

隧道施工期间不同通风方式的对比研究

岳昆¹,包小华^{2,3},敖翔¹,刘宽⁴,吴涵^{2*},李涛⁴,沈俊²

(1.广东长正建设有限公司,广东 珠海 519000;2.深圳大学 交通与土木工程学院,广东 深圳 518061;
3.深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室,广东 深圳 518061;4.上海隧道工程有限公司,上海市 200032)

摘要:随着隧道施工技术水平的不断提升,隧道掘进的速度和里程快速增长,其中隧道施工期间的通风问题是影响隧道高效、安全施工的主要问题之一。该文以珠海兴业快线(西线)隧道工程为背景,研究压入式、抽出式和混合式3种通风方式对隧道工作面附近有害气体CO的稀释情况、排出效果和洞内风速的影响。结果表明:混合式通风在CO稀释方面更有优势,而抽出式通风的CO排出效率较高,其工作面附近的风速较小。因此,虽然压入式通风在CO的稀释和排出效率方面稍弱,但在考虑工作面附近保持一定风量的情况下,应该在隧道施工中考虑采用压入式通风方式。

关键词:隧道工程;压入式通风;抽出式通风;混合式通风;CO的稀释效率;CO的排出效率;洞内风速

中图分类号:U455

文献标志码:A

Comparative Study of Different Ventilation Methods during Tunnel Construction

YUE Kun¹, BAO Xiaohua^{2,3}, AO Xiang¹, LIU Kuan⁴, WU Han^{2*}, LI Tao⁴, SHEN Jun²

(1.Guangdong Changzheng Construction Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518061, China; 3.Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures (Shenzhen University), Ministry of Education, Shenzhen, Guangdong 518061, China; 4.Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The continuous improvement of tunnel construction technology brings a rapid increase in the speed and mileage of tunnel excavation, during which ventilation is a main problem affecting construction efficiency and safety. Taking the Zhuhai Xingye Express (West Line) tunnel project as an example, this paper studied the influences of forced ventilation, exhaust ventilation, and hybrid ventilation on the dilution and discharge of harmful gas CO near the tunnel face and the wind speed in the tunnel. The results show that hybrid ventilation performs better in CO dilution, while exhaust ventilation has higher CO emission efficiency with a lower wind speed near the working face. Therefore, although forced ventilation is slightly weaker in terms of CO dilution and discharge efficiency, it is still demanded in tunnel construction when maintaining a certain air volume near the working face is considered.

Keywords: tunnel engineering; forced ventilation; exhaust ventilation; hybrid ventilation; CO dilution efficiency; CO discharge efficiency; wind speed in the tunnel

0 引言

随着中国综合实力的不断提升,隧道建设的技

术正在飞速发展^[1-3]。在如今的隧道施工建设中,为了缩小路线长度以及缩短运输时间,隧道掘进的长度不断增加,长距离隧道施工已经成为目前常见的道路建设工程之一^[4-6]。然而,长距离隧道的建设往

收稿日期:2024-09-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFC1511104);国家自然科学基金资助项目(编号:52022060);深圳市科技创新计划项目(编号:JCYJ20190808112203700)

作者简介:岳昆,男,大学本科,工程师.E-mail:2987927698@qq.com

*通信作者:吴涵,女,硕士研究生.E-mail:1195190141@qq.com

往伴随着施工期间的通风问题^[7-9],它是影响隧道安全施工以及高效率建设的关键因素。

隧道的通风方式按照风的动力来源可以分为自然通风和机械通风。自然通风主要是依靠隧道进风口和出风口之间的温差和气压差产生的气流来实现隧道通风。这种通风方式不需要使用风机设备,排除有害气体的速度较慢,不适合应用在长隧道施工中。另外,机械通风可分为压入式、抽出式和抽-压混合式(简称混合式)^[10]等。不同的通风方式会对隧道施工的安全和效率有不同的影响^[11-12]。压入式通风(图1)的工作原理是将新鲜空气经过通风机压入隧道施工的工作面,使得工作面附近的有害气体向隧道洞口排出。

