

赵于龙, 赵青, 曹文昱, 等. 基于参数化建模的地下洞室施工通风方案优化[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 345-350.

ZHAO Yulong, ZHAO Qing, CAO Wenyu, et al. Optimization of ventilation scheme for underground caverns construction based on parametric modeling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 345-350.

基于参数化建模的地下洞室施工通风方案优化

赵于龙¹, 赵青², 曹文昱¹, 赵翌博¹, 翟秋凤³

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300354; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 成武县水务局农村供水服务中心, 山东 菏泽 274000)

摘要: 地下洞室纵横交错的布置形式和平行交叉的掘进方式导致通风散烟难度大, 而其通风效果直接影响工程的施工进度和安全。以某地下水封洞库工程为研究对象, 采用 Addins 方式对 OpenBuildings Designer 软件进行二次开发, 参数化构建地下水封洞库 BIM 模型, 并依据与工程相符的初始条件和边界条件, 通过标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和组分运输模型精细化模拟洞室内风流场分布与有害气体迁移。研究表明, 相对于风管出口到工作面的距离, 其在截面的位置对二衬步距范围内通风效果的影响更大; 当风管出口位于拱顶中央且距工作面 50 m 时, 二衬步距范围内的通风效果最好, 仅需 9.7 min 的通风时长即可满足施工人员长期作业的需求; 洞室内有害气体存在汇集于连接巷道、施工巷道等主通道内的现象, 可考虑在主通道内有序间隔布设射流风机以提高其通风效率。

关键词: 地下洞室群; 施工通风; 参数化建模; 数值模拟; 通风方案

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.053

中图分类号: TU398⁺. 9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0345-06

Optimization of ventilation scheme for underground caverns construction based on parametric modeling

ZHAO Yulong¹, ZHAO Qing², CAO Wenyu¹, ZHAO Yibo¹, ZHAI Qiufeng³

(1. National Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation of Hydraulic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Rural Water Supply Service Center of Chengwu County Water Affairs Bureau, Heze 274000, Shandong, China)

Abstract: The crisscross layout and parallel crossing excavation method of of underground caverns make it difficult to ventilate and disperse smoke, and the ventilation effect directly affects the construction progress and safety of the project. Taking a ground water-sealed cavern project as the research object, the OpenBuildings Designer modeling software is redeveloped by Addins method, and the BIM model of the groundwater-sealed cavern is parameterized. According to the initial conditions and boundary conditions consistent with the project, the standard turbulence model and the component transport model are used to simulate the distribution of the wind flow field and the migration of harmful gases in the cavern. The result show that the position of the cross section has a greater influence on the ventilation effect in the range of the secondary lining step distance than the distance from the outlet of the air duct to the working face. When the air duct outlet is located in the middle of the vault and 50 m away from the working face, the ventilation effect within the second lining step distance is the best, and only 9.7 min of ventilation time can

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 天津大学自主创新基金项目(2023XJD-0065); 国家重点研发计划项目(2021YFC3090103)

作者简介: 赵于龙(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事智慧水利方面的研究。E-mail: 3401509259@qq.com

通信作者: 翟秋凤(1974—), 女, 高级工程师, 学士, 主要从事水利工程项目建设与管理。E-mail: 15898669692@163.com

meet the needs of long-term operation of construction personnel. The harmful gases in the tunnel are concentrated in the main channels such as connecting roadways and construction roadways. It is considered that jet fans can be arranged in an orderly interval in the main channel to improve its ventilation efficiency.

Keywords: underground caverns; construction ventilation; parametric modeling; numerical simulation; ventilation scheme

0 引言

通风作为地下洞室施工的主要工序之一,是影响工程安全、进度的关键因素,在地下水封洞库、地下厂房、矿井等工程施工期间发挥着重要作用^[1]。

近年来,国内外专家学者对地下工程的施工通风问题进行了大量研究,主要集中在风流场分布、污染物扩散迁移、通风方案优化等方面^[2]。陈日伟等^[3]通过模拟分析乌江渡水电站地下厂房通风效果,提出应重点改造特定送风口管道;施晨等^[4]针对某抽水蓄能电站副厂房配电室问题,提出并验证了优化通风方案;史俊杰等^[5]设计监测系统分析金寨抽水蓄能电站交通洞气体运移,提出改变通风机布置方案。WU 等^[6]采用计算流体力学探究不同风机开启方式对高海拔隧洞内 CO 扩散的影响,提出了通风效果较好的二段式通风方案。LIU 等^[7]通过相似实验和数值模拟不同曲率半径螺旋隧道内的粉尘迁移特性,确定了螺旋隧道施工过程中的最佳风量。

