

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-815-04

山壁倾角对连续隧道群洞口间污染物窜流的影响

唐 莎¹ 韩晓阳¹ 曾仕豪² 袁中原² 雷 波²

(1. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100120

2. 西南交通大学 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。此前研究主要针对纵向窜流和横向窜流单独发生的情况, 并且普遍将山体简化为垂直平面。本研究采用 CFD 数值模拟方法建立连续隧道群模型, 对不同山壁倾角下的污染物窜流情况进行模拟分析。结果表明连续隧道群洞口间污染物窜流存在一种不同于纵向窜流和横向窜流的形式, 并且增大山壁倾角能明显减少窜流量, 当山壁倾角从 0° 增大到 60°, 窜流比从 79.2% 下降到 67.7%。

【关键词】 污染物窜流; 连续隧道群; 山壁倾角; 数值模拟
中图分类号 U459.2 文献标识码 A

The Influence of Mountain Surface Inclination on Polluted Air Interporosity Flow Between Openings of the Continuous Tunnels Group

Tang Sha¹ Han Xiaoyang¹ Zeng Shihao² Yuan Zhongyuan² Lei Bo²

(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 interporosity flow, and reduces ventilation efficiency and increases operating costs. Previous researches individually focused on vertical interporosity flow and horizontal interporosity flow with simplifying the mountain to a vertical plane. CFD numerical simulation is adopted to build the model of continuous tunnels group, and interporosity flow situation with different mountain surface inclinations are analyzed. Results show there is a interporosity flow form different from vertical and horizontal interporosity flow when interporosity flow occurs in continuous tunnels group. And interporosity flow is obviously decreased from 79.22% to 67.71% with the mountain surface inclination increasing from 0° to 60°.

【Keywords】 large space buildings; warm air heating; coupled airflow; 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: 2021-06-15

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, 公路隧道运营的安全性、舒适性和健康性越来越受到行车人员和交通部门的关注。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^[1], 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^[2], 所以目前大部分隧道采用的通风系统均为纵向式^[3]。

公路路段上会出现两座或两座以上间隔距离

较短的隧道，纵向间距较短的被称作毗邻隧道^[4]，横向间距较短的被称作相邻隧道^[5]。由于隧道洞口间距较小，在纵向通风作用下从上游洞口排出的污染空气，未完全稀释又被吸入下游隧道，形成二次污染，直接降低隧道通风效率，增大运营成本^[6]。进入下游的污染物占从上游排出污染物的比例称作窜流比^[7]，多位学者分别针对毗邻隧道和相邻隧道进行数值模拟研究，并拟合出窜流比有关进排风速度以及隧道间距的计算式^[5-7]。彭建康^[8]和张桂莲^[9]等人研究发现自然风向以及风速对窜流现象的影响很大，但是最不利风向在毗邻隧道和相邻隧道中并不相同。之后有学者对同时存在毗邻隧道和相邻隧道的连续隧道群的污染物窜流问题进行研究，研究因素集中在进排风速度、隧道间距以及自然风上^[10,11]。

在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，将洞口处山壁简化为垂直平面，污染空气流动域简化为矩形空间，而实际上山壁都具有一定倾角，其形状对窜流现象有一定影响，尤其对自然风影响较大。彭康夫^[12]建立某隧道群实际地形模型，但并未研究地形造成的影响。

为了分析山体形状对连续隧道群洞口间污染物窜流特性的影响，本文参考某连续隧道群建立模型，改变山壁倾角，采用 Fluent 软件进行数值模拟，并分析不同山壁倾角下污染物窜流的特点以及窜流比随倾角的变化规律。

