

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.019

独头隧道钻爆法施工爆生气体扩散过程模拟*

朱应伟^{1a}, 章光^{1a}, 胡少华^{1a}, 罗忆^{1b}, 蒲青松²

(1. 武汉理工大学 a. 安全科学与应急管理学院; b. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室; 武汉 430070;
2. 中铁五局集团有限公司, 长沙 550003)

摘要: 为研究隧道钻爆法施工产生的有害气体压入式通风效果, 以我国成兰铁路跃龙门隧道工程为依托, 通过建立独头隧道内气体湍流流动与浓度扩散有限元模型, 模拟风机出口风速 13.2 m/s 时, 掌子面爆破作业后爆生有害气体的扩散过程, 研究了不同风管布置位置与施工方法下 CO 浓度场时空演化规律。研究表明: 掌子面 CO 浓度随通风时间呈负指数下降, CO 浓度在 300~900 s 内到达浓度限值。对比各风管布置位置, 风管拱顶布置时通风效果最好, 通风 600 s 内 CO 浓度可降低至浓度限值。对比各施工方法, 台阶法施工下通风 350 s 内 CO 浓度可降低至浓度限值, 同时该隧道结构能够避免通风前期的 CO 滞留现象。

关键词: 压入式通风; 风管布置; 施工方法; CO 浓度; 扩散规律

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0131-08

Simulation of Diffusion Process of Harmful Gas Produced by Drill-blast Construction in One Ended Tunnel

ZHU Ying-wei^{1a}, ZHANG Guang^{1a}, HU Shao-hua^{1a}, LUO Yi^{1b}, PU Qing-shong²

(1. a. School of Safety Science and Emergency Management; b. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structural Engineering Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. China Railway Fifth Bureau Group Co Ltd, Changsha 550003, China)

Abstract: To explore the forced ventilation effect of the harmful gas produced by drill-blast construction, a finite element model is established to show gas turbulent flow and concentration diffusion in a one ended tunnel, based on the Yuelongmen tunnel project of Chenglan railway in China. When the wind speed at the exit of the simulated fan is 13.2 m/s, the diffusion process of the harmful gas produced by blasting at the working face of the tunnel is simulated. Meanwhile, the temporal and spatial evolution law of CO concentration field for different positions and excavation modes of the air duct is studied. The results show that CO concentration at the working face decreased negatively with the ventilation time, and the CO concentration reached the concentration limit within 300~900 s. Comparing the layout position of each air duct, the ventilation effect is best when the duct arch is laid, and the CO concentration within 600 s of ventilation can be reduced to the concentration limit. Comparing the construction methods, the CO concentration in the 350 s ventilation under the bench method can be reduced to the concentration limit. At the same time, the tunnel structure can avoid the CO retention phenomenon in the early stage of ventilation.

Key words: forced ventilation; ventilation layout; construction method; CO concentration; diffusion law

随着我国铁路网正不断向西南地区铺设, 受西南地区地理条件的限制, 隧道成为西南区域铁路网升级的关键工程。钻爆法由于其施工方法简单、高效经济, 是目前隧道施工的主要方法, 但其爆破施工后生成大量的有毒气体会导致施工人员室

息甚至隧道爆炸^[1]。因此, 研究爆破施工后隧道内有毒气体分布规律, 对保障施工人员职业健康、施工安全和工程进度具有重要意义^[2]。

目前关于隧道内爆生有毒气体通风排出问题的研究方法可分为现场实测、模型试验、理论分析

与数值模拟^[3]。谭信荣等对钻爆法施工隧道空气质量进行了现场测试,研究了隧道断面积,风管漏风率,通风长度对净化空气质量所需要的通风时间影响^[4]。张欣等通过建立等比例隧道模型,得出了通风段射流升压力变化对隧道内风量及风量分配的影响规律^[5]。杨立新基于PC-STEL标准的风量计算方法,研究了不同的通风方式下隧道钻爆排烟风量计算方法^[6]。曹杨等对排烟时间影响因素进行灰色关联度计算,计算得出了主要影响因素的敏感性大小^[7]。陈赞成等模拟了通风长度与风管出口距掌子面距离下的炮烟扩散规律,并得到具体理论公式^[8]。张恒等基于隧道壁面粗糙条件对风流场的影响,提出了壁面粗糙常数的计算公式^[9]。

国内外学者研究表明通风长度、风管出口距掌子面距离与隧道尺寸等对CO扩散有着明显的影响。但其多数的研究是基于风管拱腰布设与全断面法施工等常见的通风方式与施工方法下。由于跃龙门隧道穿越山体断裂带,其地质条件与水文地质条件复杂,现阶段采用的全断面法施工下的风管拱腰布设通风已难以满足隧道内爆生气体的稀释需求,而对于其他布设方式与施工方法下的通风问题,有关的研究工作则相对不足。不同方式所导致的隧道内部风流结构的差异性使得爆生有毒气体的扩散过程与分布特性更难以预测^[10],所以有必要对不同布设方式与施工方法下的通风规律进行深入研究,并提出相应的优化措施。