由于洞室结构的复杂性和风流性态的不稳定性导致极易发生污染物滞留现象^[8]。此外,洞室几何模型构建难度大、人工成本高。基于此,本文拟针对地下洞室的参数化建模方法进行研究,并通过流体力学数值仿真提出针对性的通风方案优化方法。依托我国西南部某在建的地下水封洞库工程,验证本研究所提方法的可行性和有效性,为实际工程提供理论指导和技术支撑。

1 地下洞室参数化建模方法

1.1 地下洞室 BIM 模型构建流程

地下洞室 BIM 模型参数化构建主要包括洞轴线

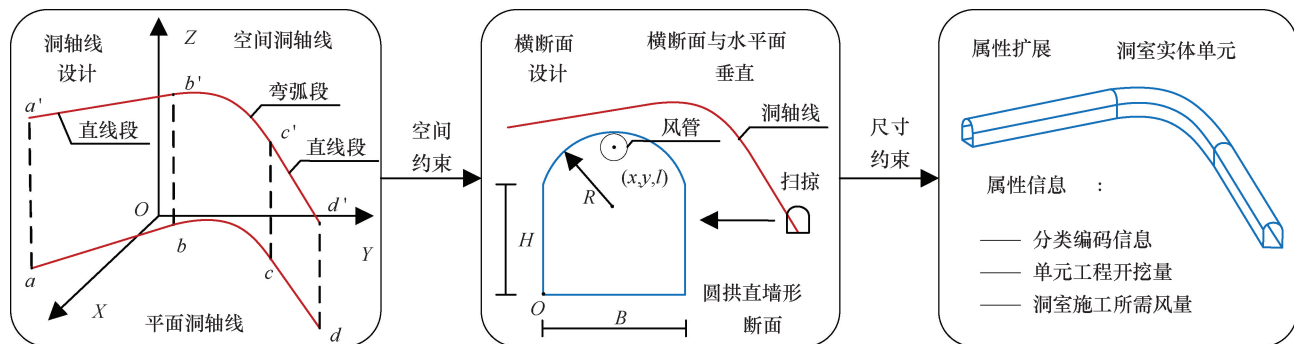


图 1 BIM 模型参数化构建流程

设计、横断面设计和属性扩展,具体构建流程如图 1 所示。洞轴线设计决定地下洞室的空间位置与走向,由控制点坐标、弯弧段半径、圆心坐标等参数控制。横断面设计决定地下洞室的断面形状和大小,由底板宽度、侧墙高度、拱顶高度、拱顶半径等参数控制。属性扩展决定地下洞室 BIM 模型的非几何信息,由分类编码信息、洞室所需风量等属性信息组成。在洞轴线设计过程中,主要采用“离散—拟合”方法进行构建,即将平面洞轴线离散成平面点集,依据高程信息获取新的空间点集,最后拟合生成空间洞轴线弯弧段。在此过程中,生成的空间洞轴线为 B 样条曲线。此外,为便于模拟不同通风方案下地下洞室内的风流场分布和有害气体迁移,通过 x 和 y 设置风管出口在洞室截面的位置,通过 l 设置风管出口到工作面的距离。

1.2 OpenBuildings Designer 二次开发方式

OpenBuildings Designer 建模软件主要支持 MVBA、Addins 和 MDL 三种二开发方式^[9],其支持的语言及环境如表 1 所列。通过对上述三种开发方式对比分析,选用 Addins 作为 OpenBuildings Designer 软件的二次开发方式,以确保开发程序的专业性、实用性和高效性。考虑到 C#既有 VBA 简单的可视化操作,又具有 C++的高运行效率,选用 C#作为开发语言。OpenBuildings Designer 二次开发流程主要为开发环境搭建、用户界面开发和应用程序调用。

