

矿井智能巡检车CO传感器搭载位置优化

张晋瑞¹, 姚锡文¹, 许开立¹, 孙修²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司 焦家金矿, 山东 烟台 261441)

摘要: 为提高矿井智能巡检车CO体积分数监测数据的可靠性,通过运用计算流体动力学软件对山东焦家金矿-630 m掘进巷道的风流分布及CO体积分数时空演化规律进行了分析. 研究表明,风筒出口至掌子面区段风流状态不稳定,易产生扰动气体体积分数分布的涡旋;在自身性质及边界层流影响下,CO体积分数峰值多分布于巷道顶部,CO传感器应搭载于车体较高位置;衰减段期间巷道两侧CO体积分数变化不稳定,智能巡检车行进时应位于巷道中间附近. 与某掘进巷道中CO体积分数随通风时间的衰减变化进行对比,验证了模拟结果的准确性.

关键词: 矿井智能巡检车;CO传感器;数值模拟;掘进巷道;安全工程

中图分类号: X 936 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0721-08

Optimization of CO Sensor Carrying Position of Mine Intelligent Inspection Vehicle

ZHANG Jin-rui¹, YAO Xi-wen¹, XU Kai-li¹, SUN Xiu²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining Industry (Laizhou) Co., Ltd., Yantai 261441, China. Corresponding author: YAO Xi-wen, E-mail: yxw_20061005@126.com)

Abstract: To improve the reliability of CO volume fraction monitoring data collected by mine intelligent inspection vehicles, the wind flow distribution and the spatial-temporal evolution law of CO volume fraction in the excavation roadway at the -630 m level of Jiaojia Gold Mine in Shandong province are analyzed by using a computational fluid dynamics (CFD) software. The study results show that the wind flow in the zone between the ventilation duct's mouth and the heading face is unstable, leading to the formation of the vortices that disrupt the volume fraction distribution of gas. The CO transducer should be carried as high as possible in the car body because the CO volume fraction peak is mostly at the top of the roadway under the effect of self-characterization and laminar flow near the wall. The variation of CO volume fraction on both sides is unstable during the attenuation section, thus the inspection vehicle should be put in the middle of the roadway when travelling. The simulation results are validated by comparing the attenuation variation of CO volume fraction with ventilation time in an excavation roadway.

Key words: mine intelligent inspection vehicle; CO sensor; numerical simulation; excavation roadway; safety engineering

一氧化碳(CO)作为掘进巷道爆破作业后主要的毒害气体产物^[1],因理化性质较NO等气体更为稳定,且体积分数大小可用来判断工作人员是否可以重新返回工作面,所以CO常被作为巷

道中有毒有害气体运移规律的研究对象^[2-3].考虑到毒害气体体积分数会随时空不断变化,所以进行峰值监测是防止人员中毒窒息的重要举措.为提升CO体积分数峰值的监测精度,相关标准

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001300).

作者简介: 张晋瑞(1998-),男,山西临汾人,东北大学硕士研究生;姚锡文(1987-),男,山东五莲人,东北大学副教授,博士生导师;许开立(1965-),男,山东郓城人,东北大学教授,博士生导师.

对定点式 CO 传感器的布设参数提出了明确要求,其中规定 CO 传感器距巷壁不小于 0.2 m,距顶板不大于 0.3 m^[4],而这些规定主要源于工程实际经验.此外,事故的发生常会对通信系统造成影响,从而导致传感器监测到的浓度峰值数据无法正常收集^[5].地下非煤矿山智能巡检车可实时向地面传回车体所在区域及移动式传感器所在高度的气体浓度数据,解决事故发生时空受限的问题^[6],因此有必要基于气体浓度时空分布规律对移动式气体传感器搭载高度及车体行进位置进行研究.

掘进巷道一般采用压入式通风^[7],因工作环境恶劣常会发生各种事故.Torno 等^[8]建立了一个压入式通风条件下的掘进巷道模型,通过将模拟结果与现场实测的气体浓度数据进行对比,验证了计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术在预测 CO 气体时空演化规律上的可行性,得到了毒害气体的稀释数学模型.Huang 等^[9]通过数值模拟对通风作业开始后的 CO 气体质量浓度时空分布规律进行了研究,发现气体质量浓度随时间的变化曲线类似于高斯分布,并结合此特性给出了 CO 质量浓度与扩散系数的计算方法.Li 等^[10]结合现场实测与数值模拟对一大型掘进巷道爆破后的炮烟扩散规律进行了研究,结果表明 CO 比粉尘颗粒需要更长的通风时间才能达到国家标准要求.基于现场测试的 CO 浓度随时间变化数据,Torno 等^[11]通过数值模拟建立了 CO 气体的 4 维运移模型.陈宝智等^[12]对掘进巷道压入式通风下的风流结构及其排尘作用进行了试验研究,验证了射流与二次循环流的存在.在传感器布设方面,Cohen 等^[13]为提高矿山监测系统的精度,提出了一系列定点式风速传感器以及气体传感器布设位置的布设建议,并根据相关实验给出了传感器位置优化的步骤.罗周全等^[14]对竖井掘进爆破产生的 NO₂, CO 气体进行了数值模拟,通过研究气体的时空演化规律实现了有毒有害废气的有效监测与控制,为 CO 及 NO₂ 传感器在竖井中的科学布设提供了参考.Si 等^[15]基于正交实验与无量纲方法对多个巷道模型进行了数值模拟,通过模拟结果与现场实测数据分析了矿用传感器的最佳布设高度,进而提高了传感器监测数据的可靠性.Murphy 等^[5]对现有矿用巡检车进行了综合研究,论证了其代替人工在矿山进行救援与恢复工作的可行性,并通过重要度分析提出了传感器在矿用巡检车上的研究方向.