1 独头隧道钻爆法施工压入式通风数学模型

独头隧道钻爆法施工压入式通风问题属于流体力学中典型的湍流流动问题,隧道内气流运动规律服从Navier-stokes方程。该文假定如下:①爆破前隧道内原有空气不计入在内,有害气体来源仅为爆生气体,且在掌子面均匀分布;②隧道内气体视为三维黏性不可压缩气体;③隧道内温度恒定,隧道壁面绝热,并忽略流体黏性力做功所引起的耗散热;④忽略隧道内其他设备对流场的影响。基于上述基本假定,隧道内气体流动与浓度扩散控制方程如下^[11]

收稿日期:2019-08-21

作者简介:朱应伟(1995-),男,安徽马鞍山人,硕士,研究方向为地下空间内有害气体防治方面的流体动力学模拟,(E-mail)wuhtzyw1995@163.com

通讯作者:章光(1958-),男,教授、博士,主要从事地下空间安全技术方面的教学与研究,(E-mail)gzhang58@163.com。

基金项目:武汉理工大学自主创新研究项目(2019-zy-302);国家自然科学基金青年基金项目(51609184);国家自然科学基金资助项目(51779197)

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度; v_i 为 x_i 方向上速度; t 为通风时间。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_{x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: p 为静压; τ_{ij} 为粘性应力分量; f_{x_i} 为 i 方向上重力体积力与外部体积力。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i T) = \sum \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: T 为温度; K 为流体的传热系数; c_p 为比热容; S_T 为粘性散耗项。

(4) 组分质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_s) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_s v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_s \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_s) \right) \quad (4)$$

式中: c_s 为 s 组分质量浓度; D_s 为该组分的扩散系数。

为求解 τ_{ij} 使方程组封闭,并计算处理隧道中出现的高应变率及流线弯曲程度较大的湍流流动问题,引入RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon u_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: μ_{eff} 为有效粘性系数; G_k 为紊动能生产项; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; $C_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 α_k 、 α_ε 为模型常数。

2 有限元模型与计算工况

2.1 有限元模型建立

跃龙门隧道是成兰铁路穿越龙门山断裂带与千佛山断裂带的控制性工程。其中3#横洞HD3K0+148段横洞净空尺寸为7.65 m(宽)×6.85 m(高),断面面积为47.68 m²。该段具有巷道狭窄,独头掘进长度长,通风压力大等特点,属于跃龙门隧道中的典型工况。掌子面附近涌水量约800 m³/d,围岩以炭质千枚岩为主,如图1所示。基于上述基本条件,建立如图2所示的有限元模型。

2.2 初始条件与边界条件

(1) 初始条件

掌子面处有毒有害气体初设浓度。施工隧道

爆破作业完成后,由于使用的岩石乳化炸药爆破过程属于化学变化,爆破后在掌子面附近会产生 CO、NO_x 等有毒有害气体,以及由爆炸波所引起的粉尘^[12]。由于该段隧道内湿度较大,除 CO 外其他物质在隧道空间内易发生物理吸附或化学反应,为简化模拟过程,采用 CO 稀释与排出情况来衡量隧道通风效果。根据爆生气体抛掷经验公式,掌子面处爆破产生的 CO 初始浓度可通过下式计算^[13]:

$$C = \frac{Gb}{LA} \quad (7)$$

式中: C 为 CO 的初始浓度; G 为爆破炸药用量, kg; b 为每千克炸药产生的 CO 量, m³/kg; $L = 15 + G/5$ 为爆生气体抛掷长度,即爆破后爆生气体弥漫区域的长度, m; A 为施工隧道断面面积, m²。

根据跃龙门隧道 3#横洞 HD3K0+148 爆破施工方案,一次爆破施工炸药用量约为 63 kg,炮烟抛掷长度为 27.6 m,通过式(7)可计算出 CO 平均初始浓度约为 900 mg/m³。