(1)在开发环境搭建过程中,选用 OpenBuildings Designer 软件所支持对应版本的 Visual Studio 2017 作为集成开发环境(IDE),并在 .NET Framework 版本为 4.6.2 的目标框架下,添加所必需的动态连接库。

(2)在用户界面开发过程中,用户界面为 Windows 窗

体应用程序应但非传统的 WinForm, 为便于其在 OpenBuildings Designer 软件中显示, 其应继承于 Bentley、MstnPlatformNET、WinForms、Adapter 类。在完成用户界面的设计后, 即可进行功能函数的开发, 从而实现线、面、体及其他元素属性的创建、修改等功能, 所应用的功能函数包括 BodyFromSweep、BodyToElement、GetCurveVector、ToElement、ElementToCurveVector 等。

(3) 在应用程序调用过程中, 首先将开发的程序生成为类库并输出到相应的路径即. / OpenBuildingsDesigner/Mdlapps, 其次借助 MDL Applications 工具调用生成的类库, 最后通过 Key-in 工具键入命令调用用户界面。

表 1 OpenBuildings Designer 支持的二次开发方式

开发方式	开发语言	开发环境
MVBA	VBA	OpenBuildings Designer
Addins	C#、VB、NET、C++/CLI	OpenBuildings Designer、Visual Studio
MDL	C、C++	OpenBuildings Designer、Visual Studio、SKD

2 施工通风数值模拟方法

2.1 数学模型

在采用流体计算学软件对地下水封洞库施工通风进行数值模拟的过程中应遵循如下基本假定。假定空气流场为连续介质; 假定洞室内空气为不可压缩气体; 假定洞室内空气密度、空气黏度、热物理参数恒定; 假定洞室内无施工机械、电气设备等对空气流场产生扰动。基于上述假定, 施工通风数值计算应满足连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[10-11]。考虑到地下水封洞库施工通风过程中风管出口的射流和洞室内的回流, 以及有害气体在地下水封洞库内的稀释和扩散过程为非稳态, 因此采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和组分运输模型模拟施工过程地下水封洞库内有害气体扩散。数学模型应满足组分守恒方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程^[12]。

(1) 组分守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[A_k \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_k) \right] + m_s \quad (1)$$

(2) 湍动能 k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2)$$

(3) 湍动能耗散率 ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon) \quad (3)$$

式中, c_k 为组分的体积浓度 (%); A_k 为组分的扩散系数 (m^2/s); m_s 为组分的产生率 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]; k 为湍流动能 (m^2/s^2); μ_e 为动力黏性系数; σ_k 、 σ_ε 为湍流普朗特数; G_k 为流动能产生率; ε 为湍流动能耗散率 (m^2/s^3); c_1 、 c_2 为高雷诺数模型常数。

2.2 初始条件

地下水封洞库通常采用光面钻爆法掘进, 施工爆破是在相对封闭的空间内实施, 空间较小且烟尘扩散受限, 因此由爆破产生的炮烟与空气在炮烟抛掷区内混合均匀^[13]。

(1) 炮烟抛掷区域长度。地下水封洞库施工爆破多采用非电毫秒雷管、导爆管等起爆方式, 参考电雷管起爆后炮烟弥漫区域的长度^[14], 炮烟抛掷区域长度的计算公式为

$$L_{or} = 15 + \frac{G}{S} \quad (4)$$

式中, G 为单次爆破总装药量 (kg)。

(2) 有害气体初始浓度。爆破后洞室内主要有有害气体成分为一氧化碳、氮氧化物、硫化物等, 其中, CO 产量多、理化性质稳定且对人体危害极大, 是影响施工人员生命安全的最主要因素之一。因此本文仅以 CO 为有害气体的主要代表进行数值模拟和分析^[3]

$$c_0 = \frac{M_0}{V_{or}} = \frac{Gb_0\gamma}{AL_{or}} \quad (5)$$

式中, b_0 为单位质量炸药产生有害气体体积 (m^3/kg); γ 为有害气体容重 (kg/m^3); A 为隧洞开挖断面面积 (m^2)。

2.3 边界条件

以工程中流场情况为依据, 在不影响计算进度的前提下对地下水封洞库的边界条件进行设置, 将压入式/抽出式通风的风管出口设置为速度入口, 并设定风速均匀分布; 将竖井、巷道等入口设置为压力出口, 并设定相对压力为零; 将地下水封洞库的内部边壁设置为壁面, 并设定壁面函数粗糙度一致。

