

# 特长隧道斜井转正洞段施工通风设计

薛威, 周保刚

(陕西省交通规划设计研究院有限公司, 西安 710000)

**摘要:** 隧道施工通风能够有效排除有害气体和粉尘,保障施工环境安全。以野河山特长公路隧道为例,计算斜井及斜井转正洞多工作面施工需风量,选择适配风机型号,按照斜井与正洞施工进度对隧道施工通风进行分阶段设计。将分离式隧道一段作为通风巷道,采用“巷道+压入式”通风方式缩短风管供风长度。利用 FLUENT 软件建立多工作面施工通风三维数值模型,深入研究隧道内 CO(一氧化碳)扩散规律。研究表明:CO 以“气团”的形式从掌子面附近向洞口迁移,迁移速度与隧道内通风风速正相关;斜井交差处 CO 高浓度区随风速比的逐渐变大向右侧(低速区)偏移,且最大浓度逐渐减小;风速比对左洞 CO 浓度变化无明显影响。

**关键词:** 隧道; 施工通风; 阶段设计; 污染物扩散; 数值模拟

**中图分类号:** U453.5   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1671-1807(2025)07-0094-07

近年来,国内特长隧道建设取得显著发展,不仅体现在隧道数量的增加上,更在于隧道长度、技术难度和建设质量的提升<sup>[1]</sup>。特长隧道由于长度长、施工环境复杂,施工过程产生的粉尘、烟尘和有害气体如果不能及时有效地排除,会严重危害施工人员的健康,甚至引发安全事故<sup>[2]</sup>。采用斜井辅助隧道主线施工,施工通风仅能通过斜井进行。一方面斜井断面较小,难以满足为正洞供风的风管布置要求;另一方面随着通风距离增长,沿程损失逐渐增大,通风效果变差。因此,展开特长隧道斜井多工作面施工通风方案优化研究,解决隧道施工难题尤为关键。

在隧道施工通风方面,国内已有不少研究。刘钊春等<sup>[3]</sup>利用 ADINA 软件的 CFD 模块,对压入式通风隧道中有害气体浓度进行三维数值模拟,揭示了工作面附近涡流的形成及其对有害气体扩散的滞留效应;苟红松等<sup>[4]</sup>对海拔高度与空气性质、通风需风量计算、通风阻力变化及风机选型进行分析,提出风量计算考虑有害气体体积膨胀与浓度限值因素。邓祥辉等<sup>[5]</sup>通过数值模拟分析得到了施工期隧道内流场和浓度场随时间的变化规律。李自强等<sup>[6]</sup>通过调研确定施工通风控制标准并计算得出掌子面理论需风量,利用 FLUENT 进行模拟,根据炮烟分布规律及特性对

联合式施工通风方案进行优化。张恒等<sup>[7]</sup>采用 CFD 软件结合现场数据,探讨了隧道壁面粗糙度对风流场的影响。何聪<sup>[8]</sup>采用主副斜井射流巷道式通风,并通过合理划分工区、通风设备选优布置等措施优化施工通风方案,解决了特长瓦斯隧道施工通风问题。罗燕平等<sup>[9]</sup>采用数值模拟的方法对“风机-风管-隧道”整个通风系统进行三维数值计算分析,比较压入式和风仓式通风方案优缺点,并对数值计算所得测点风速与实测数据进行校验。吴波等<sup>[10]</sup>采用 FLUENT 对铁路隧道台阶法施工压入式通风流场进行数值模拟,通过研究不同风管位置、上台阶长度、上台阶高度时通风流场规律,得出各个参数对施工隧道通风效果的影响,并对隧道通风施工参数进行优化。赵树磊等<sup>[11]</sup>运用 FLUENT 数值模拟软件探究了独头压入式通风在极限距离条件下,隧道内 CO(一氧化碳)、粉尘等污染物的扩散规律,并通过现场实测数据进行验证。刘庆宽等<sup>[12]</sup>基于 CFD 模拟方法,分析海拔与地温耦合对 CO 扩散规律的影响。裴真真等<sup>[13]</sup>以宜兴联络线兴山东隧道斜井为研究对象,对比不同直径的风管对应的风机能耗费用和斜井净空断面土建费用,降低隧道整体建造成本。冉捷等<sup>[14]</sup>基于数值模拟方法,以瓦斯平均浓度数据为基础,研究了瓦斯浓度在施工通风影响下的分

