

特长高瓦斯隧道双斜井辅助正洞施工通风的数值分析

石广斌¹, 来显杰^{1*}, 洪勇¹, 张雯¹, 刘江²

(1.西安建筑科技大学 资源工程学院,陕西 西安 710055;2.贵州省公路工程集团有限公司,贵州 贵阳 550008)

摘要:为研究特长高瓦斯隧道利用双斜井辅助正洞通风的问题,以贵州在建桐梓隧道为例,计算其需风量和选择风机型号,采用数值分析的方法研究了巷道式通风下隧道内风流场变化和瓦斯运移规律.结果表明,该通风方式隧道内瓦斯最高浓度为 0.25%,降低了 86%,正洞回风平均风速可达 0.5 m/s 以上,排风道风速均在 0.75 m/s 以上;射流区一侧瓦斯浓度沿隧道轴向呈“急速下降—逐渐稳定”的趋势,回流区一侧瓦斯浓度沿隧道轴向呈“急速下降—缓慢上升—逐渐稳定”的趋势;掌子面瓦斯浓度随时间呈“急速下降—缓慢上升—逐渐稳定”的趋势;轴向风速在掌子面附近会发生较大波动,瓦斯浓度在距离掌子面 2 m 的位置达到最小.

关键词:特长隧道;瓦斯隧道;施工通风;双斜井;数值模拟;瓦斯运移

中图分类号:U453.5;TD721 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)02-0055-07

Numerical Analysis of Air Ventilation Fraction of Auxiliary Main Tunnel Construction With Double Inclined Shafts in Extra Long High Gas Tunnel

SHI Guangbin¹, LAI Xianjie¹, HONG Yong¹, ZHANG Wen¹, LIU Jiang²

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Guizhou Highway Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550008, China)

Abstract: In order to study the problem in using double inclined shaft to assist the main tunnel ventilation in extra long high gas tunnel, taking the construction ventilation of Tongzi tunnel gas work area under construction in Guizhou as the example, the air demand of tunnel roadway construction ventilation is calculated theoretically and the model of axial flow fan is selected. The change of air flow field and gas migration law in the tunnel are studied by FLUENT software and field monitoring method. Results show that the maximum gas concentration in the tunnel is 0.25%, which is reduced by 86%. The average wind speed of return air in the main tunnel is more than 0.5 m/s, and the wind speed of exhaust duct is more than 0.75 m/s. The gas concentration at one side of the jet area shows a “rapid decline-gradually stable” trend along the tunnel axis, and the gas concentration at one side of the reflux area shows a “rapid decline-slowly rise-gradually stable” trend along the tunnel axis. The gas concentration in the tunnel face shows a trend of “rapid decline-slow rise-gradual stability” with time. The axial wind speed will fluctuate greatly near the tunnel face, and the gas concentration will reach the minimum at 2 m away from the tunnel face.

Keywords: extra long tunnel; gas tunnel; construction ventilation; double inclined shaft; numerical simulation; gas migration

收稿日期:2021-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目青年基金资助项目(51904220);陕西省教育厅基金资助项目(21JK0719)

*通信作者, E-mail:2207077155@qq.com

在我国川滇黔地区,地形复杂且煤炭储量巨大,自“十三五”以来,新建特长公路隧道数量逐年上升,将不可避免地穿越赋存瓦斯的煤系及非煤系地层^[1-3],而良好的施工通风能够保证隧道内外空气流通且有效排除瓦斯等有害气体^[4],营造一个安全、稳定的施工环境.特长公路瓦斯隧道施工通风向来都是国内很多学者研究的主题.曾昌等^[5]探究了瓦斯公路隧道采用巷道式施工通风时瓦斯的体积分数分布规律,该研究有利于优化通风方案,保证方案的可行性;闫肃^[6]根据现场监测数据和数值模拟研究了先压入式后巷道式阶段式的通风效果,有效解决了隧道长距离穿越高瓦斯地层时的通风难题;辛国平等^[7]采用了分隔巷道与风管压入式联合通风模式,有效解决了特长隧道斜井工区的长距离独头通风技术难题;张磊等^[8]对采用竖井辅助通风下隧道内流场分布规律和瓦斯运移扩散规律进行了研究;罗刚等^[9]研究了斜井辅助的压入式和巷道式2种通风方式,认为斜井辅助的巷道式通风效果更好;何聪^[10]研究了主副斜井射流巷道式通风为主的施工通风方案,并对施工通风方案进行优化,较好地解决了特长高瓦斯隧道施工通风问题;吴建福等^[11]分析对比了增设各类辅助通道下施工通风方案的优缺点,最终确定了竖井+斜井的方案.