3 工程应用与分析

3.1 工程概况

某地下水封洞库工程隶属国家石油储备第三期项目, 主要由施工巷道、连接巷道、储油洞室、竖井、水幕巷道等单元工程组成, 共布置有 16 条储油洞室。在采用钻爆法施工过程中, 2 号施工巷道、6 号至 10 号储油洞室、2 号至 3 号通风竖井、2 号至 3 号进油竖井、连接巷道等单元工程共用一套通风系统。在 6 号至 10 号储油洞室上层施工过程中, 通风、进油竖

井与储油洞室贯通, 洞室内风流场分布情况复杂, 有害气体迁移扩散难于预测, 因此本研究对该过程的施工通风开展研究, 其物理模型如图 2 所示。

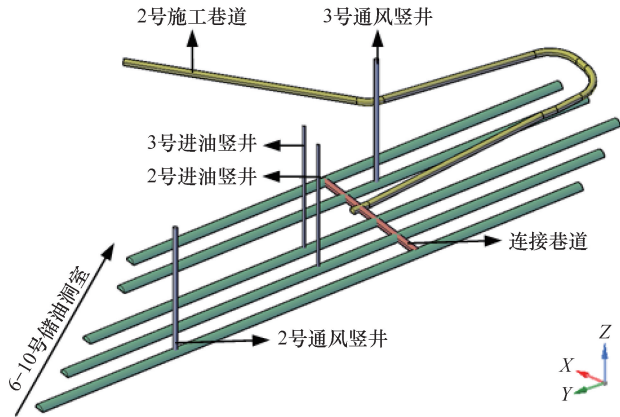


图 2 地下水封洞物理模型示意

为保证施工环境, 其通风方案如下: 在施工巷道入口布设 3 台轴流风机, 并选用直径为 2.2 m 的柔性风管向 6 号、7 号和 8 号储油洞室工作面压风; 在 3 号通风竖井施工巷道入口布设 2 台轴流风机, 并选用直径为 2.2 m 的柔性风管向 9 号和 10 号储油洞室工作面压风; 在 2 号和 3 号进油竖井入口各布设 1 台轴流风机, 选用直径为 2.0 m 的刚性风管分别对 7 号和 8 号储油洞室进行负压抽排。综合人员呼吸、燃油机械、爆破排烟、最小风速等各项作业所需风量, 在考虑高程等因素的前提下, 选取制约因素中最大风量作为洞室风量, 各洞室施工过程中所需风量如表 2 所列。

表 2 各洞室施工过程中所需风量

洞室名称	所需风量 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	风管直径/m
2 号、3 号进油竖井	282.3	0.8
2 号、3 号通风竖井	72.8	0.8
2 号施工巷道	2 453.2	2.2
6 号—10 号储油洞室	4 446.8	2.2

3.2 BIM 参数化建模应用

借助 OpenBuildings Designer 软件的二次开发应用程序, 可实现各类型洞室的快速化、参数化建模, 并在此基础上赋予其分类编码、单元工程开挖量等属性信息构建地下洞室 BIM 模型, 大幅度提高了设计人员的建模效率, 应用程序功能示例如图 3 所示。此外, 可将生成的 BIM 模型导出为 .sat、.dwg 等多种中间格式文件, 便于在 Hypermesh 和 Ansys Fluent 软件中剖分网格和数值模拟。



图 3 BIM 模型参数化构建

3.3 施工通风优化

3.3.1 工况设定

风管出口到工作面的距离是风管布设的重要参数之一, 且风管出口在隧洞截面的位置也对通风效果有一定程度的影响^[16]。为探究其对施工期通风效果的影响, 本研究针对上述两种风管布设参数不同组合下的施工通风方案进行数值模拟, 分析各方案通风效果, 风管布设参数如图 4 所示。

