

11-25-2023

Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing

WANG Xinfeng

College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education (Anhui University of Science and Technology), Huainan 232001, China, xfw2020@xtu.edu.cn

LIU Wengang

College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

WANG Long

College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

WANG Xinfeng, LIU Wengang, WANG Long, et al. (2023) "Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 51: Iss. 11, Article 2.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0161

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol51/iss11/2>

This Coal Geology, Mine Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing

Authors

WANG Xinfeng, LIU Wengang, WANG Long, WEI Youyu, and ZHANG Qiao



移动阅读

王新丰, 刘文港, 王龙, 等. 静态致裂作用下低渗厚煤层瓦斯增透数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 1-12. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0161

WANG Xinfeng, LIU Wengang, WANG Long, et al. Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 1-12. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.04.0161

静态致裂作用下低渗厚煤层瓦斯增透数值模拟研究

王新丰^{1,2}, 刘文港¹, 王 龙¹, 韦友玉¹, 张 乔¹

(1. 湘潭大学 环境与资源学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室(安徽理工大学), 安徽 淮南 232001)

摘要: 为提高煤层静态致裂井下作业效率, 优化致裂布孔参数, 以中煤华晋王家岭矿 12316 综采工作面胶带巷为实验背景, 结合煤层变形破坏方程、瓦斯扩散渗流方程和煤层渗透率演化方程, 构建煤层破坏及渗透率演化模型; 采用 FIAC^{3D}-COMSOL Multiphysics 对煤体静态致裂增透过程及影响因素进行数值模拟, 揭示静态致裂作用下煤层应力分布、塑性扩展与瓦斯压力传递演化规律。通过优化选取致裂工艺参数开展现场试验, 定量分析不同孔距下静态致裂过程中煤层瓦斯抽采量的变化特征。结果表明: 静态致裂过程中膨胀应力在煤体内部沿致裂孔半径方向向四周均匀传递, 单孔致裂过程中形成圆环状应力圈和塑性区; 在双孔致裂条件下, 两致裂孔内膨胀应力的水平叠加效果优于竖直叠加效果, 使煤体水平方向破坏效果较竖直方向显著, 且两致裂孔中间区域的煤层先于其他区域破坏。受静态致裂作用范围的限制, 增透促抽后煤层内瓦斯压力大小与孔距呈正相关关系, 煤层渗透率与孔距间呈负相关关系; 现场试验表明, 将孔距设为 1.6 m 以内进行静态致裂增透, 在抽采负压为 20 kPa 条件下抽采 30 d, 测得致裂后瓦斯抽采纯量提升 1 倍左右, 说明静态致裂对瓦斯抽采具有显著的卸压增透效果。

关键词: 瓦斯抽采; 静态致裂; 煤层增透; 扩散渗流; 数值模拟; 效果评价

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2023)11-0001-12

Numerical simulations of enhancing permeability and gas extraction of thick coal seams through static fracturing

WANG Xinfeng^{1,2}, LIU Wengang¹, WANG Long¹, WEI Youyu¹, ZHANG Qiao¹

(1. College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education (Anhui University of Science and Technology), Huainan 232001, China)

Abstract: This study seeks to improve the underground operation efficiency and optimize the borehole arrangement parameters for static fracturing of coal seams. To this end, this study conducted tests in the belt roadway of the No. 12316 fully mechanized mining face in the Wangjialing Coal Mine, China Coal Huajin Group. By combining the equations for coal seams' deformation and failure, gas diffusion and seepage, and coal seams' permeability evolution, this study constructed a model of the damage and permeability evolution of coal seams. Based on the numerical simulations of the process of static fracturing and permeability enhancement of coals, as well as its influencing factors, using FIAC^{3D} and COMSOL Multiphysics, this study revealed the laws of the stress distribution, plastic expansion, and gas pressure transfer and evolution of coal seams under the action of static fracturing. Furthermore, through field experiments using fracturing parameters selected through optimization, this study quantitatively analyzed the changes in gas flow extracted from coal seams during static fracturing under different borehole spacings. The following findings are obtained. During the static fracturing, the expansion stress in coals was evenly transferred outward along the radial directions of the borehole for fracturing. An annulus stress zone and a plastic zone were formed during single-hole fracturing. In the case of

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51904266, 52104224); 湖南省自然科学基金青年项目(2023JJ40634); 湖南省教育厅优秀青年基金项目(21B0144); 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金项目(JYBSYS2018203)

第一作者: 王新丰, 1988 年生, 男, 安徽亳州人, 博士(后), 副教授, 从事矿山安全与灾变防控方面的研究工作. E-mail: xfw2020@xtu.edu.cn

double-hole fracturing, the expansion stress in both holes exhibited better superposition effects in the horizontal direction than in the vertical direction, leading to more significant damage to coals in the horizontal direction than in the vertical direction. Furthermore, zones between both holes were damaged earlier than other zones. After permeability and gas extraction were enhanced by static fracturing, the gas pressure and permeability of coal seams were positively and negatively correlated with the hole spacing, respectively due to the limited static fracturing range. During field tests, static fracturing and permeability enhancement were conducted under hole spacings below 1.6 m. After gas extraction for 30 days under negative pressure of 20 kPa, the pure gas flow extracted after fracturing doubled. This indicates that static fracturing has significant pressure-relief and permeability-enhancement effects on gas extraction.

Keywords: gas extraction; static fracturing; penetration enhancement for coal seam; diffusion and seepage; numerical simulation; effect evaluation

我国煤层透气性普遍较低,且随着煤矿开采技术的升级和生产方式的进步,浅部煤矿资源因大量开采而日益枯竭,逐渐向深部延伸,进入深部开采后,煤层所受应力显著升高,导致煤层透气性更低,煤层瓦斯压力大,这可能引发严重的瓦斯灾害^[1-4],一般采用增透技术对低渗透煤层进行增透处理。静态致裂由于工艺简单、效果稳定且安全系数高,在煤矿实际生产中使用具有无爆声、无飞石、无冲击波和无爆破震动的优点,在低渗透厚煤层增透方面逐渐得到应用^[5-6]。研究表明煤与瓦斯突出主要是由高地应力和局部瓦斯聚集造成^[7-8],静态致裂能有效卸载煤体地应力并提高煤层渗透率,起到提高瓦斯抽采效果。国内外学者针对静态致裂进行系统研究,郭怀广^[9]、Li Chong^[10]等通过建立静态破岩致裂力学模型模拟致裂过程,分析了致裂剂的水灰比和浸泡时间对致裂剂的影响规律,发现静态致裂剂的体积增长率随水灰比的增加而减小,流动性随水灰比的增加而增大,得出合适水灰比范围。翟成等^[11]通过制造相似材料型煤,设置布孔方式这一变量,研究单孔致裂、双孔致裂、导向孔致裂对静态致裂效果的影响,发现静态致裂的裂缝沿最接近自由面方向发育,将布孔方式布置为“多孔+导向孔”可使静态致裂膨胀应力最大限度传播,达到最优增透效果。王金贵等^[12]采用煤岩动力灾害实验模拟系统对原煤致裂过程进行实时监测,将静爆致裂分为微裂、膨胀压传递和劈裂 3 个阶段,发现致裂后煤岩纵向裂纹多于横向裂纹,即径向拉应力作用效果要优于轴向拉应力。谢雄刚等^[13]通过现场实验得到静态致裂膨胀应力变化情况及抽采孔开裂内窥图,据此计算出合理的孔间距与钻孔直径比为 14~15,同时在该值一定时,抽采孔开裂效果与钻孔直径呈正相关关系。郝生雷等^[14]探讨一种“台阶导洞”的施工方案用于空间狭小、设备密集的井下空间作业,为静态破碎剂的井下使用创造了条件。刘健等^[15]以 Froude 比例法建立相似模型,并采用超动态应变仪和高速摄像机监测爆破过程中试件裂纹发育过程,研究发现爆破应力波穿透煤层到达岩层后会反射拉伸波,该拉伸波再次作用煤层,使试件