特长公路隧道大都借助辅助坑道来实现“长隧短打”的施工方式以便加快施工进度,这也为施工通风提供了辅助条件,特别是双洞隧道施工通风常利用横洞、平导、竖井和斜井,以便增加工作面、缩短工期和改善施工环境.大量学者针对采用辅助通道施工通风下隧道内风流场以及瓦斯运移规律展开了大量的研究,其中利用斜井辅助正洞通风的案例有很多,但是大多都是利用单个斜井承担多个工作面的通风,会造成通风困难,瓦斯隧道更甚.因此,笔者提出利用双斜井作为一个闭合回路同时辅助正洞通风的方式,而关于双斜井双洞隧道通风模式的研究并不多,其隧道内流场和瓦斯浓度分布需要进一步的探讨.鉴于此,本文以贵州桐梓隧道为例,较为全面地研究了双斜井辅助正洞通风时隧道内风流场和瓦斯运移规律,以提高瓦斯的排出效率,减少瓦斯聚集,为此类隧道施工通风技术提供依据.

1 工程概况

桐梓隧道为新建兰海高速公路重庆至遵义段(贵州境)双向六车道分离式隧道,依据 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》,该隧道被认定为大断面特长隧道,采用钻爆法施工并结合无轨运输.隧道全长 6 km,净空面积 120 m²;1#斜井全长 1 448 m,净空面积 105 m²;2#斜井全长 1 499 m,净空面积 84 m²;隧道净宽 15.18 m,净高 7.94 m,最大埋深约 600 m.桐梓隧道穿过非煤系地层和煤系地层,目前施工处在非煤系地层,瓦斯地段分布:左幅桩号 ZK37+650~ZK38+160,长 510 m,右幅桩号 YK37+700~YK38+210,长 510 m,为非煤系地层炭质泥岩的页岩气,出露的基岩为志留系下统龙马溪组(S₁l)泥质灰岩与泥岩互层,下部为泥岩、黑色炭质泥岩^[12].

经过研究分析,在非煤系地层,炭质泥岩经过漫长时期的地质作用而炭化生成瓦斯气体,泥岩、炭质泥岩具有生烃能力及储烃能力.在掌子面节理裂隙发育以及爆破振动等因素影响下,下部泥岩、炭质泥岩生成的瓦斯气体通过裂隙涌出到开挖空间,致使掌子面检测到较小的瓦斯浓度.随着掌子面掘进越来越靠近下部的泥岩、炭质泥岩段,掌子面瓦斯涌出越多,特别在东山背斜核心炭质泥岩段瓦斯含量高、瓦斯压力大,瓦斯具有突出危险性,如图 1 所示.根据 JTG/T 3374—2020《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》附录 G 中绝对瓦斯涌出量实测方法,可按照式(1)测定瓦斯绝对涌出量:

$$Q_{\text{CH}_4} = QW_{\text{max}} \quad (1)$$

式中: Q_{CH_4} 为瓦斯绝对涌出量; Q 为隧道断面通风量, m³/min; W_{max} 为稳定回风流中实测最大瓦斯浓度, %.

根据现场测定结果,钻孔孔内瓦斯浓度在 1.8%~10%,掌子面绝对瓦斯涌出量最大值大于 3 m³/min,瓦斯压力最大值大于 0.74 MPa,根据 JTG/T 3374—2020《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》中的瓦斯隧道分类,桐梓隧道被定义为瓦斯突出隧道.