为了防止事故的发生, Ma 等^[16]基于巡检车的实时采集数据对巷道空间内的毒害气体浓度进行了预测.Fu 等^[17]从实际应用角度出发,对适用于竖井爆破后的智能监测机器人进行了整体设计与研究,但未结合应用场景对毒害气体传感器的布设位置进行优化.Shen 等^[18]为实现高效的井下安全管理,对搭载有多种传感器的巡检车进行了研究与分析.上述研究多集中于 CO 等毒害气体时空扩散变化规律、定点式传感器布设位置选取以及智能巡检车在矿山的应用上,关于智能巡检车移动式 CO 传感器搭载高度及车体最佳行进位置的研究较少.

本文基于焦家金矿-630 m 中段上一条掘进巷道建立几何模型,应用 Fluent 计算流体力学软件开展掌子面附近风流分布及巷道内 CO 时空演化规律的数值模拟研究,通过模拟结果对智能巡检车移动式 CO 传感器的搭载高度及车体在巷道内的行进位置进行优化,以期提升非煤矿山精准监测、精确预警 CO 气体体积分数峰值的水平,降低中毒窒息事故的发生率.

1 数值模型

1.1 基本假设

- 1) 巷道内气流由连续分布的质点组成,将其视为不可压缩流体且不考虑流体黏性做功引起的热耗散^[19];
- 2) 巷道壁面绝热且不存在漏风的情况;
- 3) 巷道中的 CO 只来源于爆破作业且与炮烟中其他组分不发生化学反应.

1.2 控制方程

本研究涉及的控制方程组中包括连续性方程、能量方程、动量方程(N-S 方程)、组分方程、紊流动能方程及紊流动能耗散率方程,各方程张量形式的表达式如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_i \mathbf{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \left(\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + O_i. \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$ 为 i, j 方向上的速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x_i, x_j 为 i, j 方向上的位移分量, m ; t 为时间, s ; p 为时均压力, Pa ; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; k 为紊流动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$;

μ_c 为表观黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\mu_c = \mu + \mu_t$, μ 为层流动力黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$, μ_t 为紊流动力黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; O_i 为动量源项, $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$.

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_i T)}{\partial \mathbf{x}_i} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}_i} \right]. \quad (3)$$

式中: T 为温度, K ; Pr 为充分紊流时的普朗特数; σ_T 为常数, $\sigma_T = 0.9$.

组分方程^[20]

$$\frac{\partial(\rho Y_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_j Y_n)}{\partial \mathbf{x}_j} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \right) \frac{\partial Y_n}{\partial \mathbf{x}_j} \right) - W. \quad (4)$$

式中: Y_n 为组分 n 的质量分数; σ_Y 为常数, $\sigma_Y = 1.0$; W 为时均反应率, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$.

紊流动能方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_j k)}{\partial \mathbf{x}_j} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \left(\alpha_k \mu_c \frac{\partial k}{\partial \mathbf{x}_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon. \quad (5)$$

式中: α_k 为常数, $\alpha_k = 1.39$; G_k 为紊流动能 k 的产生项; ε 为紊流动能耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$.

紊流动能耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_j \varepsilon)}{\partial \mathbf{x}_j} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_c \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{x}_j} \right) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G_k + C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon). \quad (6)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}. \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt{2E_{ij} \cdot E_{ij}} \frac{k}{\varepsilon}. \quad (8)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (9)$$

式中: $\alpha_\varepsilon, \beta, \eta_0, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为常数, $\alpha_\varepsilon = 1.39, \beta = 0.012, \eta_0 = 4.377, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68$; E_{ij} 为反映主流的时均应变率项.

μ_t 根据如下公式进行计算:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

式中, C_μ 为常数, $C_\mu = 0.0845$.

