

大断面瓦斯隧道不同开挖方式瓦斯运移规律

王晨¹, 李树清^{1,2*}, 袁志刚^{1,2}, 黄飞^{1,2}, 袁超^{1,2}, 钱运来¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为探究大断面瓦斯隧道开挖过程中的瓦斯运移规律,基于煤与瓦斯流固耦合理论模型,采用 COMSOL Multiphysics 数值软件进行模拟,研究三台阶法、二台阶法和全断面法这3种不同开挖方式下煤层内瓦斯压力和流速随时间的变化规律。研究结果表明:采用三台阶法、二台阶法和全断面法开挖破坏了煤层瓦斯赋存条件,煤层内瓦斯压力呈现先下降后逐渐平衡的趋势,瓦斯流速呈先上升再下降后稳定的变化规律;采用三台阶法和二台阶法开挖,各台阶瓦斯压力和流速大小存在差异,但随时间的变化规律相同;采用全断面法开挖,掌子面上、中、下位置的瓦斯压力和流速随时间变化的规律及大小基本一致;采用台阶法与全断面法开挖对掌子面不同位置瓦斯压力和流速的影响不同,全断面法开挖后掌子面不同位置瓦斯压力和流速大小的差别不大,而二台阶法和三台阶法开挖后各台阶掌子面的瓦斯压力、流速差异明显。

关键词:公路隧道;煤系地层;开挖方式;瓦斯运移;流固耦合

中图分类号:X951

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)02-0071-08

Gas Migration Patterns in Large Cross-Section Gas Tunnels Under Different Excavation Methods

WANG Chen¹, LI Shuqing^{1,2}, YUAN Zhigang^{1,2}, HUANG Fei^{1,2}, YUAN Chao^{1,2}, QIAN Yunlai¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to explore the gas migration law during the excavation of large-section gas tunnels, based on the theoretical model of coal and gas fluid-structure coupling, COMSOL Multiphysics numerical software was used to simulate the variation of gas pressure and flow velocity in coal seams with time under three different excavation methods: three-step method, two-step method and full-section method. The results show that after the excavation of the three-step method, the two-step method and the full-section method destroy the gas occurrence conditions of the coal seam, the gas pressure in the coal seam shows a trend of first decreasing and then gradually equilibrium, and the gas flow rate shows a change law of first rising, then decreasing, and then stable. After excavation using the three-step method and the two-step method, there are differences in the gas pressure and flow rate of each step, but the change law is the same with time. The excavation method is adopted, and the gas pressure and flow rate in the upper, middle and lower positions of the face are basically the same as the changes in time and size. The effect of the step method and the full-section method on the gas pressure and flow velocity at different positions of the face is different, and there is little difference in the gas pressure and flow velocity of the shaft face at different positions after the full-section method excavation, while the gas pressure and flow velocity of each step face are obviously different after the excavation of the two-step method and the three-step method.

Keywords: highway tunnel; coal measure strata; excavation methods; gas migration; liquid-solid coupling

收稿日期:2023-11-23

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52274198);2022年度湖南省交通运输科技项目资助(202243)

*通信作者, E-mail: lsq-hnust@163.com

我国西南地区多处于高原与高山地带,地形起伏比较大,且煤系发育,给隧道安全建设带来巨大挑战^[1-2]。其中,隧道穿越煤系地层施工是危险性高的情形之一,揭煤过程中可能发生煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、瓦斯窒息等事故^[3],对隧道安全施工造成极大威胁。

针对煤层内瓦斯流动机制与瓦斯突出问题,众多学者进行了大量的研究。陶云奇^[4]研究含瓦斯煤的变形机制,推导出含瓦斯煤的孔隙率和渗透率变化方程,构建了煤和瓦斯的热流固多场耦合模型;秦玉金等^[5]描述了瓦斯在煤层中渗流的应力场、渗流场和温度场耦合模型,研究埋深对煤层瓦斯压力、含量等因素的影响规律;曹偈等^[6]揭示煤与瓦斯突出过程中煤体多物理场耦合灾变机制;杨本伟等^[7]通过描述穿煤系地层隧道开挖的瓦斯运移流固耦合模型,研究不同因素对瓦斯在煤层内运移的影响;魏晨慧等^[8]基于热流固耦合模型对深部煤层瓦斯运移进行研究,分析影响瓦斯压力与含量分布的因素,得出瓦斯含量受瓦斯压力与温度的双重影响;张波等^[9]基于热流固耦合模型,分析温度与地应力对深部煤层瓦斯运移规律的影响;杨正东^[10]分析了穿煤系地层隧道施工情况以及煤与瓦斯突出发生的原因;彭宇峰等^[11]通过在玉京山隧道工程中采取穿层网格预抽法消突,确定瓦斯抽放区域大小与钻孔间距。