生成裂纹的拓展方向与炮孔轴线垂直。李清等^[16]采用实验与数值模拟结合的研究方法,针对单炮孔和不同孔距的双炮孔端部爆生裂纹演化规律及应力分布进行研究,发现双炮孔间爆炸应力的叠加使炮孔内侧裂纹发育受限,且孔距与止裂时间、裂纹拓展长度呈正相关关系。针对静态致裂引起的煤层渗透率变化可借鉴煤样三轴压缩实验进行研究,白鑫等^[17]基于“立方体”模型结构建立三轴作用下损伤煤岩渗透率模型,得到了煤岩在应力加载损伤破坏过程中渗透率变化规律,发现煤在受力破坏前渗透率随应力增加而降低,受力破坏后渗透率随应力增加而缓慢上升,煤岩瓦斯渗透率受有效应力的影响要远大于瓦斯自身吸附/解吸作用的影响。林海飞^[18]、尚宏波^[19]等采用真三轴试验系统,对煤体瓦斯吸附、解析及水力压裂前后渗流特征进行研究,压裂形成裂隙沿最大主应力方向呈椭圆状拓展,且煤层渗透率随有效应力的增大而剧烈减小。孟召平等^[20]利用声发射技术对不同围压下样煤应力-应变和渗透性研究,将煤的破坏过程分为孔隙形变阶段、塑性变形阶段和破坏失稳阶段 3 个过程,在不同阶段样煤的渗透率受应力-应变影响不同。

目前针对静态致裂煤层增透的研究主要为致裂剂释能机制、致裂的布孔方式以及致裂过程中岩体裂隙发育等几个方向,而针对静态致裂产生膨胀应力对煤层的变形破坏规律和致裂过程中煤层瓦斯抽采演化规律的研究较少且不够深入。本文采用数值模拟分析方法,建立煤层受力变化模型和煤层瓦斯演化模型,对静态致裂过程中煤层应力和塑性区变化规律、煤层瓦斯变化特征进行研究,在此基础上优化王家岭煤矿静态致裂布孔孔距参数,提高煤层瓦斯抽采效率。

1 数学模型构建

1.1 煤体变形控制方程

对煤体进行受力变形分析时,假定含瓦斯煤体为一种均质且各向同性的线弹性材料,其变形可以通过广义胡克定律来描述,考虑到在致裂剂反应到生成最大应力的过程中未进行瓦斯负压抽采,此时煤体中瓦

斯的吸附和解吸作用很小, 该因素对煤层变形的影响也很小, 基于力的平衡方程, 含瓦斯煤体的变形方程^[21-22]为:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ii} - \left[\alpha + \frac{K\varepsilon_L p_L}{(p_L + p)^2} \right] p_{,i} + f_i = 0 \quad (1)$$

式中: $G=E/2(1+\nu)$ 为煤的剪切模量, GPa; E 为煤的弹性模量, GPa; $K=E/3(1-2\nu)$ 为煤的体积模量, GPa; $\alpha=1-K/K_s$ 为 Biot 系数; ν 为泊松比; ε_L 和 p_L 分别为 Langmuir 体积应变常数和压力常数; K_s 为骨架弹性模量, MPa; u 为位移, m; $u_{i,jj}$ 为位移张量形式, 且第一个下标 i 表示 u 的 i 方向分量, 第 2 个下标 j 表示对 u_i 求 j 方向偏导数, 第 3 个下标 j 表示对 u_{ij} 求 j 方向上偏导数; $u_{j,ii}$ 为位移张量形式, 且第一个下标 j 表示 u 的 j 方向分量, 第 2 个下标 i 表示对 u_{ji} 求 i 方向上偏导数; p 为煤层瓦斯压力, MPa; $p_{,i}$ 右下角符号为力学中用张量形式表示的求导符号; f_i 为 i 方向上的体应力, Pa。

1.2 煤层瓦斯扩散控制方程

在静态致裂后的负压抽采过程中, 煤层裂隙内瓦斯压力降低会导致煤层裂隙与基质间的瓦斯压力差增大, 从而增强了裂隙与基质之间瓦斯的流动能力。瓦斯在煤层孔隙结构中的流动符合 Fick 定律, 将质量守恒方程应用到煤基质中的瓦斯流动过程, 单位体积煤基质中的瓦斯质量通过 Langmuir 方程和理想气体状态方程计算, 基质中的瓦斯扩散由浓度梯度驱动, 得到煤基质中瓦斯扩散方程^[23-24]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial m_m}{\partial t} = -Q_s \\ m_m = \frac{V_L p_m}{p_m + p_L} \cdot \frac{M_c}{V_M} \rho_c + \varphi_m \frac{M_c}{RT} p_m \\ Q_s = \frac{M_c}{RT} D \sigma_c (p_m - p_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_m 为单位体积煤基质中的瓦斯含量, kg/m^3 ; Q_s 为单位体积煤基质同裂隙系统的质量交换率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; V_L 为 Langmuir 体积常数, m^3/kg ; p_m 为煤基质瓦斯压力, MPa; M_c 为甲烷的摩尔质量, kg/mol ; V_M 为气体摩尔体积, 取 $22.4 \text{ L}/\text{mol}$; ρ_c 为煤的视密度, kg/m^3 ; φ_m 为煤体孔隙率, %; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为煤层温度, K; D 为 Fick 定律中的扩散系数, m^2/s ; $\sigma_c=3\pi^2/a^2$, 为煤体形状因子, m^{-2} ; a 为基质尺寸, m; p_f 为裂隙瓦斯压力, MPa; t 为时间, s。

1.3 煤层瓦斯渗流控制方程

瓦斯在煤层裂隙系统中的流动属于渗流, 符合 Darcy 定律, 结合质量守恒方程可以得到瓦斯在煤层中的渗流控制方程^[25-26]:

$$\begin{cases} v = \frac{k_e}{\mu} \nabla p_f \\ \frac{\partial(\phi_f \rho_f)}{\partial t} = -\nabla(\rho_f v) + Q_s(1 - \phi_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_e 为煤层有效渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯气体动力黏度, Pa·s; ϕ_f 为煤体裂隙孔隙率, %; ρ_f 为裂隙中瓦斯密度, kg/m^3 。

1.4 煤层渗透率模型

煤体可视为由煤基质和裂隙组成的双重孔隙介质, 静态致裂后煤层瓦斯的负压抽采会导致瓦斯解吸作用加剧, 此时煤体的弹性应变和煤体中瓦斯的吸附解吸对煤层的体积应变具有诱导作用。结合 Langmuir 方程, 可得到煤体渗透率^[27-28]的表达式为:

$$k = k_0 \exp[-3C_f(\sigma - \sigma_0)] \quad (4)$$

式中: k_0 为煤层的初始渗透率, m^2 ; σ 为应力, MPa; σ_0 为煤层初始应力, MPa; C_f 为裂隙压缩系数, 其计算表达式为:

$$C_f = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)\varphi_0 E} \quad (5)$$