1.3 初始条件

爆破作业发生在掘进巷道的掌子面, 炮烟的抛掷长度与爆破方式和炸药使用量有关. 当电雷管起爆时, 炮烟的抛掷长度 l 为^[9]

$$l = 15 + \frac{q}{5}. \quad (11)$$

式中, q 为单次爆破的炸药使用量, kg .

爆破后 CO 的质量分数 C_0 为

$$C_0 = \frac{28qV}{29lA - qV}. \quad (12)$$

式中: V 为每千克炸药爆破后产生的 CO 气体体积, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; A 为巷道横截面积, m^2 .

1.4 边界条件

风筒的出口为计算域的进口边界. 假设风筒出口断面上风速分布均匀, 则风筒出口速度 v_c 为

$$v_c = \frac{Q}{S}. \quad (13)$$

式中: Q 为风筒的压入风量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; S 为风筒横截面积, m^2 .

计算域边界紊流动能 k_b 与紊流耗散率 ε_b 的计算公式为^[20]

$$k_b = \alpha_b v_c^2. \quad (14)$$

$$\varepsilon_b = \frac{C_\mu k_b^{1.5}}{0.03R}. \quad (15)$$

式中: α_b 为常数, $\alpha_b = 0.005$; R 为风筒半径, m .

掘进巷道出入口为计算域的出口边界, 其相对压力为 0, 变量 u_i, k, ε 分别满足:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial k}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

巷道的掌子面以及边壁均为无滑动壁面边界. 因重整化群 (renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 紊流模型只对充分发展的紊流有效, 对于距壁面无量纲长度值 y^+ 较小的区域无法使用紊流动能方程与紊流动能耗散率方程对 μ_t 求解, 因此近壁区采用标准壁面函数法封闭方程组.

2 模拟验证

以某一大型地下水封洞库一期通风工程的 1# 掘进巷道为验证对象^[21]. 该巷道宽 8.5 m, 高 7.5 m, 掘进巷道内采用压入式通风, 风筒直径 2.2 m, 风筒出口距掌子面 40 m, 压入风量为 $2\ 370\ \text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 炮烟抛掷距离为 50 m, CO 初始体积分数为 $3\ 376.6 \times 10^{-6}$. 综合考虑计算成本与模拟目的, 截取模型前 70 m 为验证对象. 因模型具有对称特性, 只需针对整个流动区域的一半进行数值分析^[22]. 掘进巷道的几何模型如图 1 所示, 网格划分后的模型如图 2 所示.

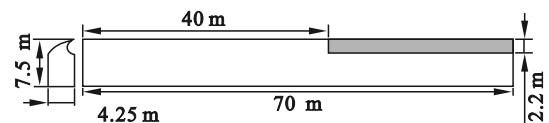


图 1 施工巷道几何模型

Fig. 1 Geometry model of the construction roadway

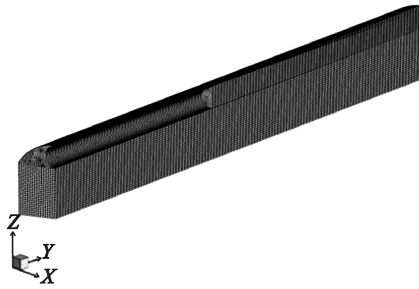


图2 网格划分后的施工巷道

Fig. 2 Construction roadway after grid discretization

图3与图4分别为距掌子面45 m及35 m断面上CO平均体积分数随通风时间变化的模拟结果.因两断面均位于炮烟抛掷区内,所以爆破作业发生后CO体积分数瞬间达到最大值.通风作业开始后,在新鲜风流的稀释与排送作用下,各断面CO体积分数随时间迅速下降,其衰减趋势与文献[21]基本吻合.除此之外,由图4可得,CO体积分数在4~10 s内有小幅度提升,这是因为通风初期巷道局部区域会形成影响CO扩散的涡流,残留的CO会在内部压力趋于平衡后再次较为集中地向出口扩散.通过与某地下水封洞库CO体积分数衰减曲线的对比,验证了本文数值模拟结果的可靠性.

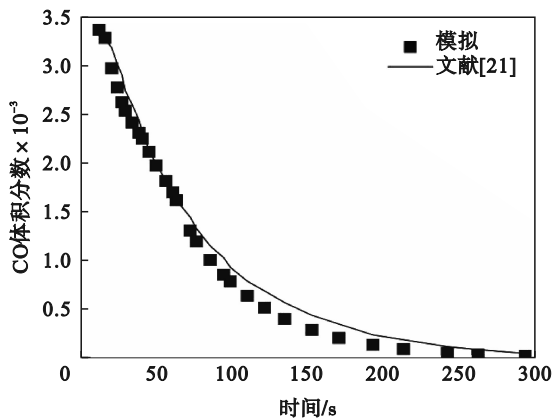


图3 距掌子面45 m模拟与文献结果对比

Fig. 3 Comparison between the results of simulation and literature at 45 m from the heading face

3 数值模拟过程与结果分析

3.1 工程概况与几何模型

以焦家金矿-630 m中段上一长度为90 m的掘进巷道为研究对象.该巷道横截面为三心拱形,巷道壁高2.80 m,拱高0.95 m,宽3.95 m.巷道内采用经济高效的压入式通风,其风筒半径0.30 m,风筒出口距掌子面10 m,爆破后压入风速为 $17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,单次炸药用量为40 kg.巷道横截面与三维模型如图5所示.