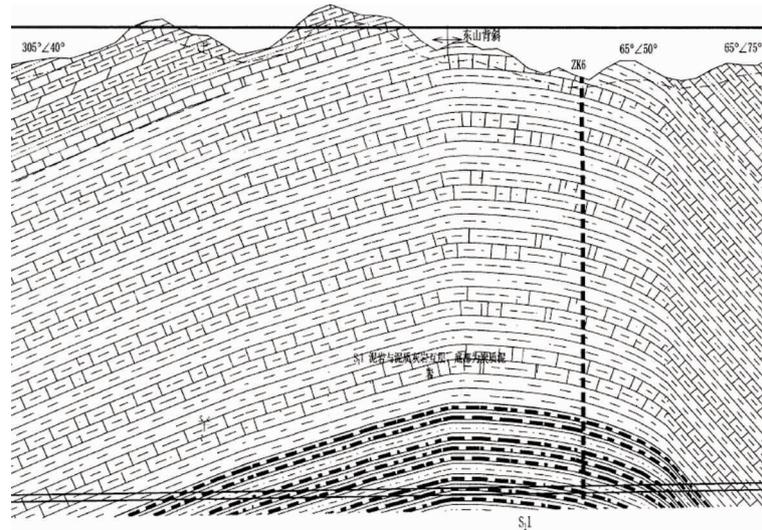


图 1 桐梓隧道左幅非煤系地层瓦斯段分布

施工区分为进口工区和斜井工区,如图 2 所示.斜井工区采用一种双斜井辅助正洞的接力压入式联合巷道式的通风方案,该隧道施工通风在两斜井形成自然通风回路的前提下,利用一条斜井作为送风井,通过洞口风机和风管压入新鲜风流至左洞,在左洞和横通道交叉处前布置 2 组防爆风机接力分别为左右隧道掌子面供给新鲜风流,污风从另一条斜井排出.