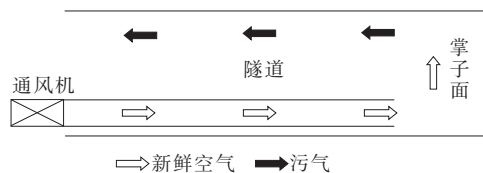


图1 压入式通风工作原理

Figure 1 Working principle of forced ventilation

抽出式通风(图2)的工作原理是将工作面附近的有害气体经过通风管排出洞外,而新鲜空气由隧道洞口自由流入。

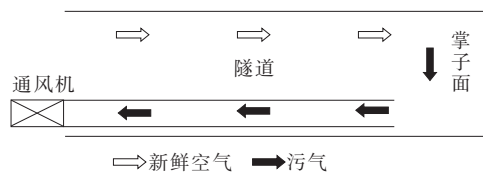


图2 抽出式通风工作原理

Figure 2 Working principle of exhaust ventilation

混合式通风(前压后抽式,图3)以抽出式通风为主,在靠近工作面设立压入式通风。

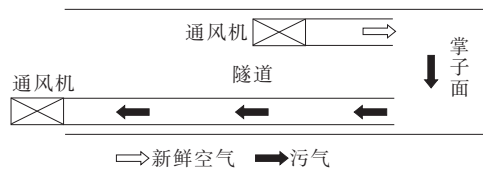


图3 混合式通风工作原理示意图

Figure 3 Working principle of hybrid ventilation

由于在隧道掘进施工时期,爆破会产生有害气体(如CO等)和粉尘等污染物质^[13-17],采用不同的通风方式将会对其稀释效果和排出效率有不同的影响。

本文以珠海兴业快线西线的隧道施工为背景,使用数值分析方法研究不同的通风方式对CO排出、稀释效率和隧道中不同位置风速的影响,提出较合理的隧道施工通风方式,为隧道施工通风方案的优化提供参考依据。

1 工程概况

兴业快线(北段)是珠海市衔接“粤港澳大湾区”的重要组成部分,全长约17.1 km,主要为香洲中心城区至高新区的组团加强交通联系,缓解港湾大道的交通压力。其中,隧道西线段长约5 761 m,由凤凰山合并段北端出入口至凤凰山隧道西线出入口,为单洞两车道,双洞四车道。隧道洞口总高度约为6.818 m,总宽度约为9.734 m,采用矿山法施工。

施工过程中工作面附近容易产生CO、CH₄等有害气体。原作业过程采用压入式通风与排风相结合的通风方式(图4)。考虑到爆破的影响,一般将通风口与隧道工作面的距离保持为20~30 m,但为了降温和其他因素,在工作面前方安装一些移动排风扇。然而,该工程在施工阶段仍然面临由工作面附近废气排散效果不良等问题。



图4 施工作业现场

Figure 4 Construction site

由于通风竖井是运维期间使用,施工期间无作业。因此,本文主要研究压入式、抽出式和混合式通风方式对通风效果的影响。

2 模型建立

2.1 假设条件

结合珠海兴业快线西线隧道施工的工程实例,本文对隧道内的气体做以下假设:

(1) 流体具有不可压缩性,一般情况下的真实流体具有黏滞性,但是对于隧道内的气流,气体体积的变化对计算结果的精度要求影响较小,几乎可以忽略。

(2) 假设隧道中的温度恒定,不考虑气体运动产

生的热效应,忽略气体扩散时产生的化学反应和能量损失。

(3) 除了通风口以及隧道出口,隧道内部不存在其他通风口,且施工期间不考虑通风竖井的作用。

2.2 研究内容

本文研究采用不同的通风方式对隧道内部有害气体的排散程度以及隧道内风速分布的影响。因此,建立压入式、抽出式以及混合式的通风模型进行计算分析。其中,污染气体具体考虑为CO的体积分数。根据《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)^[18]的要求,隧道施工工作场所的CO平均容许接触质量浓度为 20 mg/m^3 ,短时间容许接触质量浓度为 30 mg/m^3 。以CO的质量浓度量程换算为体积分数可知:隧道施工工作场所的CO平均容许接触体积分数为 17.4×10^{-6} ,短间接接触容许体积分数为 24×10^{-6} 。而根据珠海兴业快线西线的隧道施工气体检测记录,CO的平均检测值约为 11×10^{-6} ,其中最高检测结果达到 15×10^{-6} 左右。于是在保证正常通风的情况下,加快有害物质的稀释和排出是相当重要的环节。

另外,由于隧道长度较大,若按照实际长度进行建模,则会导致计算量极大。考虑在进行隧道施工通风方案设计时,重点在于为工作面提供良好的工作环境^[19]。于是本研究将关注距离隧道施工工作面35 m之内的通风效果。

