



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.020

常晓珂, 柴军瑞, 许增光, 等. 引汉济渭椒溪河隧洞施工通风数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 137-143. CHANG X K, CHAI J R, XU Z G, et al. Numerical simulation of ventilation in the Jiaoxihe tunnel of the Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 137-143. (in Chinese)

## 引汉济渭椒溪河隧洞施工通风数值模拟

常晓珂, 柴军瑞, 许增光, 覃 源

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

**摘要:** 引汉济渭工程是陕西省为缓解关中渭河沿线城市和工业缺水问题, 而提出的由汉江调水到渭河流域的大型水利工程。椒溪河段工程为穿河段, 地形地质相对复杂, 隧洞施工期的通风问题也相对比较严重。采用 CFD(Computational Fluid Dynamics) 数值模拟方法对带有支洞隧洞的通过程进行模拟, 研究几种典型工况下隧洞内的流场和浓度场在施工时期随着时间的变化规律, 分析掌子面以及支洞内涡流对气流及有害气体分布的影响。在气流排散通道不顺畅时, 掌子面附近的涡流区域内涡流的大小和位置呈现周期性的变化, 并随通风时间的增加影响范围逐渐降低。隧道爆破产生的有害气体和烟尘会随着气流的流动发生移动和扩散过程, 并逐渐排向洞外。通过对隧洞主洞与支洞内气流和有害气体排散过程的研究, 得出隧洞爆破后在通风作用下隧洞的掌子面附近和支洞与主洞的交叉位置处形成涡流区, 涡流的产生和变化不断的消耗通风的机械能, 降低通风效率, 对有害气体的排散造成一定的阻滞作用, 隧洞内有害气体的排散过程包括移动和扩散两方面, 移动过程将 CO 排向洞外, 扩散过程不断的降低洞内 CO 峰值, 总结出了不同工况下隧洞内达到安全浓度的时间, 对隧洞施工进度给出一定的参考意见。

**关键词:** 压入式通风; 交叉隧道; 数值模拟; 流场; 浓度场

**中图分类号:** TV 554    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0137-07

### Numerical simulation of ventilation in the Jiaoxihe tunnel of the Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project

CHANG Xiaoke, CHAI Junrui, XU Zengguang, QIN Yuan

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project is a large water conservancy project to ease the water shortage in Guanzhong Plain in Shaanxi province. The Jiaoxihe tunnel crosses a river and faces complicated geographical and geological conditions. We simulated the ventilation in the tunnel with a branch tunnel using CFD numerical simulation, studied the variation of the flow and concentration fields in the tunnel during the construction period under several typical conditions, and analyzed the influence of the vortex on airflow and harmful gas distribution near the working face and in the branch tunnel. When the exhaust passage was hindered, the size and position of vortices would change periodically near the working face, and their influence range would gradually decline with the ventilation time. In addition, the harmful gas and smoke produced from tunnel blasting would move and diffuse gradually out of the tunnel. After studying the airflow and dissipation of harmful gas in the main tunnel and branch tunnel, we had the following findings: A vortex zone would form after tunnel blasting due to ventilation near the working face and the intersection of the main tunnel and branch tunnel. The production and variation of vortices would continuously consume the mechanical energy of ventilation, reduce ventilation efficiency, and hinder the dissipation of harmful gas. The dissipation process of the harmful gas in the tunnel included movement and diffusion. The movement process drove the CO out of the tunnel. The diffusion process continuously reduced the peak CO value in the tunnel. We calculated the time needed to reach safety concentration in the tunnel under different conditions and gave relevant suggestions on the construction progress.

**Key words:** forced ventilation; cross tunnel; numerical simulation; flow field; concentration field

收稿日期: 2017-03-21    修回日期: 2017-04-21    网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1040.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51679197); 陕西省重点科技创新团队(2013KCT-015)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51679197); Shaanxi Key Scientific and Technological Innovation Team (2013KCT-015)