式中: φ_0 为煤层初始孔隙率, %。

在静态致裂初期, 煤的储层压力并未降低到瓦斯的临界解吸压力, 瓦斯此时不会解吸, 此时有效应力可表示为:

$$\sigma - \sigma_0 = -\frac{\nu}{1-\nu}(p_1 - p_0) \quad (6)$$

式中: p_1 为静态致裂膨胀压力, MPa; p_0 为初始瓦斯压力, MPa。

由式(4)~式(6)可得煤体渗透率演变动态方程为:

$$k = k_0 \exp\left[3C_f \frac{\nu}{1-\nu}(p_1 - p_0)\right] \quad (7)$$

2 几何模型建立

瓦斯在煤层中的流动受多种因素综合影响, 属于较复杂的过程, 为使数值建模这一研究方法可行, 做出如下基本假设: 煤层顶底板的透气性相对较小, 假定顶底板为不透气岩层; 煤体骨架是线性弹性体, 且煤体渗透率各向同性; 将煤层中的瓦斯看作理想气体, 并且服从达西定律; 瓦斯的解吸渗流按等温处理; 煤体破坏满足 Mohr-Coulomb 准则。

2.1 模型及边界条件

构建 FIAC^{3D} 模型用于模拟静态致裂过程中煤体应力及塑性区演化情况。该模型边界条件为 X 轴走向长 13 m, Y 轴走向长 40 m, Z 轴走向长 9.3 m, 其中煤体厚 6 m, 顶板厚 2 m, 底板厚 1.3 m, 在模型顶部自由边界上设置一个 10 MPa 的竖直向下的应力, 模拟

上覆岩层荷载,模型的初始速度场和位移场为 0。煤层静态致裂立体模型如图 1 所示。

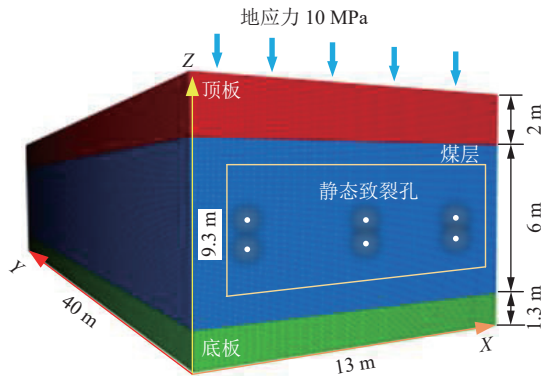


图 1 煤层静态致裂 FLAC^{3D} 模型

Fig.1 A FLAC^{3D} model for the static fracturing of coal seams

构建 COMSOL Multiphysics 模型用于模拟静态致裂过程中煤层瓦斯变化规律。该模型边界条件为长 6 m,高 3 m,开挖前固定模型底部跟上部,左、右两侧设置为滚轮边界,约束法向位移,设置致裂孔内膨胀力为 40 MPa。计算瓦斯压力时,将煤层所有边界设为非流动边界,将抽采孔壁设为 Dirichlet 边界,模拟抽采负压为 20 kPa,模型如图 2 所示, l 为抽采孔与致裂孔孔距。

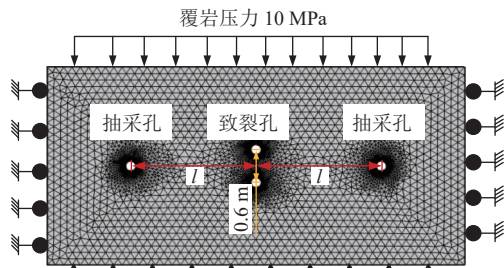


图 2 煤层静态致裂 COMSOL Multiphysics 模型

Fig.2 A COMSOL Multiphysics model for the static fracturing of coal seams

2.2 参数设定

试验地点为中煤华晋王家岭煤矿 12316 综采工作

面胶带巷。该工作面位于 123 盘区东北部,工作面底板高程 518~607 m,煤层埋藏深度为 550 m,北邻 12318 工作面采空区,南邻 12314 工作面,西邻 2 号煤中央辅运大巷,东邻芦子坪村保护煤柱。工作面走向长为 3 300 m,倾向长为 300 m。工作面开采煤层为 2 号煤层,属近水平煤层开采,平均厚度 6.2 m。实验煤层相关力学参数见表 1,含煤地层岩性如图 3 所示。

表 1 煤层岩石力学参数
Table 1 Rock mechanical parameters of coal seams

参数	数值
煤层弹性模量/GPa	3.0
顶板弹性模量/GPa	5.0
底板弹性模量/GPa	6.5
煤层黏聚力/MPa	1.5
顶板黏聚力/MPa	3.5
底板黏聚力/MPa	4.8
Langmuir 压力	3.08
抽采负压/kPa	20
瓦斯初始压力	0.2
煤层内摩擦角/(°)	25
顶板内摩擦角/(°)	32
底板内摩擦角/(°)	37
煤层密度/(kg·m ⁻³)	1 400
顶板密度/(kg·m ⁻³)	2 300
底板密度/(kg·m ⁻³)	2 600
煤层泊松比	0.35
煤层初始渗透率/m ²	0.2×10 ⁻¹⁴
煤层初始孔隙率/%	4.3
瓦斯动力黏度/(Pa·s)	1.08×10 ⁻⁵
Langmuir 体积/(kg·m ⁻³)	0.023
煤基质尺寸/m	1.88
单孔扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	5.61×10 ⁻¹⁰
煤层温度/K	296

岩层划分	岩层名称	平均层厚/m	柱状图	岩性描述
基本顶	粉砂岩	13.43		黏土质胶结,薄层状,层面富集云母碎片
直接顶	泥岩	2.30		黏土为主,性脆含少量植物化石
煤层	2 号煤	6.20		平均含 1~2 层夹矸,以黏土泥岩和灰质泥岩为主
直接底	细粒砂岩	1.34		石英为主,长石次之,含少量云母及煤屑
基本底	泥岩	4.50		夹薄层灰色粉砂岩条带,层面凹凸不平

图 3 工作面岩层柱状图

Fig.3 Stratigraphic column along the mining face

3 模型求解和分析

3.1 静态致裂作用下煤层应力分析

静态致裂过程中, 膨胀应力会在 12 h 左右达到最大值 40 MPa, 通过设置 10、20、30、40 MPa 的不同应力, 研究致裂过程中应力区、塑性区的演化规律。FLAC^{3D} 建模后在致裂孔上下左右 0.25 m 处设置应力监测点, 用于监测致裂过程中煤层所受应力变化。由于静态致裂孔孔径(0.075 m) 相对整体模型的高度(9.3 m) 来说

太小, 本文将致裂孔周围区域放便于研究分析, 得到单孔和双孔静态致裂的数值模型求解。

3.1.1 单孔致裂数值模拟分析

对煤体进行静态致裂, 致裂孔内逐渐增大的膨胀应力会破坏煤体原有的力学平衡, 进而形成新的应力平衡状态。研究静态致裂过程中煤层应力和塑性区演化情况, 得到 FLAC^{3D} 求解结果, 其中煤层应力变化如图 4 和图 5 所示。