2.3 不同通风方式的模型建立

建立不同通风方式通风模型如图5、6所示。由于研究关注隧道施工工作面附近的通风情况,送风/排风管管口离隧道工作面的距离选取为30 m,其中压入式和排出式的几何模型相同;混合式模型的隧道拱腰处两边分别放置送风管和排风管,送风管的管口离隧道工作面的距离为17 m,排风管的管口离隧道工作面的距离为3 m。在几何坐标上, x 轴指隧道洞口宽度, y 轴指隧道洞口高度, z 轴指从隧道截面到工作面的纵向距离。根据工程概况,隧道横截面的总高度为6.4 m,总宽度为8.9 m,风管直径为1.5 m,模拟的总时间为80 s。数值计算涉及的边界条件如下:

(1) 该工程施工期间选用功率220 kW的两级轴流风机,通风量可达 $2\,400 \text{ m}^3/\text{min}$,可满足施工通风要求。因此,设置风风管口的风速大小为 22 m/s ,风向垂直于风管横截面。

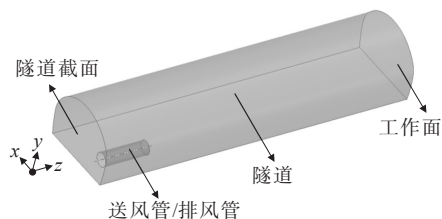


图5 压入式或抽出式的通风模型

Figure 5 Forced or exhaust ventilation model

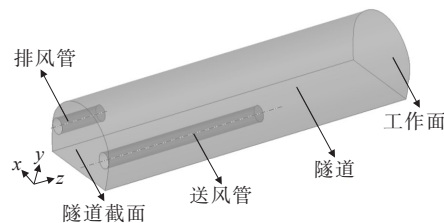


图6 混合式的通风模型

Figure 6 Hybrid ventilation model

(2) 对于压入式通风模型,送风管口设置为速度入口,隧道截面设置为压力出口,其工作压力为0;对于抽出式通风模型,隧道截面设置为工作压力为0的压力入口,排风管口设置为速度出口。

(3) 风管与隧道的壁面边界均为壁面条件,且设置为无滑移条件。

(4) 隧道内的CO初始体积分数设置为 11×10^{-6} ,温度恒定为 27°C 。

在建立模型和划分网格后,采用Ansys的流体动力学计算软件Fluent对其分别进行求解。

3 结果与讨论

3.1 不同通风方式的CO稀释效果

为了研究不同通风模式下工作面附近CO的稀释情况,图7~9分别展示了混合式、压入式和抽出式通风在10 s以及当CO平均体积分数降低到约 3×10^{-6} 时对应时刻的CO体积分数分布云图,选择分析的截面位于离工作面10 m处。如图7所示,在10 s时,进行混合式通风时CO在隧道横向上的分布比较均匀;图8中,由于送风管位于拱腰处,进行压入式通风的CO的分布主要在送风风管口之外的位置;而由于抽出式通风采用负压风管(图9),在排风管附近的位置上风压比排风管内压力大,于是大部分CO分布在排风管口附近的位置。由此可知:对于稀释CO的效果而言,采用混合式的通风方式较有优势,而抽出式的稀释效果较差,压入式的效果介于两者之间。