图 1 HD3K0+148 段掌子面现场及围岩

Fig. 1 HD3K0+148 section of the working face and surrounding rock

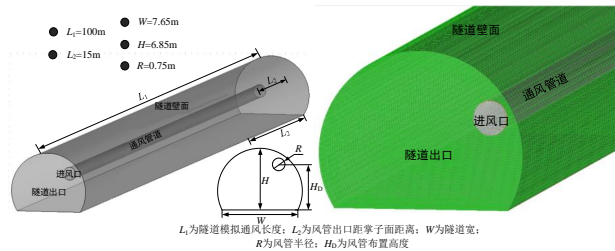


图 2 独头隧道有限元模型

Fig. 2 One ended tunnel finite element model

(2) 隧道边界条件

① 隧道壁面设为标准固壁边界,壁面粗糙度函数如下:

$$\Delta B = \frac{1}{K} \ln(1 + C_s K_s) \quad (8)$$

式中: K 为经验常数,取 0.4;跃龙门隧道 3#横洞已初次支护衬砌至 HD3K0+148 段,已衬砌支护段壁面为均匀砂粒表面,粗糙常数取 $C_{1s}=0.5$,粗糙颗粒高度取 $K_{1s}=0.09$;未支护段壁面为裸露的岩石表面,粗糙常数取 $C_{2s}=0.7$,粗糙颗粒高度取 $K_{2s}=0.3$ ^[14]。

② 风管进风口设为等速边界条件,掌子面配置一台 2×200 kW 型 SDF(B)-6-No18 通风机,可提供的风量为 5792 m³/min,,半径 $R=0.75$ m,出口风速为 13.2 m/s。

③ 隧道出口设为自由出口边界条件。隧道出口压力为 1 atm,除压力外所有流动参数法向梯度为 0。

2.3 工况设计

(1) 风管布设

依据《铁路隧道工程施工技术指南》(TZ204—2008),施工隧道压入式通风建议采用风管靠边拱腰布设,可采用中央拱顶布设、隧道中部布设、拐角布设。风管各布设方式见图 3,其中 A、B 为掌子面处 CO 浓度监测点,监测时段为爆破后通风 30 min 内掌子面附近 CO 浓度变化情况。

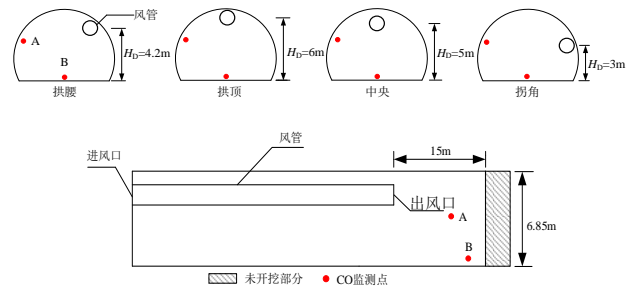


图 3 全断面法施工与通风示意

Fig. 3 Full-section construction and ventilation

(2) 隧道施工方法

不同隧道施工方法对 CO 浓度的扩散也有很大的影响。CO 扩散除现阶段采用的全断面法施工外,台阶施工法与下导洞超前施工法均适用于该段,台阶法施工与下导洞超前法施工布置见图 4 和图 5。因此以全断面法、台阶法与下导洞超前法为例,讨论风管靠边拱腰布设时,不同隧道施工方法对 CO 浓度分布特性的影响。

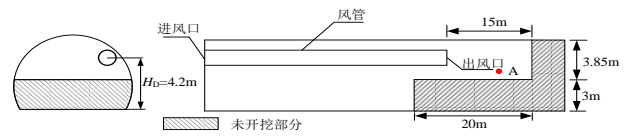


图 4 台阶法施工与通风示意

Fig. 4 Bench method construction and ventilation

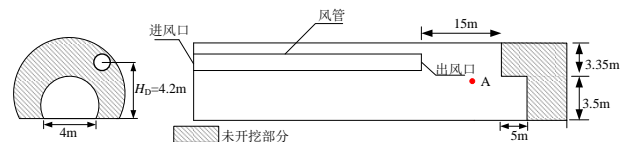


图 5 下导洞超前法施工与通风示意

Fig. 5 Advance bottom heading technology construction and ventilation

3 独头钻爆施工隧道压入式通风数值模拟结果分析

3.1 风管布设方式对CO扩散规律的影响

如图6所示为掌子面A、B处CO通风扩散浓度变化曲线。独头掘进隧道一次钻爆施工后,掌子面附近CO浓度变化可分为三个阶段。第一阶段:通风5 min,CO在新鲜射流空气稀释作用下自掌子面快速向隧道中部扩散,此时CO浓度下降最为迅速。第二阶段:通风5~15 min,掌子面附近残余CO在射流空气与隧道内部旋涡状风流作用下不断被稀释,

该期间内CO浓度下降速率不断减小,直至掌子面CO浓度降低至标准限值。第三阶段:通风15 min后,掌子面附近残余极少量的CO,此阶段内CO浓度下降速率逐步趋于0,直至掌子面附近CO完全稀释排除干净。当风管布设在拱顶时,A处CO浓度降低至标准限值所需的为588 s;而风管布设在隧道中部、拱腰处与拐角处时,分别需要786 s、847 s、738 s才可使CO浓度降低至标准限值。B处CO浓度降低至标准限值所需的为511 s;而风管布设在隧道中央、拱腰处与拐角处时,分别需要614 s、742 s、879 s才可使CO浓度降低至标准限值。

