

水力大直径分级造穴卸压效果数值模拟研究

Numerical Simulation Study on Pressure Relief and Outburst Prevention Effect of Hydraulic Large Diameter Staged Hole Building

杨春丽^{1,2}, 仇海生^{1,2}

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要:为了提高低透气性煤层瓦斯抽采效果,利用水力大直径分级造穴技术,研究低透气性煤层卸压增透效果。通过对煤体受力平衡方程、瓦斯渗流方程以及耦合方程,分析了煤体中的瓦斯吸附、解吸、渗流过程以及同应力之间的耦合关系。利用COMSOL Multiphysics软件,构建了零透气性边界的抽采、造穴三维计算模型,研究了不同抽采时间和不同造穴半径(0.3 m、0.6 m、0.9 m)条件下的卸压抽采效果。研究结果表明,煤层造穴后随着瓦斯不断抽采,钻孔周围瓦斯压力随之下降,随着抽采时间逐渐增加,瓦斯压力降低区逐渐扩大,卸压范围不断增大。半径0.9 m的造穴孔腔模型瓦斯压力下降速度更为明显,能在更短时间内对煤层进行卸压增透,实现煤层消突。

关键词:水力; 分级造穴; 卸压; 数值模拟; COMSOL Multiphysics; 瓦斯

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)01-0047-07

Abstract: In order to improve the effect of gas drainage in low permeability coal seams, the pressure relief and permeability enhancement effect of low permeability coal seams was studied by using the hydraulic large-diameter graded hole making technology. Through the stress balance equation, gas seepage equation and coupling equation of coal, the process of gas adsorption, desorption, seepage and the coupling relationship with stress in coal are analyzed. By using COMSOL Multiphysics software, a three-dimensional calculation model of pumping and hole making with zero permeability boundary is constructed, and the pressure relief pumping effect under different pumping time and different hole making radius (0.3 m, 0.6 m, 0.9 m) is studied. The research shows that the gas pressure around the borehole decreases with the continuous gas drainage after the coal seam cave is built. With the gradual increase of the drainage time, the gas pressure reduction area expands gradually, and the pressure relief range increases continuously. The gas pressure drop speed of the hole cavity model with a radius of 0.9 m is more obvious, which can relieve the pressure and increase the permeability of the coal seam in a shorter time to achieve the coal seam outburst elimination.

Key words: hydraulic power; grading hole making; pressure relief; numerical simulation; COMSOL Multiphysics; gas

1 前言

水力化冲孔造穴技术首先在美国圣胡安盆地煤层气开发领域得到了大规模应用,并取得了良好的效果。目前,在该盆地的4 000多口井中有1/3采用洞穴完井,其产量是射孔完井后水力压裂的3~20倍,且成本低于大型水力压裂。煤矿井下煤层瓦斯抽采造穴主要有机械造穴、松动爆破造穴和水力

冲洗造穴等方式^[1-2]。受到造穴作用影响后,松软突出煤层迅速松动,煤层瓦斯快速解吸、运移,钻进、造穴过程中大量瓦斯、煤粒沿钻孔排出。国内呼鲁斯太矿区曾在2012年采用煤矿井下穿层孔穴完井技术进行煤层瓦斯抽采^[3],穿层洞穴完井钻孔在扩大抽采钻孔影响范围、提高瓦斯抽采量和延长钻孔有效抽采时间等方面具有优势。

王凯等^[4]为了研究水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化及分布规律,基于煤层实际赋存条件,采用压力法和含量法对水力冲孔卸压范围进行了现场试验考察。采用RFP 2D-Flow软件模拟分析了水力冲孔钻孔周围煤体应力及透气性变化规律。冲孔过程中排出了大量瓦斯和一定数量的煤体,在钻孔周围煤体中形成一定的卸压排放瓦斯区域,然而这个

[作者简介] 杨春丽(1979—),女,高级工程师,主要从事电缆及非金属材料检验技术、煤矿安全技术、煤矿自动化技术等方面的研究。

[基金项目] 国家重点研发计划(2017YFC0804207-01)(水力大直径分级造穴技术及装备研究)

[引用格式] 杨春丽,仇海生.水力大直径分级造穴卸压效果数值模拟研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):47-53.