作者简介: 常晓珂(1992), 女, 山西运城人, 主要从事隧洞通风数值分析方面研究。E-mail: m18789468702@163.com

通讯作者: 柴军瑞(1968), 男, 陕西宝鸡人, 博士生导师, 主要从事岩土体渗流数值分析方面研究。E-mail: jrchai@xaut.edu.cn

隧洞是水利工程中十分普遍的工程。通风技术是保障隧洞施工、运营安全的基础。随着工程技术的发展,隧洞的建筑施工越来越多。施工过程中产生的问题需要学者们不断的研究和探索<sup>[1]</sup>。隧洞是个相对封闭的区域,爆破时产生的炮烟和有害气体不会随自然风扩散到大气中,随着隧洞掘进距离的增加和工程地质的复杂,其施工通风往往成为制约其施工进度的关键。隧洞工程的爆破危害十分严重,隧洞施工通风的技术水平直接影响隧洞独头掘进的施工效率,威胁到施工人员的生命安全。因此,研究独头掘进隧洞的管道通风技术有着十分重要的意义<sup>[2,3]</sup>。研究通风的方式主要有实验室模拟和计算机数值模拟。由于实验室模拟的造价高、周期长、测量数据不够全面等缺点,相比之下随着计算机性能的提高和有限元理论的发展,以及工程实例验证的可靠性和合理性,越来越多的学者采用数值模拟的方法对隧洞的通风状况进行研究<sup>[4,6]</sup>,并对具体的工程给出相关的意见和建议。例如, Xia 等<sup>[7]</sup>使用 CFD 软件建立模拟模型,通过研究隧道通风和除尘系统的特点,得出通风管在隧道内位置的不同会导致不同的通风效果。Esmael 等<sup>[8]</sup>通过对运行期隧洞的通风数值模拟,分析不同类型的风机运行效率,对新型风机的优势做出详细的比较。但是由于很多工程地质环境的复杂和施工过程的需要,许多复杂的隧道更需要详细的研究<sup>[9,11]</sup>。例如, Fang 等<sup>[12]</sup>建立三维数值模型研究交叉隧洞内气体流动和有害气体扩散的规律。结果表明在交叉的通道内流体流速较低导致有害气体在该区域的排散不利和滞留。

大量的工程实践及研究表明<sup>[13,19]</sup>,隧洞开挖爆破过程中,洞内复杂的施工环境严重危害了施工人员的健康,影响施工的进度,有效探索洞内的气体流动规律和有害气体的排散过程十分必要。本文运用有限元软件 ADINA 中的 CFD 模块对引汉济渭工程进行数值模拟,研究在带有支洞的隧道中复杂的流场与浓度场的分布以及变化规律,为实际工程提供参考资料。

## 1 引汉济渭工程简介

引汉济渭调水工程是针对关中地区缺水问题提出的省内南水北调工程的骨干调水线路,是解决陕西省关中地区水资源短缺,有效遏制渭河水生态环境恶化,减轻关中地区环境地质灾害的重点支撑工程(图 1)。秦岭隧洞为明流洞,全长 81.779 km,设计流量  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ,采用钻爆法和 2 台 TBM 法施工,工期 6.5 a。

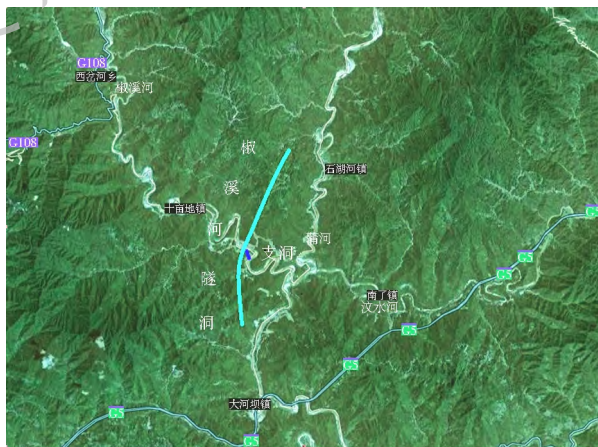


图 1 引汉济渭工程示意图

Fig.1 Diagram of the Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project

引汉济渭秦岭隧道椒溪河工区勘探试验洞主洞长 6 592 m,采用由支洞向主洞上下游两方向进行开挖的施工方式,其中上游主洞距离支洞长 2 529 m,下游主洞长 4 063 m;隧洞主洞采用马蹄形断面,支洞与主洞的夹角为  $66^\circ$ 。工程示意图见图 2。隧道采用钻爆法施工,现浇混凝土衬砌。椒溪河支洞洞口位于椒溪河右岸黄泥嘴,支洞与主洞交汇里程为 K2+575,为无轨双车道施工支洞,平距 324 m,斜长 325.88 m,综合坡比 10.44%。隧洞通风采用压入式通风技术,考虑施工人员、爆破散烟、洞内最小风速、使用柴油机械、高海拔散烟系数等因素确定需风量。压风管直径采用 120 cm 的软风管,设置于隧道的顶部,采用系统锚杆、管卡固定。通风过程为:新鲜风通过通风管压入两侧主洞,掌子面爆破产生的有害气体与粉尘在气流的影响下通过主洞排向支洞,继而排向洞外。

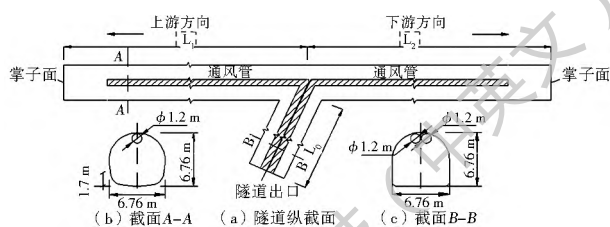


图 2 隧道示意图

Fig.2 Sketch of the tunnel

## 2 隧道通风数值计算方法

### 2.1 基本假设

使用数值方法获得的结果要满足实际工程的要求,一个常见的方法就是只关注主要的因素。使用合理的数值模拟方法是要提高计算效率和准确性。构建这项研究中使用的模型制定以下的假设。