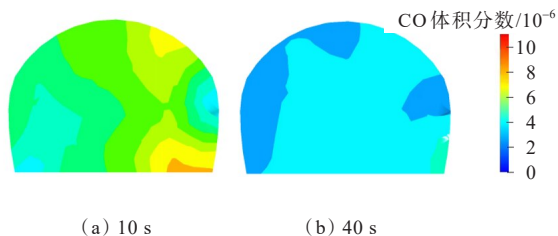


图7 混合式通风模式在10 s和40 s时离工作面10 m处的隧道截面CO体积分数分布云图

Figure 7 CO volume fraction in the cross-section of the tunnel

10 m away from the working face at 10 s and 40 s
under hybrid ventilation

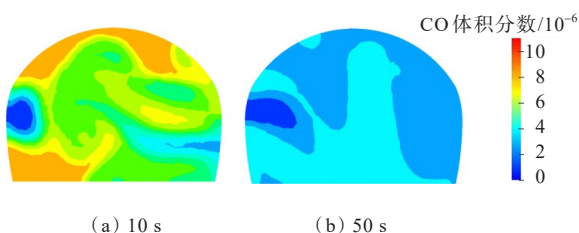


图8 压入式通风模式在10 s和50 s时离工作面10 m处的隧道截面CO体积分数分布云图

Figure 8 CO volume fraction in the cross-section of the tunnel

10 m away from the working face at 10 s and 50 s
under forced ventilation

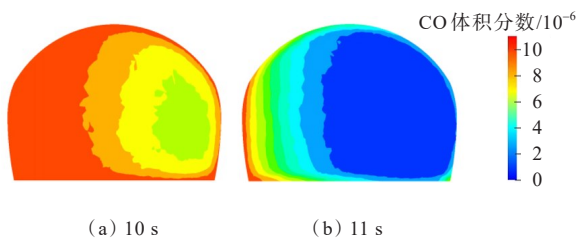


图9 抽出式通风模式在10 s和11 s时离工作面10 m处的隧道截面CO体积分数分布云图

Figure 9 CO volume fraction in the cross-section of the tunnel 10 m away from the working face at 10 s and 11 s under exhaust ventilation

3.2 不同通风方式的CO排出效果

图10~12分别为在15 s、30 s和50 s时每种通风方式沿着隧道纵向的隧道面CO平均体积分数分布图。由图10可知:①抽出式通风在前15 s内的CO排出效率较高,相比另外两种通风模式,其在离工作面约7 m之外的CO平均体积分数很少;②在进行压入式通风时工作面附近的CO平均体积分数低于抽出式,原因主要是采用压入式通风方式,在短时间内风流经过送风管道口释放到掌子面附近,与CO混合

形成涡流。此时,工作面附近的风速大于抽出式,且最大风速约为后者的10倍(图13、14),使工作面附近的CO在风力的作用下往隧道洞口方向移动;③在离工作面约17 m内,进行混合式通风时工作面附近的CO平均体积分数明显比压入式低,这是由于在混合式通风中此段距离主要受送风管道的影响,而相比之下压入式通风的送风管道口与工作面距离较远,在离工作面17 m之外,CO的平均体积分数较高。

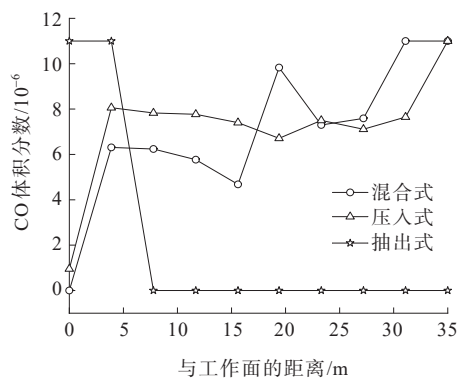


图10 不同通风方式在15 s沿隧道中心纵向截面CO平均体积分数

Figure 10 Average CO volume fraction along the longitudinal cross-section of the tunnel center at 15 s under different ventilation methods

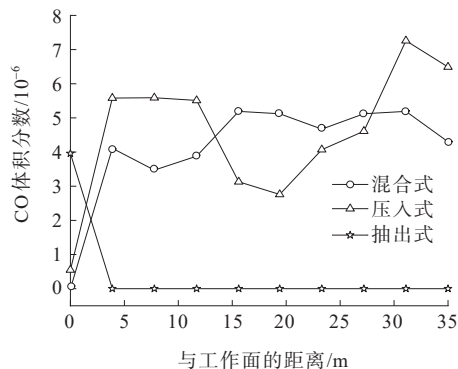


图11 不同通风方式在30 s沿隧道中心纵向截面CO平均体积分数

Figure 11 Average CO volume fraction along the longitudinal cross-section of the tunnel center at 30 s under different ventilation methods

由图11可知:当 $t=30$ s时,抽出式通风的CO排出效果更加明显,此时CO主要集中在离工作面4 m附近,且最高体积分数值约为15 s时的 $1/3$ 。对于混合式通风,在排风管附近CO的最高体积分数值相比15 s时下降了约 5.8×10^6 ,可见排风管的工作效果比

较明显。由图 12 可知:当 $t=50$ s 时,抽出式通风的 CO 排出效果非常明显。值得注意的是,此时 CO 的体积分数并非为 0(图 15),根据《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)^[18]可知该 CO 体积分数的最高值可忽略不计。另外,在离工作面约 35 m 内,混合式与压入式通风的 CO 排出效果并没有很明显的区别。