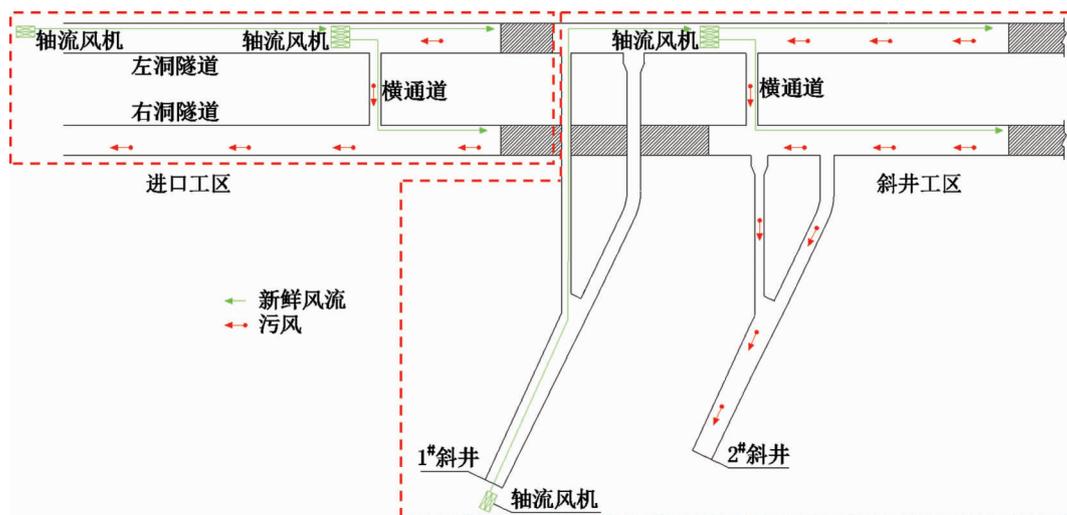


图 2 隧道施工工区划分及通风方式

2 隧道所需风量计算

根据 JTG/T 3374—2020《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》7.2.1,其隧道所需风量应按绝对瓦斯涌出量、爆破排烟、工作的最多人数、作业机械及最小风速等 5 个因素分别计算,取其最大值作为需风量.但在实际情况中还需考虑风管因漏风损失的通风量,通过严格的通风管理,使百米漏风率控制在 1.5% 以内.根据计算可得隧道按绝对瓦斯涌出量、爆破排烟、工作的最多人数、作业机械及最小风速所需风量分别为 2 151, 1 844, 375, 1 714, 1 800 m^3/min ,故取按绝对瓦斯涌出量计算所需最大风量 2 151 m^3/min 作为控制设计通风量,按绝对瓦斯涌出量计算如式(2)所示.考虑需风量、风压以及瓦斯等因素配置 SDGC-No14A、功率为 $2 \times 185 \text{ kw}$ 的变频防爆轴流风机并加装智能控制装备.

$$Q = \frac{1}{(1 - \beta)^{L/100}} \frac{100KQ_{\text{CH}_4}}{(N_a - N_b)} \quad (2)$$

式中: β 为通风管百米漏风率, 取 1.5%; L 为通风管长度, m; Q_{CH_4} 为绝对瓦斯涌出量, 计算中取最大瓦斯涌出量 $7.17 \text{ m}^3/\text{min}$; K 为瓦斯涌出不均衡系数, 介于 1.5~2.0, 取值 1.5; N_a 和 N_b 分别为隧道内最大允许瓦斯浓度和进风中瓦斯浓度, 分别取 0.5% 和 0.

3 模型建立与边界条件

3.1 物理模型

物理模型以桐梓隧道实际尺寸为准, 取斜井工区隧道长度 200 m 建立物理模型, 风管直径 1.8 m, 位于隧道侧壁距底面 4 m 处, 风管末端至掌子面距离 L_z 为 15 m, 如图 3 所示. 利用 workbench 界面下 geometry 建立三维模型, 将模型导入 icem 进行结构网格划分. 其中 1, 2 为连接回风斜井的排风道, 3 为横通道, 4, 5 分别为左右线隧道, 6 为左洞掌子面到横通道之间的局部模型, 如图 4 所示.

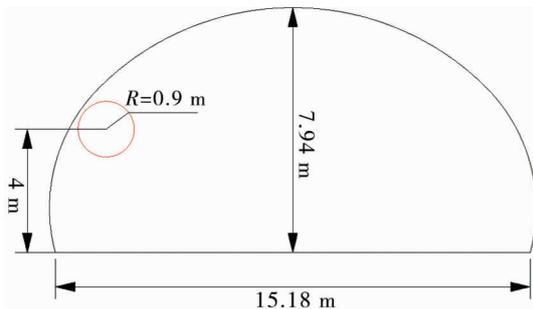


图3 隧道断面尺寸

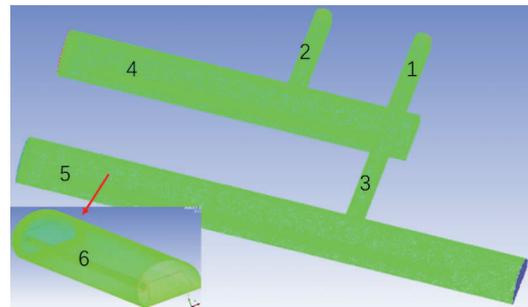


图4 隧道三维模型及结构网格划分

3.2 采用数学模型及边界条件

通过对实际工程情况进行简化和假定, 以便利用 Fluent 进行数值计算. 假定隧道内气体为不可压缩体, 整个过程中温度保持恒定, 隧道壁面简化为具有粗糙度的平面边界. 基于以上假设, 再考虑到隧道内的空气流动为紊流, 可确定数学模型为标准的 k -epsilon 二方程紊流模型, 其控制方程包括连续性方程、动量守恒方程、 k 方程和 epsilon 方程.