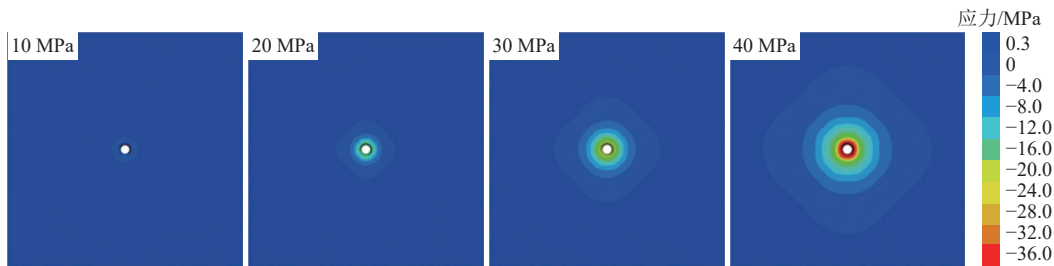


图 4 单孔致裂应力分布

Fig.4 Stress distribution caused by single-hole fracturing

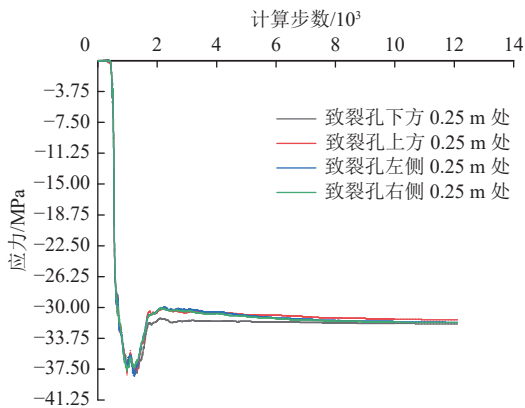


图 5 单孔致裂应力变化曲线

Fig.5 Stress curves of single-hole fracturing

由图 4 可以看出, 静态致裂过程中膨胀应力对煤层的作用始终存在圈层效应, 在静态致裂初期, 膨胀应力对煤层作用不明显, 整个煤层受地应力和自身重力影响, 表现为受到与膨胀应力相反的正应力, 随着静态致裂的推进, 致裂应力作用区域越来越大, 其应力作用区域在 4 个应力节点均呈现为对称的圆环状, 该现象表明在静态致裂过程中, 致裂孔内膨胀应力对煤层的作用效果是沿致裂孔半径方向向外均匀传递的, 且在同一时刻对称方向上膨胀力大小一致。另外在 40 MPa 应力云图中可以看出, 应力由 -36 MPa 变化到 -24 MPa 的应力区域半径远小于应力由 -24 MPa 变化到 -12 MPa 的应力区域半径, 越远离致裂孔的相同应力跨度的圈层半径越大, 此现象说明越靠近致裂孔的煤层所受应力越大, 其应力变化幅度也越大, 因此近致裂孔区域煤

层处于应力集中区域, 该区域内弹性材料极易产生疲劳断裂, 导致此处煤体优先其他区域煤层发生破坏。图 5 的应力曲线图也佐证了上述结论, 在图 5 中, 致裂孔周围 4 个点的应力监测曲线在整个致裂过程中基本保持重合, 在致裂前期应力持续升高, 由 0 MPa 升高到 37.5 MPa 左右, 当计算步数达到 1.6×10^3 左右时出现应力峰值, 之后应力值回弹减小并保持为 31 MPa 不变, 说明在运行步骤达到 1.6×10^3 时距致裂孔 0.25 m 处模型发生破坏。

煤体受力破坏过程中其塑性区也会发生变化, 利用 FLAC^{3D} 模拟出单孔致裂过程中煤体塑性区变化情况, 如图 6 所示, 其中 None 表示未发生破坏, shear 表示剪切破坏, tension 表示拉伸破坏, n 表示正在破坏, p 表示已经破坏。

单孔致裂过程中塑性区形状发生改变, 膨胀应力达到 10 MPa 时, 应力对煤层产生张力破坏并形成圆形塑性区, 当膨胀应力达到 20 MPa 时, 其对煤层产生张力和剪切力的破坏效果, 在致裂孔周围形成剪切力破坏的圆环塑性区, 而在离致裂孔较远区域为张力破坏的方形塑性区, 并随着膨胀应力增大到 40 MPa, 塑性区面积不断增大。当煤层发生剪切破坏后, 新增的裂隙会与煤层内原生裂隙相互联通, 形成复杂裂隙网, 减小煤岩基块尺寸的同时增加了裂缝表面积, 从而大幅提高煤层气的解吸-扩散速率^[27]。研究表明, 煤岩剪切破坏后气体解吸-扩散速率比破坏前提高了近两个数量级^[28], 大大提高煤层致裂后瓦斯的抽采效果, 达到

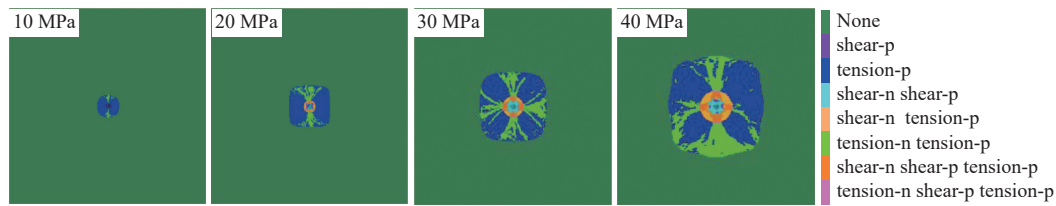


图 6 单孔致裂塑性区效果

Fig.6 Effects of a plastic zone caused by single-hole fracturing

减小煤层瓦斯压力的目的。

3.1.2 双孔致裂数值模拟分析

由单孔致裂数值结果可看出,在 40 MPa 膨胀应力作用下,煤层形成半径为 0.25~0.30 m 的圆方形塑性

破坏区。考虑到静态致裂现场试验一般采用双孔致裂的布孔方式,通过构建相距 0.5 m 的双孔致裂模型,研究在双孔致裂下煤层应力、塑性区的演化情况,结果如图 7—图 9 所示。

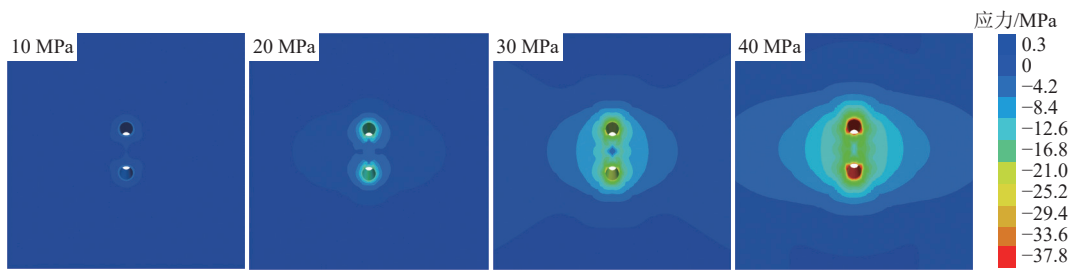


图 7 双孔致裂应力分布

Fig.7 Stress distribution caused by double-hole fracturing

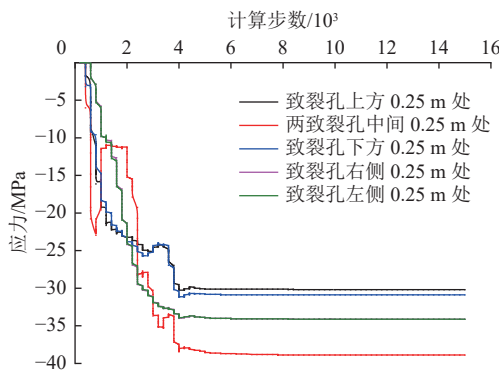


图 8 双孔致裂应力变化曲线

Fig.8 Stress curves of double-hole fracturing

在图 7 中可以看出,双孔致裂前期两致裂孔产生的膨胀应力影响区域尚未完全联通,与单孔致裂相比,两应力影响区域不再为规则圆形,而是互相干扰形成向两孔中间区域延伸的不规则形状;随着膨胀应力的增大,不规则形状逐渐演变成水平方向的椭圆形状,该现象表明双孔致裂的应力叠加效果在水平方向要优于竖直方向,两孔内应力的合力在水平方向传递更远。在图 7 中应力为 30 MPa 时,两孔中间区域还存在一小块应力突变区域,此处应力值要比周围区域应力值都小,这是由于此区域受到上下两个方向不同力的作用,力的叠加导致在此区域形成类似地理中盆地的应力区。