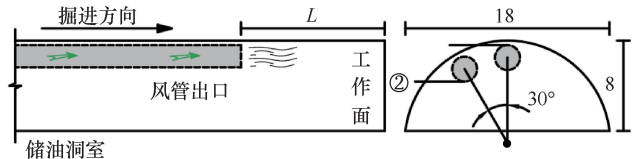


图 4 风管布设参数(单位: m)

参考本工程通风专项方案和相关标准^[17], 并结合施工爆破过程中碎石的飞溅情况, 风管出口到工作面的距离 L 分别取 40 m、50 m 和 60 m。结合施工现场实际情况, 风管出口可布置在洞室截面的拱顶中央处和左侧拐角处, 具体的施工通风方案如表 3 所列。在原始通风方案中, 风管出口布设在左侧拐角且距离工作面 50 m 处, 即对应施工通风方案 B2。

表 3 施工通风方案

施工通风方案	风管出口在洞室截面的位置	风管出口到工作面的距离/m
方案 A1/A2/A3	拱顶中央处	40/50/60
方案 B1/B2/B3	左侧拐角处	40/50/60

钻爆法施工过程中, 作业区域跨度为工作面到衬

砌台车的距离(二衬步距), 此区域内施工人员较为密集且作业时间较长。结合地下水封洞库现场实际施工情况, 本研究中作业区域跨度取 100 m。依据《地下水封石油洞库施工及验收规范》中对作业环境的要求可知^[18], 二衬步距范围内的 CO 体积浓度不应高于 24 ppm(0.002 4%), 以满足施工人员长期作业的需求。

3.3.2 风流场分布

以风管出口布设在拱顶中央且距工作面 50 m 为例, 当风流场基本稳定时, 地下水封洞库内 1 603 m 高程处风速分布情况如图 5 所示。由通风机输送的新风在风管出口处形成射流, 并在工作面及非工作面附近形成与射流方向相反的回流。6 号储油洞室内, 回流沿洞室经 2 号通风竖井涌向洞室外。7、8 号储油洞室内, 一部分回流沿洞室经上连接巷道和施工巷道涌向洞外, 另一部分回流经进油竖井涌向洞室外。9 号储油洞室内, 一部分回流沿洞室经上连接巷道和施工巷道涌向洞外, 另一部分回流经 3 号通风竖井涌向洞室外。10 号储油洞室内, 回流沿洞室经上连接巷道和施工巷道涌向洞外。此外, 储油洞室内风速基本

稳定在 0.30 m/s 以上, 满足《地下水封石油洞库施工及验收规范》^[18]中对主洞室回流风速不小于 0.2 m/s 的要求。

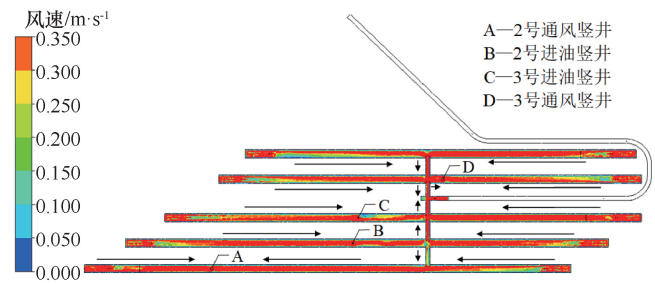


图 5 风流场分布

3.3.3 有害气体迁移

针对地下水封洞库内风流汇聚时容易形成通风死区的问题, 需对洞库整体的有害气体迁移扩散规律进行分析, 从而避免 CO 滞留对施工人员身体健康的不利影响。以原始通风方案为例, 6、8 和 10 号储油洞室工作面同时爆破时, 地下水封洞库内 CO 迁移扩散情况如图 6 所示。施工爆破后, CO 均匀分布在污染物抛掷区域内, 初始体积浓度高达 0.118 7%

