

特长隧道群污染物窜流规律及新型通风方式研究

郑晓卿 田 伟 陈礼明

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘 要] 特长隧道群洞口多位于峡谷中,上游隧道污染物易扩散至下游隧道造成二次污染并大大增加了下游隧道的通风负荷。为了掌握特长隧道群毗邻隧道的污染物窜流问题及影响,以浙江省景文高速公路工程叶麻尖特长隧道群为依托,建立了流体力学分析模型,以 CO 为示踪污染物,分析了隧道洞内外温差、峡谷风速、进出口风速比等因素对窜流比的影响。分析表明:隧道出口污染气流与环境温差越大,或者峡谷风风速越大,或者隧道进出口风速比越小,则窜流比越低;在不利工况下,叶麻尖隧道左、右线隧道的上下游窜流比分别约为 67% 和 73%。最后,针对叶麻尖特长隧道群提出了竖井送排风+互补风道分流+射流风机通风方案的新型绿色节能通风方案。

[关键词] 特长隧道群; 污染物窜流; 数值模拟; 运营通风

0 引言

近年来,随着公路建设的发展,特长隧道及特长隧道群的建设也日益增多。对于特长隧道群,运营通风是其面临的最大难题之一。特长隧道群洞口多位于狭窄的峡谷间,上游隧道的污染物极易扩散到下游隧道造成二次污染^[1],大大增加了下游隧道的通风负荷,造成隧道通风系统规模庞大,运营能耗高。因此,通过研究特长隧道群污染物窜流规律,并从改善污染物窜流影响出发,提出新型节能通风模式,对于特长隧道群通风节能设计具有重要意义。

国内外对毗邻隧道污染物扩散及窜流开展了一系列研究。1975 年,日本建设省土木研究所通过现场测试方法研究了隧道口范围的污染物的扩散规律^[2]。2008 年,杨玉蓉采用现场测试方法研究了北碚特长隧道洞口 CO 污染物扩散状况^[3]。除现场实测方法外,黄哲学、杨玉蓉、张脩、韩星^{[4]~[6]}等人采用数值模拟的方法对毗邻隧道污染物窜流规律进行了研究,并提出一系列措施改善污染物窜流影响;徐湃^[7]等结合数值模拟和模型试验,研究了不同间距和不同风速下毗邻隧道污染物窜流规律;朱聘婷^[8]通

过数值模拟研究了不同通风风速、隧道间距、环境风等因素下毗邻隧道间污染物窜流规律。在隧道污染物窜流的研究上,目前针对特长隧道群的研究较少,且对于洞口地形和峡谷风等因素的影响考虑较少。

本文拟以浙江省景文高速公路叶麻尖隧道群为依托,借助 Fluent 流体力学计算软件,对隧道群近接段地形建立空气流动区域模型,开展隧道洞内外温差,峡谷风以及不同进出口风速组合工况下的通风模拟,得到特长隧道群污染物窜流规律,并提出一种改善污染物窜流的新型特长隧道群通风模式。

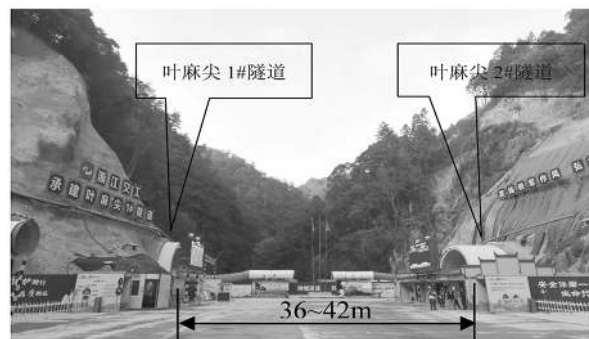


图1 叶麻尖隧道群洞口近接区域

收稿日期: 2020-09-30

作者简介: 郑晓卿 (1991-), 男, 工程师, 主要从事公路隧道设计及科研研究。

1 工程背景

浙江省景文高速公路叶麻尖隧道群总长 10.1km, 是浙江省内最长的特长隧道群, 由叶麻尖 1# (6.06km) 和叶麻尖 2# (4.08km) 两个特长隧道组成, 为分离式隧道, 左右线横向间距约 30m, 纵向间距仅为 42m 和 36m (图 1)。隧道纵坡及需风量情况如表 1 所示。