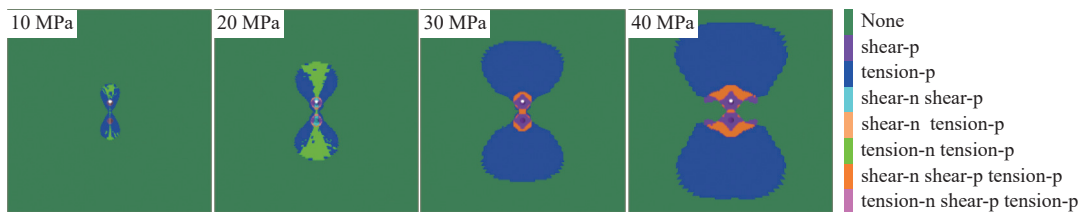


图 9 双孔致裂塑性区效果

Fig.9 Effects of a plastic zone caused by double-hole fracturing

由图 8 可以看出,致裂孔上下方监测点的应力曲线变化趋势保持一致,两点应力值从 0 MPa 开始增长到 30 MPa 后稳定不变;致裂孔左右两侧两个监测点的应力曲线基本重合,应力值从 0 MPa 开始一直增长到 34 MPa 后保持不变,且左右两侧监测点应力曲线

重合程度优于上下方两监测点,该现象表明,双孔致裂过程中同一轴线上与致裂孔等距位置的应力大小及变化情况具有同步性,能在相同时间内达到相同应力值;由于双孔致裂为竖直布孔,根据力的合成法则两致裂孔内膨胀应力的合力对煤层的作用效果在水平方向要

优于垂直方向,这使致裂孔左右两侧煤层破坏程度要大于垂直方向煤层,因此在现场实验时应优先考虑将抽采孔布置在致裂孔左右两侧。对于两致裂孔中间区域的煤层,应力曲线起伏程度大且最终达到的应力峰值要比左右两侧和上下两侧高,说明此处煤层所受应力变化幅度大,当计算步数达到 1.27×10^4 时此处出现应力突变,煤体产生变形破坏,突变出现的时间要早于水平方向和垂直方向,表明在双孔致裂时致裂孔中间区域煤层会先于其他区域发生破坏。

双孔静态致裂作用下煤体塑性区破坏效果如图 9 所示。

图 9 与图 6 相比,双孔致裂后形成的塑性区由单孔致裂的方形演变成为两头大中间小的沙漏形状,双孔致裂应力达到 10 MPa 时在致裂孔周围出现圆环形剪切破坏区域,并随着膨胀应力的增大,圆环形剪破坏区域扩大为不规则形状。当膨胀应力达到 30 MPa 时,拉伸破坏区域面积持续增加,之后膨胀应力对煤层的

作用都不产生拉伸破坏,而是由拉伸破坏转化成剪切破坏。由单孔致裂塑性区求解结果可得,只有当应力达到 20 MPa 左右才出现剪切破坏区域,而双孔致裂在应力为 10 MPa 时便出现剪切破坏区域,这说明双孔致裂对煤层的增透效果远远高于单孔致裂。另外,由图 9 中 40 MPa 塑性区分布可以看出,双孔致裂的剪切破坏只发生在两致裂孔附近区域,而在煤层其他区域并未有剪切破坏,这证明双孔致裂时两孔中间区域破坏程度要比其他区域更剧烈。

3.2 煤层瓦斯压力分析

静态致裂导致的煤体破坏会影响煤层的渗透率,将瓦斯在煤体中的流动看成气体在多孔介质中的运移过程,采用达西定律来表示瓦斯在煤体中的渗透效果,根据 Fick 定律表示瓦斯在煤体中的扩散作用,利用 COMSOL Multiphysics 模拟致裂过程中抽采孔瓦斯压力变化,如图 10 所示。

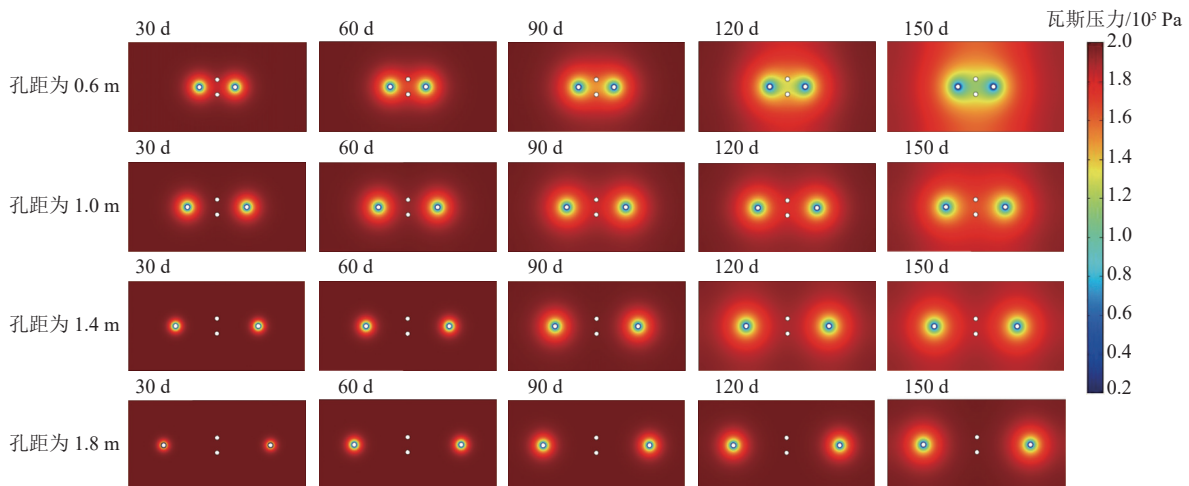


图 10 不同孔距下致裂过程中瓦斯压力变化云图

Fig.10 Nephogram showing the variations in the gas pressure during fracturing under different hole spacings

图 10 为不同时间、不同孔距下煤层瓦斯压力云图。从图 10 中可以直观看出,在同一时刻,随着孔距的增加煤层瓦斯压力下降效果逐渐减小,这是由于煤的破坏和致裂钻孔周围的应力重分布共同决定了煤层的透气性,当距离致裂孔太远,煤层受致裂作用不明显,使得煤层渗透率变化小,抽采效果不明显,反之抽采效果愈好。当孔距达到 1.8 m 时,抽采 30 d 煤层瓦斯下降效果基本不明显,而当孔距设为 0.6 m 时,在抽采 30 d 后,瓦斯压力降低区域不再独立分开,而是互相联通,这表明致裂孔周围 0.6 m 处煤层内部裂隙发育形成裂隙网,使该区域内瓦斯压力下降到相同水平。同时,在孔距为 0.6 m 时,当抽采时间达到 90 d 后,瓦斯压力云图上最内部黄色区域开始由圆形向横向水滴状演变,

120 d 后两抽采孔的黄色区域已经在致裂孔方向联通。这是由于抽采孔距离致裂孔较近,在进行静态致裂时,抽采孔对致裂有导向作用,使致裂形成的裂隙朝抽采孔方向发育,致裂后负压抽采过程中,致裂孔方向瓦斯压力下降效果更明显,下降区域更大。另外,由于抽采孔直径较小(0.075 m),煤层破坏导致的高渗透区只存在于抽采孔周围很小的区域内,此区域瓦斯压力下降跨度达到 0.12 MPa,而在高渗透带的外围,由于应力集中效应导致煤层存在低渗透带,此区域瓦斯压力下降幅度小。因此,在进行静态致裂现场实验时,布孔孔距最好控制在 1.0 m 以内,保障抽采效果最佳。