1 数值计算模型

本文参考某连续隧道群建立模型，隧道截面由一长 12m、宽 1.4m 的矩形和半径 6m 的半圆组成，如图 1 所示。

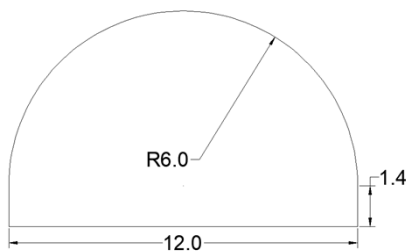


图 1 隧道截面

Fig.1 Tunnel section

洞口横向间距 28m，纵向间距 50m，纵向沿线隧道洞口用桥面连接，两侧及上方各取 5 倍当量直

径长度，下方取 25m 深度表示山谷，隧道外空间为污染空气扩散域，建立的连续隧道群三维模型如图 2 所示。

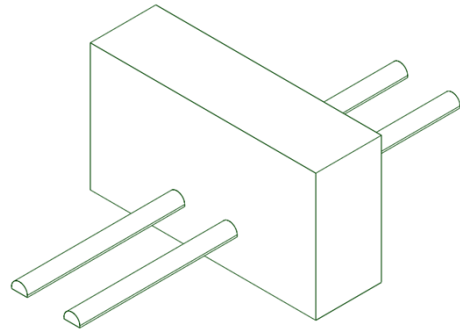


图 2 连续隧道群模型

Fig.2 Model of continuous tunnels group

大部分隧道洞口面积相对于山体表面是很小的，在洞口附近将山壁简化为平壁不会引起很大误差，但是山壁具有一定倾角，且一般不会接近 0°，将其考虑为垂直面可能引起一定误差。本研究设置 5 种角度研究山壁倾角对污染物窜流的影响，5 种模型分别对应 0°、15°、30°、45° 和 60° 的倾角，模型 3 垂直于隧道方向视图如图 3 所示。

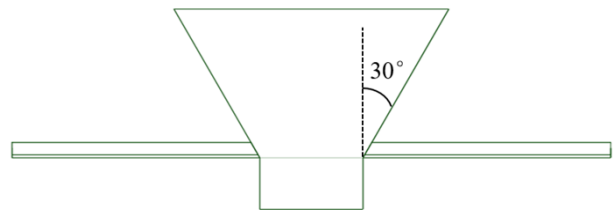


图 3 模型 3

Fig.3 Model 3

采用 Fluent 软件进行计算，开启能量方程以及组分运输方程，湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。山壁表面以及隧道设置为壁面边界，与大气相接触表面设置为压力出口边界，隧道出入口设置为速度入口边界。车辆排放气体中 CO 和 NO₂ 对人体健康影响最大，通常把他们作为首要控制有害气体^[13]，通风设计时将其浓度控制在一定的安全限度内是主要的设计指标之一，对较长的隧道 CO 和 NO₂ 的控制限值分别为 100cm³/m³ 和 1cm³/m³^[14]。本研究中仅考虑 CO 作为污染气体，隧道排出气体中 CO 浓度为 100ppm，隧道进风速度与排风速度均设置为 3m/s。

2 计算结果分析

取距路面高度 1m 截面, 在模型 1 结果中做出 CO 浓度云图如图 4 所示。

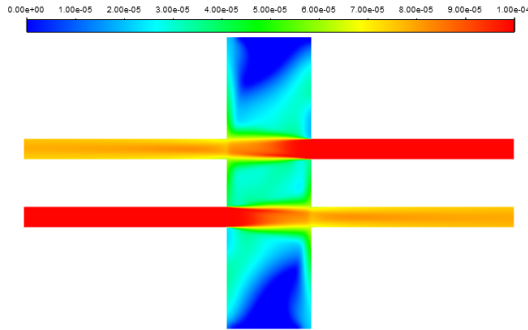


图 4 模型 1 截面 1 CO 浓度云图

Fig.4 CO concentration contours of section 1 in model 1

两条隧道 CO 扩散情况基本一致, 左线与右线隧道进风处 CO 浓度均为 79.2ppm (云图中上方隧道为左线, 下方为右线), 差别很小, 取平均值即一条隧道总的窜流比为 79.2%。在不考虑自然风等情况下, 这是个很高的比例, 有大量污染物被吸入下游隧道, 造成严重二次污染。