以上研究主要针对煤层内瓦斯运移机制和瓦斯钻孔抽放防突技术方面,而对于大断面瓦斯隧道开挖过程中煤层内瓦斯运移特征的研究较少。本文以黄家沟隧道为工程背景,采用数值模拟方法,分析不同开挖方式下大断面瓦斯隧道后煤层内瓦斯压力和瓦斯流速的变化规律,揭示不同开挖方式下大断面瓦斯隧道瓦斯运移的影响,为大断面瓦斯隧道选择合适的开挖方式提供理论依据。

1 瓦斯运移流固耦合数学模型

1.1 基本假设

煤与瓦斯之间的相互作用是流固耦合过程,耦合过程较为复杂,为探究揭煤时煤层内瓦斯运移特性,提出以下假设^[12]:(1)含瓦斯的煤岩体变形为线弹性变形;(2)含瓦斯的煤体为多孔介质且具有各向同性;(3)瓦斯在煤层内只有游离和吸附这 2 种状态;(4)吸附状态和游离状态的气体分别服从 Langmuir 方程和理想气体状态方程;(5)瓦斯在煤层中运移忽略温度的变化。

1.2 煤与瓦斯耦合方程

结合煤层有效应力方程与本构方程可得煤层变形场方程^[13]:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} + \varphi p_{,i} + \frac{2\alpha bRT}{3V_m(1+bp)}p_{,i} + F_i = 0. \quad (1)$$

式中: G 为剪切模量; $u_{i,jj}$, $u_{j,ji}$ 为各方向的位移张量,第一个下标为位移在 i,j 方向上的分量,第二个下标分别为位移分量 u_i , u_j 在 j 方向上的一阶导数,第三个下标分别为位移分量 u_i , u_j 分别在 j 和 i 方向上的二阶导数; ν 为泊松比; φ 为孔隙率; α 为 Biot 系数; R 为摩尔气体常数, $J/(mol \cdot K)$; V_m 为标况下甲烷摩尔体积, m^3/mol ; $p_{,i}$ 为煤层瓦斯压力张量,第二个下标是压力张量在 i 方向上的导数,MPa; b 为吸附常数, Pa^{-1} ; T 为煤层温度,K; p 为朗格缪尔气体压力,Pa; F_i 为煤体受到的体积力; N/m^3 。

煤层内瓦斯主要以吸附态与游离态形式存在,即单位体积煤体内瓦斯含量包括煤基质孔隙内吸附瓦斯含量和裂隙游离瓦斯含量^[14]:

$$Q = \left(\frac{abcp}{1+bp} + \varphi \frac{p}{p_n} \right) \rho_n. \quad (2)$$

式中: Q 为单位体积下的瓦斯含量,kg; a 为吸附常数, m^3/t ; c 为含瓦斯煤校正系数,kg/ m^3 ; p_n 为标况下瓦斯压力,Pa; ρ_n 为标准状态下的气体密度,kg/ m^3 。

结合达西定律与气体质量守恒得到渗流场方程:

$$\frac{\partial \left(\frac{abcp}{1+bp} + \varphi \frac{p}{p_n} \right) \rho_n}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho_g \frac{k}{u} \nabla p \right) = I. \quad (3)$$

式中: I 为质量源项,kg/($m^3 \cdot s$); k 为煤层渗透率, m^2 ; ρ_g 为气体密度,kg/ m^3 ; u 为瓦斯动力黏度,Pa·s。

瓦斯压力变化引起的煤固体颗粒的体积变化可忽略不计,煤层渗透率 k 以及煤层孔隙率 φ [15] 变化方程:

$$\varphi = \frac{\varphi_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v}; \quad (4)$$

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{\varphi_0}\right)^3. \quad (5)$$

式中: φ_0 为煤层初始孔隙率; ε_v 为煤层体积应变; k_0 为煤层初始渗透率, m^2 .