连续性方程: 对于定常不可压缩流动, 密度为常数, 且只考虑沿隧道的方向, 公式可简化为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (3)$$

动量守恒方程: 不考虑流体黏性的情况下, 公式可简化为

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = F_i - \frac{\partial p}{\rho \partial x_i}. \quad (4)$$

k 方程:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \varepsilon. \quad (5)$$

epsilon 方程:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} p - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

式中: u_i 为风速分量, m/s; t 为时间, s; F_i 为质量力, m/s²; p 为压力, pa; ρ 为空气密度, kg/m³; k 为紊流动能, m²/s²; μ 为动力黏性系数, pa·s; μ_t 为紊流动力黏性系数, pa·s; G_k 为紊流能量生成率; ε 为紊流动能耗散率, m²/s³; 经验常数取值分别为 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$.

根据工程实际条件可将边界条件确定如表 1 所示, 其中隧道进口测得风速即为送风斜井风速, 反映送风斜井送风量; 排风道 1, 2 连接回风斜井, 定义为出口边界, 反映回风斜井瓦斯排出情况; 绝对瓦斯涌出量 $3.2 \text{ m}^3/\text{min}$, 假设从距掌子面 0.1 m 的空气源项均匀涌出; 壁面粗糙高度取 0.03 m, 风管壁面取 0.01 m.

表 1 计算模型参数设定

边界条件	参数设定	边界条件	参数设定
求解器	基于压力求解器	隧道进口	velocity-inlet,取 1 m/s
求解方法	Coupled	出口边界类型	outflow
离散格式	二阶迎风	粗糙高度	隧道内壁取 0.03 m
湍流模型	标准的 k -epsilon 二方程	粗糙系数	取 0.5
湍流扩散模型	组分运输模型	质量源项	掌子面附近 10 cm 处设置流体域
入口边界类型	velocity-inlet,取 13.5 m/s		

4 结果分析

4.1 数值模拟验证

本文为验证数值模拟参数设置及计算结果的可用性,依据 JTG/T 3374—2020《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》中的图 G.0.9-2 瓦斯监测断面测点示意图,在掌子面附近断面的不同位置布置了相应测点,包括拱顶、拱肩、下拐角、中轴线以及人工活动高度区域(1.7 m),测点距壁面 250 mm,如图 5 和图 6 所示.选取了回风侧的下拐角位置(测点 7)进行风速和瓦斯浓度的测量,并导出左洞距离掌子面 0~60 m 的平均风速变化数据、测点 7 的风速及瓦斯浓度变化数据与现场测试结果进行分析对比,如图 7 和图 8 所示.由此可知,数值模拟的结果和测量结果较为吻合,误差均在 10%以内,保证了下一步模拟分析结果的正确性.

