

DOI: 10.7672/sgjs2024190093

单线特长高铁隧道斜井长距离多工作面 通风方案优选研究*

文 凯, 姬传军

(中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750)

[摘要] 秦岭马白山隧道属于特长双洞单线高铁隧道,其2号斜井工区共下辖斜井及正洞左右线大小里程5个工作面。针对工期紧、多工作面施工、洞内环境复杂的情况,隧道通风方式选择及通风效果关系到隧道施工进度、施工人员身体健康、工程造价等方面,因此选取合理的通风方式尤为重要。采用理论分析和数值模拟相结合的方法,建立三维数值模型,对施工通风的相关参数和隧道多工作面施工通风方案进行选型研究。通过理论计算,分析不同方案下风速和气体运移扩散规律,选配满足要求的通风机型及配置台数,解决了多工作面施工过程中风筒的布置问题。

[关键词] 隧道;斜井;通风;数值模拟;风速;空气流场

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)19-0093-06

Research on Optimization of Ventilation Plans of Single Track Extra Long High-speed Railway Tunnel Inclined Shaft with Long Distance and Multiple Working Faces

WEN Kai, JI Chuanjun

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: The Mabaishan Tunnel in the Qinling Mountains is an extra-long double-hole single-line high-speed railway tunnel. No. 2 inclined shaft work area has a total of five working faces of the inclined shaft and left and right lines of the main tunnel. In view of the tight construction period, multi-face construction, and complex environment in the tunnel, the selection of tunnel ventilation methods and ventilation effects are related to the tunnel construction progress, the health of workers, and the cost of project. Therefore, it is particularly important to select a reasonable ventilation method. By combining theoretical analysis and numerical simulation, a three-dimensional numerical model was established, and the relevant parameters of construction ventilation and the selection of a construction ventilation scheme for the multi-working face of the tunnel were studied. Through theoretical calculation, the law of wind speed and gas migration and diffusion under different schemes is analyzed, and the fan type and configuration number that meet the requirements are selected to solve the layout problem of the air duct in the construction process of multiple working faces.

Keywords: tunnels; inclined shaft; ventilation; numerical simulation; wind speed; air flow field

0 引言

随着我国交通基础设施投资持续增长和高速铁路建设的蓬勃发展,特长山岭隧道的建设规模日益增加。在特长山岭隧道的建设中,为缩短工程建

设周期,多采用竖井、斜井或平行导洞等开辟多个辅助工作面,以实现长隧短打。

施工通风作为特长隧道施工的关键组成部分,国内外很多学者进行了大量研究^[1-4]。目前隧道施工通风方式有独头压入式、抽出式、巷道式和混合式等,其中独头压入式通风使用最为广泛。仇玉良等^[5]依托秦岭终南山特长公路隧道,采用高精度压

* 中国铁路总公司科技研究开发计划(P2018G048)

[作者简介] 文 凯,高级工程师,E-mail:48763457@qq.com

[收稿日期] 2024-03-20

差法对喷射混凝土的通风阻力系数现场测试,并提出了喷射混凝土衬砌通风阻力系数。王明年等^[6]采用 CFD 数值模拟和多项式拟合数值分析方法,对风管出口到掌子面的距离以及风管出口风量对施工通风时间的影响规律进行了研究。赵树磊等^[7]依托米拉山特长隧道,采用现场测试和数值模拟等方法,研究了独头压入式通风极限距离下的 CO、粉尘等通风污染物的运移规律,表明粉尘扩散距离与通风时间满足三次函数关系,CO 气体扩散距离与通风时间呈线性关系。Zhou 等^[8]利用 CO 作为示踪气体模拟污染迁移的特性,通过小比例尺模型研究了阻塞率和出风口与掌子面之间的距离对压入式通风效果的影响,并研究了隧道几何形状、斜井与正洞之间的夹角、斜井坡度等对风机能耗的影响。为解决特长隧道压入式通风距离长、粉尘浓度过大的问题,技术人员引入了中继风仓系统和细水雾降尘系统。Tao 等^[9]开发了一种新型风仓通风系统,并通过建立 3D 数值模型,讨论了风仓长度、隔板长度和风机布置等对轴流风机通风效率的影响。