2 煤与瓦斯运移数值模拟

2.1 工程概况

黄家沟隧道进口位于遵义市桐梓县松坎镇楠树村,出口位于遵义市桐梓县新站镇群英村.黄家沟隧道左线隧道里程桩号为 ZK13+070~ZK18+335,长 5 265 m;右线隧道里程桩号为 YK13+040~YK18+315,长 5 275 m;左右线隧道均属特长隧道.隧道断面尺寸为 106 m^2 ,属大断面隧道.隧道左线最大埋深为 531 m,右线最大埋深为 525 m.本隧道 2 次穿过煤系地层(2~6 层),为瓦斯隧道,左线穿越煤系地段为 ZK14+810~ZK15+015 和 ZK15+870~ZK16+110,右线穿越煤系地段为 YK14+815~YK15+020 和 YK15+825~YK16+076,煤与瓦斯突出危险性极高,施工时有发生煤与瓦斯突出灾害的可能,将隧道出口评定为瓦斯突出危险工区,黄家沟隧道出口左洞(ZK15+700~ZK18+335)段落地质纵断面如图 1 所示.

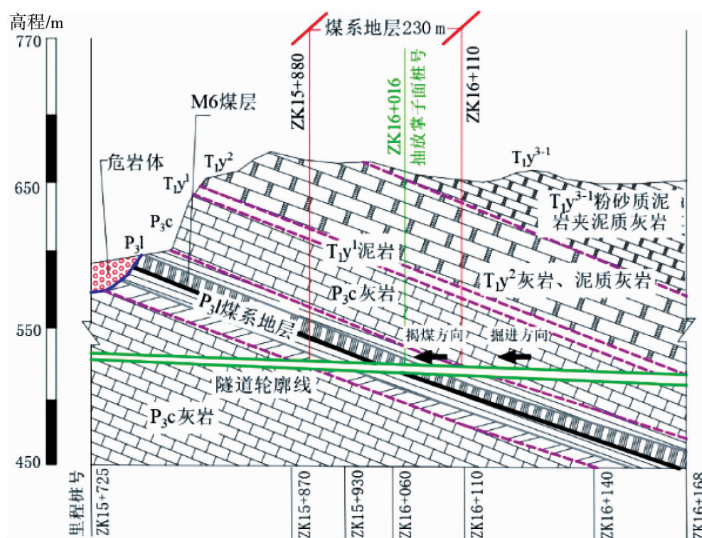


图1 隧道出口左洞(ZK15+700~ZK18+335)段落地质纵断面

2.2 隧道开挖模型建立

基于兰州至海口国家高速公路重庆至遵义段黄家沟隧道出口左洞煤层的背景,依据上述理论,采用 COMSOL Multiphysics 数值软件进行模拟,研究大断面瓦斯隧道采用 3 种不同开挖方式下煤层内瓦斯运移规律.隧道开挖模型网格划分及监测布置如图 2 所示.

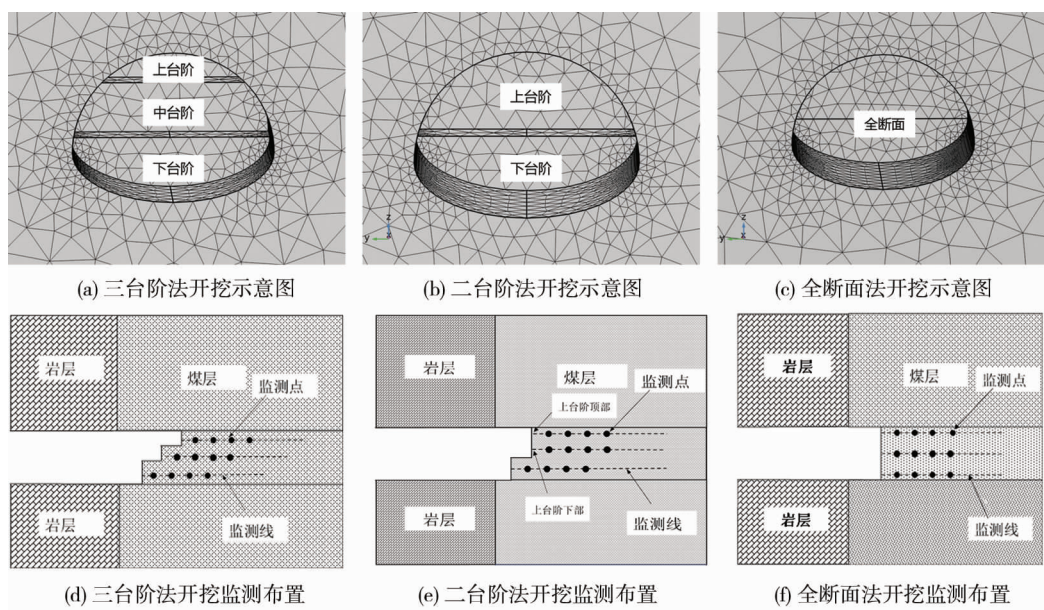


图2 隧道开挖模型网格划分及监测布置

数值模拟模型尺寸为 200 m×140 m×120 m,为了更好地分析不同开挖方式对瓦斯压力和瓦斯流速的影响,在掌子面各位置中心沿隧道轴向布置 3 条监测线,监测线长度为 15 m,各监测线间距 4 m,监测线上设置监测点,间距为 1 m.