- (1) 流体运动不考虑内摩擦力,即不考虑黏滞性作用。
- (2) 流体不可压缩。

(3) 壁面绝热,等温通风。

(4) 风筒进口风速分布均匀。

(5) 考虑风流在隧道内随时间的变化过程,没有稳定的污染源,假定初始状态有害气体均匀的分布在计算抛烟范围内。

空气是可压缩流体,本文模拟隧洞的距离较短,且空间不封闭,忽略气体的压缩性对结果的影响不大,为简化理论分析,选择忽略气体的压缩性。

## 2.2 初始条件

有害气体转化成的CO初始浓度计算公式

$$c = \frac{Gb}{LA} \quad (1)$$

式中: $c$ 为CO初始浓度; $G$ 为爆破炸药用量,取210 kg; $L$ 为炮烟抛掷长度,取35 m; $b$ 为每千克炸药产生的有毒气体,取 $0.04 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $A$ 为隧道开挖断面积( $\text{m}^2$ ),取 $65 \text{ m}^2$ 。得 $c = 3.696 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。洞内其余部分CO浓度较小,取为 $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

## 2.3 边界条件

(1) 进口边界条件。

$$V_x = 3.14 \text{ m}/\text{s}, C_y = V_z = 0$$

CO浓度取 $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

(2) 出口边界条件。采用一致流边界条件

$$\frac{\partial V_i}{\partial X_i} = 0 \quad (2)$$

$$P = P_{out} = 0 \quad (3)$$

$k, \varepsilon$ 自由滑动。

(3) 壁面边界条件。隧道边壁和掌子面均为固定壁面,按固壁定律处理,所有固壁处的节点均采用无滑移条件,即 $V_i = 0$ 。

## 2.4 计算工况

带有支洞的隧道通风系统结构构成较为简单,为通风风管和隧道组成的体系,支洞中设置两道风管,置于隧道的顶部,在支洞与主洞的交叉位置处分别通向上游主洞和下游主洞的掌子面。在上游主洞或下游主洞的掌子面进行爆破后,通风风管将洞外的新鲜风压向掌子面,将掌子面附近的污浊空气通过主洞,经由支洞排向洞外。工程实际中很少采用两侧掌子面同时进行爆破的工况,但是为了可以更加全面的模拟工程中可能遇到的工程情况,本文对以下三种工况分别建模,模拟了引汉济渭椒溪河隧洞爆破的典型情况,具有一定的代表性,见表1。

第一种工况是施工支洞长为300 m,上下游主洞均开挖为250 m、总长为500 m的隧洞进行模拟,在上游掌子面进行爆破开挖。第二种工况是施工支洞长为300 m、上下游主洞均开挖250 m长、总长为

500 m的隧洞下游掌子面进行爆破的模拟工况。工况三是上下游主洞均为750 m长、总长为1500 m的隧洞两侧掌子面同时进行爆破的工况模拟。

表1 不同工况参数

Tab. 1 The parameters under different conditions			
工况	工况一	工况二	工况三
$L_1/\text{m}$	250	250	750
$L_2/\text{m}$	250	250	750
$L_3/\text{m}$	300	300	300
爆破对象	上游主洞	下游主洞	上、下游主洞

## 3 隧道通风模型及结果分析

数值模型网格剖分图见图3,共有230974个节点和1217366个单元。截面A-A、B-B为主洞的横截面,分别距离两侧掌子面为30 m。截面C-C为平行于水平面的截面,代表大部分施工人员的身高水平,研究施工人员活动水平面上的流场及浓度场情况,与隧道底部的距离为1.7 m。

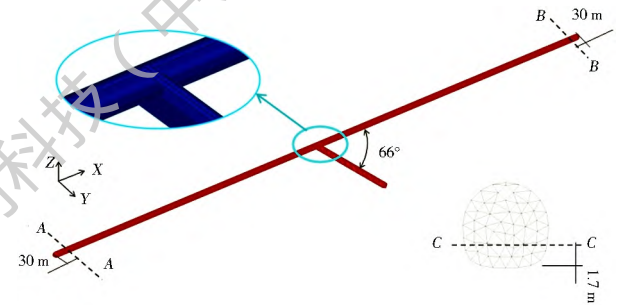


图3 有限元网格剖分图

Fig. 3 Sketch of finite element mesh generation

### 3.1 隧道流场分析

三种工况中隧洞内气流稳定后的沿X方向的断面平均速度分布图见图4。结果是由各个位置对应的断面节点风速取和求平均所得。由图中可以看出,隧洞断面平均风速在支洞位置的两侧流速变化很大,并不是由该位置的不连续造成,而是因为隧洞支洞与主洞交叉位置气体向出口方向排散,流速方向发生了变化,由沿主洞方向变为沿支洞出口的方向,因此在沿隧洞方向的流速值发生了骤变。第一种工况中隧洞上游掌子面爆破后,通风管将新鲜的空气压向掌子面,将有害气体与烟尘经由上游主洞排向支洞,然后排出洞外。主洞内气流稳定后的平均流速大约为 $0.6 \text{ m}/\text{s}$ ,而另一侧主洞的流速基本为0。第二种工况的排散过程与第一种相似,但是有一定的不同。经过支洞的出口位置后,上游主洞距离支洞出口约30 m位置处流速有所增加,流速为 $0.18 \text{ m}/\text{s}$ 。这是因为支洞与上游主洞夹角较

