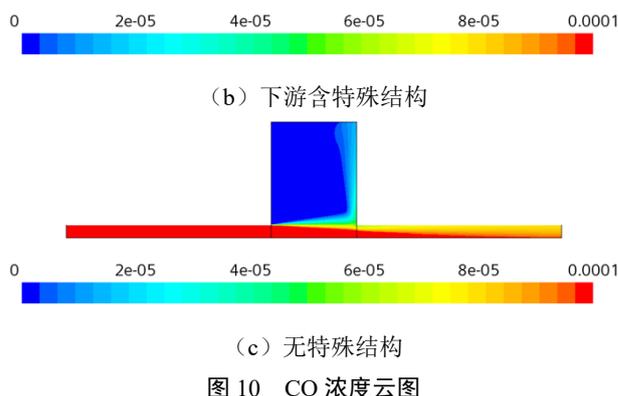
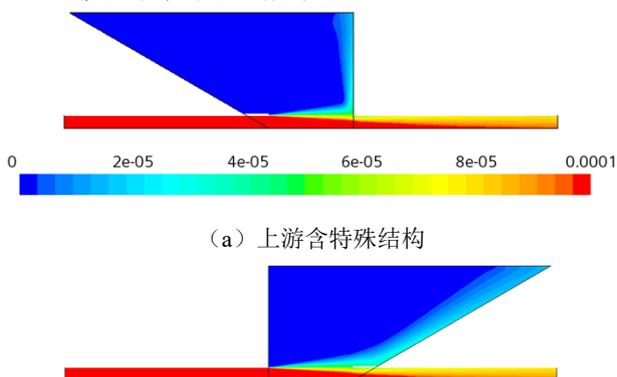


Fig.10 CO concentration contours

根据流体力学理论并结合 CO 浓度云图分析, 污染气体从上游洞口高速喷出后的运动状况, 主要受洞口几何因素影响, 设置明洞结构时, 上游山坡并不会影响洞口几何因素, 所以也不会对窜流造成影响。虽然下游洞口吸入气体会受周围几何因素影响, 但是其吸入洞口周围气体较少, 影响较小, 所以设置明洞的下游山坡对窜流影响也很小。

构建不含明洞的隧道模型, 设置各工况上下游隧道风速均为 5m/s, 并改变山坡坡角, 设置纵向间距为 50m (此处以洞口底部间距计算)。显然, 隧道由于山坡的存在, 上下游隧道洞口顶部的间距大于底部的间距, 因此, 为了更好地与垂直山壁情况进行比较, 本文采用山坡情况下隧道洞口的顶部间距和底部间距, 分别建立了垂直山壁的计算模型。窜流比的比较结果如图 11 所示。图中显示, 存在山坡时的窜流比, 高于顶部间距垂直山壁模型的窜流比, 但低于底部间距垂直山壁模型的窜流比。因此, 对于没有设置明洞的隧道, 山坡对窜流造成的影响可近似考虑为改变纵向间距造成的影响。

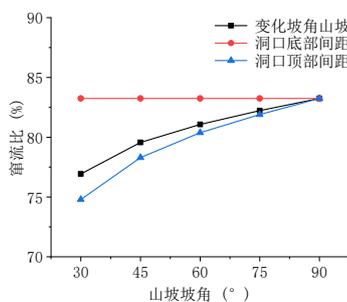


图 11 不同山坡坡角下窜流比计算结果

Fig.11 Results of crossflow ratio in different t different slope angles

### 3 结论

本文采用 CFD 数值模拟方法研究了山谷和山坡等地形因素,对纵向隧道洞口污染物窜流的影响,得到如下结论:

(1) 山谷的存在有利于污染气体扩散,使窜流比减少,其减少比例与纵向间距有关,间距越大,减少比例越大。山谷深度增加,窜流比随之减小,但变化幅度很小。存在山谷时,在不同上下游隧道风速下,窜流比减少比例基本一致。

(2) 当洞口周围存在山坡且设置明洞结构时,上下游山坡均不影响洞口大小形状,对窜流无明显影响。

(3) 洞口周围存在山坡且不设置明洞结构时,洞口形状会造成纵向间距的不一致,此时山坡对污染物窜流造成的影响可以近似考虑为纵向间距变化造成的影响。

#### 参考文献:

- [1] 朱娉婷,邓志辉.公路隧道洞口污染物窜流的对比研究[J].制冷与空调,2016,30(1):109-113.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术研究综述·2015[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.
- [3] Li J S M, Chow W K. Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems[J]. Tunnelling and underground space technology, 2003, 18(5):435-452.
- [4] 张光鹏.公路隧道双向换气式纵向通风研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [5] 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.
- [6] 李飞.近距离公路隧道送排风相互影响机理及其对策研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2005.
- [7] Pai X, Shu-ping J, Zhi L, et al. Theoretical research on crossflow pollution in short distance and continuous road tunnels[C]. 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE, 2012:932-936.
- [8] 彭建康,曾艳华,何川.连续毗邻隧道出口污染物的扩散影响研究[C].2006年公路隧道运营管理与安全国际学术会议,2006.
- [9] 韩星,杨洁,张翥.毗邻隧道上游污染物对下游影响的研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(3):781-787.
- [10] 张连贺.公路隧道洞口污染气体窜流研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [11] 彭康夫.基于污染物窜流影响的特长公路毗邻隧道通风方案优化研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [12] 赵晓勇.运营期间隧道洞口高陡边坡落石处理技术探讨[J].地质灾害与环境保护,2015,26(2):95-99.
- [13] 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):225-228,299.
- [14] JTG D70/2T-02-201,公路隧道通风设计细则[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [8] GB/T 18883-2002,室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [9] GB 3095-2012,环境空气质量标准[S].北京:中国质检出版社,2012.
- [10] Senlin Lu, Dingyu Liu, Wenchao Zhang, et al. Physico-chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> in the microenvironment of Shanghai subway[J]. Atmospheric Research, 2015,153:543-552.
- [11] Park Wha Me, Park Jae Bum, Roh Jaehoon, et al. Levels of formaldehyde and TVOCs and influential factors of 100 underground station environments from 2013 to 2015[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018,24:1030-1042.
- [12] Cheng YH, Li YS. Influences of Traffic Emissions and Meteorological Conditions on Ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Levels at a Highway Toll Station[J]. AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH, 2010,10(5):456-462.
- [13] Querol X, Moreno T, Karanasiou A, et al. Variability of levels and composition of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Barcelona metro system Atmos[J]. Chem. Phys., 2012, 12(11):5055-5076.
- [14] 张敏,何红弟.屏蔽门对地铁站台颗粒物分布的影响研究[J].环境监测管理与技术,2020,32(2):32-36.

(上接第 188 页)

---

[15] Hak Sung Lee, Byung-Wook Kang, Jang-Pyo Cheong, et al. Relationships between indoor and outdoor air quality

during the summer season in Korea[J]. Atmospheric Environment, 1997,31(11):1689-1693.