**收稿日期:** 2024-09-29

**作者简介:** 薛威(1997—),男,黑龙江绥化人,硕士,研究方向为公路隧道运营管理;周保刚(1986—),男,陕西西安人,高级工程师,研究方向为城市交通与基础设施。

布特点。胡威东<sup>[15]</sup>采用数值模拟及现场实测的方式总结了通风状态下流场分布及风流运动规律,并提出了通风参数的优化方案。王朋等<sup>[16]</sup>测试断面的风速、风流方向和不同工况下的粉尘浓度,利用数值模拟,研究各作业工况下主洞内风流场特征和粉尘扩散规律,提出相应改善措施。陈星宇等<sup>[17]</sup>采用数值模拟和现场测试的方法,研究高海拔隧道施工通风过程中粉尘和CO的扩散规律。王静华等<sup>[18]</sup>结合特长隧道施工计划,划分多个通风阶段,利用不同的通风方式完善隧道施工通风设备,将隧道施工通风效果最优化。喻兴洪等<sup>[19]</sup>计算压入式通风和巷道式通风需风量、风压及风机功率,对两种方案瓦斯浓度和风速进行了数值分析,并比较两种方案的经济性。

本文以野河山特长公路隧道斜井多工作面施工段为依托,采用理论分析方法计算斜井及斜井转正洞多工作面施工需风量,按照斜井与正洞施工进度对隧道施工通风进行分阶段设计,将分离式隧道一段作为通风巷道,采用“巷道+压入式”通风方式缩短风管供风长度,降低通风过程中的阻力。利用数值模拟软件FLUENT建立多工作面施工通风三维数值模型,将隧道施工过程中产生的CO作为关键特征污染物,深入探究不同风速比时CO在多工作面隧道环境中的扩散机制与分布规律,为特长隧道斜井施工通风方案的设计提供参考。

## 1 工程概况

野河山隧道设计为曲线形分离式隧道,技术标准双向四车道,起讫桩号为ZK12+917~ZK21+047,全长8 130 m,为特长隧道。通风斜井井口在距进口约2.4 km YK15+500处右侧,斜井长1 530 m,综合坡率9.71%,采用无轨运输。井底设计高程1 020 m,井口设计高程1 170 m,高差150 m。斜井承担左洞小里程施工900 m,承担左洞大里程施工600 m;斜井承担右洞小里程施工950 m,承担右洞大里程施工700 m,表1为斜井施工任务划分表。斜井开挖断面积为74.5 m<sup>2</sup>,隧道开挖断面积110 m<sup>2</sup>。图1为隧道断面图,图2为斜井断面图。

表1 斜井施工任务划分

斜井长度/m	工作面	施工任务/m	通风长度/m
1 530	左洞小里程	900	2 430
	左洞大里程	600	2 130
	右洞小里程	950	2 480
	右洞大里程	700	2 230

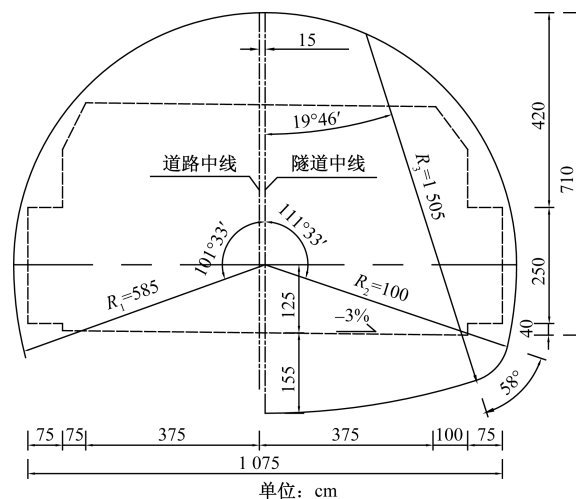


图1 隧道断面图

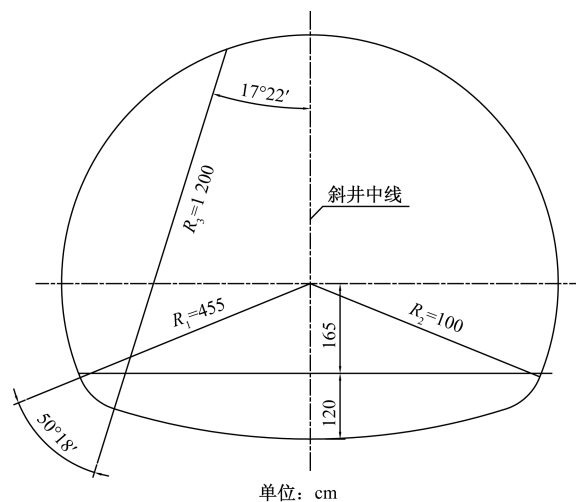


图2 斜井断面图

## 2 隧道通风计算

### 2.1 施工环境卫生标准

隧道施工中,由于炸药爆炸,内燃机械的使用,施工人员呼吸所释放的废气等相互叠加,导致洞内空气环境十分污浊,对人体的影响较为严重。规范对施工中作业环境卫生标准做了如下规定。