小, 气流流经交叉位置后, 部分气流经过支洞排散, 一小部分气流流向另一侧的主洞。这种现象易于造成有害气体在上游主洞内部的滞留, 不利于有害气

体的排散。在最后一工况中, 主洞两侧均达到稳定流速, 其大小相同, 方向相反。在支洞出口位置处流速急速变化。

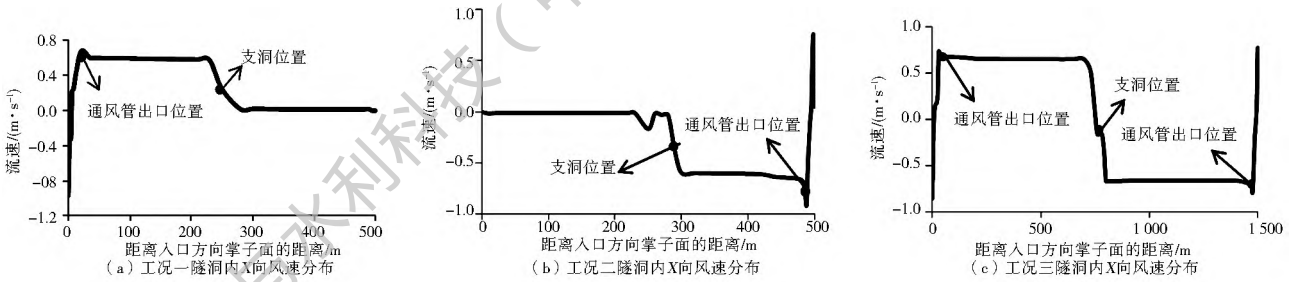


图 4 不同工况下隧洞内流速分布

Fig. 4 Distribution of air speed in the main tunnel in different cases

图 5 为三种工况在支洞出口位置的气流随时间的变化过程。这项计算结果可以代表了整条隧道气流稳定所需要的时间。在不同的工况中, 气流稳定所需要的时间不同。800 s 后支洞出口位置处气流稳定, 但在隧道的其他位置气流稳定所需的时间更少。第一种工况与第二种工况气流稳定状态相似, 第三种工况的区别较大。该工况主洞两侧均进行通风, 支洞的气流较快的达到较高流速。由于在主洞的交叉位置处两侧气流有冲击作用, 支洞内气流形成部分涡流, 造成气流在 400 s 左右产生了流速变化。

大, 12.0 m × 3.2 m。在 600 s 后较大的涡流  $\tilde{O}$  向掌子面方向移动, 影响范围减小, 9.8 m × 2.4 m, 而较小的涡流  $\tilde{N}$  向远离掌子面的方向移动, 区域增大, 11.8 m × 2.4 m。涡流形成过程为: 气流从通风管出口喷射向掌子面, 与掌子面碰撞, 继而反射向隧道的另一侧, 部分反射流由于风管出口气流的影响流向掌子面, 剩余部分反射流留在这个区域。因为该侧主洞与支洞的夹角较小, 不利于气体的顺畅排散, 造成掌子面附近的涡流区域不断移动。

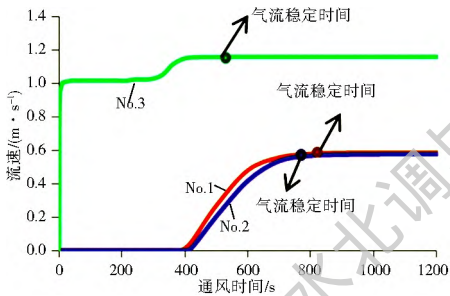


图 5 隧洞入口断面平均流速变化过程

Fig. 5 Variation of the average air speed at the cross section of the tunnel entrance

随着通风时间的增加, 隧洞内的气流分布逐渐稳定。第三种工况主洞下游方向的气流稳定后没有过多的变化, 但是另一侧的主洞流速分布会随着时间持续的变化。高速区域随着时间做左右的摇摆变化。循环时间大约为 4 min 左右, 这种现象造成该位置的流速较小, 但是不同时间时都有部分稳定流速流经不同位置, 对掌子面附近的有害气体的排散有一定的帮助。

掌子面附近的气流矢量图见图 6。掌子面和通风管出口位置之间存在多个气体涡流。通风 450 s 时, 在掌子面附近范围内分布两个明显的涡流区域: 涡流  $\tilde{N}$  和涡流  $\tilde{O}$ 。涡流  $\tilde{N}$  的分布范围较小, 6.8 m × 1.8 m, 而远离掌子面的涡流  $\tilde{O}$  分布范围较