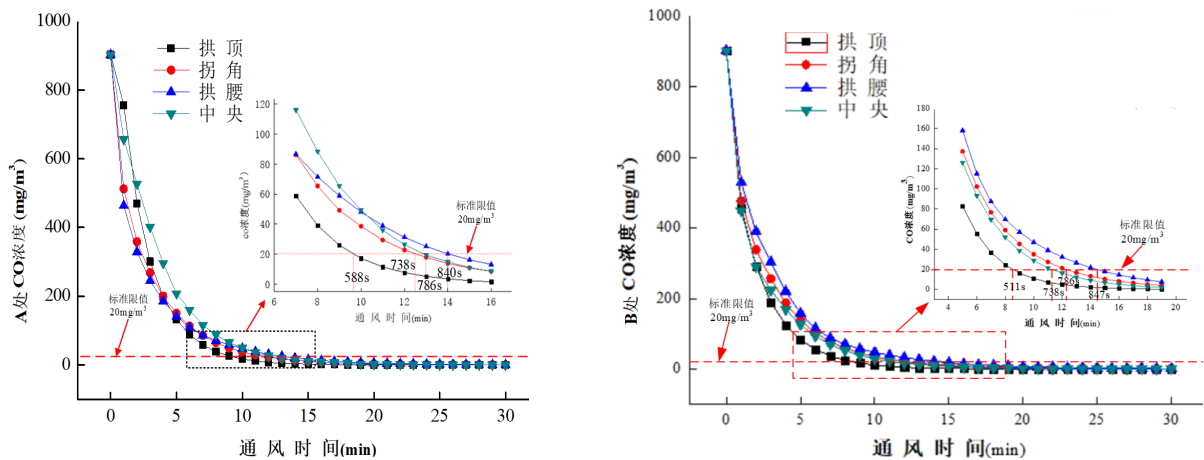


图6 爆破后掌子面CO通风扩散浓度变化曲线

Fig. 6 CO ventilation diffusion concentration curve at the point A and B of the face after blasting

由于不同风管布设条件下掌子面CO浓度可在900 s内达到标准限值 20 mg/m^3 ,故以掌子面通风300 s、600 s、900 s时隧道中轴面CO浓度分布情况分析CO浓度场时空演化规律,如图7所示。

当风管布设在隧道近壁拱腰处(如图7(a)、图8(a)),通风300s时,CO主要富集在距掌子面50~60 m处的空间内,距掌子面约70 m外空间内无CO气体,但在距掌子面60~70 m处的空间内CO有向隧道底部沉降趋势。同时由于风管布设于隧道一侧,在掌子面附近CO浓度分布不均匀。通风600 s时,CO高浓度区域已迁徙至距掌子面95~85 m处的空间内,且主要分布在隧道上方,同时在距掌子面85~65 m出的空间内赋存的CO浓度差异较大。通风900 s时,在距掌子面2 m前的空间内的CO浓度已经低于 20 mg/m^3 ,满足隧道施工要求。风管布设在隧道近壁拐角处时(如图7(b)、图8(b)),通风后的前600 s内,CO赋存状态与近壁拱腰布设时相似。通风900 s时,掌子面前25 m的空间内已是安全区域。

当风管布设在隧道近壁拱顶处(如图7(c)、图8(c)),通风300 s时,由于射流空气在掌子面处运动受阻,产生冲壁射流现象,导致在距掌子面约4~5 m的隧道中部空间内出现CO滞留,该区域内CO浓度略高于四周其他空间内的CO浓度。其余空间内CO赋存状态与近壁拱腰布设、近壁拐角布设相似。通风600 s时,掌子距面约19 m空间已经属于安全区范围。同时CO高浓度区域已迁徙至距掌子面80~90 m处的空间内。通风900 s时,掌子面前40 m空间内CO浓度均小于 20 mg/m^3 ,此时CO浓度最高处位于距隧道出口4~10 m的底部空间内,且最高浓度为 504 mg/m^3 。当风管布设在隧道中央处(如图7(d)、8(d))。通风900 s内CO赋存状态与近壁拱顶布设相似,但是由于风管与隧道拱顶的间距较大,使得CO在拱顶处滞留时间较长,不利于排出,当通风900 s时,隧道出口拱顶位置CO浓度为 644 mg/m^3 ,是隧道空间内最高浓度。