- (1)开挖工作面进风流中氧气不得少于19.5%。
- (2)当施工人员进入开挖面检查时,CO容许浓度可为100 mg/m<sup>3</sup>,但必须在30 min内降至30 mg/m<sup>3</sup>。
- (3)隧道内风量要求每人每分钟供应新鲜空气3 m<sup>3</sup>;洞内使用柴油机械施工时,每1 kW每分钟供风量不宜少于4.5 m<sup>3</sup>。

(4)全断面(包括斜井)开挖时,最小风速应不小于0.15 m/s。分部开挖的导洞内取0.25 m/s。

### 2.2 通风计算

#### 2.2.1 风量计算

施工通风设计旨在确保洞内空气新鲜,优化通

风机选型与管道配置,以满足施工环境的安全需求<sup>[20]</sup>。计算过程考虑人员呼吸、有害气体排放等因素,取各项的最大值,并依据管道漏风系数进行调整。根据安全余量即备用系数,最终确定风机规格,保障施工环境健康与作业高效。

(1)按洞内同时工作的最多人数计算。

$$Q = qmb \quad (1)$$

式中:  $Q$  为风量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $q$  为工作面每人每分钟所需新鲜空气量,通常取  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $m$  为工作面同时工作的最多人数,按斜井 15 人、正洞 30 人计算;  $b$  为风量备用系数,通常取  $1.1 \sim 1.2$ 。

(2)按洞内允许最小风量计算。

$$Q = 60sv \quad (2)$$

式中:  $s$  为隧道断面面积,斜井开挖断面面积取  $75 \text{ m}^2$ ,隧道开挖断面面积取  $110 \text{ m}^2$ ;  $v$  为洞内允许最小风速,取  $0.25 \text{ m/s}$ 。

(3)按机械废气污染计算。

$$Q = kN_i T_i \quad (3)$$

式中:  $k$  为单位功率所需风量,  $1 \text{ kW}$  需风量为  $4.5 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{min})$ ;  $N_i$  为各内燃机功率,  $\text{kW}$ ;  $T_i$  为同时工作内燃机设备利用系数,工作时考虑负荷系数。

(4)按一次爆破后排烟量计算。

$$Q = \frac{0.13 \sqrt[3]{GS^2 L^2}}{t} \quad (4)$$

式中:  $G$  为一次爆破炸药用量;  $t$  为通风时间;  $S$  为隧道断面面积;  $L$  为通风长度。

### 2.2.2 考虑漏风系数计算最小供风量

根据表 1 的通风长度,选用漏风率为  $0.01$  的高质量风管,风机最小供风量计算如下:

$$P = \frac{1}{1 - \frac{L}{100}\beta} \quad (5)$$

式中:  $P$  为漏风系数;  $\beta$  为漏风率。

$$Q_{\text{供}} = PQ \quad (6)$$

式中:  $Q_{\text{供}}$  为风机供风量。

表 2 给出了不同长度风管对应的漏风系数。

经计算,斜井施工区间及正洞施工区间供风量见表 3。

### 2.2.3 通风阻力计算

通风机的风压用来克服风管(或风道)的沿程阻力,考虑风管漏风时,主洞和斜井风管摩擦阻力计算公式为

表 2 漏风系数

L/m	700	1 000	1 600	2 000	2 500
P	1.08	1.11	1.19	1.25	1.33

表 3 供风量

通风长度/m	漏风系数	基准风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	计算风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	供风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	备注
1 000	1.11	1 125	1 249	2 000	斜井段
1 600	1.19	1 125	1 249	2 000	
2 000	1.25	1 650	2 062	2 500	正洞段
2 500	1.33	1 650	2 195	2 500	

$$h_f = \frac{400\lambda\rho}{\pi^2 d^5} \frac{1 - (1 - \beta)^{\frac{2L}{100}}}{\ln(1 - \beta)} Q_0^2 \quad (7)$$

式中:  $h_f$  为风管沿程阻力,  $\text{Pa}$ ;  $\lambda$  为摩擦系数;  $\rho$  为隧址区空气密度;  $d$  为风管直径,取  $1.5 \text{ m}$ ;  $Q_0$  为施工需风量。