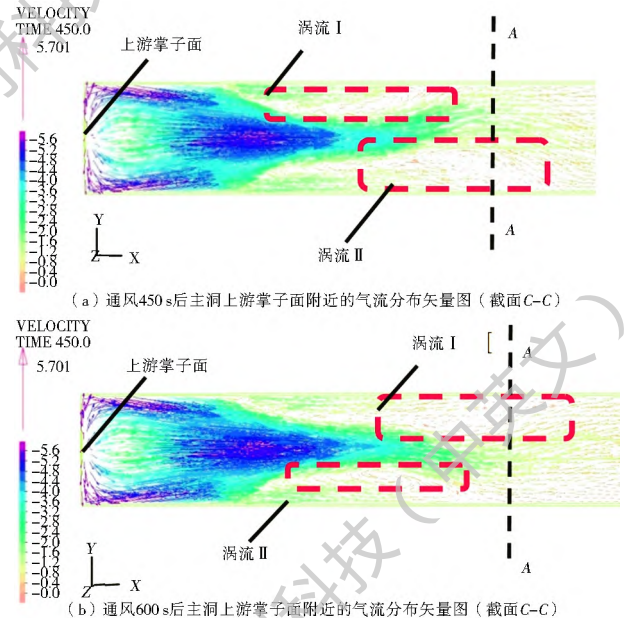


图 6 不同时刻主洞入口方向掌子面附近的气流分布矢量图(截面 G-C)

Fig. 6 Vector diagram of airflow distribution near the working face in entrance direction at different times (Section G-C)

图 7 断面距离上下游掌子面约 30 m 的主洞横断面(图 3), A-A 截面与 B-B 截面分别为上下游掌子面附近的涡流中心横截面的气流分布云图。在上游方向的主洞中, 由于涡流的不断变化, 高流速区域呈现了不断摇摆变化的现象, 当较大的涡流存在于掌子面的右侧时, 高流速的区域就在另一侧, 反之, 高流速区

域也向另一侧移动。但在下游方向的掌子面附近,涡流变化不明显时流速分布趋于稳定。

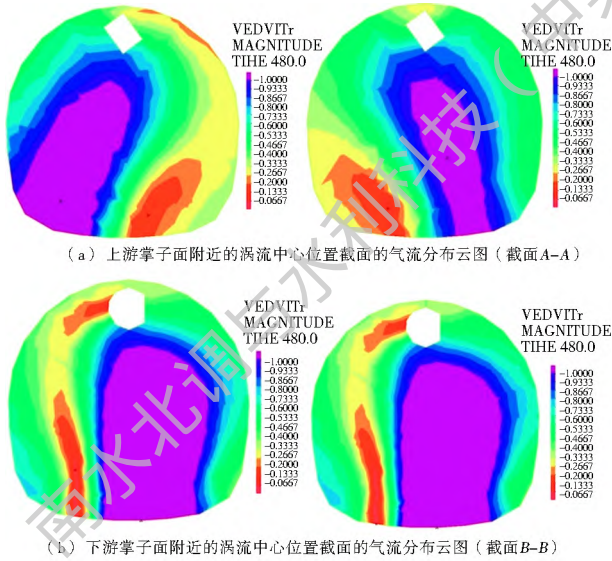


图7 两方向掌子面附近的涡流中心位置截面的气流分布云图

Fig. 7 Wind speed distribution in the central cross section of the vortex zone (m/s) near both working faces

图8为在不同工况下主洞与支洞的交叉位置处的气流分布矢量图。在第一种工况下,气流流经交叉位置时,气流分成两部分,一部分气流射向支洞,后与支洞侧壁相碰反射,在支洞的另一侧形成明显的涡流。另一部分气流流向出口方向的主洞,由于该侧主洞没有气流的流动,造成这部分气流的滞留。第二种工况下的气流分布与第一种工况较为相似,不同在于支洞中的涡流效应较为不明显,这是因为支洞与上游方向的主洞夹角较小,与支洞侧壁的冲击较小,有利于气流的排散,但是残留在另一侧的主洞气流增加。第三种工况的气流分布较为复杂,主洞两侧均进行通风,在支洞位置处两部分气流有明显的冲击作用,后流向支洞排出洞外。

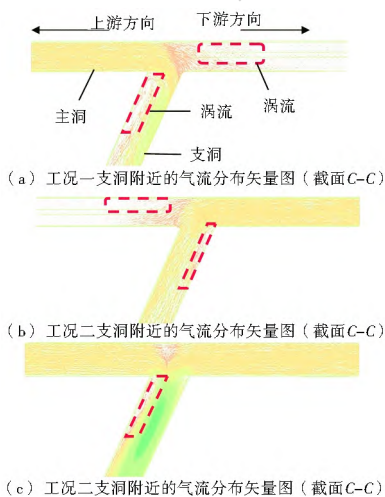


图8 各工况下支洞附近的气流分布矢量图(截面G-C)