2.3 模拟计算定解条件

初始条件:煤层初始瓦斯压力 p_0 为 1 MPa,隧道掌子面压力简化为标准状况下的气体压力,设为 0.1 MPa,模型初始位移为 0.边界条件:煤层四周均为零通量不透气边界,掌子面处设置为狄利克雷边界;模型底部为固定约束,四周为辊支撑,煤层顶部受上覆岩层压力作用简化为均布载荷,模型内部为体载荷.

2.4 含瓦斯煤层基本力学参数

根据兰州至海口国家高速公路重庆至遵义段黄家沟隧道工程现场资料,煤层基本物理力学参数如表 1 所示.

表 1 煤层基本物理力学参数

参数名称	数值	参数名称	数值
煤层弹性模量 E/GPa	5.75	水分 $A/\%$	1.65
煤的泊松比 ν	0.3	灰分 $M/\%$	21.13
煤体密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 580	吸附常数 $a/(\text{m}^3/\text{t})$	17.76
煤层初始孔隙率 φ_0	0.06	吸附常数 b/Pa^{-1}	0.72
煤层初始渗透率 k_0/m^2	2.6×10^{-17}	煤基质体积模量 K_s/Pa	5.3×10^{10}
瓦斯动力黏度 $u/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.34×10^{-5}	煤层温度 T/K	303
初始瓦斯压力 p_0/MPa	1	气体常数 $R/(\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K}))$	8.314
标况下瓦斯压力 p_n/MPa	0.1		

3 3 种不同开挖方式模拟结果

3.1 三台阶法开挖模拟结果

3.1.1 瓦斯压力变化

瓦斯隧道采用三台阶法开挖,各台阶瓦斯压力变化如图 3 所示.不同台阶瓦斯压力随时间的变化呈先快速降低再缓慢下降后直至平衡状态的规律,但中台阶和下台阶煤层瓦斯压力降幅几乎相等且高于上台阶瓦斯压力降幅.开挖 100 h 后,距上、中、下台阶掌子面 1 m 处瓦斯压力变化分别为 0.48,0.70,0.70 MPa;沿开挖方向距掌子面 0~10 m 处,上台阶瓦斯压力变化明显;沿开挖方向 0~12 m 处,中、下台阶煤层内瓦斯压力变化明显.

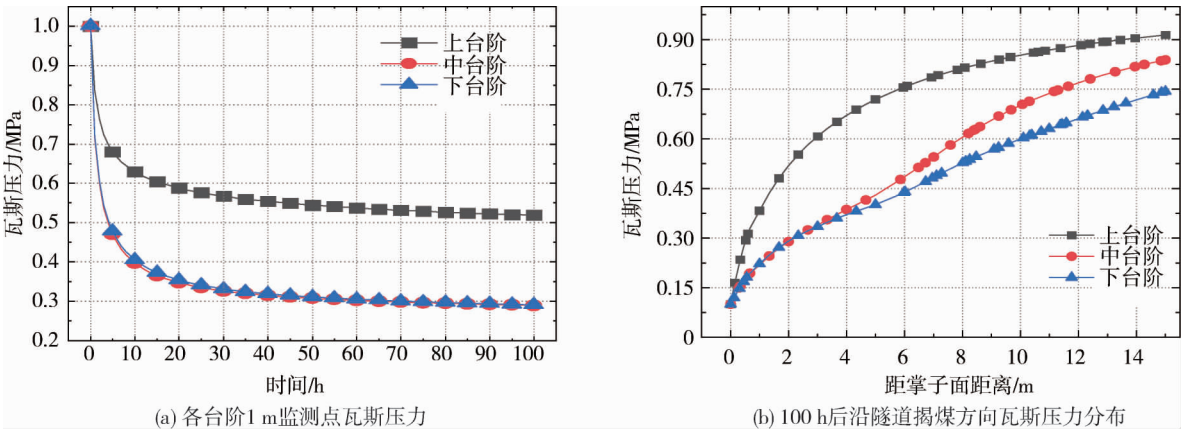


图 3 三台阶法开挖各台阶瓦斯压力变化

隧道采用三台阶法开挖,上台阶先进行施工,煤层受开挖扰动影响,瓦斯从上台阶掌子面处涌出;当中台阶和下台阶开挖时,该台阶掌子面与上层底板均有瓦斯涌出,使中台阶和下台阶瓦斯压力的降低程度相等且高于上台阶处,瓦斯压力云图如图 4 所示.