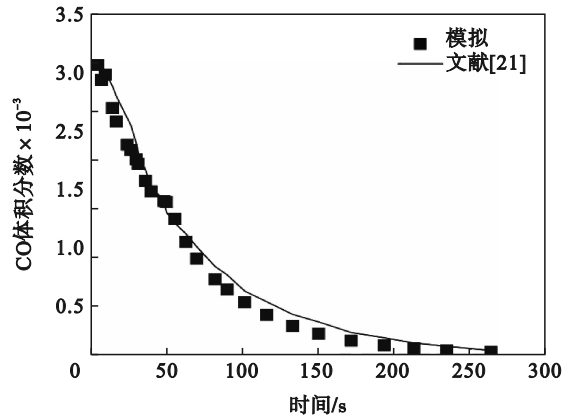


图4 距掌子面35 m模拟与文献结果对比

Fig. 4 Comparison between the results of simulation and literature at 35 m from the heading face

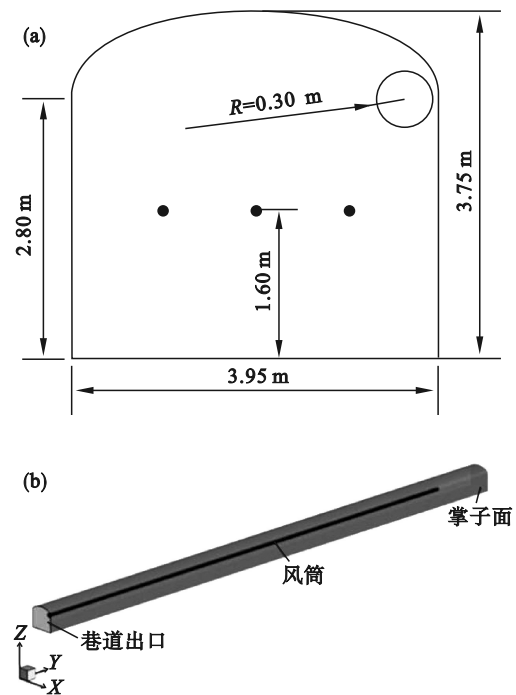


图5 掘进巷道截面与三维模型

Fig. 5 Cross section and 3D model of the excavation roadway

(a)—巷道横截面;(b)—巷道三维模型.

3.2 网格划分与边界条件

将巷道几何模型导入Gambit前处理软件中进行网格划分.考虑到风筒出口处速度梯度较大,因此需对其附近的网格进行适当加密^[23],模型最终网格数为470 700.将网格文件导入求解器中检查,无负体积生成,网格正交质量为0.61,满足求解器相关要求^[24].其他模拟参数的设定如表1所示.

3.3 掌子面附近风流分布分析

风筒出口到掌子面区段雷诺数远大于下临界值,因此风流的流动轨迹极其复杂.图6为风筒出口到掌子面区域的风流流动方向图.由图可

表 1 Fluent 数值模拟参数设定
Table 1 Fluent numerical simulation parameters settings

边界条件	参数设定
紊流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)	9.81
时间模型	非稳态
壁面函数	标准壁面函数
压力速度耦合方法	压力隐式算子分裂法
能量方程	开启
温度/K	297
组分运输模型	CO-air
CO 扩散系数/($m^2 \cdot s^{-1}$)	1.9×10^{-5}
入口边界条件	速度入口
入口速度/($m \cdot s^{-1}$)	17.7
紊流动能/($m^2 \cdot s^{-2}$)	1.57
紊流耗散率/($m^2 \cdot s^{-3}$)	19.6
出口边界条件	压力出口
出口表压/Pa	0
CO 初始质量分数	0.004 8

知,自风筒出口射出的新鲜气流不同于自由射流,其断面扩张到一定程度后会在巷道边壁的影响下逐渐收缩,从而形成贴壁射流.到达掌子面附近后,其会受空间影响形成冲击射流并开始附壁回转.此后,部分回流会在局部负压作用下随射流重新回到掌子面,剩余部分则沿巷道向出口处流动,且回流区面积约为射流区的 2 倍.