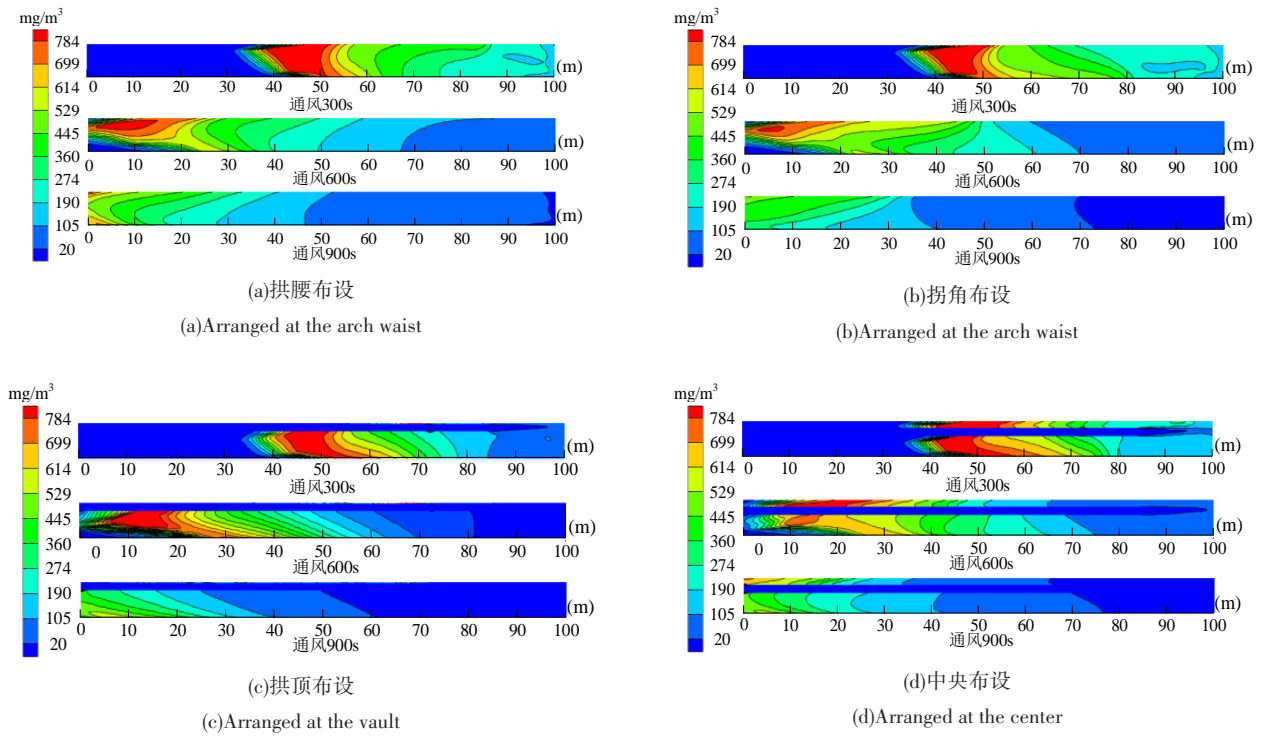


图 7 爆破后隧道内 CO 通风扩散浓度变化云图

Fig. 7 Cloud image of CO ventilation diffusion concentration change after blasting

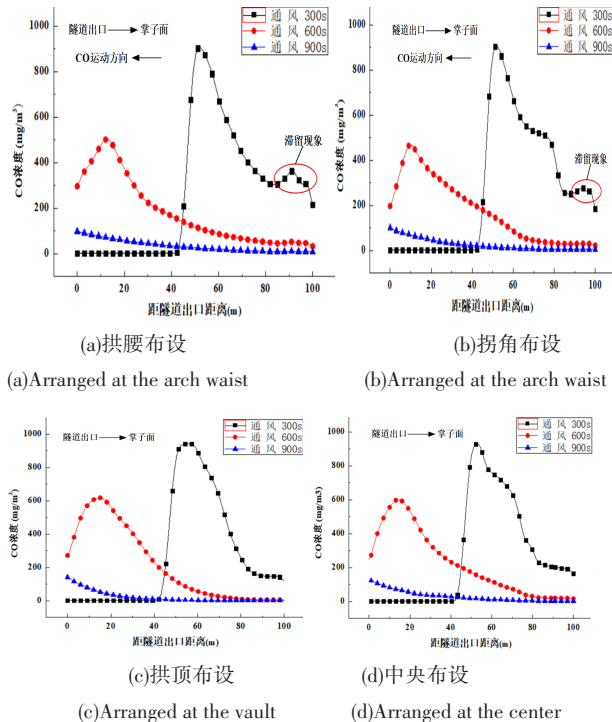


图 8 隧道 z=1.5 m 中轴线 CO 浓度变化曲线

Fig. 8 Tunnel z=1.5 m central axis CO concentration curve

对比各风管布置方式下的 CO 浓度分部与变化情况,由于 CO 密度略小于空气易聚积于隧道底部,当风管布置在隧道近壁拱顶处时掌子面 CO 浓度降低至标准限值所需时间最短,隧道内 CO 排出速率