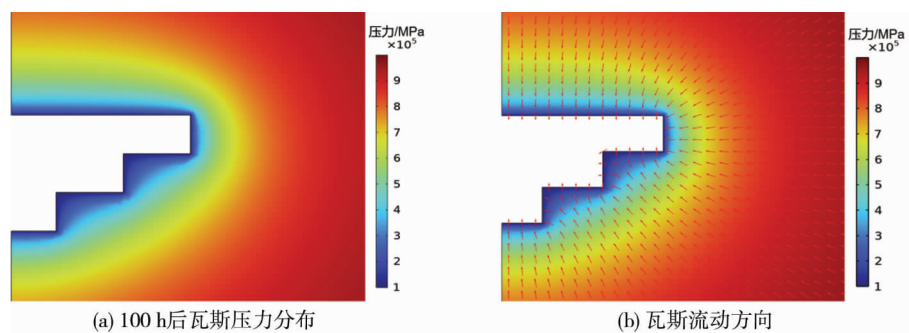


图4 三台阶法开挖100 h后瓦斯压力云图

3.1.2 瓦斯流速变化

距上、中、下台阶掌子面1 m的监测点处瓦斯流速随时间的变化如图5所示.三台阶法开挖后,上、中、下台阶煤层内瓦斯流速随时间的变化呈先上升再下降后达到稳定状态的变化规律.上台阶开挖后,上台阶瓦斯流速最大值为 7×10^{-6} m/s,中、下台阶开挖后,最大瓦斯流速均为 5.2×10^{-6} m/s.开挖100 h后煤层内瓦斯流速云图如图6所示.采用三台阶法开挖时,上、中、下台阶先后施工,使上台阶掌子面前方形成的瓦斯压力梯度高于中台阶和下台阶,上台阶掌子面前方的瓦斯流速大于中、下台阶掌子面.因下台阶煤层距上台阶较远,受上台阶煤层开挖扰动的影响小,中、下台阶煤层形成的瓦斯压力梯度大小基本相同,即中台阶和下台阶掌子面前方的瓦斯流速大小基本相同.

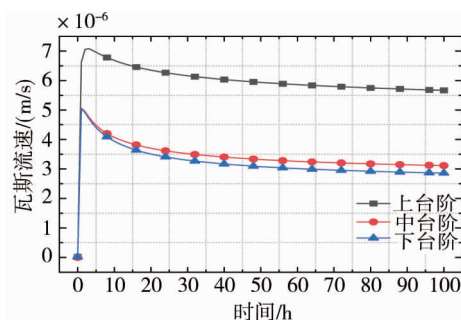


图5 距各台阶掌子面1 m监测点瓦斯流速随时间的变化



图6 三台阶法开挖100 h后瓦斯流速云图

3.2 二台阶法开挖模拟结果

3.2.1 瓦斯压力变化

二台阶法开挖后掌子面各台阶瓦斯压力变化如图7所示.二台阶法开挖后,上台阶和下台阶瓦斯压力随时间的变化曲线与三台阶压力变化曲线一致,且上台阶煤层内瓦斯压力变化量小于下台阶煤层内瓦斯压力变化量;相较于三台阶法,二台阶法开挖后整体瓦斯压力的变化较小.隧道开挖100 h后,距上台阶顶部、下部和下台阶煤层掌子面1 m处瓦斯压力累积变化量分别为0.53,0.55,0.63 MPa,上台阶顶部和下部的瓦斯压力变化量几乎一致且小于下台阶瓦斯压力变化量;沿开挖方向距掌子面0~10 m处,上台阶(顶部、下部)煤层内瓦斯压力变化明显;沿开挖方向距掌子面0~12 m处,下台阶煤层内瓦斯压力变化明显.