Fig. 8 Vector diagram of airflow distribution near the branch tunnel in the three cases (Section G-C)

### 3.2 隧道浓度场分析

我国《铁路隧道设计规范》<sup>[20]</sup>第13.0.16条规定工作面的CO允许浓度为 $30 \text{ mg/m}^3$ ,但当施工人员进入工作面检查时,浓度可为 $100 \text{ mg/m}^3$ 。

实际工程中通风机在爆破前就已经打开或者始终打开着,因此爆破后的通风散烟是在稳定的流场中进行的。

图9为三种工况爆破后,隧洞断面CO平均浓度值随通风时间的变化过程图:

图9(a)为第一种工况下隧洞主洞内CO浓度分布情况。爆破后,掌子面附近一定范围内分布着高浓度的有害气体,随着通风时间的增加,隧洞有害气体浓度值逐渐降低并排向洞外。涡流区域的CO峰值也逐渐降低,但是随着通风时间的增加仍有一定的残余。CO的排散过程如图9(a)。首先,峰值移向支洞出口,表明CO气体随着通风时间的增加向出口排散。其次,通风时间的增加导致了CO峰值的降低和跨度的增加。这表明随着气体的排散,有害气体的浓度降低,影响范围也逐渐扩大。CO气体的排散可以根据湍流气流运输的基本理论的综合过程计算排烟总结为移动和扩散两个过程。但是由于部分气流流向出口方向的主洞,造成有害气体在该侧主洞的滞留。随着气流的移动和扩散,经过11 min后,隧道主洞内的有害气体浓度达到安全浓度。

图9(b)是第一种工况下支洞内的CO浓度分布情况。与主洞大不相同,首先洞内CO浓度很低,随着时间的增加逐渐增大,随着时间的继续增加,CO浓度逐渐降低并达到安全浓度。由于支洞中靠近主洞的位置处存在较大的气体涡流,这个区域存在有害气体的残留。16 min后最大的有害气体浓度为 $75 \text{ mg/m}^3$ ,在隧道的出口位置处。

图9(c)和9(d)为第二种工况下隧洞主洞和支洞内CO浓度分布情况。其过程与第一种工况相似,但是由于较大部分气流流向入口方向的主洞内,CO气体伴随气流滞留在该侧主洞内,因此造成CO峰值经过支洞位置停留在入口方向的主洞内。随着通风时间的增加,CO的移动和扩散,区域的CO浓度值有所降低。16 min后支洞出口位置处的CO浓度值达到 $90 \text{ mg/m}^3$ 。

图9(e)和9(f)为第三种工况下隧洞主洞和支洞内CO浓度分布情况。主洞两侧均进行爆破与通风。因此隧洞主洞两侧有两个CO峰值,峰值均不断减小并向支洞位置方向移动。在隧洞支洞内有害气体的影响范围较大,浓度降低所需要的时间也较长。28 min后CO浓度降低于安全浓度( $30 \text{ mg/m}^3$ )。