最快,故将风管布置在此处,有利于隧道施工与施工人员的职业健康。

3.2 隧道施工方法对 CO 扩散特性的影响分析

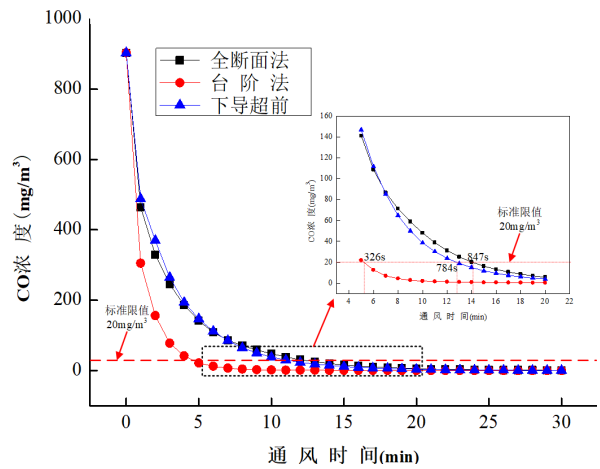


图 9 爆破后掌子面 A 处 CO 通风扩散浓度变化曲线

Fig. 9 CO ventilation diffusion concentration curve at the point A of the face after blasting

图 9 所示为不同施工方法下掌子面 A 处 CO 浓度变化情况,可知台阶法施工通风在 326 s 时 A 处 CO 浓度降低至标准限值 20 mg/m³,全断面法施工与下导洞超前法施工通风则分别需要 874 s、784 s 方可使 CO 浓度降低至标准限值。台阶法施工所需通

风时间短于全断面法施工与下导洞超前法施工,是其上台阶段空间较小,造成风流对该段掌子面的冲击更强,有利于掌子面附近CO的稀释排出。

对比全断面法施工与下导超前法施工通风,在通风初始阶段两种施工方法A处CO浓度下降相同,后因掌子面风流随着通风时间的增加不断涌入下导超前段,使得下导超前法施工在部分通风时间段内掌子面A处CO浓度下降趋势缓于全断面法,在持续通风后下导超前段风流回流至掌子面,促进了A处CO的稀释,导致掌子面CO浓度下降趋势略快于全断面法。

图10所示为隧道施工方法对CO扩散特性的影

响。采用台阶法施工时(如图10(b)),通风300s时,CO主要富集在距掌子面50~60m处的空间内,且CO最高浓度小于其他两种施工方法,同时上台阶段掌子面已出现安全区。通风600s时,上台阶段掌子面空间的CO浓度已基本满足施工需求,但下台阶掌子面CO浓度高于周边空间。通风900s时,在上台阶掌子面安全空间扩张较小,上台阶段掌子面CO浓度有所降低但任不满足施工需求。采用下导洞超前法施工时(如图10(c)),通风前600s内的CO赋存状态与全断面法施工相似,但是在通风至900s时,掌子面前25m空间的大部分区域内CO浓度低于20 mg/m³。