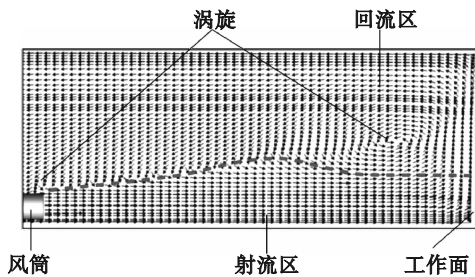


图 6 掌子面附近风流分布
Fig. 6 Wind flow distribution near the heading face

在卷吸析出与康达效应的影响下^[9],射流与回流的分界处产生了两处明显的涡旋,其中一处临近掌子面,另一处则在风筒出口附近,涡旋区的存在会严重影响毒害气体的稀释与排出效率,有可能导致中毒窒息事故的发生.

3.4 传感器搭载高度及巡检车行进位置优化

将距巷道出口 20, 40, 60 及 80 m 的横截面分别定义为截面 A, 截面 B, 截面 C 及截面 D. 图 7 为各横截面 CO 平均体积分数随时间的变化曲线. 因爆破发生时间短, 反应剧烈, 毒害气体可瞬间

在炮烟抛掷区内与空气均匀弥散混合, 所以除截面 D 外, 其余截面的 CO 体积分数变化均由 3 个时段构成, 分别是零时段、上升段以及衰减段^[25], 且衰减段持续时间约占整个过程的 90%. 零时段表示 CO 还未被风流携带到该截面. 上升段说明 CO 主气团在逐渐向该截面处靠近. 随后 CO 气体会不断从巷道出口处排出, 气体体积分数开始衰减. 因此, 若在非零时段测得巷道出口处的 CO 体积分数小于 24×10^{-6} , 便可认为巷道内 CO 体积分数已小于职业接触限值^[9], 此巷道模型中 CO 体积分数在通风 604 s 后达到了职业接触标准要求.

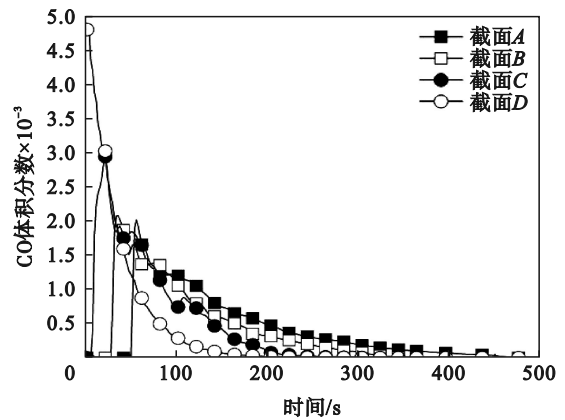


图 7 CO 平均体积分数变化曲线
Fig. 7 CO mean volume fraction variation curves

图 8 与图 9 分别为通风开始后截面 A 和截面 C 的 CO 体积分数分布云图. 由图可知, 不同时空下气体体积分数的峰值几乎都位于巷道顶部, 这是由 CO 密度较空气轻且巷道边壁处有速度较缓的层流边层共同作用所致. 对图 9c 分析可得, 截面 C 在 $t=200$ s 时截面右下区域 CO 体积分数较中部大, 这进一步证明毒害气体浓度峰值监测的必要性. 因为巷道内气体的惯性远大于黏性力, 毒害气体在向巷道出口运移过程中极有可能受到紊流的扰动, 使得分布特征发生变化, 所以对巷道内毒害气体浓度的监测不能仅局限于人体呼吸带区域, 还应充分考虑紊流的影响. 值得注意的是, 尽管紊流的出现会干扰毒害气体原有的浓度分布特征, 但巷道截面的浓度峰值仍出现在巷道顶部, 这与已有的测试结果^[26]基本一致.

对图 8 和图 9 分析可知, 随着通风作业的进行, 截面 A 体积分数峰值区所占高度从通风后 100 s 的 0.88 m 降至通风后 300 s 的 0.32 m, 截面 C 从通风后 100 s 的 0.83 m 降至 0.08 m, 且高度方向上的体积分数梯度逐渐趋缓, 所以当巡检车在巷道内行进时需适时调整 CO 传感器的所在高