综上,目前采用数值模拟和工程类比法,在一定程度上解决了隧道主洞施工通风中一些规律性问题,为特长隧道斜井施工段通风方案的设计提供参考。

1 工程概况

新建西安至十堰高速铁路(陕西段)站前工程 XSZQ-2 标秦岭马白山隧道位于陕西省蓝田县和商洛市商州区境内,全长 22.918km,为特长双洞单线高铁隧道,最大埋深 620m,最小埋深 76m。洞内采用人字坡,每 500m 设置 1 处横通道,联通左右线。该隧道设置进口、1~4 号斜井及出口工区。根据施工组织设计,其中 2 号斜井工区计划承担斜井 2 695m+正洞左线 6 221m+正洞右线 5 629m 的施工任务。2 号斜井任务划分如图 1 所示。

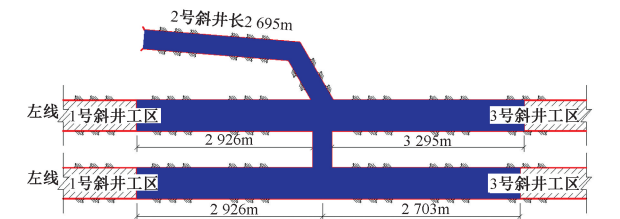


图 1 2 号斜井任务划分

Fig. 1 Task division of No. 2 inclined shaft

2 原有通风方案及其问题分析

秦岭马白山隧道 2 号斜井施工采取压入式通风方案。在斜井洞口布置安装 1 套轴流风机,配置

φ2.0m 柔性风管满足斜井供风。

斜井完成后,进入正洞左、右线分别向西安、十堰方向掘进。左线西安端通风长度 2 926m、十堰端通风长度 3 295m,右线西安端通风长度 2 926m、十堰端通风长度 2 703m。采用 1 座斜井带 4 正洞工作面模式,斜井掘进时采用压入式通风,斜井开始转入正洞施工采用风室接力式通风。由风室向各个工作面继续通风,在风室的各个工作面配置 1 台轴流风机,并配备 φ2.0m 风筒布。原有通风方案如图 2 所示。

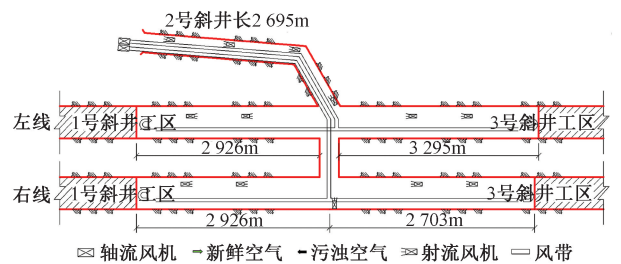


图 2 原有通风方案

Fig. 2 Original ventilation scheme

2.1 正洞单工作面需风量计算

隧道作业面所需通风量应根据隧道内同时工作的最多人数、一次起爆炸药量所产生的有害气体、隧道内同时作业的内燃机械产生的有害气体等因素所需要的通风量,并取其中的最大值作为隧道施工作业面的需风量,再按排尘最低风速进行验算。

1) 按隧道内最多同时工作人数计算需风量

$$Q_1 = m_{\max} q k \approx 216 \text{ m}^3/\text{min} \quad (1)$$

式中:洞内同时工作的最多人数 $m_{\max} = 60$ 人;每人每分钟呼吸所需空气量 $q = 3 \text{ m}^3/\text{min}$;风量备用系数 $k = 1.2$ 。

2) 按隧道内允许最低风速计算需风量

$$Q_2 = 60 v S \approx 1 493 \text{ m}^3/\text{min} \quad (2)$$

式中:隧道内允许最低风速 $v = 0.25 \text{ m/s}$;隧道开挖断面面积 $S = 99.5 \text{ m}^2$ 。

3) 按排除炮烟计算需风量

$$Q_3 = \frac{2.25}{t} \times \sqrt[3]{\frac{AbS^2L^2K}{P^2}} \approx 1 721 \text{ m}^3/\text{min} \quad (3)$$