表 1 叶麻尖隧道纵坡及需风量一览表

隧道	左右线	纵坡	需风量 (m^3/s)		
			工况	2032 年	2042 年
叶麻尖 1# 隧道	左线	-0.66%/6055m	稀释 CO	78.16	94.5
			稀释烟尘	146.36	176.96
			换气	316.83	316.83
	右线	0.75%/6070m	稀释 CO	78.35	94.74
			稀释烟尘	344.12	416.06
			换气	317.61	317.61
叶麻尖 2# 隧道	左线	-0.66%/38m 1.843%/4080m	稀释 CO	61.89	74.83
			稀释烟尘	359.55	434.71
			换气	215.47	215.47
	右线	0.75%/25m -1.85%/4095m	稀释 CO	53.06	64.15
			稀释烟尘	61.37	74.2
			换气	215.58	215.58

2 特长隧道群污染物窜流数值模拟

2.1 几何模型

对于特长隧道群污染物窜流的模拟, 仅需取隧道群近接段建立隧道及空气域模型, 研究近接洞口间空气域中的窜流扩散规律。模型沿线路方向长 260m, 垂直线路方向宽 180m。采用非均匀网格形式, 分区选取 Tet/Hybrid 网格进行网格自动划分。模型及网格如图 2 所示。

模型中叶麻尖 1、2 号隧道的进、出口面为速度入口, 速度大小由运营通风风量计算来控制确定, 左线 2#隧道出口风速 6.92m/s, 1#隧道入口风速 5.03m/s, 右线 2#隧道进口风速 6.63m/s, 1#隧道出口风速 3.43m/s; 考虑无自然风时空气域边界为压力出口边界, 考虑峡谷风时, 将峡谷不同侧空气域边界设为速度入口, 其它空气域边界设为压力出口, 环境温度取为 288K。隧道壁面、路面和地形边界类型均为固壁边界 (Wall)。

2.2 隧道群 CO 窜流规律分析

模拟中采用 CO 作为示踪气体成分, 并采用

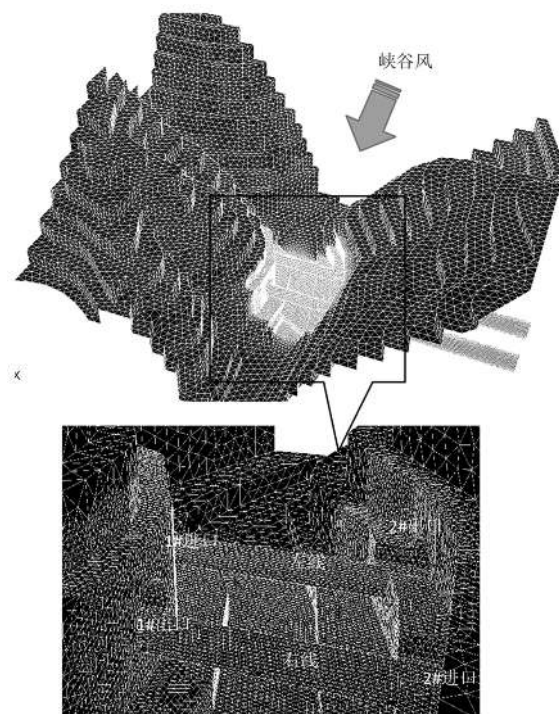


图 2 模型壁面网格划分图

窜流比来表达隧道群污染物的窜流。所谓窜流比是指窜流进下游隧道的 CO 体积流量占上游隧道出口 CO 体流量的百分比。

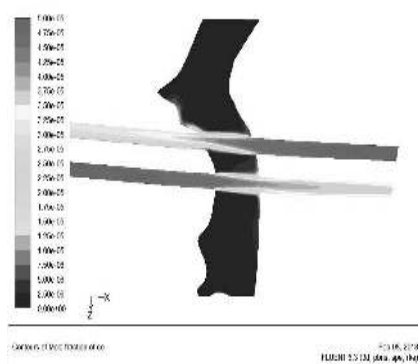
2.2.1 洞内外温差对窜流的影响分析

洞外大气环境与上游隧道出口风流的温度差影响污染物窜流, 温差为正表示洞外温度高, 温差为负表示洞内温度高。图 3 为峡谷风速为零时仅受洞内外温差影响作用的 CO 浓度分布云图, 图 4 为模拟得到窜流比与洞内外温差的关系。