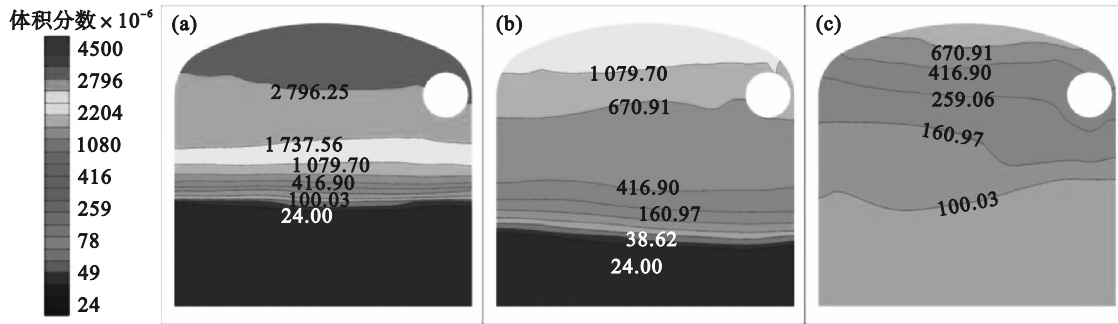


图8 截面A不同时段CO体积分数分布云图

Fig. 8 CO volume fraction distribution nephogram of cross section A (a)一通风后 100 s; (b)一通风后 200 s; (c)一通风后 300 s.

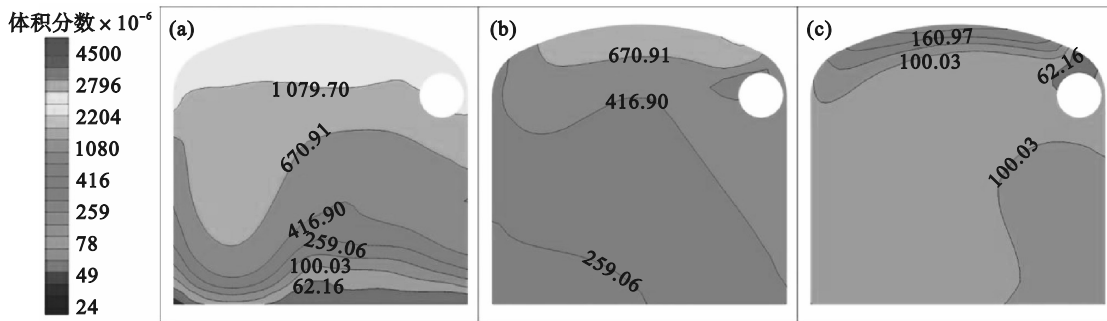


图9 截面C不同时段CO体积分数分布云图

Fig. 9 CO volume fraction distribution nephogram of cross section C (a)一通风后 100 s; (b)一通风后 150 s; (c)一通风后 200 s.

度,以此获得更加准确的体积分数峰值数据.

通过对CO体积分数时空分布特性的分析可知,CO传感器须尽可能安装在车体较高且贴近巷道顶部的位置.对于车体较低的巡检车可通过增设伸展式机械臂来灵活调整CO传感器的监测高度,进而增强体积分数峰值监测数据的有效性,其示意图如图10所示.

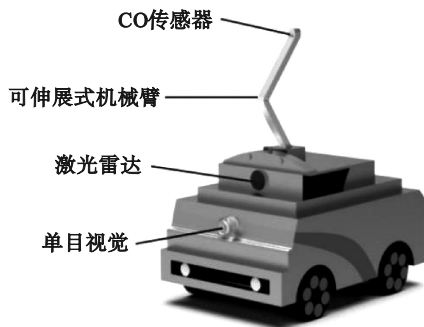


图10 装配有机械臂的巡检车

Fig. 10 Inspection vehicle equipped with mechanical arm

为分析爆破后掘进巷道内靠近壁面两侧及中间位置的CO体积分数变化趋势,分别在截面A、截面B、截面C及截面D上布设3个体积分数实时监测点,布设高度 $h=1.6\text{ m}$ (人体呼吸带高

度),各体积分数监测点间距为 0.9875 m ,具体分布位置如图5a所示.

图11为自爆破后各体积分数监测点的CO体积分数变化趋势.由图可知,截面A、截面B及截面C的零时段持续时间分别为 54 s 、 30 s 、 9 s .在零时段及上升段期间,各监测面上不同监测点所测得的CO体积分数数值基本相等.这是因为通风初期各截面CO体积分数分布均匀,风速大小的差异难以产生较大的影响.一旦进入衰减段,同截面下各监测点的CO体积分数便开始出现较大差距,但整体上体积分数峰值在巷道两侧之间不断交替.比如,图11中截面C在 $31\sim 41\text{ s}$ 时, $x=0.9875\text{ m}$ 处体积分数最大, $x=2.9625\text{ m}$ 处体积分数最小.当通风时间为 $42\sim 55\text{ s}$ 时, $x=2.9625\text{ m}$ 处体积分数反而最大, $x=0.9875\text{ m}$ 处体积分数最小,且在后续较长时间内都反复呈现出上述规律.

因CO体积分数峰值持续在巷道两侧交替出现,所以即便在当前时空下测得了体积分数峰值,也很难确保后期测得的CO体积分数仍为峰值.相较于两侧,巷道中间位置CO体积分数变化更为稳定.此外,井下巷道壁面凹凸不平,若巡检车靠近两侧行进,车体搭载的部分元件极有可能受到壁面的刮碰,从而影响巡检车的正常工作.