式中:爆破后通风时间 $t = 15 \text{ min}$;一次开挖爆破耗药量 $A = 422 \text{ kg}$;炸药有害气体生成量 $b = 40 \text{ L/kg}$;隧道开挖断面面积 $S = 99.5 \text{ m}^2$;炮烟抛掷长度 $L = 99.4 \text{ m}$;考虑淋水使炮烟浓度降低的系数 $K = 1$;巷道计算长度范围内漏风系数 $P = 1.05$ 。

4) 按稀释内燃机废气计算需风量

$$Q_4 = k \sum N_i T_i \approx 1 940 \text{ m}^3/\text{min} \quad (4)$$

式中: k 为单位功率稀释内燃机废气所需新鲜风量, $k=3\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{kW}$; N_i 为内燃机额定功率(kW),2 台装载机,功率 162kW/台,负荷率按 1 考虑;2 台出渣车,功率 215kW/台,按满载 1 台,负荷率 1,空载 1 台,负荷率 0.5 考虑; T_i 为内燃机利用率系数。

综上,正洞单工作面的需风量 $Q_{\text{需}}=\max(Q_1,Q_2,Q_3,Q_4)=1\,940\text{m}^3/\text{min}$ 。

2.2 风机设备配置计算

根据通风风损、风阻与风管直径的关系,以及斜井内净空条件的限制,隧道选取直径 2.0m 的风管。

1) 风机供风量计算

采用压入式通风方式时,需要利用风管进行新鲜空气输送,这时需考虑风管漏风率的影响。

$$Q_{\text{供}}=\eta Q_{\text{需}}$$

(5)

式中: η 为风管漏风系数, $\eta=\left(1-\frac{L}{100}\times\beta\right)^{-1}$, 风管百米漏风率 $\beta=1.0\%$; L 按最大通风长度取风管长度; $Q_{\text{需}}$ 为掌子面需风量(m^3/min)。

2) 风管风阻

$$R_{\text{f}}=\frac{6.5\alpha L}{d^5}$$

(6)

式中: R_{f} 为风管风阻(Pa); 摩擦阻力系数 $\alpha=0.001\,6$; L 按最大通风长度取风管长度; 风管直径 $d=2\text{m}$ 。

3) 风管内风流流量

$$Q=\sqrt{Q_{\text{需}}Q_{\text{供}}}$$

(7)

式中: $Q_{\text{需}}$ 为掌子面需风量(m^3/min); $Q_{\text{供}}$ 为风机供风量(m^3/min)。

4) 沿程阻力损失

$$h_{\text{f}}=R_{\text{f}}Q^2$$

(8)

式中: h_{f} 为沿程阻力损失(Pa)。

5) 局部阻力损失经综合考虑后取 200Pa。

6) 风机全压计算

$$H_{\text{f}}\geq h_{\text{t}}=h_{\text{f}}+h_{\text{x}}$$

(9)

式中: H_{f} 为风机全压(Pa); h_{f} 为沿程阻力损失(Pa); h_{x} 为局部阻力损失(Pa),取 200Pa。

7) 风机功率计算

$$W\geq\frac{KH_{\text{f}}Q_{\text{供}}}{\eta}$$

(10)

式中: $Q_{\text{供}}$ 为风机供风量(m^3/s); H_{f} 为风机全压(Pa); K 为功率储备系数,取 1.05; η 为风机效率,取 0.8。

2.3 风室至掌子面设备配置计算结果

根据风量、风压计算结果进行风机选型。选择

能够同时满足通风所需风量及风压的风机,对隧道作业面进行压入式通风,如表 1 所示。

表 1 斜井风室至掌子面设备配置计算

Table 1 Equipment configuration calculation of inclined shaft air chamber to palm face