经计算,斜井段通风系统阻力为  $3 270 \text{ Pa}$ ,隧道正洞段通风系统阻力为  $5 280 \text{ Pa}$ 。

### 2.2.4 风机选型计算

风机功率  $W$  的计算公式为

$$W = Q_{\text{供}} HK / (\eta_1 \eta_2) \quad (8)$$

式中:  $H$  为风机工作风压;  $\eta_1$  为风机效率,取  $90\%$ ;  $\eta_2$  为传动效率,取  $1$ ;  $K$  为功率储备系数,取  $1.1$ 。

根据式(8),计算斜井段风机功率为  $180 \text{ kW}$ ,隧道正洞段  $310 \text{ kW}$ ,根据计算风机功率初步选定风机型号,见表 4。

表 4 风机型号选定

施工部位	风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	风压/ $\text{Pa}$	功率/ $\text{kW}$	通风管 直径/m	建议型号
斜井	3 000	3 000	220	1.5	SDF-M-4-No14/220
正洞	3 500	4 400	$2 \times 160$	1.5	SDF-M-4- No14/2×160

## 3 施工通风阶段设计

隧道多工作面施工通风要求高,一方面合理的通风方式能够确保隧道内空气流通,及时排除有害气体和粉尘,降低隧道内的有害气体浓度和粉尘含量,另一方面可以通过优化通风设计和调整通风量来降低能耗和运行成本。根据上述计算,综合考虑施工需求以及经济等因素,对特长隧道施工通风进行阶段设计。在第 1、2 阶段利用大纵坡长斜井作为阶段性施工通风的主通道。在第 3、4 阶段将分离式隧道一段作为通风巷道,采用“巷道+压入式”通风方式缩短风管供风长度,分阶段设计施工通风,保障隧道空气质量。

### 3.1 第 1 阶段:斜井施工段施工通风

采用压入式通风,施工斜井全长  $1 530 \text{ m}$ ,于斜井洞口  $20 \text{ m}$  外设置 1 台轴流风机,由直径为  $1.5 \text{ m}$  风管向斜井掌子面送风。污染空气由施工斜井排出洞外。第 1 阶段施工通风平面布置如图 3 所示。

### 3.2 第2阶段:左线隧道施工通风

采用压入式通风,在斜井洞口设置2台轴流风机,由直径为1.5 m风管风别向隧道左线大小里程掌子面送风,污浊空气由施工斜井排出洞外。第2阶段施工通风平面布置如图4所示。

### 3.3 第3阶段:左线隧道单侧贯通后施工通风

左线隧道单侧贯通后,利用左线隧道贯通侧一段作为进风巷道,风机前设风门,不用于通风或行车。在左线隧道贯通侧设置2台轴流风机,由直径为1.5 m风管风别向隧道掌子面送风,斜井既作为污染空气的排放通道,又作为施工人员和车辆进入掌子面作业的行车要道。为保证压入掌子面空气新鲜,严格禁止在风门前进行任何施工作业,并定期清理该区域。第3阶段施工通风平面布置如图5所示。

### 3.4 第4阶段:右线隧道施工通风

左线隧道贯通后,受进出口地形高差、温度差

异、大气压差的影响,在隧道内部形成自然风,为轴流风机提供新鲜风,在风道内设置2台轴流风机,风机前设风门,由直径为1.5 m风管风别向隧道掌子面送风,污浊空气由施工斜井排出洞外。为保证压入洞口内空气新鲜,定期清扫左线隧道。第4阶段施工通风平面布置如图6所示。

## 4 多工作面施工 CO 扩散规律

斜井进入多工作面施工后,由于不同方向的通风气流会在斜井处汇合,导致在正洞与斜井交叉处的流场特征更为复杂,对通风效果也会产生一定的影响。选取具有代表性的两工作面施工通风为研究对象,重点研究两工作面送风风速对隧道施工通风污染物扩散规律的影响,结合 FLUENT 数值模拟结果,阐明两个工作面通风风流汇入斜井过程中 CO 的变化规律,为多工作面施工通风控制提供重要依据。