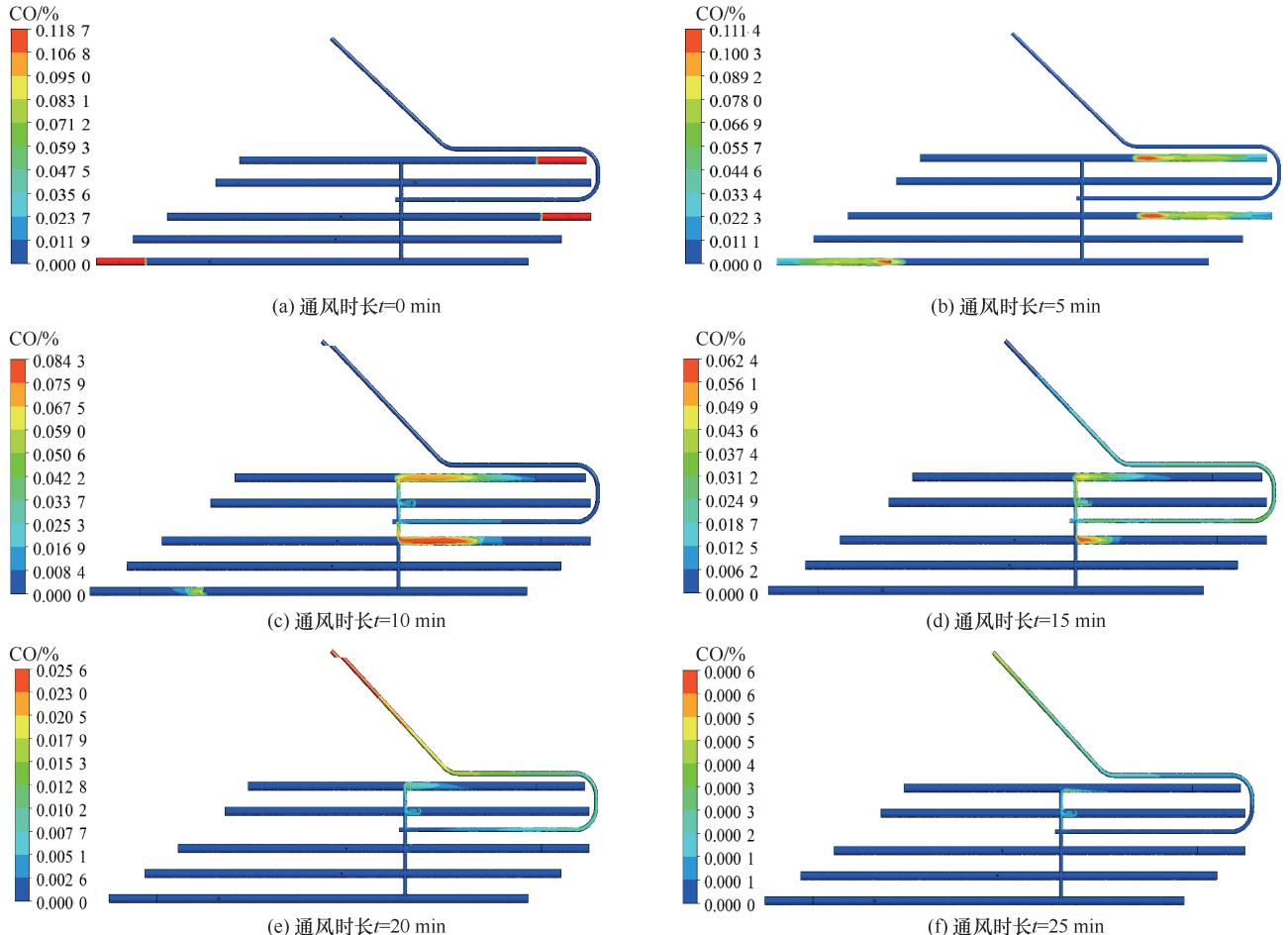


图 6 地下水封洞库内 CO 迁移

(1 187 ppm)。通风开始后, 6 号储油洞室内 CO 沿洞室经 2 号通风竖井排送至洞外, 8 和 10 号储油洞室内 CO 沿洞室向上部连接巷道排送, 最终 2 号施工巷道排送至洞外。此外, 由于在 2、3 号进油竖井口布设轴流风机进行负压抽排, 因此部分 CO 从风管出口排出储油洞室。