序号	项目	左线 小里程	右线 小里程	左线 大里程	右线 大里程
1	管道漏风系数	1.49	1.44	1.38	1.38
2	风机供风量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	48	47	45	45
3	管道风阻	1.07	0.99	0.90	0.90
4	管道内 风量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	39	39	38	38
5	沿程阻 力损失/Pa	1627	1506	1300	1300
6	局部阻 力损失/Pa	200	200	200	200
7	通风机 全压要求/Pa	1 827	1 706	1 500	1 500
8	通风机 功率要求/kW	115	105	29	29
9	风机选择	AVH-R16 0.315.1.8	AVH-R16 0.315.1.8	AVH-R16 0.315.1.8	AVH-R 160.315.1.8

2.4 斜井洞口至风室设备配置计算结果

风室内最大需风量为 $10\,440\text{m}^3/\text{min}$,考虑 3 个掌子面出渣,1 个掌子面按最低风速,由 3 台风机供应,则斜井到风室的洞内最大需风量 $Q_{\text{需}}=5\,220\text{m}^3/\text{min}$ 。斜井至风室的各参数及通风风机选型如表 2 所示。

表 2 斜井至风室设备配置计算

Table 2 Equipment configuration calculation of inclined shaft to air chamber

序号	项目	斜井口
1	管道漏风系数	1.37
2	风机供风量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	119
3	管道风阻	0.87
4	管道内风量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	102
5	沿程阻力损失/Pa	9 051
6	局部阻力损失/Pa	200
7	通风机全压要求/Pa	9 251
8	通风机功率要求/kW	1 445
9	风机选择	AVH-R180.500.4.8

2.5 通风布置

2.5.1 斜井单工作面施工通风(第 1 阶段)

斜井洞口设置 1 套 AVH-R160.315.1.8 通风机,风量 $22\sim70\text{m}^3/\text{s}$,风压 $1.3\sim2.2\text{kPa}$,配备 $\phi2.0\text{m}$ 风筒布向工作面通风,如图 3 所示。

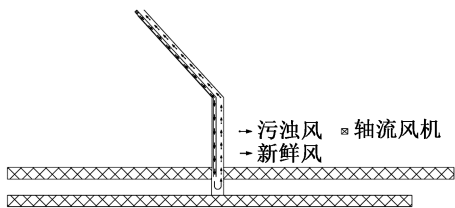


图 3 斜井单工作面施工通风

Fig. 3 Construction ventilation of single working face of inclined shaft

2.5.2 正洞多工作面施工通风(第 2 阶段)

在斜井口设置 3 套 AVH-R180.160.2.8 通风机,单套风机风量 $40 \sim 120\text{m}^3/\text{s}$,总风量 $120 \sim 360\text{m}^3/\text{s}$,风压 $4.0 \sim 7.0\text{kPa}$,配备 $\phi 2.0\text{m}$ 风筒布连接至风室;风室各工作面设置 1 套 AVH-R160.160.2.8 通风机,风量 $44 \sim 80\text{m}^3/\text{s}$,风压 $2.5 \sim 4.3\text{kPa}$,配备 $\phi 2.0\text{m}$ 风筒布向各个工作面通风,如图 4 所示。

2.6 问题分析

秦岭马白山隧道通过斜井进入正洞施工,通过 2 700m 长斜井向掌子面进行压入式通风,通风距离很长,原有通风方案存在以下问题。

1)在正洞多工作面施工通风时,多个工作面同时工作时需风量巨大,存在风仓供风量不足的状况,需要增大风室体积才能满足要求。

2)由于风仓体积增大,原有第 2 阶段通风方案在洞口设置 3 套通风机可以减少 1 套,在满足通风要求的基础上具备经济性原则。

3)由于风仓体积增加会使得左线西安端方向的大型机械无法从正洞进入斜井。经过方案优化,在 2 号斜井与正洞交点里程处、支洞与正洞交点里程处增设左右线间横通道,作为物流通道。此举缓解了斜井的通风和交通运输压力。