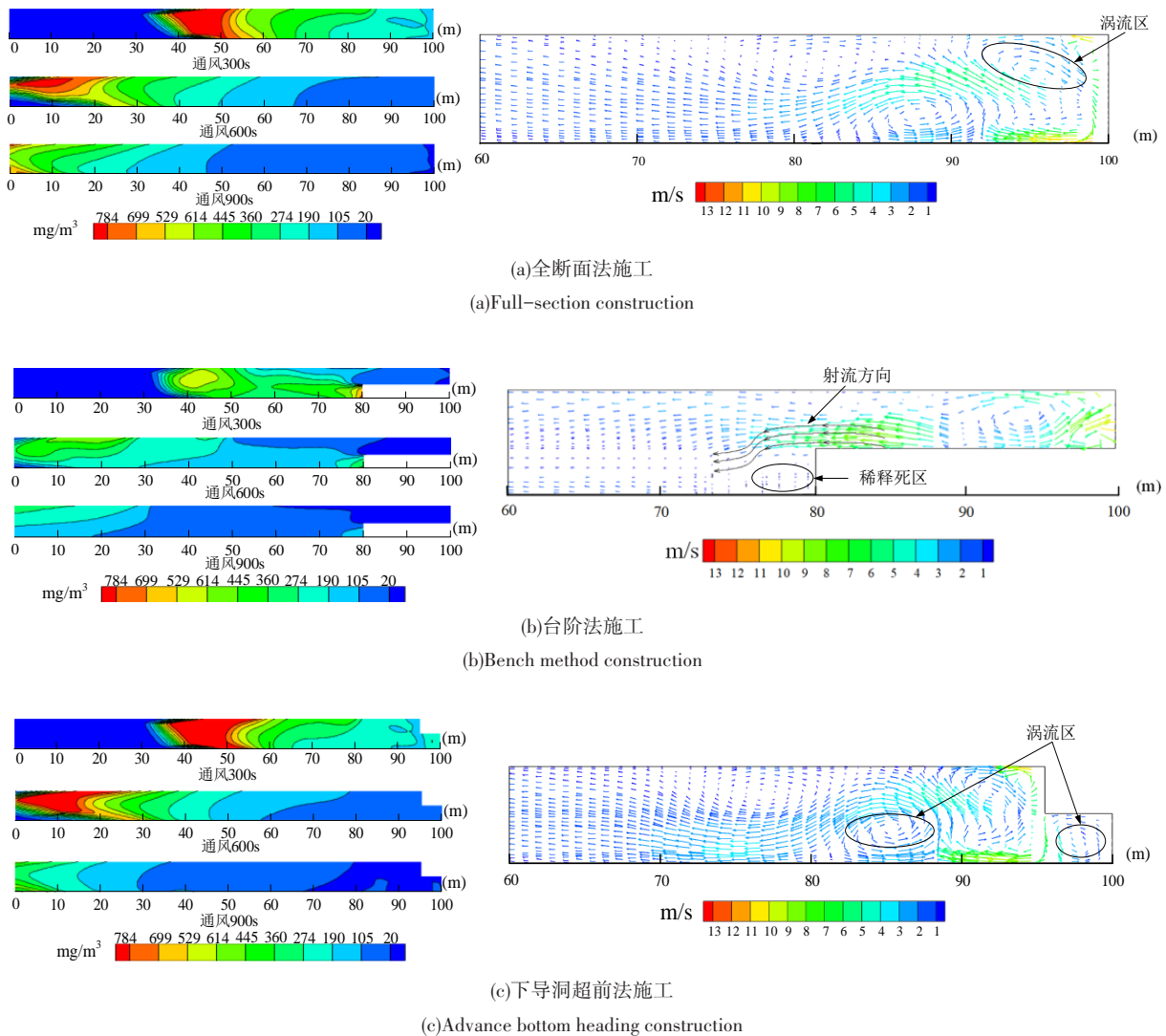


图10 爆破后隧道通风CO扩散浓度变化云图与掌子面速度矢量图

Fig. 10 CO ventilation diffusion concentration change in tunnel after blasting cloud map and working face speed vector

全断面法施工通风900s后最高浓度为476 mg/m³,台阶法施工与下导洞超前法施工

则分别为336 mg/m³、420 mg/m³。对比三种施工方法,台阶法施工使得下台阶掌子面空间存在

稀释死区,但隧道内的CO浓度整体低于全断面法施工。采用下导洞超前法施工通风后期的掌子面空间大部分区域内CO浓度低于 20 mg/m^3 。综上所述,台阶法施工通风对CO稀释效果最佳。

由于不同施工方法下的隧道空间结构不同,使得隧道内风流结构发生改变,最终导致对掌子面CO稀释效果的差异。因此,有必要对三种施工方法下掌子面附近风流结构的差异性进行分析。由图10可知,各施工方法下掌子面处CO赋存状态的差异性是由掌子面前涡流所导致的。采用全断面法施工时(如图10(a)),掌子面前 $2\sim 7\text{ m}$ 处存在涡流区,使得通风前期掌子面前出现CO滞留现象。采用台阶法施工时(如图10(b)),射流空气冲击上台阶底面后改变方向,其运动轨迹成抛物线状向隧道出口处运动,导致下台阶出现稀释死区。采用下导洞超前法施工时(如图10(c)),下导洞与掌子面前均有涡流区,在通风阶段使得这两个部位附近都存在CO滞留现象。

4 结论

通过采用,对跃龙门隧道3#横洞HD3K0+148段爆钻施工后CO浓度变化及扩散特性进行了模拟,得出的主要结论如下:

(1) 基于湍流流动Navier-stokes方程和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立了独头钻爆施工隧道压入式通风计算模型;通过建立跃龙门隧道3#横洞HD3K0+148段有限元模型,实现了风管布设方式与隧道施工方法下CO动态扩散模拟。

(2) 通过比较风管布设方式,当风管近壁布设于隧道拱顶处的通风效果最佳。此时掌子面附近CO在通风600 s内浓度降低至浓度限值。同时拱顶布设时,CO更易聚集于隧道底部,使得隧道内CO分布更为均匀,可以避免局部空间内CO滞留现象。

(3) 通过比较隧道施工方法,当采用台阶法施工下的隧道结构更利于隧道内的CO稀释排出。该方法在通风350 s内上台阶掌子面CO浓度降低至标准限值,且整个隧道空间内的CO浓度要低于相同通风时段内的气体两种施工方法。此外采用全断面法施工与下导洞超前法施工时,其产生的涡流区距掌子面较近,不利于掌子面附近空间内的CO稀释。

参考文献(References)