区域内卸压程度如何及卸压范围内煤层透气性变化程度如何,目前并不很清楚。刘明举等^[5]介绍了水力冲孔技术的工艺流程、装备技术及在突出煤层中的应用;王新新等^[6]将采取水力冲孔措施后煤层卸压区域划分为瓦斯充分排放区、瓦斯排放区、瓦斯压力过渡区、原始瓦斯压力区4个区,并利用数值模拟软件对排放机理进行了研究;文献^[6]通过压力法和流量法考察了水力冲孔有效影响半径,并对冲孔钻孔进行了优化,通过数值模拟和现场考察,考察了水力冲孔钻孔周围的卸压范围的大小;文献^[7-9]阐述了水力冲孔措施在突出煤层中的应用及效果,指出该措施可以提高抽采量、快速消除掘进或回采过程中的突出危险性。Lu等^[10-11]采用高压(40~60 MPa)水射流割缝措施在汝箕沟煤矿的使用有效提高了煤体渗透率,瓦斯抽采效率提高了3~6倍。

王兆丰等^[12]研究了水力冲孔在罗卜安煤矿的松软低透突出煤层区域抽放消突措施中的应用效果,区域抽放消突效果显著,单孔冲出煤体7t,钻孔抽放有效影响半径提高2~3倍。夏永军等^[13]对高压水射流冲蚀煤体机理进行了研究论述了高压水射流对煤体的破坏作用、前期应力波的破坏作用及后期射流准静态压力和滞止压力梯度的破坏作用。此外,王新新等^[14]基于高压水射流破煤原理研究了水力冲孔卸压增透的防突机理,并结合淮南矿区的实际条件,确定了水力冲孔的最佳破煤水压为煤的普氏系数的12~20倍。王耀锋等^[15]利用ANSYS研究了淹没条件下旋转水射流喷嘴的流场特性,经优选确定出现场扩孔用喷嘴所配叶轮的导向角为45°,并研制了井下高压旋转水射流扩孔成套新装备,经现场试验及应用,使钻孔的瓦斯抽采纯流量提高了0.79~3.79倍,取得了较好的应用效果。张永将等^[16]研制了超高压水力割缝煤层增透成套装置,采用超高压水射流对煤层进行卸压增透,穿层钻孔割缝平均单刀出煤量0.85t,可提高钻孔瓦斯抽采纯量2.0倍以上,缩短抽采达标时间50%以上。

目前,国内外学者、现场工作者对低渗透高瓦斯煤层如何卸压增加煤层透气性进行了广泛研究和试验。水力冲孔、水力割缝作为煤层卸压增透有效方法和手段,被广泛应用于煤矿井下瓦斯抽采和防突工作中,然而,国内普通高压水射流防治煤与瓦斯突出动力灾害虽然有一定效果,水力冲孔造穴技术造穴半径普遍在0.5m以下,存在卸压范围小,增透效果有限等问题^[17]。借鉴该技术成功经验,在煤矿井

下通过顺层或穿层钻孔深入煤层内部,采用高压水射流分级造穴的手段冲出大量煤体及瓦斯形成直径较大的卸压孔隙,增加煤层的透气性消除煤层的突出危险性。论文通过数值模拟的手段,采用COMSOL Multiphysics模拟煤层瓦斯抽采过程,分析造穴孔隙周围煤体在造穴过程中的瓦斯压力的分布及变化规律,研究水力大直径分级造穴孔隙的卸压防突效果。

2 水力大直径分级卸压增透防突技术

水力大直径分级造穴卸压增透的技术原理在于通过三维水射流钻头的轴向和径向回转,在煤层内制造大体积空腔室来增大煤体暴露面积,形成直径较大的卸压孔隙,为煤体膨胀变形和瓦斯解吸积聚提供充分空间,在孔隙周围煤体形成裂隙网络,配合瓦斯抽采措施释放煤层和围岩中的弹性潜能和瓦斯膨胀能,进而消除煤体突出危险性。为了扩大水力造穴水射流作用半径,增加钻孔周围煤体暴露面积,加速煤体内部裂纹产生与扩展,水力大直径分级造穴技术装备,通过分级造穴技术扩大水射流作用半径,在三维水射流造穴钻头上装配喷嘴延长杆进行分级造穴,通过延长杆导流和喷嘴集束作用实现大直径造穴孔洞煤层卸压增透,更大范围地提高煤体透气性,增大煤层卸压区域,提高瓦斯抽采效果。