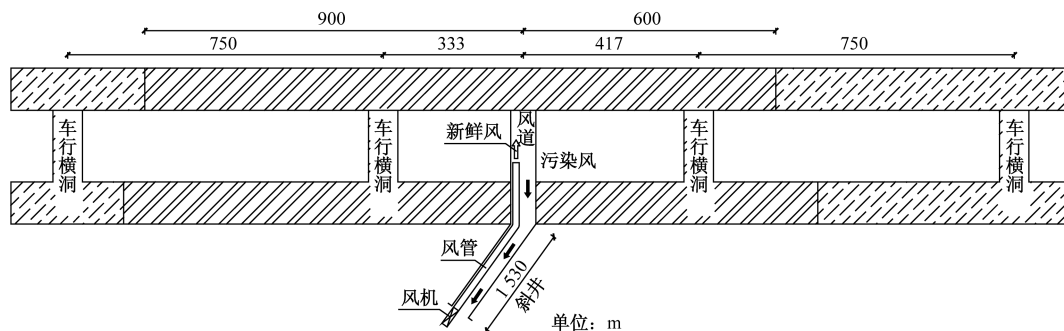


图3 第1阶段施工通风平面布置

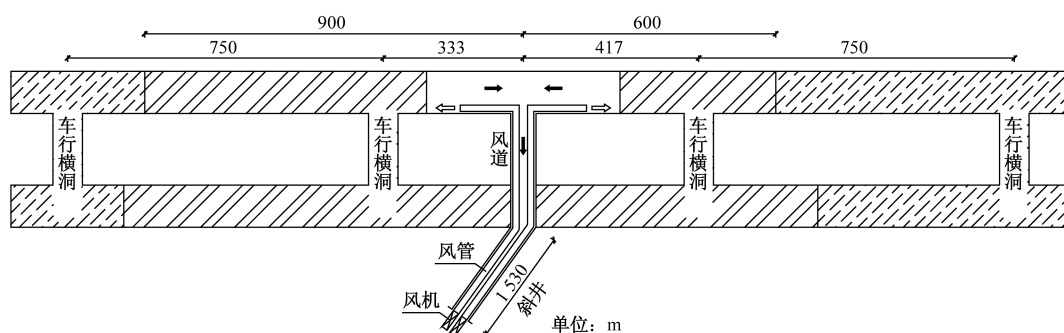


图4 第2阶段施工通风平面布置

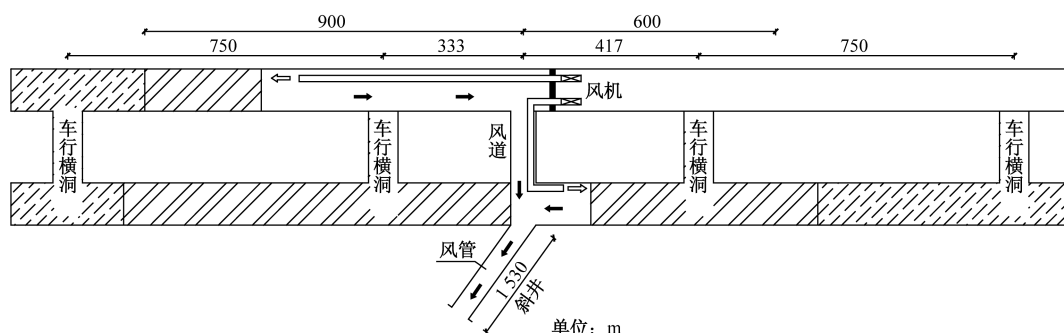


图5 第3阶段施工通风平面布置

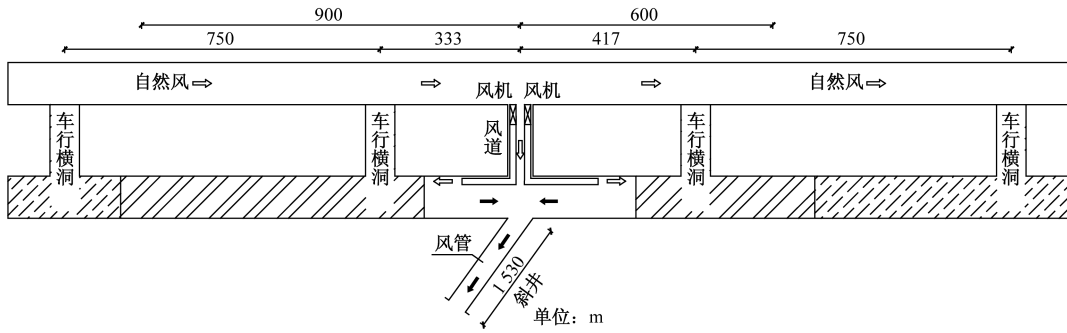


图 6 第 4 阶段施工通风平面布置

4.1 数值模拟

4.1.1 模型建立

采用 FLUENT 软件来模拟隧道多工作面施工过程中的污染物扩散,忽略二衬台车及其他变截面部分,使用三维绘图软件 SolidWorks 绘制隧道几何模型。图 7 为隧道斜井进入多工作面施工后的模型。简化分析,主洞与斜井分别为直径 13 m 和直径 10 m 的圆形断面,两侧主洞掌子面至斜井中线的距离相等,均为 300 m。斜井与正洞的交叉处设定为直角相交,斜井与正洞夹角为 10°,斜井长 330 m。两条风管从斜井洞口分别延伸至两个工作面附近,风管口距离掌子面的距离为 20 m,为正洞工作面进行压入式送风。