3 优化后通风方案

针对斜井洞口压入式通风存在的问题及困难,

对第 2 阶段通风方案进行优化。

3.1 通风方案

正洞多工作面施工通风(第 2 阶段):斜井开挖完成后采用 1 座斜井带 4 正洞工作面模式,开始向左线和右线各向西安和十堰方向掘进。在斜井洞口设置 2 套 AVH-R180.160.2.8 通风机,单套风机风量 $40 \sim 120\text{m}^3/\text{s}$,总风量 $120 \sim 360\text{m}^3/\text{s}$,风压 $4.0 \sim 7.0\text{kPa}$,配备 $\phi 2.0\text{m}$ 风筒布连接至风室;再由风室向各工作面继续通风,风室各工作面设置 1 套 AVH-R160.160.2.8 通风机,风量 $22 \sim 70\text{m}^3/\text{s}$,风压 $2.5 \sim 4.3\text{kPa}$,配备 $\phi 2.0\text{m}$ 风筒布。优化后正洞多工作面施工通风如图 5 所示。

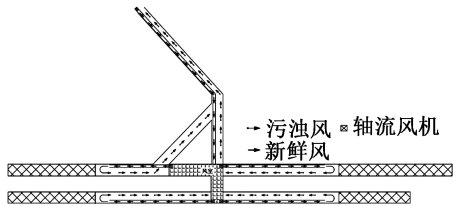


图 5 优化后正洞多工作面施工通风

Fig. 5 Construction ventilation of multi-face construction after optimization

3.2 新、旧通风方案比较

第 1 阶段通风时采取的送风方式与原有方案基本一样,第 2 阶段与原有通风方案进行优化设计,不同之处如下。

1)斜井洞口减少 1 台轴流风机。

2)风室的大小不同,新方案的风室为“左线西安端 80m 范围内+横通道顶部”,较原方案有较大增加。

3)污风的排出途径不同。新鲜风由斜井输送到风室,再从风室由各工作面的通风机输送到掌子面,其中左线西安端的污风由正洞途经支洞进入斜井,最终排出隧道,右线西安端、左线十堰端和右线十堰端 3 个方向的污风由正洞途经横通道直接进入

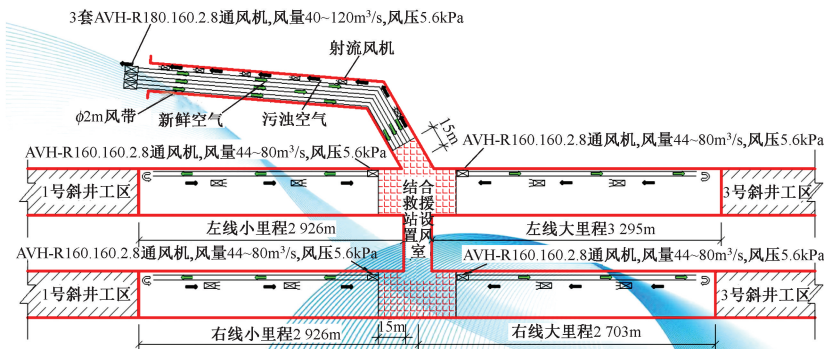


图 4 正洞多工作面施工通风

Fig. 4 Construction ventilation of multi-face construction in positive hole

斜井,最终排出隧道。

4)左线西安端风管最长通风距离较旧方案减少了 50m。

3.3 可行性研究

采用优化后的通风方案前,对该方案进行数值模拟计算分析。结合具体情况及实际模拟的需要建立模型。隧道模型与实际工程比例为 1 : 1,风筒直径为 2.0m,出风口距离掌子面均为 25m。通风管道位于隧道顶部,向工作面送风。数值模拟计算模型如图 6 所示。