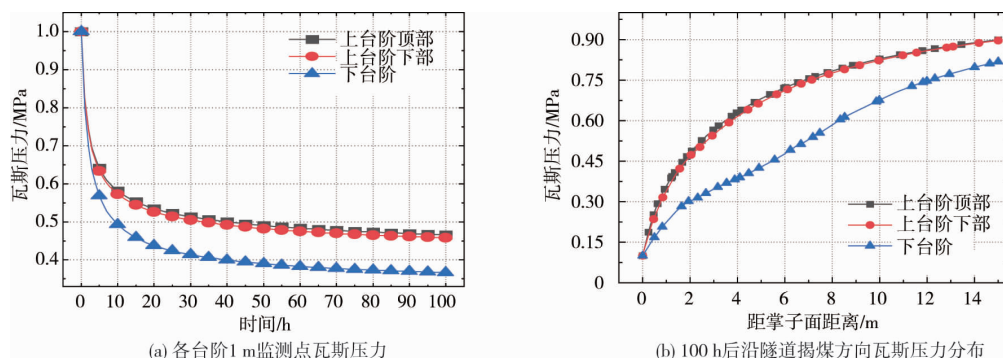


图7 二台阶法开挖各台阶瓦斯压力变化

二台阶法开挖特点与三台阶法开挖相同,上台阶先进行开挖,煤层受开挖扰动影响,瓦斯从上台阶涌向隧道,因下台阶开挖对煤层造成二次扰动,下台阶掌子面与上台阶底板均有瓦斯涌出,使下台阶瓦斯压力的降低程度高于上台阶,二台阶法开挖 100 h 后瓦斯压力云图如图 8 所示。

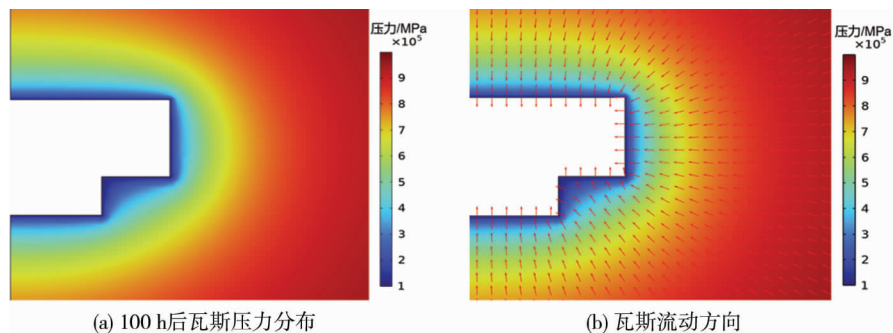


图 8 二台阶法开挖 100 h 后瓦斯压力云图

3.2.2 瓦斯流速变化

二台阶法开挖后距上台阶(顶部、下部)和下台阶掌子面 1 m 的监测点处瓦斯流速随时间的变化如图 9 所示.二台阶法开挖后,各台阶瓦斯流速随时间的变化规律与三台阶法开挖一致.距上台阶(顶部、下部)和下台阶掌子面 1 m 处最大瓦斯流速分别为 7.15×10^{-6} 、 5.1×10^{-6} m/s,上台阶掌子面各处瓦斯流速大小基本一致.开挖 100 h 后煤层瓦斯流速云图如图 10 所示.采用二台阶法开挖时,其施工特点与三台阶法相同,上、下台阶先后开挖,使上台阶掌子面前方形成的瓦斯压力梯度高于下台阶,即上台阶掌子面前方的瓦斯流速大于下台阶掌子面。

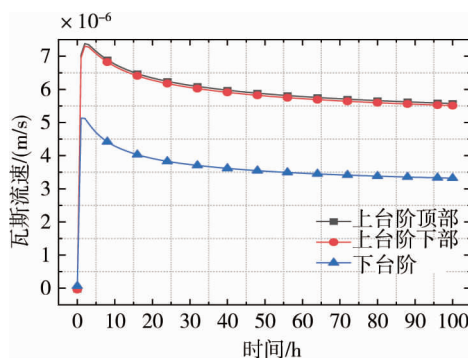


图 9 不同位置 1 m 处监测点瓦斯流速随时间的变化

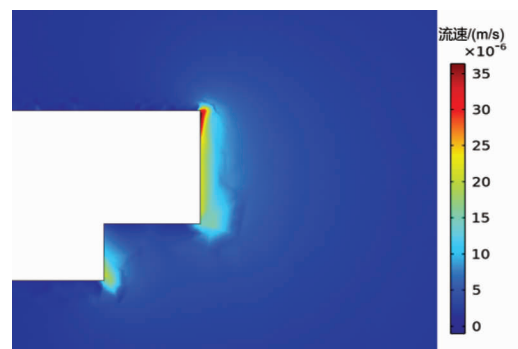


图 10 二台阶法开挖 100 h 后瓦斯流速云图

3.3 全断面法开挖模拟结果

3.3.1 瓦斯压力变化

全断面法开挖煤层瓦斯压力变化如图 11 所示.全断面法开挖后,瓦斯压力随时间的变化曲线与台阶法开挖时一致,掌子面不同位置瓦斯压力大小略有不同,掌子面中部瓦斯压力的变化略大于上、下部煤层瓦斯压力变化,较台阶法开挖的掌子面各位置瓦斯压力大小差异最小.开挖 100 h 后,距上、中、下部掌子面 1 m 处瓦斯压力变化累积量为 0.54、0.57、0.54 MPa;沿开挖方向距掌子面 0~12 m 处,隧道各位置瓦斯压力变化明显。