根据文献[7]中给出的下列公式:

$$\lambda_{横} = \left[0.022 + 15.5e^{-\left(\frac{D_{横}}{2} - 0.3\right)} \right] \left(\frac{v_{进}}{v_{排}} \right)^{2.1} \quad (1)$$

$$\lambda_{纵} = (97 - 0.388D_{纵}) \left(\frac{v_{进}}{v_{排}} \right)^{0.9} \quad (2)$$

式中, $\lambda_{横}$ 为横向污染物窜流百分比; $\lambda_{纵}$ 为纵向污染物窜流百分比; $D_{横}$ 为隧道横向间距; $D_{纵}$ 为隧道纵向间距; $v_{进}$ 为隧道横向间距; $v_{排}$ 为隧道纵向间距。

计算得到只发生横向窜流时, 窜流比仅为 0.04%; 只发生纵向窜流时, 窜流比为 77.6%, 两者之和小于在连续隧道群中的总窜流比。在连续隧道群中, 纵向窜流与横向窜流相互影响, 情况更加复杂, 虽然原本意义上的横向窜流量很小, 但是存在另一种意义上的“横向”窜流, 以一条线为例做出示意图如图 5 所示。

虽然几乎没有污染物从右线上游隧道流出直接被吸入左线下游隧道, 但是从右线扩散开的污染气体会被卷入左线的污染气体射流中, 从而进入左线下游隧道, 增加总的污染物窜流量, 这种现象在山壁处比较明显。取右线隧道中间截面, 在模型 1 中做出 CO 浓度云图如图 6 所示。除去大部分污染

空气直接发生纵向窜流进入下游隧道外, 还有相当一部分污染气体并未向上扩散到远处, 而是向另一条线方向以及向下扩散, 进入两股污染气体射流中间及山谷区域, 又被气流卷吸进入下游隧道, 发生二次污染。