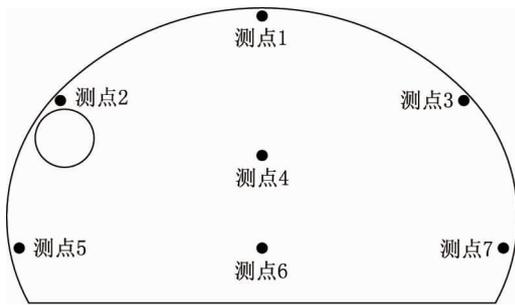


图 5 断面测点分布



图 6 风速、瓦斯检测

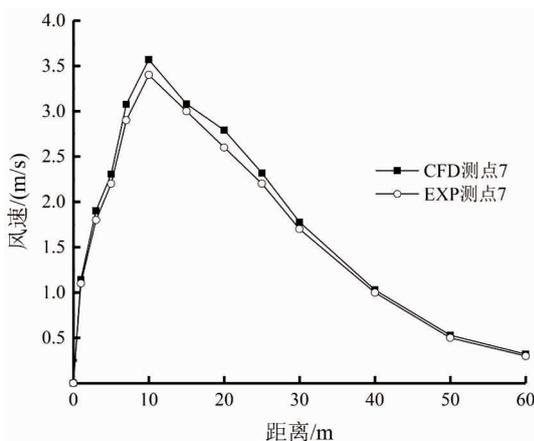


图 7 测点 7 风速对比

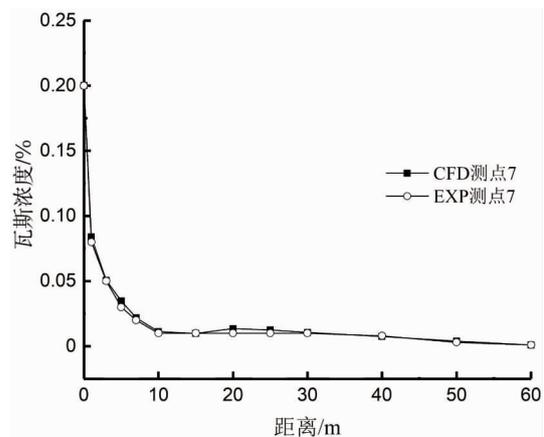


图 8 测点 7 瓦斯浓度对比

4.2 隧道内风流场变化规律分析

图 9 为 XOZ 中轴面上风速流线分布,图 10 为各测点风速轴向分布.由图 9 和图 10 可知,各测点轴向风速在掌子面附近均会发生较大波动,说明新鲜风流从风管射出,依附隧道壁面流向掌子面形成射流区,当风流与掌子面碰撞之后转向回流,一部分风流直接沿着隧道另一侧壁面排出形成回流区,另一部分风流

在风管出口处受到射流风流跟回流风流的综合作用被卷吸形成涡流区.各区域具有明显的边界区分,回流区测点3、测点7风速较射流区测点2、测点5和涡流区测点1、测点4、测点6风速要小很多,当风流到达距掌子面50 m后趋于稳定.

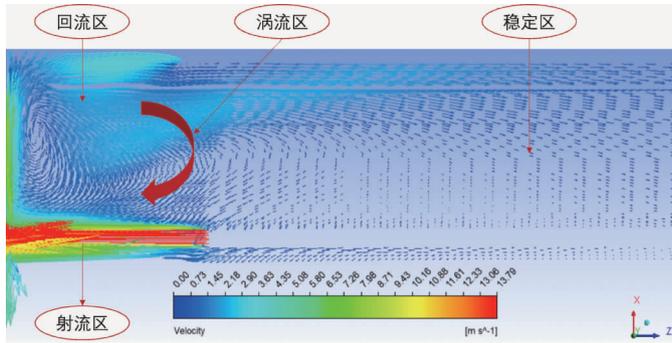


图9 XOZ中轴面风速流线分布

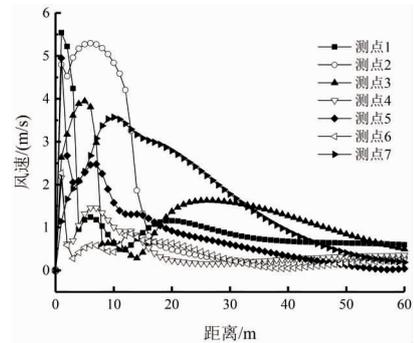


图10 测点风速

4.3 隧道内瓦斯运移规律分析

图11为掌子面瓦斯浓度分布,瓦斯浓度高的地方主要集中在隧道风管位置另一侧的拱肩和下拐角位置,分布范围较小,局部最高瓦斯浓度为0.25%,降低了86%,该区域很容易形成瓦斯局部积聚,应对这一区域瓦斯浓度实时检测.图12为各测点瓦斯浓度轴向分布,各测点的瓦斯浓度在距掌子面2 m区域内急剧下降,之后射流区一侧的测点瓦斯浓度随着至掌子面距离的增大逐渐趋于稳定,而回流区一侧测点的瓦斯浓度随着至掌子面距离的增大而缓慢上升再逐渐趋于稳定,说明涡流作用导致部分风流携带瓦斯回流而不能及时排出,造成回流区局部位置瓦斯浓度偏高.回流区下拐角测点7和拱肩测点3的瓦斯浓度最高,涡流区测点1,测点4,测点6的瓦斯浓度次之,射流区测点2和测点5的瓦斯浓度最小,因此,射流区和涡流区的瓦斯浓度比回流区要小.