在云图基础上可进一步得到不同时间、不同孔距下煤层瓦斯压力曲线,如图 11 所示。

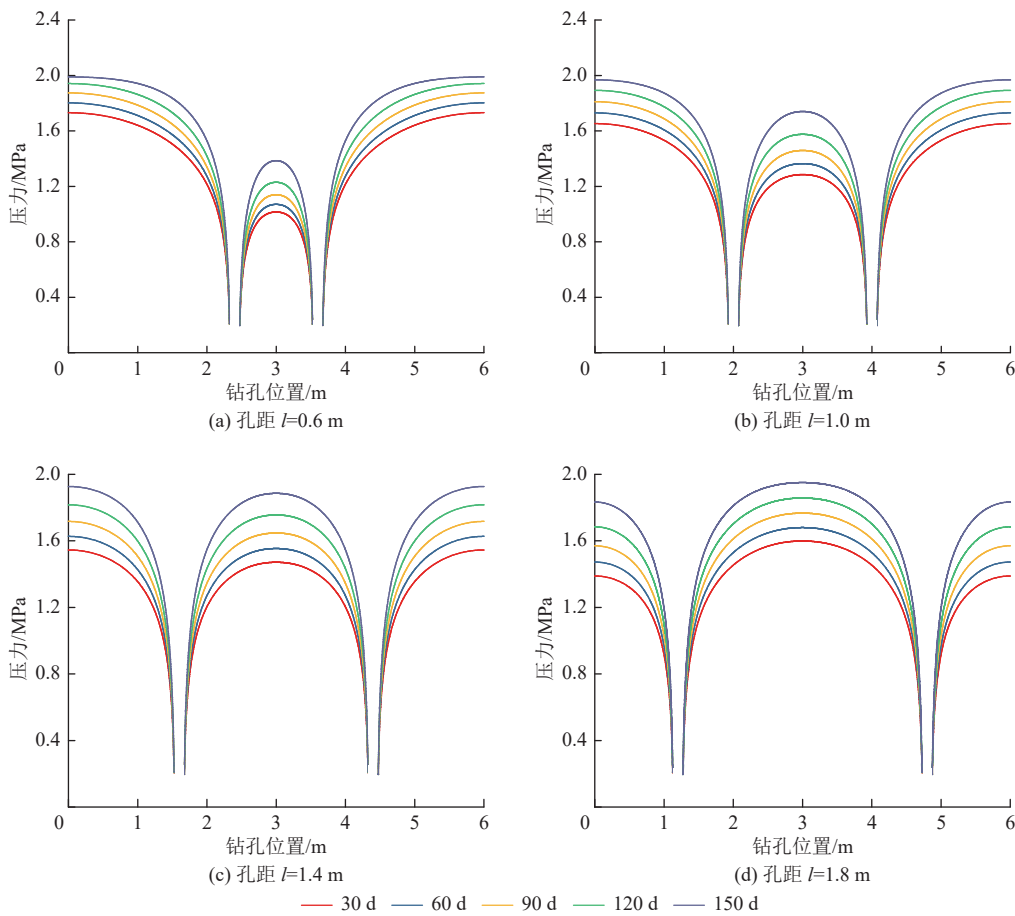


图 11 不同孔距下致裂过程中瓦斯压力变化曲线

Fig.11 Gas pressure curves during static fracturing under different hole spacings

由图 11 可以看出,随着孔距的不断增大,两抽采孔中间区域的瓦斯压力也逐渐增大,当孔距为 0.6 m 和 1.0 m 时,从图 11a、图 11b 中可以看出两抽采孔中间区域的瓦斯压力要明显小于抽采孔外边区域,而当孔距为 1.4 和 1.8 m 时,两致裂孔中间有很大一部分区域瓦斯压力下降不明显。另外,在图 11a 和图 11b 中,在相同负压抽采时间段内,瓦斯压力下降幅度由大到小为:30~60、60~90、90~120、120~150 d,这是由于在静态致裂前期,煤层内的初始瓦斯含量高,瓦斯压力大,煤层被致裂后,瓦斯从高浓度区域流向低浓度区域,在自身扩散效应和抽采孔负压抽采的综合作用下沿抽采孔向外排出。因此该过程内瓦斯抽采效果明显;随着煤层瓦斯含量降低,瓦斯扩散效果降低,瓦斯运移的动力来源主要为抽采负压,瓦斯压力下降幅度减小。

煤层渗透率同样是评价煤层增透效果的标准之一,取两抽采孔中间水平方向连线为研究位置,得到该区域静态致裂 30、60、90、120、150 d 后煤层渗透率变化曲线,如图 12 所示。

静态致裂剂反应完全后,煤体内部主要受地应力和瓦斯压力的作用,这两个力对煤体渗透率变化产生

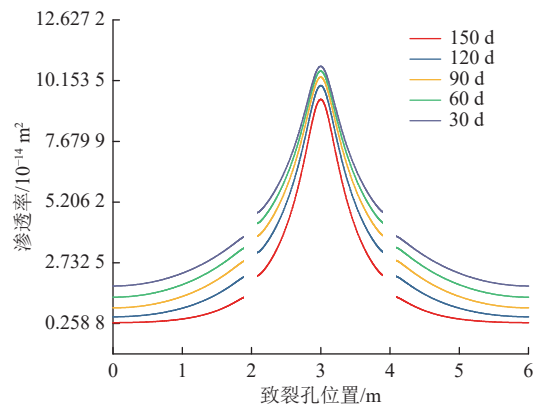


图 12 抽采孔周围煤体渗透率变化

Fig.12 Variations in coal permeability around a gas extraction hole

影响。随着负压抽采进行,煤层瓦斯压力逐渐减小,使得煤层所受地应力影响占主导作用,煤层裂隙开始闭合,渗透率逐渐减小。在图 12 中,越靠近致裂孔区域煤层渗透率曲线走向趋于垂直,表明在致裂孔周围煤体渗透率变化幅度最大,在远离致裂孔煤层渗透率曲线趋向水平,渗透率变化幅度小。该现象表明煤层变形破坏程度与致裂孔距离成反比,这与 FLAC^{3D} 模拟中的计算相吻合。同时,由图 12 可以看出,负压抽采

30 d 后, 两致裂孔中点处煤层的渗透率达到 $10.153 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 与初始渗透率 $0.2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 相比提高约 50 倍。负压抽采 60、90、120、150 d 后, 该处的渗透率分别降为 4.96×10^{-14} 、 4.43×10^{-14} 、 3.86×10^{-14} 、 3.20×10^{-14} 、 $2.15 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。

4 现场致裂试验

4.1 钻孔布置方案

针对王家岭煤矿煤层透气性差、瓦斯上隅角聚集等一系列问题, 采用静态致裂的方法对煤层进行增透处理, 开展煤层增透促抽现场试验。

由数值模拟研究结果分析得到, 在 40 MPa 膨胀

应力作用下, 双孔静态致裂对致裂孔两边的致裂效果基本相同, 在 20 kPa 负压抽采情况下, 与致裂孔相同距离的抽采孔其瓦斯压力变化情况也基本一致, 故在设计静态致裂现场试验布孔方案时, 令两致裂孔的距离为 0.5 m, 抽采孔到致裂孔的距离分别设为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 m, 用现场试验考察 COMSOL 数值模拟结果。选取矿井 2 号煤层作为试验对象煤层, 测试地点选择在距离 12316 工作面回风巷 900 m 的巷帮处, 共布置 12 个钻孔, 钻孔孔径为 75 mm, 深 40 m, 静态致裂现场试验钻孔布置参数如图 13 所示, 其中 2、3、6、7、10、11 号孔为致裂钻孔(图 13b 中红色圆圈), 1、4、5、8、9、12 号孔为抽采考察钻孔(图 13b 中黑色圆圈)。