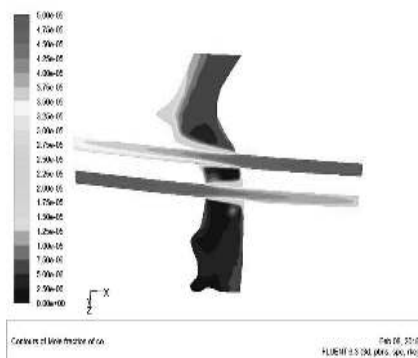
从图 3、图 4 可见, 隧道群近接区域环境空气与上游隧道出口风流存在温度差, 导致上游隧道出口气流密度的差异, 进而影响污染物的扩散。当温差为 0 时, CO 窜流比最大, 当温差的绝对值增大时, CO 窜流比降低, 且同一温差绝对值时, 负温差下窜流比较小。

2.2.2 峡谷风对窜流的影响分析

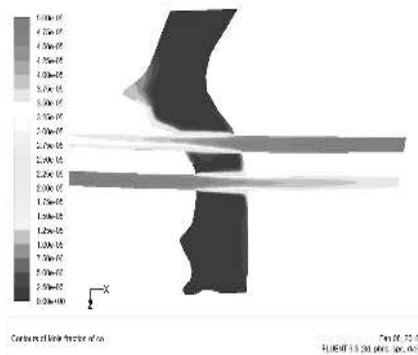
特长隧道群近接区峡谷风的大小和方向也会影响污染物窜流, 考虑不利情况即洞内外等温条件下, 模拟不同风速和方向峡谷风工况下的 CO 窜流, 得到隧道 3m 高处平面的 CO 分布云图 (图 5) 以及窜流比与峡谷风的关系图 (图 6)。



(a) 温差为-3℃



(b) 温差为0℃



(c) 温差为3℃

图3 洞内外温差影响下的CO分布云图

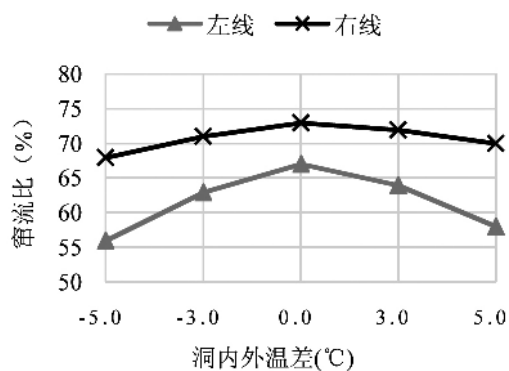
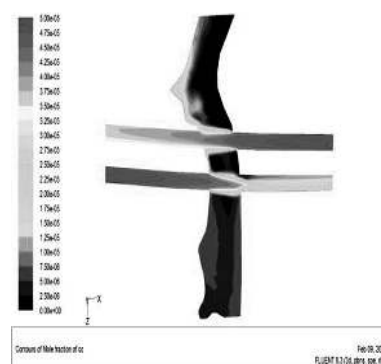
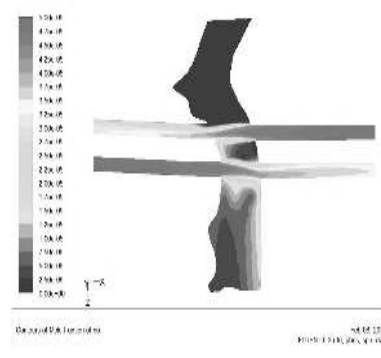


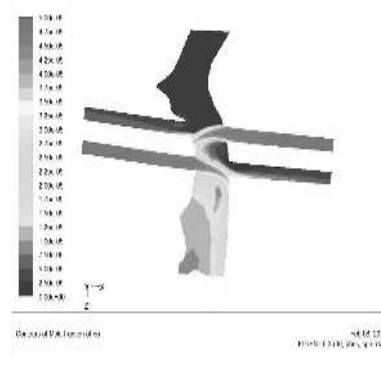
图4 窜流比随洞内外温差变化曲线图



(a) 峡谷风速为0m/s



(b) 峡谷风速为1m/s



(c) 峡谷风速为2m/s

图5 不同峡谷风工况CO分布云图

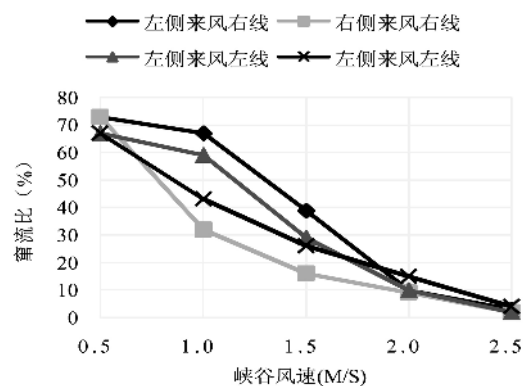


图6 窜流比随峡谷风速变化曲线图

从图5、图6可见,峡谷风速为零时,隧道群CO窜流比最大,左线为67%,右线为73%。CO窜流比随着峡谷风速的增大而降低。峡谷风越大,降低得越明显,风速大于2.5m/s时,窜流比降低至极低值。