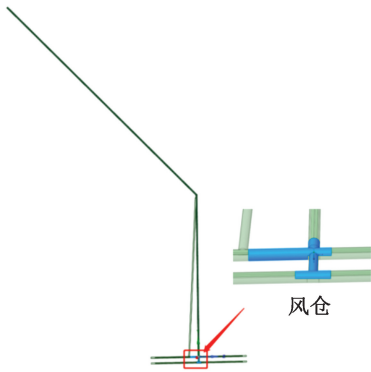


图 6 数值计算模型
Fig. 6 Numerical calculation model

4 通风效果分析

针对马白山隧道 2 号斜井施工的新、旧通风方案,利用 Fluent 软件对其第 2 阶段通风时正洞掌子面爆破产生 CO 气体和风流流场开展数值模拟计算,并对数值计算结果进行分析。

绘制隧道左线西安、十堰方向和右线西安、十堰方向的空气流场速度迹线云图,可以看出,分布呈现压入式隧道通风的典型流场特性,可将气体在隧道内的流动区域分为 4 类:附壁射流区、冲击射流区、涡流区、回流区。4 个掌子面前方均产生了涡流区,涡流区域均出现在各掌子面前方 30m 范围内;在回流起点和射流起点之间形成涡流,在射流冲击区附近形成涡核,将带动更多的被污染空气向出口流动;在远离掌子面 50m 之后,紊乱的流线才逐渐变得平滑并且稳定。

由于射流过程中气流与内壁摩擦作用、气流冲击掌子面、气流相互作用等导致的能量损失,让气流由管口射出后风速呈阶梯性递减,数值模拟计算如表 3 所示。隧道内风速均>0.25m/s,满足规范要求。

选取通风 10s 和 1,5,10,15,20,25min 时隧道整体的 CO 摩尔浓度云图,展示隧道内 CO 的运移规律。CO 气体是以气团的形式向隧道外扩散的,且

表 3 数值模拟计算

Table 3 Numerical simulation calculation

隧道线别和方向		出风口风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	掌子面风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	降幅/ %
左线	西安方向	18.21	2.44	86.60
	十堰方向	17.19	2.17	87.38
右线	西安方向	18.84	1.93	89.76
	十堰方向	18.42	2.16	88.27

随着隧道通风时间的增加,CO 气团覆盖的范围不断增大,峰值浓度不断降低,说明在隧道内流动表现出明显的扩散特性。越远离工作区,CO 浓度降低得越慢,达到施工标准的通风时间越长。其一是因为风流在隧道内会产生能量损耗,距离掌子面越远,风速会逐渐减小,使得通风时间加长;二是因为隧道斜井具有一定的坡度,会在一定程度上影响 CO 气体排出斜井的速度,进而加长通风时间。

大约在通风 2min 时,左线十堰方向、右线西安方向和右线十堰方向的 CO 气体开始在横通道位置汇合,途径斜井排出隧道外。大约在 3min 时,左线西安方向的 CO 气体开始到达正洞与支洞交叉位置,随着时间的增加,途经支洞,经由斜井排出隧道外。大约在 8min 时 CO 气体到达斜井转折位置,此时左线十堰方向、右线西安方向和右线十堰方向的 CO 气体会较左线西安方向的先到达此处。大约在 11min 时两股 CO 气体汇合,最终一起排出隧道外。大约在 25min 时,整个隧道内的 CO 气体浓度达到规范规定的浓度之下。其中大约在通风 5min 时,在掌子面 200m 距离内 CO 气体浓度达到标准之下。

与原有通风方案相比,优化后的通风方案优势明显。

1)优化后方案的风速较旧方案有所提升(见表 4)。由表 4 可知,左线西安方向在通风管道出风口位置时,新方案比旧方案风速提升 128.48%,在掌子面前方位置时,新方案比旧方案风速提升 165.22%。右线西安方向在通风管道出风口位置时,新方案比旧方案风速提升 234.64%,在掌子面前方位置时,新方案比旧方案风速提升 101.04%。左线十堰方向在通风管道出风口位置时,新方案比旧方案风速提升 120.95%,在掌子面前方位置时,新方案比旧方案风速提升 112.75%。右线十堰方向在通风管道出风口位置时,新方案比旧方案风速提升 195.19%,在掌子面前方位置时,新方案比旧方案风速提升 87.83%。