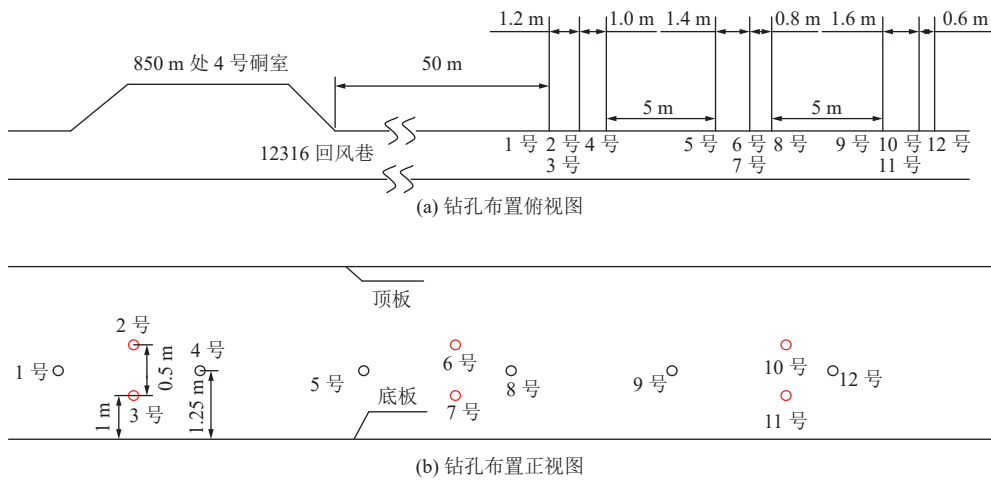


图 13 静态致裂现场布孔情况

Fig.13 Borehole arrangement in the static fracturing field

4.2 试验流程及所用设备

静态致裂现场试验是将静态致裂剂溶解制浆后注

入煤体钻孔内让其反应生成巨大膨胀力, 其试验流程及所用设备如图 14 所示。

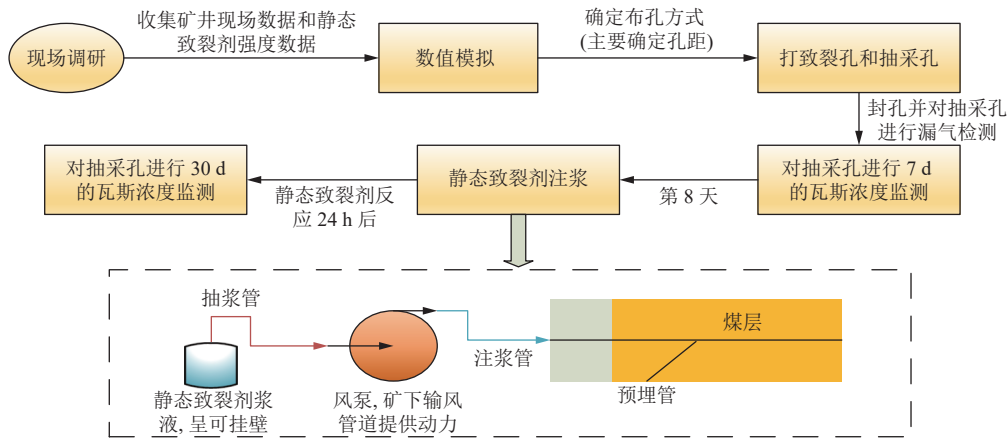


图 14 静态致裂工艺流程

Fig.14 Process flowsheet of static fracturing

其中, 静态致裂剂为可产生 40 MPa 膨胀应力的矿用致裂剂; 抽浆管选用口径为 80 mm 的软管; 考虑安全因素, 注浆泵选用风泵, 型号为 3ZBQ-5/16, 其

额定流量为 50 L/min, 额定压力为 6 MPa, 连通井下输风管后可将致裂剂浆液注入致裂孔内; 注浆管选用口径为 25 mm 带有接头的软管。

4.3 实测数据及分析

1—12 号钻孔全部施工完毕后,对 1、4、5、8、9、12 号抽采考察钻孔进行封孔,抽采钻孔封孔结束 8 h 后,将各抽采钻孔支管与抽采管路连接,保持抽采负压为 20 kPa,进行抽采,同时监测抽采钻孔的混合流量、瓦斯浓度,记录考察钻孔每天的流量变化;对 2、3、6、7、10、11 号致裂钻孔也进行封孔,在其孔口及孔底处分别留设注浆管和排气管,以便向其中注入膨胀致裂剂,待连续监测 7 d 的抽采钻孔流量及瓦斯浓度数据后,实施注浆静态致裂;注浆结束 24 h 后,保持抽采负压不变,采用湿式流量计及光学瓦斯检测仪每天监测抽采钻孔(1、4、5、8、9、12 号)的流量及瓦斯浓度变化,考察静态致裂的促抽效果。根据 30 d 内监测数据,计算出各个抽采钻孔的瓦斯纯量如图 15 所示。

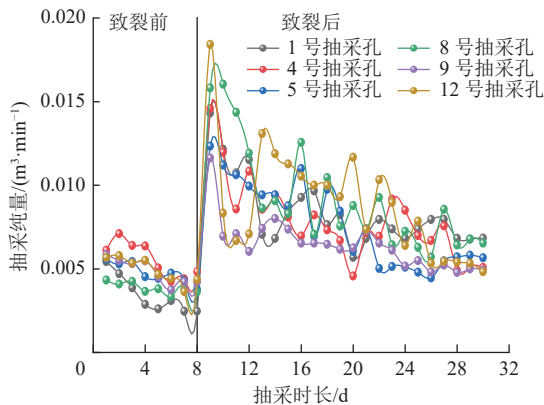


图 15 静态致裂前后钻孔瓦斯抽采纯量

Fig. 15 Pure gas flow extracted from boreholes before and after static fracturing

从图 15 可以看出,静态致裂前各个抽采考察钻孔的瓦斯纯量普遍较低,前 7 d 内,1 号钻孔平均瓦斯纯量为 $0.0042 \text{ m}^3/\text{min}$;4 号钻孔平均瓦斯纯量为 $0.0047 \text{ m}^3/\text{min}$;5 号钻孔平均瓦斯纯量为 $0.0055 \text{ m}^3/\text{min}$;8 号钻孔平均瓦斯纯量为 $0.0038 \text{ m}^3/\text{min}$;9 号和 12 号钻孔平均瓦斯纯量为 0.0046 和 $0.0045 \text{ m}^3/\text{min}$ 。实施双孔静态致裂后,各考察钻孔的瓦斯抽采纯量均大幅提升,较静态致裂前的平均纯量提升 2.1~2.5 倍。由于 12 号钻孔距离致裂孔 0.6 m,因此,瓦斯纯量提升也最明显,致裂第 1 天后纯量提升至 $0.018 \text{ m}^3/\text{min}$,后续维持在 $0.0053 \text{ m}^3/\text{min}$;而 9 号钻孔距离致裂孔为 1.6 m 最远,致裂后瓦斯纯量提升为 $0.0112 \text{ m}^3/\text{min}$,经过 22 d 负压抽采后最终维持在 $0.005 \text{ m}^3/\text{min}$;1、4、5、8 号钻孔负压抽采后的瓦斯抽采纯量维持在 0.0077 、 0.0075 、 0.0051 、 $0.0055 \text{ m}^3/\text{min}$ 。随着抽采时间延长,各个考察钻孔的瓦斯抽采纯量总体呈逐渐衰减趋势。