全断面法开挖将隧道断面一次开挖成型,较三台阶法、二台阶法对煤层的扰动次数少,开挖 100 h 后,掌子面区域内瓦斯压力降低程度较为接近,呈对称分布,压力云图如图 12 所示。

3.3.2 瓦斯流速变化

距掌子面各位置 1 m 的监测点处瓦斯流速变化和全断面法开挖 100 h 后的瓦斯流速云图分别如图 13 和图 14 所示.全断面法开挖将隧道断面一次开挖成型,掌子面各位置前方瓦斯压力梯度基本相同.掌子面各位置瓦斯流速大小差异不大,以距掌子面 1 m 处监测点为例,监测点各位置煤层内最大瓦斯流速均为 7.21×10^{-6} m/s。

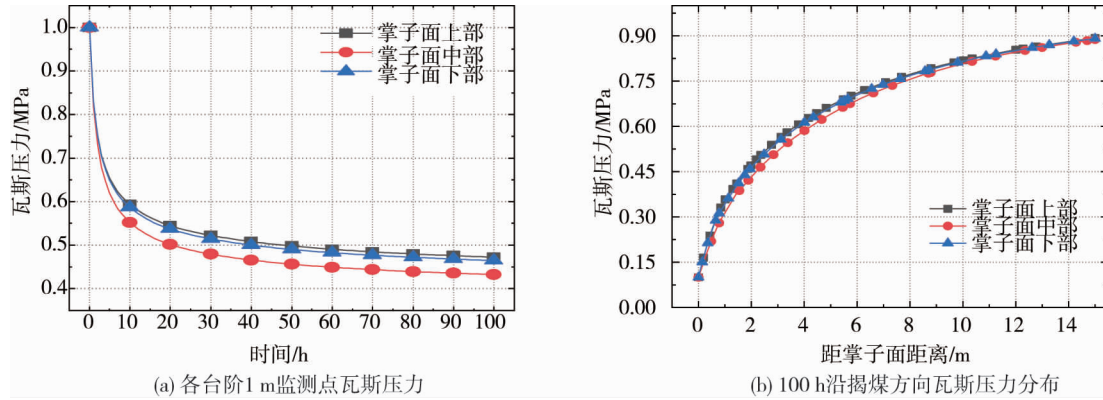


图11 揭煤断面各位置瓦斯压力对比

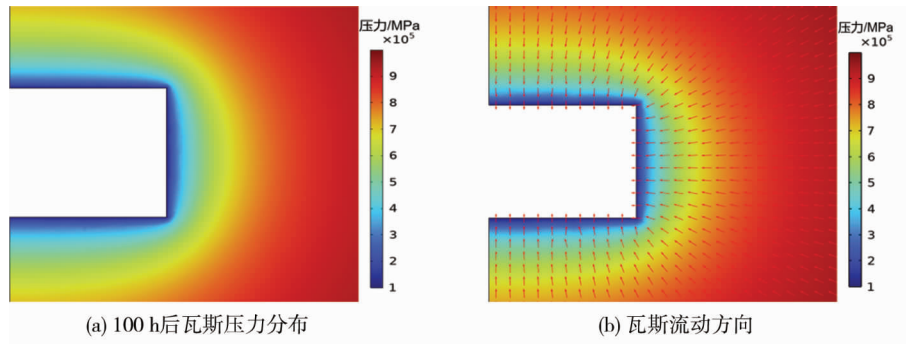


图12 全断面法开挖100 h后瓦斯压力云图

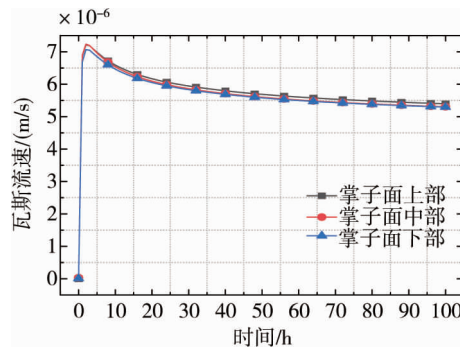


图13 距掌子面各位置1 m处监测点瓦斯流速

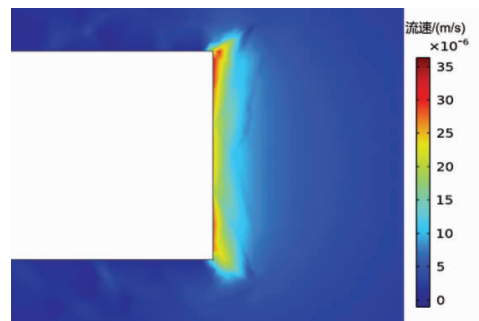


图14 全断面法开挖100 h后瓦斯流速云图

3.4 不同开挖方式模拟结果对比

1) 开挖100 h后距掌子面1 m处瓦斯压力变化有如下特点:3种方式(三台阶法、二台阶法和全断面法)开挖后,瓦斯压力随时间的变化均呈先下降后逐渐平衡的规律,但瓦斯压力大小不同;采用三台阶法、二台阶法开挖,上台阶掌子面前方瓦斯压力大小与全断面掌子面各位置瓦斯压力大小比较接近,而开挖后的掌子面前方瓦斯压力一般小于全断面法掌子面的瓦斯压力。

2) 开挖100 h后煤层瓦斯压力云图有如下特点:三台阶法、二台阶法开挖后,下部台阶瓦斯压力的降低程度大于上部台阶;全断面法开挖后,掌子面上下区域内瓦斯压力的降低程度比较接近。

3) 开挖100 h后距掌子面1 m处监测点的流速有如下特点:不同方式开挖后,瓦斯流速随时间的变化均呈先上升再下降后达到平衡的规律,但瓦斯流速大小存在差异。三台阶法、二台阶法开挖时,两者上台阶掌子面前方瓦斯流速大小均与全断面法开挖掌子面几乎相等;而开挖后的掌子面前方瓦斯流速大小基本相同且均小于全断面法掌子面前方瓦斯流速。

4 结论

1) 大断面瓦斯隧道采用不同方式开挖后瓦斯压力和流速随时间的变化规律一致. 瓦斯压力随时间变化先下降后达到平衡, 瓦斯流速随时间先上升再下降后达到平衡.

2) 多台阶法开挖后不同台阶掌子面前方瓦斯压力、流速大小及瓦斯压力的降低程度存在差异; 全断面法开挖后掌子面上下区域内瓦斯压力、流速大小及瓦斯压力降低程度几乎一致.

3) 对比不同开挖方式开挖后的瓦斯压力和流速模拟结果, 全断面法开挖时掌子面各位置瓦斯压力、流速大小差异小, 三台阶法、二台阶法开挖时不同台阶处瓦斯压力和流速大小差异明显.

参考文献:

- [1] 黄长国. 公路隧道揭煤防突技术及实践[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 236-242.
- [2] 任宏伟. 穿突出煤层隧道瓦斯抽排参数对抽排效果的影响分析——以扎西隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 257-264.