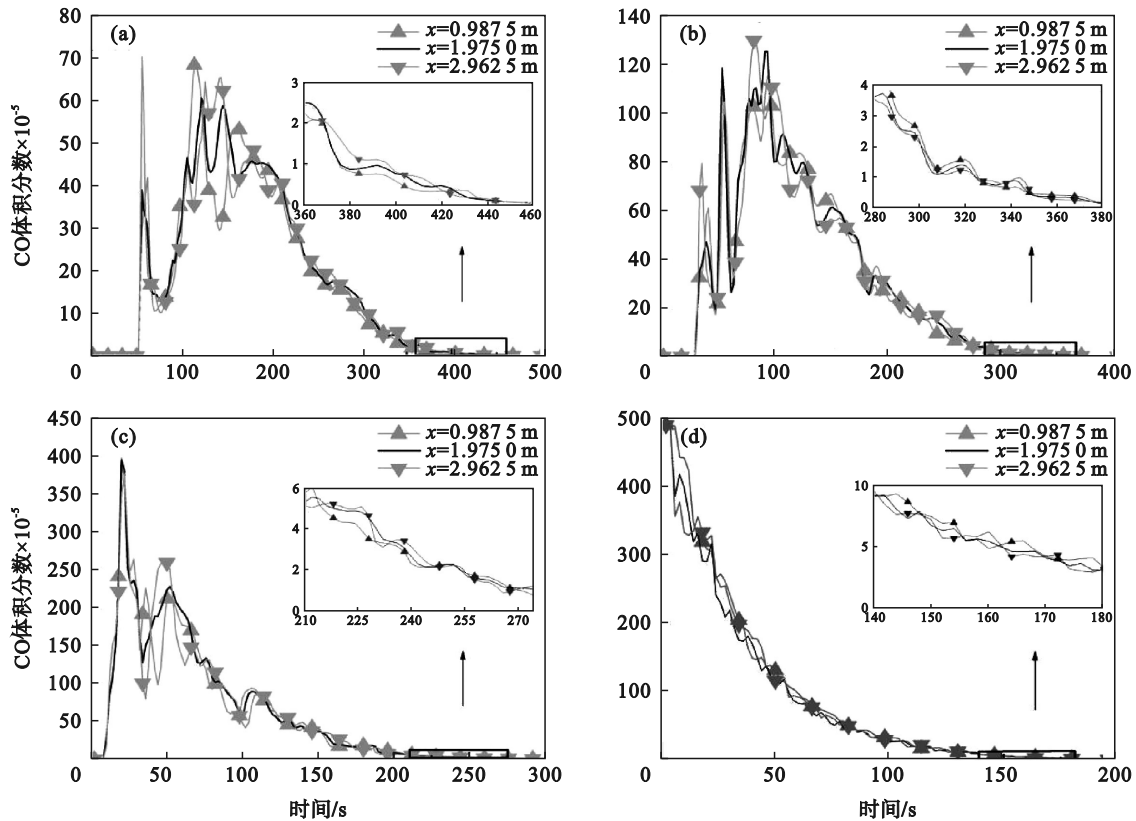


图 11 各监测点 CO 体积分数变化曲线

Fig. 11 CO volume fraction variation at monitoring points

(a)一截面 A; (b)一截面 B; (c)一截面 C; (d)一截面 D.

因此, 巡检车在爆破后的掘进巷道行进时应保证 CO 传感器在巷道中间位置.

4 结 论

1) 压入式通风条件下, 炮烟抛掷区外各横截面的 CO 平均体积分数变化具有明显的时段特征, 包括零时段、上升段及衰减段. CO 体积分数峰值主要分布于巷道顶部, 因此 CO 传感器应尽可能安装在车体较高位置. 当车身偏低时, 通过增设机械臂的方式可以实现 CO 传感器在高度上的延伸. 风流稀释作用下气体体积分数峰值区所占高度会不断变小, 因此在巡检车行进时应逐步调高 CO 传感器的所在高度.

2) 射流射程内存在两处涡流, 其中一处位于风筒出口旁, 另一处位于掌子面附近, 涡流的存在会影响毒害气体向巷道出口的运移.

3) 衰减段内 CO 体积分数峰值会在巷道两侧交替出现. 考虑到壁面两侧凹凸不平且 CO 体积分数峰值数据不稳定, 所以巡检车在掘进巷道行进时应尽可能位于巷道中间.

4) 随着掘进作业的进行, 巷道长度不断延伸, 部分巷道甚至会达到千米及以上. 因此, 长纵深掘

进巷道的研究会下一步工作中展开.