- [1] 于飞飞,张娜,张宪堂,等. 水平层状岩隧道炮孔参数优化及爆破成形研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 63-69.
- [1] YU Fei-fei, ZHANG Na, ZHANG Xian-tang, et al. Blasting parameters optimization and blasting forming of horizontal layer rock tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1): 63-69. (in Chinese)
- [2] 苏利军, 卢文波. 地下巷道钻爆开挖过程中炮烟扩散及通风[J]. 爆破, 2000, 17(1): 1-6.
- [2] SU Li-jun, LU Wen-bo. Study on diffusion of blasting fumes and ventilati on technique during const-ruction of underground tunnel [J]. Blasting, 2000, 17(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] 《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] Editorial Department of China Journal of Highways. Review on china's tunnel engineering research: 2015 [J]. China Journal of High-way and Transport 2015, 28(5): 1-65. (in Chinese)
- [4] 谭信荣, 陈寿根, 周泽林. 钻爆法施工隧道空气质量现场测试[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 567-572.
- [4] TAN Xin-rong, CHEN Shou-gen, ZHOU Ze-lin. Air quality field testing in tunnel construction with t-he drilling and blasting method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 567-572. (in Chinese)
- [5] 张欣, 黄志义, 张天航, 等. 带出口匝道城市隧道通风特性比尺模型试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 123-131.
- [5] ZHANG Xin, HUANG Zhi-yi, ZHANG Tian-hang, et al. Scale model tests for ventilation characteristics of urban tunnels with off-ramps [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 123-131. (in Chinese)
- [6] 杨立新. 隧道钻爆排烟基于PC-STEL标准的风量计算方法[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 92-96.
- [6] YANG Li-xin. Air volume calculation method for discharge of smog induced by tunnel drilling and blasting based on PC-STEL standard [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 92-96. (in Chinese)
- [7] 曹杨, 纪洪广, 周启明. 掘进巷道爆破后排烟时间计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 135-140.
- [7] CAO Yang, JI Hong-guang, ZHOU QI-ming. Calculation of fume-drainage time of tunnel after blasting [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 135-140. (in Chinese)
- [8] 陈赞成, 杨鹏, 吕文生, 等. 高寒矿井穿脉巷道掘进炮烟扩散规律的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,
- [1] 于飞飞, 张娜, 张宪堂, 等. 水平层状岩隧道炮孔参

- 2011, 33(5):521-525.
- [8] CHEN Zhan-cheng, YANG Peng, LV Wen-sheng, et al. Numerical simulation on the diffusion law of blasting fume during roadway tunneling across a vein in an alpine mine [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 521-525. (in Chinese)
- [9] 张 恒, 林 放, 孙建春, 等. 基于典型壁面粗糙模型的隧道施工通风效果CFD分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5): 58-65.
- [9] ZHANG Heng, LIN Fang, SUN Jian-chun, et al. CFD analysis of tunnel construction ventilation effect based on typical wall roughness model [J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 58-65.
- [10] 南春子, 张文辉, 赵 晓, 等. 复杂洞室群施工期通风有害气体扩散数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(8): 993-998. (in Chinese)
- [10] Chun-ziNAN, ZHANG Wen-hui, ZHAO Xiao, et al. Numerical simulations of ventilation to remove noxious gases during excavation of complicated tunnel [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(8): 993-998. (in Chinese)
- [11] 曹正卯, 杨其新, 郭 春. 高海拔地区铁路隧道施工期有害气体运移特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3948-3957.
- [11] CAO Zheng-wei, YANG Qi-xin, GUO Chun. Migration characteristics of poisonous gas during construction stage in railway tunnels at high altitude areas [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(11): 3948-3957. (in Chinese)
- [12] 陶 明, 赵华涛, 李夕兵, 等. 液态CO₂相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(2): 41-49.
- [12] TAO Ming, ZHAO Hua-tao, LI Xi-bing, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO₂ phase change fracturing and explosive rock fracturing [J]. Blasting, 2018, 35(2): 41-49. (in Chinese)
- [13] 肖赵谦, 邢健宝, 郝建财. 特长隧道长斜井进洞施工通风设计[J]. 公路, 2018, 63(12): 340-344.
- [13] XIAO Zhao-qian, XING Jian-bao, HAO Jian-cai. Ventilation design of long inclined shaft tunneling in extra long tunnel [J]. Highway, 2018, 63(12): 340-344. (in Chinese)
- [14] 张云鹏, 孔令华. 采场爆破炮烟扩散规律的Fluent数值模拟[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(3): 29-31.
- [14] ZHANG Yun-peng, Lin-huaKON. Numerical simulation on the diffusion law of blasting-fume with the use of fluent in stope [J]. Chemical minerals and processing, 2017, 46(3): 29-31(in Chinese)
- [15] LBEN Ramoul. Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure models' 2019 [C]//19 Environmental Fluid Mechanics: 379.

英文编辑:陈东方

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先通过知网以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。