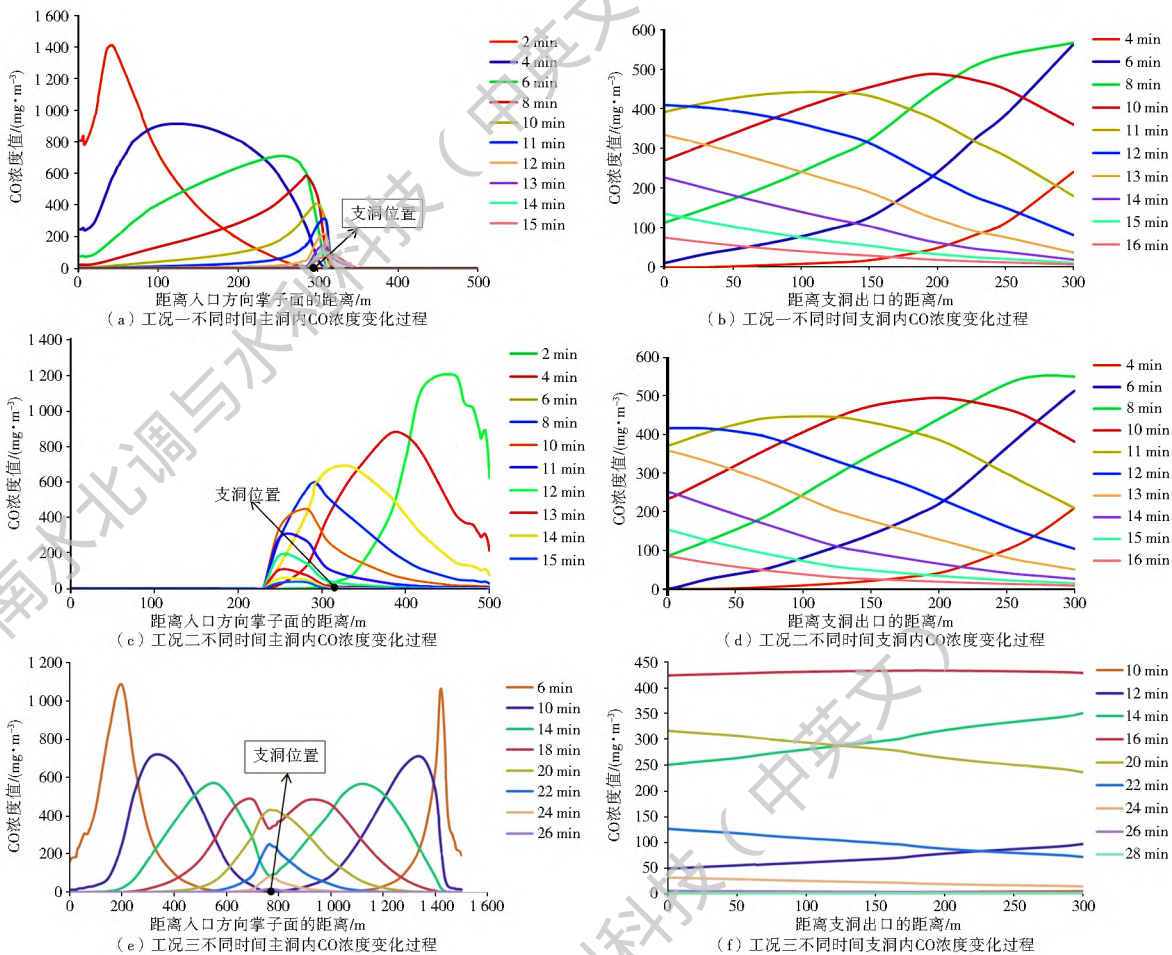


图 9 各工况下不同时间洞内 CO 浓度变化过程

Fig. 9 Variation of CO concentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) in the tunnel at different times of ventilation in the three cases

### 3.3 相关建议

当隧洞内有害气体的浓度降低至  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  时为隧道的可进入时浓度, 当浓度降低至  $30 \text{ mg}/\text{m}^3$  为隧道安全浓度。为确保施工人员的施工环境, 保证施工进度, 完成施工质量, 有效降低隧洞内有害气体的浓度具有一定的必要性。而隧洞内涡流对气流的作用是影响隧洞内 CO 峰值降低的重要因素。涡流的影响时间成是隧洞内浓度降低至安全浓度的时间。它的长短决定于不同的施工条件。为了保证施工环境, 施工人员到达掌子面进行施工的时间应该超过涡流区域有害气体浓度降低至安全浓度所需要的时间。

表 2 反映了在不同施工条件下的时间差别。通过对图 9 各个工况不同时间的 CO 峰值对应的隧洞位置和相隔的时间段求出 CO 的移动速度, 再对求得各个速度进取平均值得到下表中 CO 浓度峰值的移动速度。根据 CO 浓度峰值的移动速度, 可以定性的判断隧洞内各个位置的最恶劣环境时间段, 并根据该项计算结果对施工的工序做出一定的安排。随着施工的进行, 隧洞长度越来越长时, 隧洞的安全时间也 longer。在这项研究里, 不同的施工条件

对产生的涡流影响不同, 当气流排散的通道越顺畅时, 所需要的时间越短。

根据施工现场的调查, 模型模拟结果基本符合现场工况。当隧道主洞施工至  $1500 \text{ m}$  时, 在通风  $30 \text{ min}$  后, 隧道内的环境基本可以进行施工作业。

表 2 不同工况的计算结果

Tab. 2 The results of different cases

工况	工况一	工况二	工况三
气流稳定时间/ $\text{min}$	14	13.3	8
主洞内 CO 浓度峰值移动速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.90	0.56	0.69/0.76
安全时间/ $\text{min}$	18	19	28
掌子面附近涡流影响时间/ $\text{min}$	5	4	6

### 4 结论

通过三种典型工况的计算得出引汉济渭椒溪河带有支洞的隧洞施工中气体流场和浓度场的普遍规律。不同的计算工况下 CO 浓度场的分析得出隧洞内浓度场的安全时间, 对实际工程具有一定的意义。研究结果如下。

(1) 本文忽略了空气是可压缩流体, 因此在模型

结果中,尤其是工况一和工况二单侧掌子面进行爆破通风时,实际工程中由于气体的可压缩性,会有更多的流体流向另一侧的掌子面,造成更多CO气体的滞留,随着通风时间的持续增加,CO会逐渐排散,因此实际工程需要更长的通风时间。

(2) 引汉济渭椒溪河隧洞采用压入式通风时的流场分析如下:在距离隧洞掌子面约30 m的断面内形成涡流区,在这个区域会有多个不同的涡流不断的产生和变化。当气体流动通道不顺畅时,涡流区域的流态更加复杂,并随着通风时间的增加,涡流的大小和位置呈现周期性的变化。气流流经支洞时也会有明显的涡流产生。涡流不断的产生和消失,造成它们不断消耗着通风的机械能,降低了通风效率。