综合分析可知,在王家岭煤矿 12316 工作面 2 号煤层实施静态致裂对煤层内瓦斯的促抽效果明显,可

提高瓦斯抽采量 2 倍左右。同时,将抽采钻孔与致裂孔的水平距离控制在 1.6 m 以内时,能取得良好的卸压增透和瓦斯抽采效果。

5 结论

a. 煤层静态致裂增透过程中,双孔致裂效果要优于单孔致裂效果。在致裂孔径设为 75 mm,致裂孔孔距设为 0.5 m 的双孔致裂条件下,致裂孔周围 2 m 煤层渗透率有明显提高,其中两致裂孔中间区域煤层渗透率提高约 50 倍。负压抽采过程中,抽采孔到致裂孔距离越小抽采效果越好,煤层瓦斯压力下降程度越显著,在孔距设为 0.6 m 时,负压抽采 30 d 后煤层瓦斯压力基本控制在 $1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 左右。

b. 现场试验结果表明,以孔距 1.6 m、抽采负压 20 kPa 的方式对煤层进行双孔静态致裂,瓦斯抽采纯量由 $0.0042 \text{ m}^3/\text{min}$ 提升到 $0.008 \text{ m}^3/\text{min}$,提升 1 倍左右。现场实验证明,静态致裂在煤层瓦斯增透促抽实际生产中具有显著作用。

c. 在煤层静态致裂实际应用过程中,应确保抽采孔在致裂孔的有效影响半径内,通过多孔致裂的手段,优化布孔方式,增加致裂孔的自由面,达到提高致裂效果的目的。

d. 深部煤层的变形破坏受多因素影响,且深部煤层蕴存瓦斯的运移规律复杂,受到多种地质因素的干扰,文中通过数值模拟软件仅从内部结构和外部荷载的角度进行煤层增透瓦斯促抽的研究,后续可增加温度、采深等外部因素对瓦斯运移产生的影响。

参考文献(References)

- [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] WANG Xinfeng, LIU Wengang, JIANG Xiaojun, et al. Evolution characteristics of overburden instability and failure under deep complex mining conditions[J]. Geofluids, 2022, 2022: 6418082.
- [4] ZHANG Xiaoqiang, ZOU Jiaying. Research on collaborative control technology of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster in goaf based on dynamic isolation[J]. Fuel,

- 2022, 32(1): 124123.
- [5] CHEN Dongdong, HE Wenrui, XIE Shengrong, et al. Increased permeability and coal and gas outburst prevention using hydraulic flushing technology with cross-seam borehole[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 73: 103067.
- [6] 李忠辉, 宋晓艳, 王恩元. 石门揭煤静态爆破致裂煤层增透可行性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(1): 86-89.
LI Zhonghui, SONG Xiaoyan, WANG Enyuan. Feasibility of improving permeability by static blasting during uncovering coal seam in cross-cut[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2011, 28(1): 86-89.
- [7] ZHANG Rong, CHENG Yuanping, ZHOU Hongxing, et al. New insights into the permeability-increasing area of overlying coal seams disturbed by the mining of coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 352-364.
- [8] 许江, 程亮, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出冲击气流形成及传播规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 333-347.
XU Jiang, CHENG Liang, PENG Shoujian, et al. Formation and propagation law of coal and gas outburst impact airflow[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 333-347.
- [9] 郭怀广, 朱立凯. 煤岩层静态爆破释能增透机制探讨[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(5): 60-65.
GUO Huaiguang, ZHU Likai. Research on mechanism of energy release and permeability improvement in coal strata by static blasting[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(5): 60-65.
- [10] LI Chong, HE Sifeng, HOU Wentao, et al. Experimental study on expansion and cracking properties of static cracking agents in different assembly states[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(6): 1259-1272.
- [11] 翟成, 武世亮, 汤宗情, 等. 基于静态爆破的煤层致裂增透技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(5): 54-57.
ZHAI Cheng, WU Shiliang, TANG Zongqing, et al. Study on seam fracturing and permeability improved technology based on static blasting[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(5): 54-57.
- [12] 王金贵, 张苏. 煤岩静爆致裂微震活动规律及频谱演变特征[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1706-1713.
WANG Jingui, ZHANG Su. Characteristics of microseismic signals and its frequency-spectrum evolution rule during the static cracking of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1706-1713.
- [13] 谢雄刚, 刘锦伟, 王磊, 等. 静态膨胀剂膨胀开裂突出煤层的测试研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(10): 2620-2625.
XIE Xiongqiang, LIU Jinwei, WANG Lei, et al. Testing study of expanding and cracking outburst coal seam by the static expansion agent[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10): 2620-2625.
- [14] 郝生雷, 杨洋, 秦瑞. 煤矿复杂条件下近距离破岩施工技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(增刊1): 43-45.
HAO Shenglei, YANG Yang, QIN Rui. Closed rock breaking construction technology under complex conditions in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(Sup.1): 43-45.
- [15] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 735-742.
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study of extension characters of cracks in coal seam under blasting load with different charging modes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 735-742.
- [16] 李清, 徐文龙, 郭洋, 等. 柱状炮孔端部爆生裂纹动态扩展力学行为研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(2): 267-275.
LI Qing, XU Wenlong, GUO Yang, et al. Study on mechanical behaviors of crack dynamic propagation at the end of cylinder blastholes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(2): 267-275.
- [17] 白鑫, 王登科, 田富超, 等. 三轴应力加卸载作用下损伤煤岩渗透率模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1536-1546.
BAI Xin, WANG Dengke, TIAN Fuchao, et al. Permeability model of damaged coal under triaxial stress loading-unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1536-1546.
- [18] 林海飞, 龙航, 李树刚, 等. 煤体瓦斯吸附解吸与压裂渗流全过程真三轴试验系统研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊2): 3294-3305.
LIN Haifei, LONG Hang, LI Shugang, et al. Development and application of true triaxial test system for the whole process of gas adsorption-desorption, fracturing and seepage in coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup.2): 3294-3305.
- [19] 尚宏波, 靳德武, 张天军, 等. 三轴应力作用下破碎煤体渗透特性演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1066-1075.
SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHANG Tianjun, et al. Permeability evolution of broken coal under triaxial stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1066-1075.
- [20] 孟召平, 章朋, 田永东, 等. 围压下煤储层应力-应变、渗透性与声发射试验分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2544-2551.
MENG Zhaoping, ZHANG Peng, TIAN Yongdong, et al. Experimental analysis of stress-strain, permeability and acoustic emission of coal reservoir under different confining pressures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2544-2551.
- [21] HU Shaobin, WANG Enyuan, KONG Xiangguo. Damage and deformation control equation for gas-bearing coal and its numerical calculation method[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 25: 166-179.
- [22] 吴学海, 李波波, 王新, 等. 基于塑性变形的煤体损伤本构关系及渗透率模型研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 131-141.
WU Xuehai, LI Bobo, WANG Xin, et al. Plastic deformation-based constitutive relation of coal damage and permeability model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6):

- 131-141.
- [23] XU Hao, QIN Yueping, YANG Daoyong, et al. Modeling of diffusion kinetics during gas adsorption in a coal seam with a dimensionless inversion method[J]. *Fuel*, 2022, 326: 125068.
- [24] 周西华, 韩明旭, 白刚, 等. CO₂注气压力对瓦斯扩散系数影响规律实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 81-86.
- ZHOU Xihua, HAN Mingxu, BAI Gang, et al. Experimental study on the influence of CO₂ injection pressure on gas diffusion coefficient[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 81-86.
- [25] GUO Haijun, TANG Hanlu, WU Yuchen, et al. Gas seepage in underground coal seams: Application of the equivalent scale of coal matrix-fracture structures in coal permeability measurements[J]. *Fuel*, 2021, 288: 119641.
- [26] 苏政睿, 韦善阳. 基于X形真实裂隙通道的煤层瓦斯渗流模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(6): 109-115.
- SU Zhengrui, WEI Shanyang. X-shaped real fracture channels-based simulation of coal seam gas seepage[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 109-115.
- [27] CHEN Min, MASUM S, SADASIVAM S, et al. Modelling anisotropic adsorption-induced coal swelling and stress-dependent anisotropic permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 153: 105107.
- [28] LI Jia, PENG Shoujian, XU Jiang, et al. Novel multi-field coupling high-voltage electric pulse fracturing coal-rock permeability enhancement test system[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 158: 105180.

(责任编辑 范章群)