2)优化后方案的 CO 气体排出时间较旧方案缩短。新方案大约在通风 5min 时,在掌子面 200m 距离内 CO 气体浓度达到标准,而旧方案则大约需要

表 4 新、旧方案风速对比

Table 4 Comparison of wind speed between new and old schemes

工作面	位置	旧方案 风速/(m·s ⁻¹)	新方案 风速/ (m·s ⁻¹)	风速提升/ %
左线西安	通风管道出口	7.97	18.21	128.48
方向	掌子面前方	0.92	2.44	165.22
右线西安	通风管道出口	5.63	18.84	234.64
方向	掌子面前方	0.96	1.93	101.04
左线十堰	通风管道出口	7.78	17.19	120.95
方向	掌子面前方	1.02	2.17	112.75
右线十堰	通风管道出口	6.24	18.42	195.19
方向	掌子面前方	1.15	2.16	87.83

通风 11min,较新方案时间增加 1 倍多。新方案大约在通风 25min 时,整个隧道内的 CO 气体浓度达到规范规定的浓度之下,而旧方案则大约需要通风 38min,比新方案多 13min。

5 结语

针对秦岭马白山特长隧道 1 座斜井辅助 4 个隧道施工的复杂工况,工期紧、物流组织难、洞内环境复杂,采用合理的通风方案、设备布置、管理方式是解决特长隧道复杂工况通风难题的重要方法和途径。采用双联式辅助坑道设计,优化通风和物流方案,增大了风仓体积,加大了风量存储,改变了左线西安端的污风排出隧道路线,解决了多工作面施工过程中风仓的布置问题并且避免了车辆出现拥堵的情况。通过数值模拟计算,对比新旧通风方案可知,运用新的通风方案后,洞内通风效果良好,提高了施工效率,达到了预期的通风目标。

参考文献:

[1] AKHTAR S, SKUMRAL M, SASMITO A P. Correlating variability of the leakage characteristics with the hydraulic performance of an auxiliary ventilation system[J]. Building and environment, 2017, 121(47): 200-214.

[2] SF F P,ZHOU X Q,WANG Y. Influence of atmospheric pressure fluctuation on air leakage rate of airtight-wall [J]. Procedia

engineering, 2011, 11: 401-408.

[3] 赵宁雨,吕陈伏,陈弘杨,等. 高海拔长大隧道压入式施工通风的合理长度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020,39(3):94-99,128.

ZHAO N Y, LÜ C F, CHEN H Y, et al. Study on reasonable length of compression ventilation in high altitude long tunnel construction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science edition), 2019,39(3):94-99,128.

[4] TORANO J, TORNÓ S, MENENDEZ M, et al. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: Validated CFD modelling of dust behaviour[J]. Tunnelling and underground space technology, 2011, 26(1): 201-210.

[5] 仇玉良,李宁军,谢永利. 喷射混凝土衬砌隧道通风阻力系数测试研究[J]. 中国公路学报,2005(1):85-88.

QIU Y L, LI N J, XIE Y L. Sprayed concrete lining of tunnel ventilation resistance coefficient test study [J]. China journal of highway and transport, 2005 (1): 85-88.

[6] 王明年,邓涛,于丽. 基于大断面高铁隧道的施工通风时间理论预测方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38 (8): 1279-1285.

WANG M N, DENG T, YU L. Theoretical prediction method of construction ventilation time based on large section high-speed railway tunnel [J]. Tunnel construction, 2018, 38 (8): 1279-1285.

[7] 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.

ZHAO S L, WANG H Y, ZHAO N Y, et al. Study on the transport of pollutants under the limit ventilation distance of a single head in Mila Mountain Tunnel [J]. Tunnel construction, 2021,41(S2):367-374.

[8] 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.

[9] TAO Y C, HU H,ZHANG H,et al. A new ventilation system for extra-long railway tunnel construction by using the air cabin relay: A case study on optimization of air cabin parameters length [J]. Journal of building engineering, 2018, 339: 354-367.