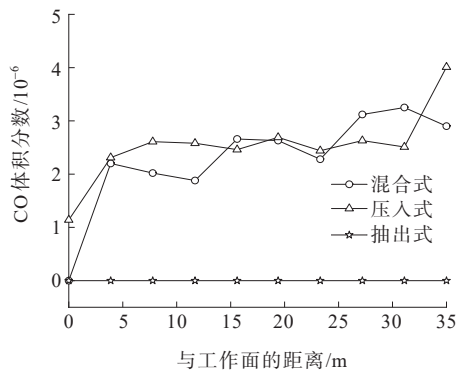


图 12 不同通风方式在 50 s 沿隧道纵向的隧道面 CO 平均体积分数

Figure 12 Average CO volume fraction along the longitudinal cross-section of the tunnel at 50 s under different ventilation methods

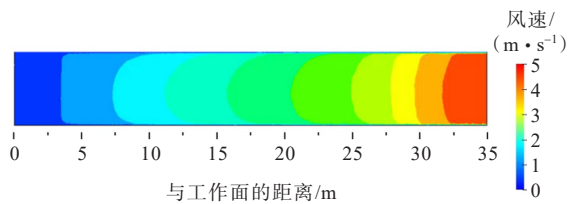


图 13 抽出式通风模式在 15 s 沿隧道中心纵截面的风速分布云图

Figure 13 Wind speed distribution along the longitudinal section of the tunnel center at 15 s under exhaust ventilation

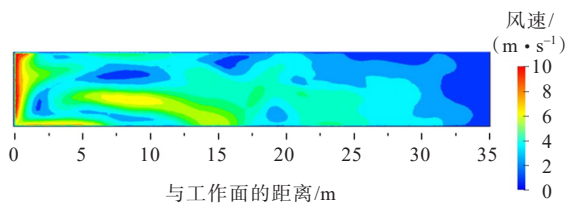


图 14 压入式通风模式在 15 s 沿隧道中心纵截面的风速分布云图

Figure 14 Wind speed distribution along the longitudinal section of the tunnel center at 15 s under forced ventilation

图 16~18 分别展示了不同通风方式在离工作面 0、10 m 和 20 m 处隧道截面的 CO 平均体积分数随时间的变化。

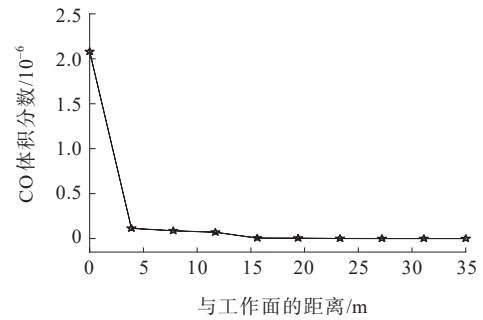


图 15 抽出式通风模式在 50 s 时沿隧道纵向的隧道面 CO 平均体积分数

Figure 15 Average CO volume fraction along the longitudinal cross-section of the tunnel at 50 s under exhaust ventilation

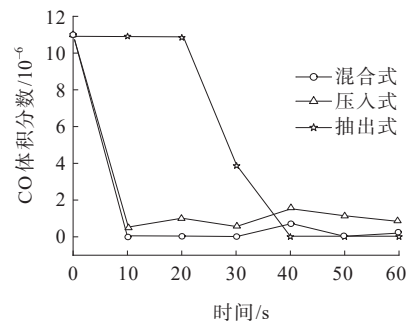


图 16 不同通风方式在离工作面 0 m 处隧道截面的 CO 平均体积分数随时间的变化

Figure 16 Average CO volume fraction varied with time in the tunnel section 0 m away from the working face under different ventilation methods

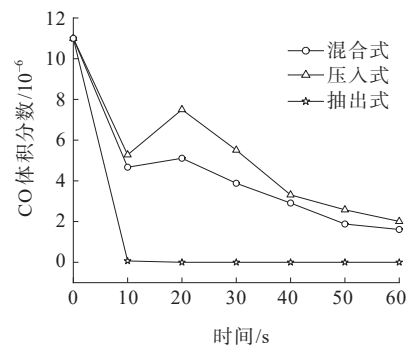


图 17 不同通风方式在离工作面 10 m 处隧道截面的 CO 平均体积分数随时间的变化

Figure 17 Average CO volume fraction varied with time in the tunnel section 10 m away from the working face under different ventilation methods