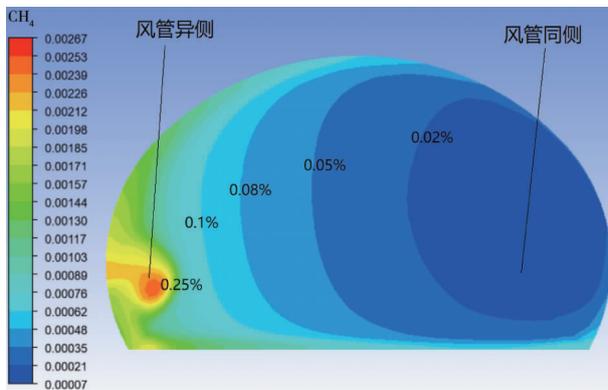


图11 掌子面瓦斯浓度分布

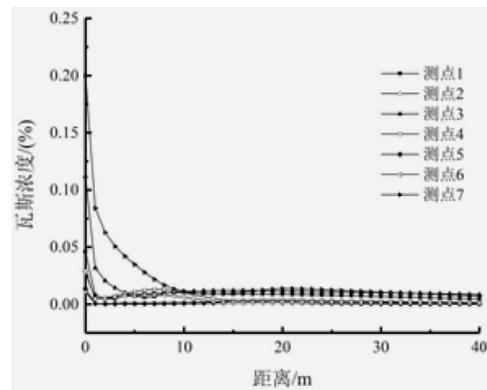


图12 测点轴向瓦斯浓度

图13为数值模拟(CFD)结果得出的掌子面瓦斯浓度随时间变化曲线,经过分析可知通风30 min内隧道掌子面经爆破振动后有瓦斯从裂隙涌出,此时打开电源开始通风,由于射流距离的存在,风流在未达到掌子面之前瓦斯浓度先急剧上升到最大值,随着风流到达掌子面后瓦斯逐渐稀释,瓦斯浓度开始下降,但是由于受到风流的卷吸作用导致部分瓦斯气体回流,瓦斯浓度又轻微升高,随着风管口新鲜风流的连续输入,涡流区的气体被连续置换稀释,故瓦斯浓度也随之被降低,最终趋于稳定.图14为现场监测(EXP)结果得出的掌子面瓦斯浓度随时间变化曲线,瓦斯浓度均低于0.5%的限值,通风方案可行.数值模拟和现场监测曲线基本一致,亦可说明本文采用数值模拟瓦斯隧道瓦斯运移规律是可行的.图15和图16为排风道断面平均风速和瓦斯浓度随时间变化曲线,平均风速均大于0.5 m/s,最大可达0.98 m/s,瓦斯浓度最大为0.05%,可知瓦斯排出效果良好.

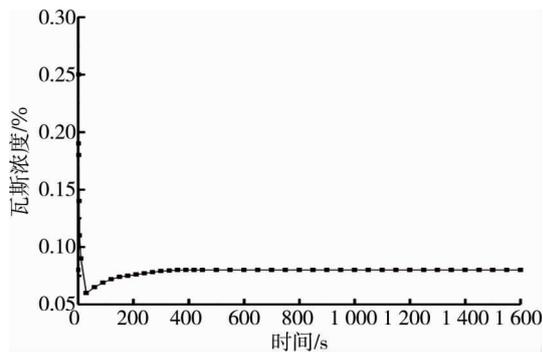


图13 掌子面瓦斯浓度-时间关系曲线(CFD)

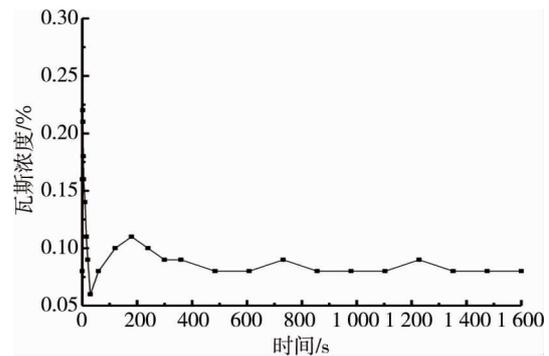


图14 掌子面瓦斯浓度-时间关系曲线(EXP)