2.2.3 不同进出口风速工况的模拟分析

取不利工况,在隧道内外温差为零、峡谷风速为零的条件下,调整上游隧道出口的风速分别为2m/s和4m/s,并逐渐增加下游隧道进口风速,模拟不同风速比工况下下游隧道入口CO窜流情况,结果如下表2和图7所示。

表2 不同进出口风速下的CO窜流比结果

上游出口风速 (m/s)	下游右线 进口风速 (m/s)	风速比	窜流比 (%)
2	1	0.5	47.2
	2	1.0	80.5
	3	1.5	96.8
	4	2.0	98.5
	5	2.5	99.5
4	2	0.5	46.7
	4	1.0	80.2
	6	1.5	96.9
	8	2.0	99.1
	10	2.5	100.0

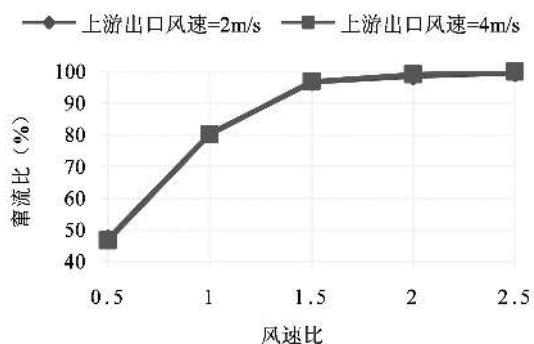


图7 窜流比随峡谷风速变化曲线图

3 考虑污染物窜流影响的通风方案设计

根据上述研究结果,叶麻尖毗邻隧道间污染物窜流比较大,为提高通风效率,需从改善污染物窜流的角度出发进行叶麻尖特长隧道群营运通风方案设计。本项目采用竖井送排风+互补风道分流+射流风机通风方案(图8)。

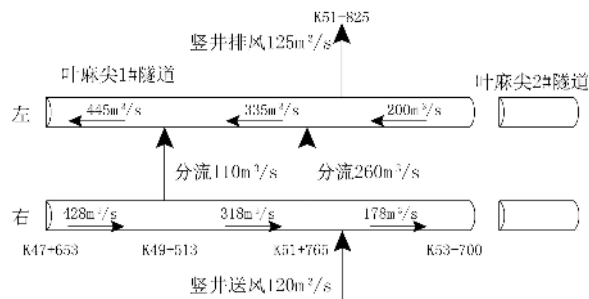


图8 叶麻尖隧道系统风流组织图

该通风方案利用叶麻尖1#隧道竖井分别排出左线隧道入口段污风以降低2#隧道窜流进入1#隧道的污染物浓度;同时,利用互补风道将右线隧道入口至竖井段污风排入左线隧道,起到污染物浓度分流的效果,并利用竖井向右线隧道送入新风,进一步降低右线隧道出口的浓度,缓解污染物窜流进入右线2#隧道的问题。火灾时,竖井兼顾两线隧道的排烟。

该方案对左右线1#、2#隧道的窜流影响均改善良好。1#左线隧道为行车下坡隧道,受窜流影响,入口风流初始污染物浓度高,从洞口流入风量越多,其污染物量也越多,导致隧道内风量过大。通过降低1#左线隧道入口风速,并从隧道入口1.8km处竖井排出部分污染空气进一步降低隧道流向下流的污染物浓度,并接纳1#右线隧道两次输入的污染空气,从而实现1#左线隧道污染物浓度满足规范要求的空气质量标准。1#右线隧道为行车上坡隧道,通过两次通过横向风道排出污染空气至左线隧道和竖井送风,大幅降低了1#右线隧道的出口风速和污染物浓度,有效降低了2#右线隧道入口的窜流污染物浓度,实现了隧道的节能运营。