水力大直径分级造穴卸压增透装备主要包括三维水射流分级造穴钻头、高压注水管路系统与全液压坑道钻机、高压清水泵、水箱等装备部件进行装配连接组成,具体如图1所示。

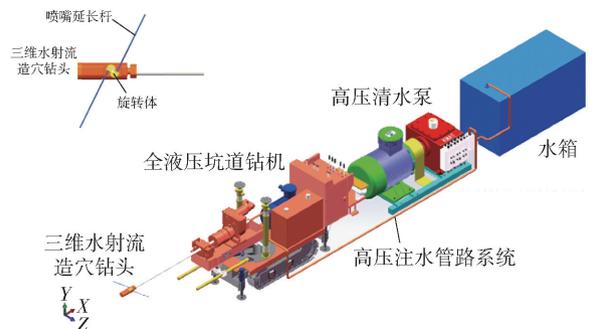


图1 水力大直径分级造穴装备原理图

3 煤层应力场与渗流场耦合数学模型

煤层增透主要涉及煤体变形与煤层瓦斯渗流两个物理过程,且两者之间是相互耦合的,以宏观尺度为表征体,文献^[18]给出了弹性介质在应力与渗流两个场耦合条件下的数学方程。

3.1 煤体受力平衡方程

根据弹性固体受力的平衡方程

$$\sigma_{ij,j} = F_i, (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 为应力; F_i 为体积力。

煤体假定为弹性介质, 且视为各向同性, 可以得到应力 σ_{ij} 、变形量 ε_{ij} 和孔隙压力 P 之间的本构方程

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} P, (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中, D_{ijkl} 为张量; α 为孔隙压力系数; $\varepsilon_{ij} = (U_{i,j} + U_{j,i})/2$ 为应变; U_i 为位移量。

3.2 瓦斯渗流方程

煤层瓦斯的运移满足质量守恒定律, 即:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q_g Q_p) \quad (3)$$

式中, m 为瓦斯含量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; t 为时间变量, s ; ρ_g 为瓦斯密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; q_g 为瓦斯 Darcy 渗流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q_p 为源汇项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将瓦斯假定为理想气体, 瓦斯密度和压力的关系为

$$\rho_g = \beta p \quad (4)$$

式中, p 为瓦斯压力, Pa ; β 为气体压缩系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。

将其定义为

$$\beta = M_g / (RT) \quad (5)$$

式中, M_g 为气体分子量; R 为气体常数; T 为温度, K 。

煤层中的瓦斯以吸附和游离两种状态存在, 且煤体中赋存有裂隙和孔隙, 煤体中的瓦斯含量满足吸附等温方程

$$m = \beta \left(\frac{\phi}{p_0} + \frac{a_1 a_2 \rho_s}{1 + a_2 p} \right) p^2 \quad (6)$$

式中, ϕ 为煤体孔隙率; ρ_s 为煤体密度, $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; a_1, a_2 为吸附常数。

根据该公式可以得到瓦斯压力与瓦斯的吸附与解吸变化之间的关系, 煤体中处于游离状态的受到瓦斯压力梯度作用, 在煤体孔隙中作渗流运动, 可得到关系式为

$$q_g = - \frac{k_g}{\mu_g} (\nabla p + \rho_g g D) \quad (7)$$

式中, q_g 为流速, m/s ; k_g 为煤体气体渗透率; μ_g 为气体粘度; g 为重力加速度。

把上述方程代入式(3), 得到瓦斯在煤体中的渗流运动方程为

$$\beta \left[\frac{\phi}{p_0} + \frac{a_1 + a_2 + \rho_s}{1 + a_2 p} - \frac{a_1 a_2 \rho_s}{2(1 + a_2 p)^2} \right] \frac{\partial p^2}{\partial t} -$$

$$\nabla \cdot \left[\beta \frac{k_\infty}{\mu_g} \left(1 + \frac{a_k k_\infty^{-0.36}}{p} \right) \nabla p^2 \right] = Q_p \quad (8)$$

3.3 瓦斯压力场与渗流场耦合方程

瓦斯压力与煤体变形之间的关系体现在式(2)、(8)中, 表征了瓦斯渗流对煤体及应力场的影响, 与此同时, 应力场的大小会影响到煤体瓦斯的渗流过程, 影响关系为

$$\varphi = (\varphi_0 - \varphi_r) \exp(\alpha_\varphi \bar{\sigma}_v) + \varphi_r \quad (9)$$