- [3] 云峰, 黄飞, 安俊杰, 等. 瓦斯隧道穿越构造煤层施工风险的模糊层次评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3447-3454.
- [4] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型建立[J]. 煤矿安全, 2012, 43(2): 9-12.
- [5] 秦玉金, 罗海珠, 姜文忠, 等. 非等温吸附变形条件下瓦斯运移多场耦合模型研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 412-416.
- [6] 曹偲, 赵旭生, 刘延保. 煤与瓦斯突出多物理场分布特征的数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(2): 7-11.
- [7] 杨本伟, 陈相, 林志, 等. 多物理场耦合作用下裂隙岩体瓦斯迁移规律研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(3): 388-395.
- [8] 魏晨慧, 朱万成, 白羽, 等. 变温条件下深部煤层瓦斯分布规律的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(7): 1033-1036.
- [9] 张波, 谢雄刚, 刘洋成. 基于热流固耦合工作面前方瓦斯渗流数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 89-94.
- [10] 杨正东. 贵州瓦斯隧道防突技术研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 4-8.
- [11] 彭宇峰, 田亮, 杨东升, 等. 玉京山隧道中厚煤层瓦斯抽放技术[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(12): 1600-1606.
- [12] LIU G N, YE D Y, GAO F, et al. A dual fractal poroelastic model for characterizing fluid flow in fractured coal masses[J]. Geofluids, 2020(1): 2787903.
- [13] WU Y, LIU J, ELSWORTH D, et al. Evolution of coal permeability: contribution of heterogeneous swelling processes[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 88(2/3): 152-162.
- [14] ZHANG H, LIU J, ELSWORTH D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1226-1236.
- [15] 张子翔, 李雨成, 张欢, 等. 不同地应力下煤层钻孔抽采瓦斯流动特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 66-72.