4 结语

综上所述,当特长隧道群上下游隧道洞口距离近时,污染空气窜流比较大,隧道群通风应充分考虑窜流的影响并采取相应的措施。通过研究获得了叶麻尖隧道群污染物窜流影响规律及针对性技术措施:

(1) 与隧道内外温差大小有关。上游隧道出口污染气流与环境温差越大,下游隧道进口处CO窜流程度越低;但当出口(下转第44页)

十字沸石质量比达到了 35%，温岭海底砂则为 13%。对舟山海滩砂进行了淡化处理后，砂样结果中显示钙十字沸石占比为 28%。对比表明，即使是足够细致的淡化，也无法去除海砂中的钙十字沸石成分。因此，钙十字沸石可以作为特征矿物，用以区分海砂与河砂。

4 结论

(1) 水浴加热可以在海砂浸泡初期加速氯离子溶解的速度，提高海砂氯离子含量数据的准确性；

(2) 浸泡时间的延长，可以给予海砂内部的氯离子足够的时间从内部向外部水溶液扩散；

(3) 海砂、淡化海砂的氯离子含量特征曲线，存在先增加、后稳定、再增加的现象，而河砂的氯离子含量特征曲线则相对平稳，可运用氯离子含量特征曲线区分海砂与河砂；

(4) 组分分析的结果表明，钙十字沸石作为海洋自生矿物，且淡化处理无法消除海砂内

的钙十字沸石，因此可以作为特征矿物用于分辨海砂与河砂。

参考文献

- [1] 史美鹏, 卢福海. 淡化海砂在高性能混凝土中的应用研究 [J]. 混凝土, 2004 (04): 63-66.
- [2] 上海石料行业协会砂石分会. 河砂紧缺、海砂流入, 上海要求企业加强氯离子含量检测 [J]. 商品混凝土, 2018 (8): 20.
- [3] 郭元强. 不同参照标准对海砂氯离子含量测试结果的影响 [J]. 新型建筑材料, 2019 (1): 50-52.
- [4] 农业大词典编辑委员会. 农业大词典 [W]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [5] 朱而勤. 现代海洋自生矿物 [J]. 海洋科技资料, 1981 (04): 46-54.
- [6] 彭汉昌, 刘正坤. 深海沉积物中的钙十字沸石 [J]. 海洋学报, 1992, 14 (6): 68-73.
- [7] 赵其渊, 张建华. 介绍海洋自生矿物钙十字沸石 [J]. 海洋科学, 1979, 3 (1): 34-36.

(上接第 22 页) 速度较高且间距较小时, 影响程度不显著。

(2) 与峡谷风大小与方向有关, 且影响显著。在外界无风情况下, 窜流比最高; 峡谷风速越大, 下游隧道进口处 CO 窜流浓度降低得越快。

(3) 窜流比与上下游隧道进出口风速大小无关, 与风速比有关, 随风速比的不断增大, 窜流比逐渐增大至 100%。

(4) 当出口气流与环境温差为 0℃、外界无自然风时, 窜流比最大, 隧道群下游隧道入口的污染物 CO 的初始浓度最高, 为通风设计最不利工况。模拟得出最不利工况下, 叶麻尖隧道左线 CO 窜流比约为 67%, 右线 CO 窜流比约为 73%, 与文献 (2) 中的结论吻合。

(5) 最后提出了一种新型绿色节能的竖井送排风+互补风道分流+射流风机通风方案, 极大缓解了毗邻隧道群污染物窜流的问题。

参考文献

- [1] 陈达章. 公路隧道群污染物窜流扩散机理与通风控制方法研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13 (3): 266-269.
- [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] 杨玉容, 何川, 曾艳华. 特长公路隧道出口废气浓度扩散现场实测研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4 (2): 392-396.
- [4] 黄哲学, 曾兰舒, 姚虎. 近距离公路隧道污染空气窜流数值模拟分析 [J]. 西部交通科技, 2012 (3): 33-37.
- [5] 张翥, 杨洁, 韩星. 白家山毗邻隧道间二次污染的数值模拟研究 [J]. 公路, 2014, 59 (11): 221-226.
- [6] 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 (03): 781-787.
- [7] 徐湃, 蒋树屏, 张连贺, 陈建忠. 短距离连续公路隧道窜流污染研究 [J]. 公路, 2014, 59 (1): 223-227.
- [8] 朱婷婷. 双洞毗邻隧道洞口污染物窜流的数值模拟研究 [D]. 西南交通大学, 2016.