由图 16 可知:采用抽出式通风时在工作面处的 CO 平均体积分数的 20 s 内没有明显的变化,处于 11×10^{-6} 值,排风管的排气作用在 20 s 之后较为明显。在工作面处,混合式通风的 CO 体积分数在 10 s

后比压入式稍低,但总体上两者的CO排气情况相近,两者相差幅度在 1.5×10^{-6} 以内,没有显著的区别。

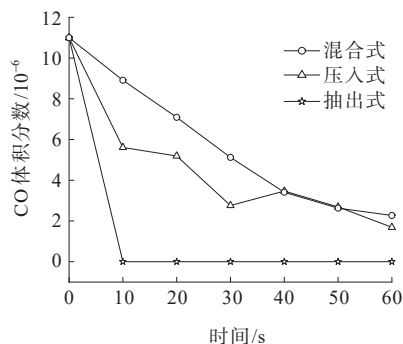


图18 不同通风方式在离工作面20 m处隧道截面的CO平均体积分数随时间的变化

Figure 18 Average CO volume fraction varied with time in the tunnel section 20 m away from the working face under different ventilation methods

由图17可知:采用抽出式通风在距离工作面10 m处CO的浓度在10 s之后明显降低,这是由于距离排风管口较近,排气作用起到了明显的效果。而采用混合式通风在10 s之后的CO体积分数比压入式稍低,两者相差幅度在 3×10^{-6} 以内。

由图18可知:与距离工作面为10 m处相比,在距离工作面20 m处抽出式通风的CO体积分数没有较大的变化,这说明在距离排风管口约20 m的范围内,排风管的作用更加明显。由于混合式通风中排风管和送风管的共同作用,距离工作面20 m处容易产生涡流,不利于CO的排出,此处混合式通风的CO体积分数明显高于压入式通风。

由此可见,对于工作面附近CO的排出效率,采用抽出式比混合、压入通风方式更加明显。

3.3 不同通风方式对风速的影响

当采用抽出式通风时,通过隧道口自然流入隧道内部的风流,到达工作面时风向转变、风速变小,在排风管的作用下,工作面附近风速减少的幅度更大。虽然抽出式的CO排出效率较高,但是在工作面附近的风速较低。图19为1 min时每种通风方式沿着隧道中心纵轴线处的风速分布图。

从图19可知:抽出式在距离工作面的距离越小时,风速较低。而另外两种通风方式的风速分布没有明显的规律,在工作面附近的风速几乎都比抽出式的风速大。

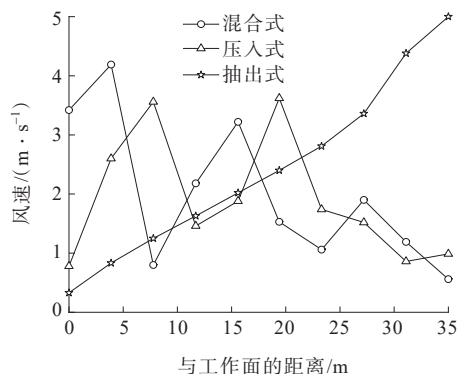


图19 不同通风方式在1 min沿隧道中心纵轴线的风速

Figure 19 Wind speed along the longitudinal axis of the tunnel at 1 min under different ventilation methods

4 结论

本文结合珠海兴业快线西线隧道工程实例,采用数值分析方法,研究压入式、抽出式和混合式3种通风方式对隧道工作面附近的有害气体排出情况以及洞内风速的影响,结果表明:

(1) 对于CO的稀释效果,采用混合式的通风方式较有优势,而抽出式的稀释效果较差,压入式的效果介于两者之间。

(2) 对于CO的排出效率,在通风机作用10 s后,抽出式通风的CO排出效果较明显,且在50 s之后的CO最高体积分数值可忽略不计;另外,混合式比压入式的CO排出效果稍好。

(3) 虽然抽出式的CO排出效率较高,但是在工作面附近的风速较低,相比之下压入式和混合式通风的风速分布没有明显的规律,但在工作面附近的风速几乎比抽出式的风速大。在考虑工作面附近保持一定风量的情况下,应该在隧道施工工程中考虑采用压入式通风方式。

参考文献:

References:

- [1] 王伟.杭州地铁大直径越江隧道总体设计关键技术[J].都市轨道交通,2020,33(6):91-98.
WANG Wei. Overall design and construction of the large-diameter cross-river tunnel of Hangzhou Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 91-98.
- [2] 王烨晟,陈文华,吴勇,等.地铁盾构隧道结构安全评判指标体系及模型建设研究[J].都市轨道交通,2020,33(6):

- 115-122.
- WANG Yesheng, CHEN Wenhua, WU Yong, et al. Establishment of a safety assessment index system and model for shield tunnels[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6):115-122.
- [3] 朱祝龙,田峰,陈洋,等.地铁长大过海区间隧道通风排烟方案[J].都市轨道交通,2017,30(1):94-97,105.
- ZHU Zhulong, TIAN Feng, CHEN Yang, et al. Ventilation and smoke extraction in long subsea subway tunnel[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(1):94-97,105.
- [4] 丁士忠.金寨特长隧道施工技术研究[D].上海:同济大学,2007.
- DING Shizhong. Study on the construction technology of Jinzhai extra large tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [5] 邓温悌,邹桂莲,张园,等.净味沥青隧道施工现场烟气排放及环境影响评估[J].中外公路,2024,44(4):210-216.
- DENG Wenti, ZOU Guilian, ZHANG Yuan, et al. Fume emission and environmental impact assessment in fresh asphalt tunnel construction site [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4):210-216.
- [6] 邓勇.我国长大隧道施工发展趋势探讨[J].铁道建筑技术,2009(11):72-75.
- DENG Yong. Discussion of development trend of long tunnel construction in China[J]. Railway Construction Technology, 2009(11):72-75.
- [7] 王晓亮.长距离输水隧洞TBM施工通风设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- WANG Xiaoliang. Study on ventilation design method for TBM construction of long-distance water conveyance tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 邓敏,闵泉,熊雅,等.基于流体力学相似理论的“互补式+排烟竖井”组合通风模型试验研究[J].中外公路,2021,41(1):190-196.
- DENG Min, MIN Quan, XIONG Ya, et al. Experimental study on combined ventilation of complementary and smoke exhaust shaft based on similarity theory of fluid mechanics[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1):190-196.
- [9] 周健,邹逸伦,徐汪豪,等.米仓山公路隧道出口段施工通风方案设计[J].中外公路,2020,40(3):199-204.
- ZHOU Jian, ZOU Yilun, XU Wanghao, et al. Design of construction ventilation scheme for exit section of Micangshan Highway Tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3):199-204.
- [10] 李永生.山岭隧道施工通风方式的发展[J].隧道建设,2010,30(5):569-572,581.
- LI Yongsheng. Development of ventilation methods for mountain-crossing tunnels during construction[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(5):569-572,581.
- [11] 曹正卯.长大隧道与复杂地下工程施工通风特性及关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- CAO Zhengmao. Study on ventilation characteristics and key technologies of long tunnels and complicated underground engineering in the construction stage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [12] 吕辉.高原区特长公路隧道施工通风技术研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- LYU Hui. Study on the technology of extra-long highway tunnel construction ventilation in plateau[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [13] CHOW W K. Dispersion of carbon monoxide from a vehicular tunnel with the exit located along a hillside[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1989, 4(2): 231-234.
- [14] CHANG X K, CHAI J R, LUO J P, et al. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations[J]. Building and Environment, 2020, 177:106902.
- [15] ZHOU W J, NIE W, LIU C Q, et al. Modelling of ventilation and dust control effects during tunnel construction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 160: 358-371.
- [16] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. Investigation of efficient dust control strategy for construction tunnels: Ventilation system's implications for cleaner production[J]. Building and Environment, 2020, 180:107032.
- [17] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. Research on tunnel ventilation systems: Dust diffusion and pollution behaviour by air curtains based on CFD technology and field measurement [J]. Building and Environment, 2019, 147:444-460.
- [18] 中交第一公路工程局.公路隧道施工技术规范:JTG/T 3660—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- CCCC First Highway Engineering. Technical specifications for construction of highway tunnel: JTG/T 3660—2020[S]. Beijing: China Communications Press, Co., Ltd., 2020.
- [19] 王闯,刘石磊,邵建霖,等.京张高铁正盘台隧道施工通风方案研究[J].铁道标准设计,2020,64(1):153-158.
- WANG Chuang, LIU Shilei, SHAO Jianlin, et al. Study on the scheme of construction ventilation in Zhengpantai tunnel of Beijing-Zhangjiakou High-Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1):153-158.