4.1.2 数值模拟方案设计

研究两工作面的送风风速对施工通风效果的影响,保持隧道左侧风速为 20 m/s,模拟右侧风速分别为 10、15、20 m/s 3 种工况时隧道内的 CO 的扩散规律。风机型号选定参数见表 5。

4.2 CO 扩散规律分析

4.2.1 CO 运移规律分析

图 8 为不同风速比情况下,不同时刻 CO 气体在正洞及斜井内的扩散情况。由图 8 可知,爆破释放的 CO 气体在新鲜风流驱动下稀释并迁移至斜井



图 7 通风数值模型

表 5 风机型号选定参数

隧道长度/m	风管距掌子面距离/m	风管直径/m	左洞风速/(m·s <sup>-1</sup> )	右洞风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风速比
600	20	1.5	20	10	2:1
			20	15	4:3
			20	20	1:1

交汇处,同时 CO 气团在扩散中伸展,经过斜井排出洞外。

4.2.2 CO 质量分数变化规律分析

当左右两洞通风风速相同,即风速比为 1:1 时,CO 气体在新鲜风流驱动下对称向斜井交叉处迁移,

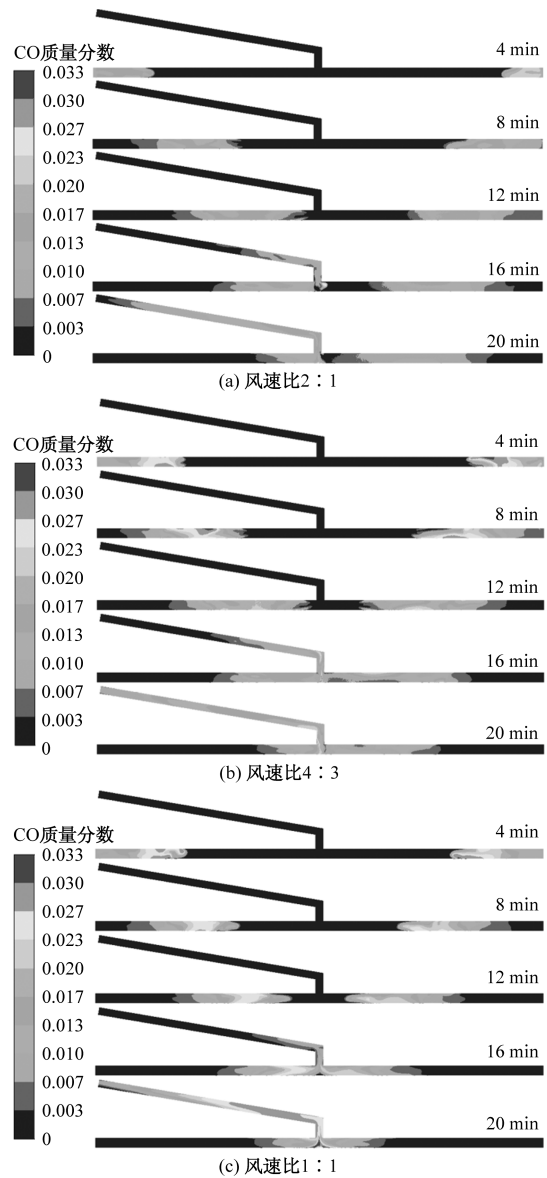


图 8 不同时刻 CO 分布云图

当两股 CO 气团在交界处相遇时,风流之间会互相掺混,形成 CO 高浓度区。当右侧隧道内通风风速逐渐减小,右侧 CO 气团的迁移速度逐渐变慢,且在隧道内伸展长度增长。左侧 CO 气团先于右侧到达斜井交叉处时,由于左右两侧风流方向相反,阻碍 CO 向右侧移动,起到类似空气幕的作用。当风速比逐渐变大,CO 高浓度区会向右侧(低速区)逐渐偏移,且最大浓度逐渐减小。