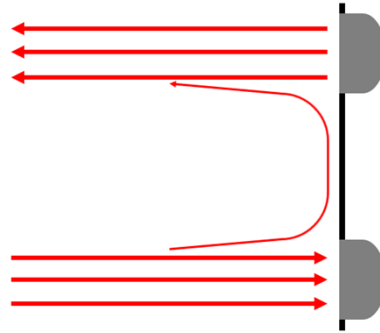


图 5 窜流示意图

Fig.5 Schematic diagram of interporosity flow

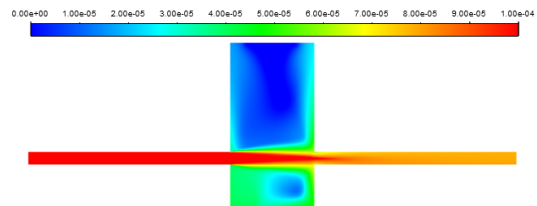


图 6 模型 1 截面 2 CO 浓度云图

Fig.6 CO concentration contours of section 2 in model 1

取右线隧道中间截面, 在模型 2~5 中做出 CO 浓度云图如图 7 所示。

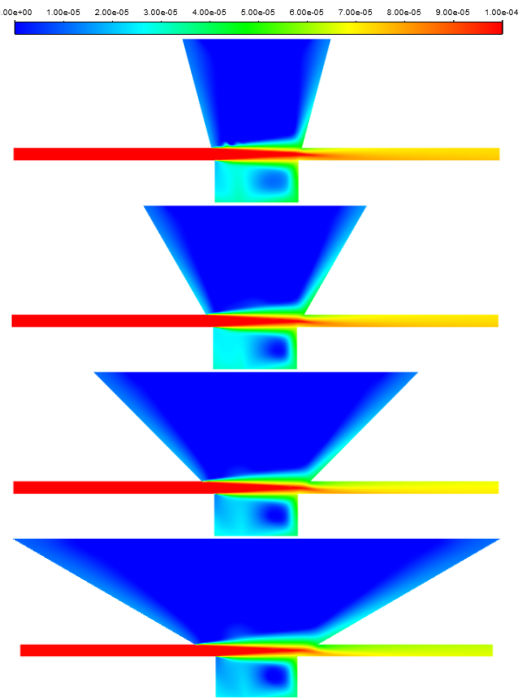


图 7 模型 2~5 截面 2 CO 浓度云图

Fig.7 CO concentration contours of section 2 in model 2-5

山壁倾角增大后,上游排出的污染空气射流顶部会较底部提前扩散,但对射流前面部分流态影响不大。但随着山壁倾角的增大,排出的污染气体射流更容易沿着山壁扩散至远处,减小下游洞口从周围尤其是上方和两侧吸入气体中的 CO 浓度,图中可观察到下游隧道顶部气体中 CO 浓度有明显下降。在山壁倾角较大时上游出口顶部、底部以及山谷的气体中 CO 浓度较小,说明山壁倾角的增大有助于减少污染气体进入两股污染气体射流中间及山谷区域而被卷吸形成二次污染,这一点在距路面高度 1m 的截面中也有所体现,如图 8 所示。

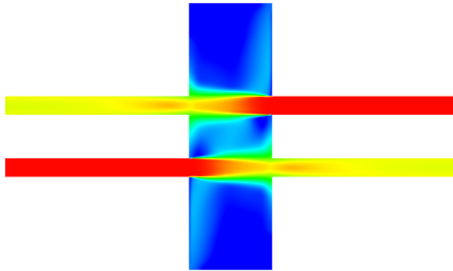


图 8 模型 5 截面 1 CO 浓度云图

Fig.8 CO concentration contours of section 1 in model 5

表 1 不同模型左右线窜流比

Table 1 Interporosity flow ratio of left and right line in different models

模型编号	左线窜流比%	右线窜流比%
模型 1	79.2	79.2
模型 2	75.3	75.4
模型 3	73.2	73.2
模型 4	71.0	71.0
模型 5	67.5	67.9

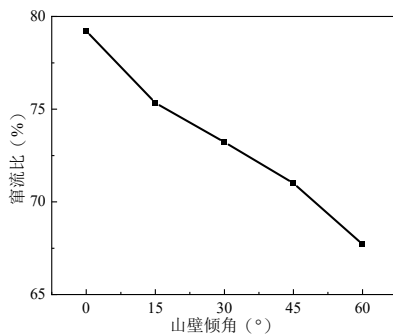


图 9 窜流比与山壁倾角的关系

Fig.9 The relationship between interporosity flow ratio and mountain surface inclination

随着山壁倾角的增大,下游隧道吸入气体中 CO 浓度有比较明显的下降,各模型分别计算出左线右线总窜流比如表 1 所示,左线窜流比从 79.21%降至 67.54%,下降了 14.73%;右线窜流比从 79.22%降至 67.87%,下降了 14.33%。两条线窜流情况差异很小,取左线右线窜流比平均值以及对应山壁倾角,做出折线图如图 9 所示,可以看出窜流比随着山壁倾角的增加表现出明显的下降趋势。

3 结论

目前对连续隧道群污染物窜流问题研究较少,本文采用 CFD 数值模拟方法研究了山壁倾角对污染物窜流的影响,得到如下结论:

(1) 连续隧道群污染物窜流存在一种不同于原本的纵向窜流以及横向窜流的形式,多发生于两横向洞口间靠近山壁区域。在洞口横向间距较大时,横向窜流量较少,但该形式的窜流同样会使一条隧道排出污染物进入相邻隧道下游,增加窜流量。

(2) 较大的山壁倾角更有利于污染气体扩散至远处,有效减少下游洞口吸入气体中污染物浓度。随着山壁倾角从 0° 增加至 60°,污染物窜流比从 79.22%下降至 67.71%,降低了 14.53%。

参考文献:

- [1] 《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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 温玉辉,谢永利,李宁军.特长公路隧道相邻洞口流态三维 CFD 仿真分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2006,25(5):32-36.
- [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] 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.