距离工作面一定范围内, CO 体积浓度降低至阈值(24 ppm)的通风耗时如图 7 所示。当风管出口在洞室截面位置相同时, 风管出口到工作面距离为 50 m 的情况下, CO 体积浓度降低至 24 ppm 的通风耗时最短; 当风管出口到工作面距离时, 风管出口位于拱顶中央的情况下, CO 体积浓度降低至 24 ppm 的通风耗时最短。风管出口在洞室截面的位置对二衬步距范围内通风效果的影响显著于其到工作面的距离。当风管出口位于拱顶中央且距工作面 50 m 时, 二衬步距范围内的通风效果最好, CO 体积浓度达标的通风耗时最短, 仅需 9.7 min。相较于风管出口位于拱顶左侧且距工作面 50 m 的原始方案, 该方案将二衬步距范围内 CO 体积浓度达标的通风耗时缩短了 32.8%。

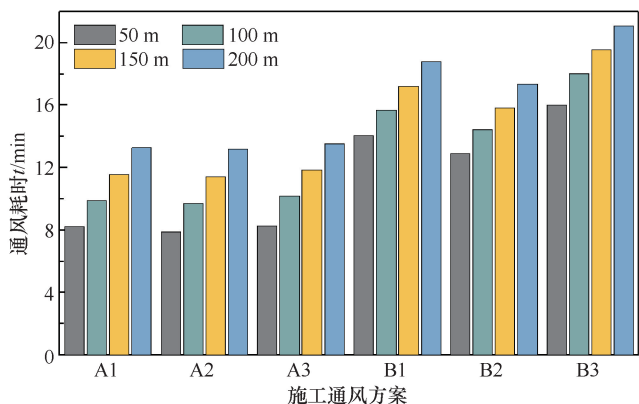


图 7 工作面附近 CO 体积浓度达标的通风耗时

4 结论

(1) 风管出口在隧洞截面的位置比其到工作面的距离更影响通风, 且布设于拱顶中央优于左侧拐角。

(2) 当风管出口位于拱顶中央且距工作面 50 m 时, 通风效果最为理想。与原始通风方案相比, 二衬步距范围内 CO 体积浓度达标的通风耗时缩短了 32.8%。

(3) 多工作面同时爆破时, 有害气体易汇集于连接巷道、施工巷道, 建议在主通道内增设射流风机增强通风。

参考文献:

- [1] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- [3] 陈日伟, 李超顺, 刘懋霖, 等. 基于 CFD 的乌江渡水电站地下厂房通风效果模拟分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 131-135.
- [4] 施晨, 胡代清, 衣传宝, 等. 抽水蓄能电站地下厂房典型洞室通风优化研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 96-100.
- [5] 史俊杰, 胡代清, 郭建强, 等. 抽水蓄能电站地下厂房施工有毒有害气体运移规律及通风系统优化研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 163-166.
- [6] WU Bo, ZHAO Rui, MENG Guowang, et al. A numerical study on CO migration after blasting in high-altitude tunnel by inclined shaft [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 14696.
- [7] LIU Rong, JIANG Deyi, CHEN Jie, et al. Blasting dust diffuse characteristics of spiral tunnel and dust distribution model; similar experiment and numerical modeling[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 52340-52357.
- [8] 赵树磊, 叶爱军, 李冰, 等. 瓦斯隧道多工作面施工通风死区控制方法研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 118-126.
- [9] 黄琦茗. 基于 BIM 的隧道洞门设计参数化建模研究及工程应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [10] 朱立明, 柯葵. 流体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [11] 江帆, 黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 李浩天. 抽水蓄能电站地下厂房施工工序及通风策略研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [13] 王晓玲, 陈红超, 刘雪朋等. 引水隧洞独头掘进工作面风流组织与 CO 扩散的模拟[J]. 水利学报, 2008(1): 121-127.
- [14] 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.
- [15] XU Guang. Remote Characterization of Underground Ventilation Systems Using Tracer Gas and CFD [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.
- [16] 宋骏修, 宋斌, 董长松, 等. 风管布设参数对隧道施工排尘效果的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 143-149.
- [17] 铁道部经济规划院. 铁路隧道工程施工技术指南: TZ 204—2008[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下水封石油洞库施工及验收规范: GB 50996—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(责任编辑 王璐)