图 9 为不同风速比情况下,隧道内 CO 气体质量分数随时间的变化情况。由图 9 可知,各通风时间,不同风速比时,左洞 CO 浓度分布相差不大,可以认为风速比对左洞 CO 浓度变化无明显影响。相同时间时,当风速比逐渐变大,右洞隧道相同位置

的 CO 浓度逐渐变大,且 CO 峰值浓度位置逐渐向斜井交叉处偏移,这是由于 CO 气团迁移速度随右洞通风风速变大而增大,与云图分布情况保持一致。

## 5 结论

(1)通过对斜井转正洞段隧道通风进行分阶段设计,实施差异化的通风方式。引入“巷道+压入式”通风的短距离高效通风策略,有效降低了通风过程中的阻力,进而实现隧道通风效果的最大化。

(2)当隧道内通风风速逐渐减小,CO 气团的迁移速度逐渐变慢,在隧道内伸展长度增长。

(3)斜井两侧 CO 气团在斜井交界处互相掺混,形成 CO 高浓度区,当风速比逐渐变大,CO 高浓度区会向右侧(低速区)逐渐偏移,且最大浓度逐渐

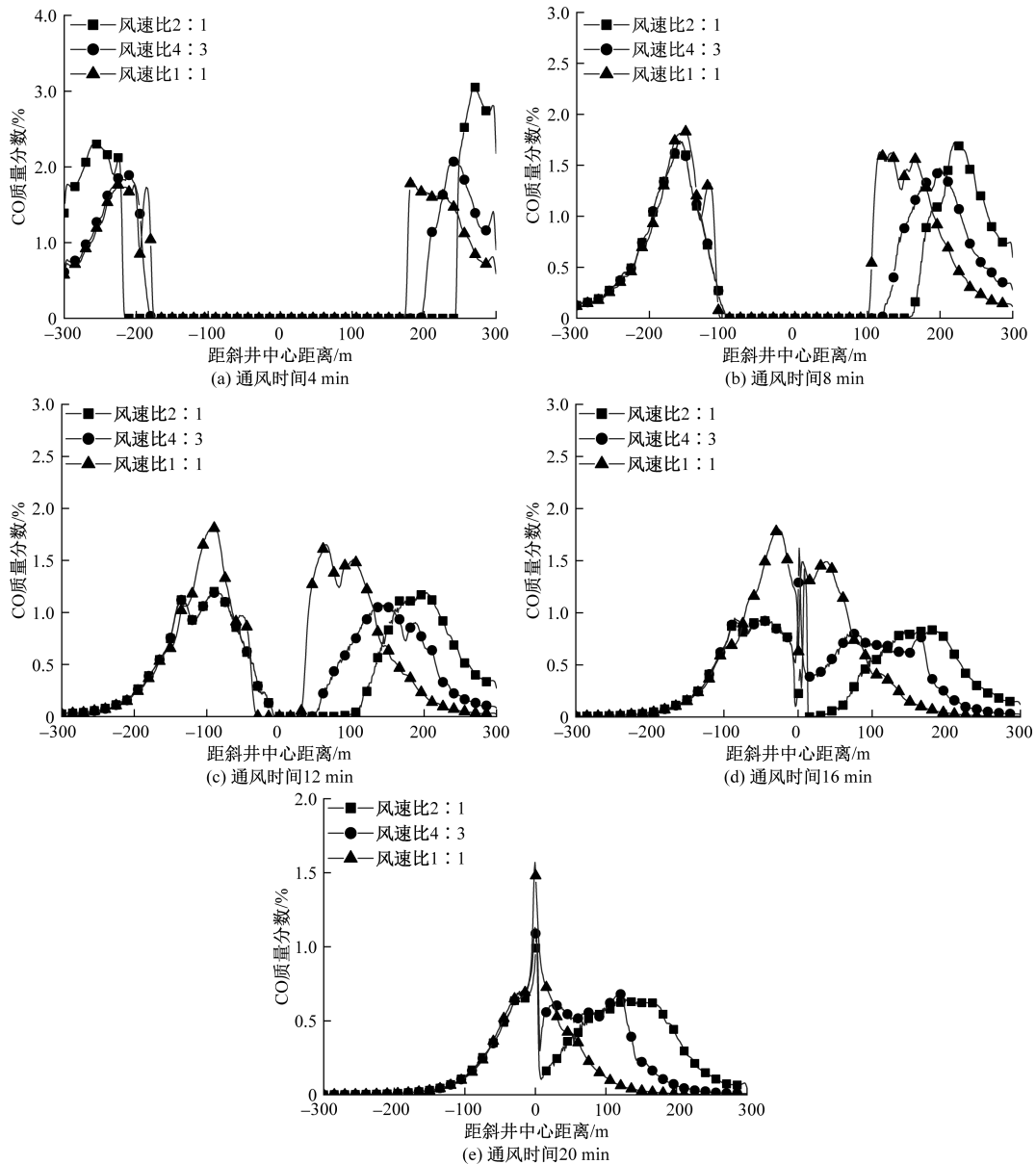


图 9 不同时刻各工况 CO 质量分数

减小。

(4)各通风时间、不同风速比时,左洞 CO 浓度分布相差不大,可以认为风速比对左洞 CO 浓度变化无明显影响。

### 参考文献

- [1] 惠冰,王琳,张文俊,等. 山岭公路隧道 CD 法开挖过程安全稳定性分析[J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52(1): 86-92.
- [2] 李昱熙,张恒,张志强,等. 复杂地下洞室群施工污染气体及粉尘通风运移[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4773-4781.
- [3] 刘钊春,柴军瑞,贾晓梅,等. 压入式通风掘进面有害气体浓度扩散数值模拟[J]. 岩石力学, 2009, 30(S2): 536-539.
- [4] 苟红松,李永生,罗占夫. 高海拔地区隧道施工通风风量计算及风机选型研究[J]. 隧道建设, 2012, 32(1): 53-56.
- [5] 邓祥辉,刘钊,刘钊春. 两河口长隧道独头掘进压入式施工通风三维数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 35-41.
- [6] 李自强,谢文强,王明年,等. 虹梯关特长公路隧道施工通风节能技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 760-766.
- [7] 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.
- [8] 何聪. 大丽攀铁路特长高瓦斯隧道施工通风方案研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 478-484.
- [9] 罗燕平,韩景科,文展,等. 金家庄特长螺旋隧道施工通风方案优化分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 385-391.
- [10] 吴波,陈辉浩,黄惟. 铁路隧道压入式通风流场分析及施工参数优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2922-2928.
- [11] 赵树磊,王海洋,赵宁雨,等. 米拉山隧道独头极限通风距离下污染物运移规律研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 367-374.
- [12] 刘庆宽,郑肖楠,崔会敏,等. 高海拔高地温铁路隧道施工通风 CO 扩散特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S2): 1015-1022, 1029.
- [13] 裴真真,王亚楠. 长斜井双洞隧道斜井断面与通风管尺寸经济对比研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 213-219.
- [14] 冉捷,王林峰,李鸣,等. 考虑开挖过程的瓦斯隧道施工通风影响机制:以鸡鸣隧道为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 804-811.
- [15] 胡威东. 超大直径泥水盾构隧道施工通风设计方案研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 186-194.
- [16] 王朋,潘红伟,程锋,等. 特长隧道斜井施工段通风优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 72-81.