参 考 文 献:

- [1] Harris M L, Mainiero R J. Monitoring and removal of CO in blasting operations[J]. *Safety Science*, 2008, 46(10): 1393-1405.
- [2] Gillies A D S, Wu H W, Shires D. Development of an assessment tool to minimize safe after blast re-entry time to improve the mining cycle[C]//Proceedings of the 10th U.S. North America Mine Ventilation Symposium. Anchorage: Balkeme, 2004: 315-323.
- [3] Bahrami D, Yuan L, Rowland J H, et al. Evaluation of post-blast re-entry times based on gas monitoring of return air[J]. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2019, 36(3): 513-521.
- [4] 国家安全生产监督管理总局. 金属非金属地下矿山监测监控系统建设规范: AQ 2031—2011[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
(State Administration of Work Safety. Regulations for the construction of monitoring and supervision system in metal and nonmetal underground mine: AQ 2031—2011 [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.)
- [5] Murphy R R, Kravitz J, Stover S L, et al. Mobile robots in mine rescue and recovery[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(2): 91-103.
- [6] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1): 19-23, 83.
(Sun Ji-ping. New technology and development of mine informatization and automation [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 19-23, 83.)
- [7] Menéndez J, Merlé N, Fernández-Oro J M, et al. Concentration,

- propagation and dilution of toxic gases in underground excavations under different ventilation modes [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(12): 7092.
- [8] Torno S, Torano J, Ulecia M, et al. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 34: 73-81.
- [9] Huang R, Shen X, Wang B, et al. Migration characteristics of CO under forced ventilation after excavation roadway blasting: a case study in a plateau mine [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122094.
- [10] Li M, Aminossadati S M, Wu C. Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 52: 38-43.
- [11] Torno S, Torano J. On the prediction of toxic fumes from underground blasting operations and dilution ventilation. Conventional and numerical models [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 96: 103194.
- [12] 陈宝智, 关绍宗, 陈荣策. 掘进巷道压入式通风的风流结构及排尘作用的研究[J]. 东北工学院学报, 1981(3): 97-105. (Chen Bao-zhi, Guan Shao-zong, Chen Rong-ce. On the air flow structure of forced ventilation in tunnels and its effect on dust removal [J]. *Journal of Northeast Institute of Technology*, 1981, 3: 97-105.)
- [13] Cohen A F, Fisher T J, Watson R A, et al. Location strategy for methane, air velocity, and carbon monoxide fixed-point mine - monitoring transducers [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, IA-23: 375-381.
- [14] 罗周全, 谢承煜, 贾楠, 等. 竖井掘进爆破有毒废气扩散规律数值研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4637-4642. (Luo Zhou-quan, Xie Cheng-yu, Jia Nan, et al. Numerical study on diffusion rule of blasting toxic exhaust gas in shaft sinking [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(11): 4637-4642.)
- [15] Si J H, Xu W Q, Wang S J, et al. The correction method of air velocity transducer in underground mine roadway [C]// Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC). Shenyang, 2013: 554-559.
- [16] Ma X L, Zhu H. Gas concentration prediction based on the measured data of a coal mine rescue robot [J]. *Journal of Robotics*, 2016, 2016: 1-10.
- [17] Fu W J, Xu Y, Liu L P, et al. Design and research of intelligent safety monitoring robot for coal mine shaft construction [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021 (Pt.16): 6897767.
- [18] Shen Y, Li Y, Li Z P. Application of intelligent inspection robot in coal mine industrial heritage landscape: taking Wangshiwa coal mine as an example [J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2022, 16: 865146.
- [19] 姚锡文, 鹿广利, 许开立, 等. 基于 FLUENT 的大倾角综放面通风降尘系统[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(10): 1497-1501. (Yao Xi-wen, Lu Guang-li, Xu Kai-li, et al. Ventilation dust removal system in high inclination angle fully mechanized caving face based on fluent [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(10): 1497-1501.)
- [20] Wang X L, Liu X P, Sun Y F, et al. Construction schedule simulation of a diversion tunnel based on the optimized ventilation time [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/2/3): 933-943.
- [21] 南春子. 长距离复杂洞室联动通风与污染物扩散的数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. (Nan Chun-zi. Numerical study on ventilation and smoke discharge for long-distance and complicated underground caverns [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [22] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Wang Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [23] Torano J, Torno S, Menéndez M, et al. Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 80(1): 35-43.
- [24] Zhang H, Sun J C, Lin F, et al. Optimization scheme for construction ventilation in large-scale underground oil storage caverns [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1952.
- [25] Hebda-Sobkowicz J, Gola S, Zimroz R, et al. Identification and statistical analysis of impulse-like patterns of carbon monoxide variation in deep underground mines associated with the blasting procedure [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2757.
- [26] Zhou Y, Yang Y, Bu R W, et al. Effect of press-in ventilation technology on pollutant transport in a railway tunnel under construction [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118590.