(3) 涡流区的产生影响了CO等有害气体的排散,不利于施工人员的进一步施工,从而影响施工进度。根据隧洞爆破后可能产生的涡流区进行针对性的通风,可以有效的排散隧洞内的污浊空气,提高通风效率。

(4) 不同的施工条件下,隧洞内的浓度场降低至安全浓度所需要的时间不同。本文对椒溪河隧洞典型的三种工况进行了模拟并给出了相关建议。当气流通道顺畅时,可以大大减少排散有害气体的时间。

这项研究表明,CO浓度场排散与隧洞内流场分布密切相关。施工人员可以根据隧道内的安全浓度时间进行施工,缩短了爆破周期,加快了施工进度,节约施工成本。根据本文对引汉济渭椒溪河隧洞的数值模拟分析得出的流场分布规律和CO浓度场降低的时间规律等结论,可以扩展并应用于类似的其他的水利工程项目中。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴慧明,丁钰,张宝亮,等.大断面/中断面、长距离隧道施工通风特性及风险分析.安全与环境学报,2011,11(1):192-196. (WU H M, DING Y, ZHANG B L, et al. Study of construction ventilation characteristics and risk assessment for the large and middle cross section long distance tunnels[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(1): 192-196. (in Chinese))
- [2] 杨超,王志伟.公路隧道通风技术现状及发展趋势.地下空间与工程学报,2011,07(4):819-824. (YANG C, WANG Z W. Current status and development trend of ventilation technology for highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 07(4): 819-824. (in Chinese))
- [3] 王艳,王子云,唐上明,等.多匝道公路隧道通风系统模拟研究.地下空间与工程学报,2012,8(3):630-636. (WANG Y, WANG Z Y, TANG S M, et al. The simulation research of ventilation system of highway tunnel with several ramps[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 630-636. (in Chinese))
- [4] LI M, AMINOSADATI S M, WU C. Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 52: 38-43.
- [5] AMOUZANDEH A, ZEIML M, LACKNER R. Real scale CFD simulations of fire in single and double track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions[J]. Engineering Structures, 2014, 77: 193-206.
- [6] KURNIA J C, SASMITO A P, MUJUMDAR A S. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014a, 42: 206-215.
- [7] XIA Y, YANG D, HU C, et al. Numerical simulation of ventilation and dust suppression system for open type TBM tunneling work area[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 56, 70-78.
- [8] ESMAEEL E, ALIREZA D, OMID A, JAVAD M, GOODARZ A. A numerical investigation into the performance of two types of jet fans in ventilation of an urban tunnel under traffic jam condition[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 4, 56-67.
- [9] 陈伟忠,郭小红,曹传林,等.公路岔洞隧道循环风相互影响及其对策研究.岩石力学与工程学报,2008,27(6):1137-1146. (CHEN W Z, GUO X H, CAO C L, et al. Research on interrelationship of exhaust air of highway forked tunnel and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1137-1146. (in Chinese))
- [10] 何坤,叶敏敏,李艳玲,等.交叉隧洞施工通风流场特性研究.四川大学学报,2014,64:20-25. (HE K, YE M M, LI Y L, et al. Characteristic research on construction ventilation flow field of cross tunnel[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 64: 20-25. (in Chinese))
- [11] 夏永旭,石平.公路隧道通风空气交叉污染三维数值分析.长安大学学报,2006,26(6):44-47. (XIA Y X, SHI P. 3D numerical analysis on air cross pollution of opening and shaft in ventilation of highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(6): 44-47. (in Chinese))
- [12] FANG Y, FAN J, KENNEALLY B, et al. Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin tunnel construction[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 58, 30-39.
- [13] WANG X, ZHANG Z, ZHOU Z, et al. Numerical simulation of TBM construction ventilation in a long diversion tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26, 560-572.
- [14] ISIDRO D, SUSANA T, JAVIER T, et al. A practical use of CFD for ventilation of underground works[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26, 189-200.
- [15] 黄浩,陈明,卢文波,等.高压大流量风机在隧洞通风中的应用.水利水电技术,2014,45(2):97-99. (HUANG H, CHEN M, LU W B, et al. Application of high pressure and large flow ventilator to tunneling ventilation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(2): 97-99. (in Chinese))
- [16] COLELLA F, REIN G, BORCHIELLINI R, et al. Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two scale modeling approach[J]. Building and Environment, 2009, 44: 2357-2367.
- [17] ANTONIO C, MARILENA M, GIUSEPPE R, et al. Numerical analysis for reduced scale road tunnel model equipped with axial jet fan ventilation system[J]. Energy Procedia, 2014, 5: 1146-1154.
- [18] COLELLA F, REIN G, VERDA V, et al. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels[J]. Computers & Fluids, 2011, 51: 16-29.
- [19] PARRA M, VILLAFRUELA J, CASTRO F, et al. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines[J]. Building and Environment, 2006, 41, 87-93.
- [20] TB 10204-2002. 铁路隧道施工规范[S]. (TB 10204-2002. Code for construction of railway tunnel[S]. (in Chinese))