- [17] 陈星宇,吴剑,任松,等. 高海拔隧道施工期污染物扩散规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(1): 176-187.
- [18] 王静华,陈强,田万良. 长斜井特长隧道施工通风设计研究与应用[J]. 公路, 2024, 69(1): 416-424.
- [19] 喻兴洪,黄才明,杨智成,等. 高瓦斯长大公路隧道施工通风优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 411-419.
- [20] 周洋,赵宇,张志强,等. 高瓦斯长大公路隧道施工通风优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 411-419.

## Construction Ventilation Design of Long Tunnel with Inclined Shaft Turning into Main Tunnel

XUE Wei, ZHOU Baogang

(Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Tunnel construction ventilation can effectively eliminate harmful gases and dust, and ensure the safety of construction environment. Taking an extra-long road tunnel as an example, the air demand for the construction of inclined shafts and tunnels was calculated with multiple working faces, choose the appropriate fan models, and the tunnel construction ventilation in stages was designed according to the construction progress of inclined shafts and main caves. A section of the split tunnel was used as a ventilation tunnel, and the roadway + pressurized ventilation method is adopted to shorten the length of the air supply ducts. FLUENT software was used to establish a three-dimensional numerical model of multi-working face construction ventilation, in-depth study of CO(carbon monoxide) diffusion regulations in tunnels. The results of the study show that CO migrates from near the tunnel face to the entrance in the form of "air mass", and the migration rate is positively correlated with the ventilation wind speed in the tunnel. The location of the high CO concentration zone at the intersection of the inclined shaft gradually shifts to the right (low velocity zone) as the wind velocity ratio gradually becomes larger, and the maximum concentration gradually decreases. The wind speed ratio has no significant effect on the change of CO concentration in the left hole.

**Keywords:** tunnel; construction ventilation; stage design; pollutant dispersion; numerical simulation