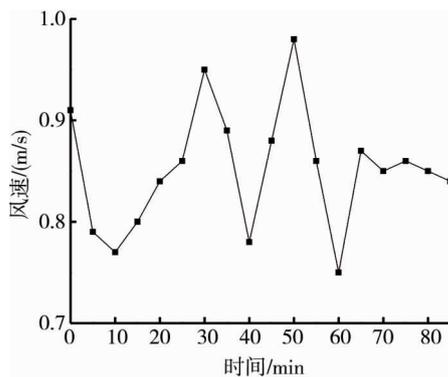


图15 排风道平均风速-时间关系曲线(EXP)

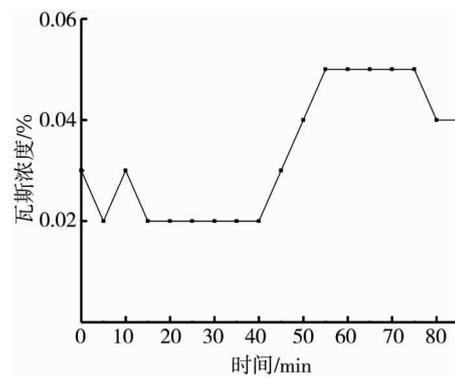


图16 排风道瓦斯浓度-时间关系曲线(EXP)

5 结论

1) 特长高瓦斯隧道利用双斜井辅助正洞通风时隧道内瓦斯最高浓度为0.25%，降低了86%，正洞回风平均风速可达0.5 m/s以上，排风道平均风速均在0.75 m/s以上，说明该通风方案能极大降低瓦斯的浓度，满足特长高瓦斯隧道的通风要求。

2) 射流区一侧瓦斯浓度沿隧道轴向呈“急速下降—逐渐稳定”的趋势，回流区一侧瓦斯浓度沿隧道轴向呈“急速下降—缓慢上升—逐渐稳定”的趋势，掌子面瓦斯浓度随时间呈“急速下降—缓慢上升—逐渐稳定”的趋势；轴向风速在掌子面附近会发生较大波动，瓦斯浓度在距离掌子面2 m的位置达到最小。

参考文献:

- [1] 郭陕云.我国隧道及地下工程的历史机遇、发展困局及若干建议[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1545-1552.
- [2] 王福敏,吴梦军,李科.穿山过水看隧道——“十二五”公路隧道建设成就概述及“十三五”科技发展展望[J].中国公路,2016(7):52-55.
- [3] 李五忠,王一兵,孙斌.中国煤层气资源分布及勘探前景[J].天然气工业,2004,24(5):8-10.
- [4] 杨超,王志伟.公路隧道通风技术现状及发展趋势[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):819-824.
- [5] 曾昌,姚志刚,范建国,等.公路隧道巷道式施工通风瓦斯分布研究[J].隧道建设,2016,36(7):837-843.
- [6] 闫肃.采用平导超前和无轨运输方式的长大瓦斯隧道施工六阶段通风技术[J].现代隧道技术,2020,57(2):80-85.
- [7] 辛国平.长大隧道分隔巷道与风管联合通风施工技术[J].现代隧道技术,2015,52(6):184-189.
- [8] 张磊,李永福,孙杰,等.瓦斯隧道施工通风流场及瓦斯运移研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):184-190.
- [9] 罗刚,贾航航,刘畅,等.天台山隧道双斜井辅助正洞施工通风方式研究[J].公路,2020,65(1):275-280.
- [10] 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):478-474.
- [11] 吴建福,樊浩博,赖金星.特长隧道辅助坑道方案比选及分析[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(2):173-175.
- [12] 刘江,喻兴洪,黄才明,等.特长高瓦斯公路隧道施工通风技术研究[J].公路交通技术,2021,37(2):101-107.