式中, φ_0 为初始状态煤体孔隙率; α_φ 为煤体的渗透率受力变化敏感常数, 取 5.0×10^{-8} ; φ_r 为受应力场影响的煤体孔隙率; $\bar{\sigma}_v$ 为应力平均值, 可以按照以下式计算:

$$\bar{\sigma}_v = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 + \alpha p \quad (10)$$

式中, α 为 BIOT 系数, α 取为 1; $\alpha_{1,2,3}$ 为 3 个方向应力。

与此同时, 煤体孔隙率与渗透率可用以下关系式表示:

$$k_g = k_{g0} \exp \left[22.2 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

式中, k_{g0} 为无应力条件下的煤体渗透率。

上述三个公式, 表征了煤体中的瓦斯吸附、解吸、渗流过程以及同应力之间的耦合关系, 体现了煤体受应力作用下孔隙率发生改变, 影响渗透性的变化, 进而返作用于应力场的变化过程^[19]。

4 数值模拟

4.1 模型构建

建立如图 2 所示的长宽高为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 理想化的三维计算模型, 模型左下部边界假设为巷道, 抽采孔长 15 m , 在 $11.1 \sim 15 \text{ m}$ 段进行造穴, 造穴孔与水平面呈 45° 倾角展布, 造穴沿倾向呈圆柱体, 造穴半径分别为 0.3 m 、 0.6 m 、 0.9 m , 造穴模型分别如图 2 所示。

模型采用零透气性边界, 地应力 $\sigma_H = 12 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 7 \text{ MPa}$, $\sigma_v = 11 \text{ MPa}$, 内部原始瓦斯压力设置为 1.5 MPa , 抽采负压为 20 kPa , 计算步长按照积数步长增长, 起始于 1 s , 终止于 $1e7 \text{ s}$, 共 100 个时间步长, 模型具体相关参数见表 1。

表 1 三维渗流耦合模型物理参数

杨氏模量 E/Pa	泊松比 ν	煤层密度 $\rho_s /$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	流体粘滞性 $\mu/\text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	饱和渗透率 k/m^2
2e9	0.33	1250	1e-3	5e-6

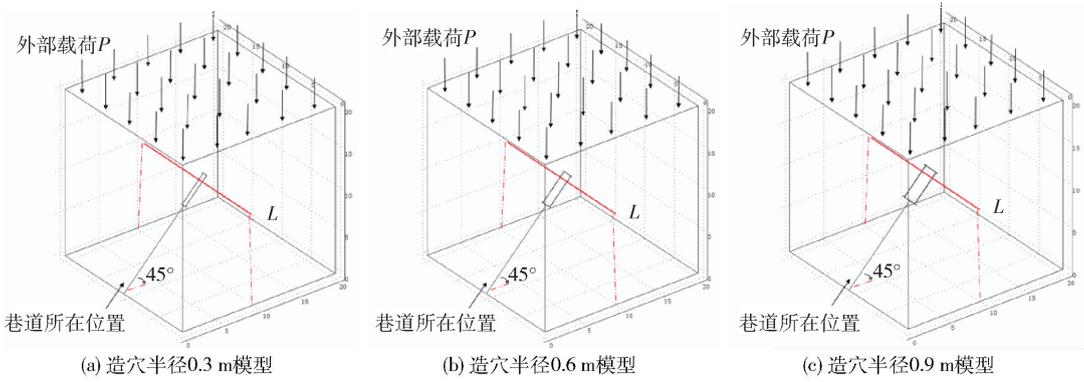


图2 数值模拟造穴模型

4.2 数值模拟

针对不同抽采时间(10^5 s、 10^6 s、 10^7 s)和不同造穴半径(0.3 m、0.6 m、0.9 m)条件下的抽采效果进行数值模拟,其等瓦斯压力表面对比图如图3所示。

当抽采时间(时间步长)为 $t = 10^7$ s 时,不同造穴半径的等瓦斯压力分布规律(抽采钻孔平面)如图4至图6所示。

取 $x_0(10, 0, 12)$ 、 $x_1(10, 20, 12)$ 两点连成的直线 L, 绘制在不同造穴半径条件下,该直线上各个时

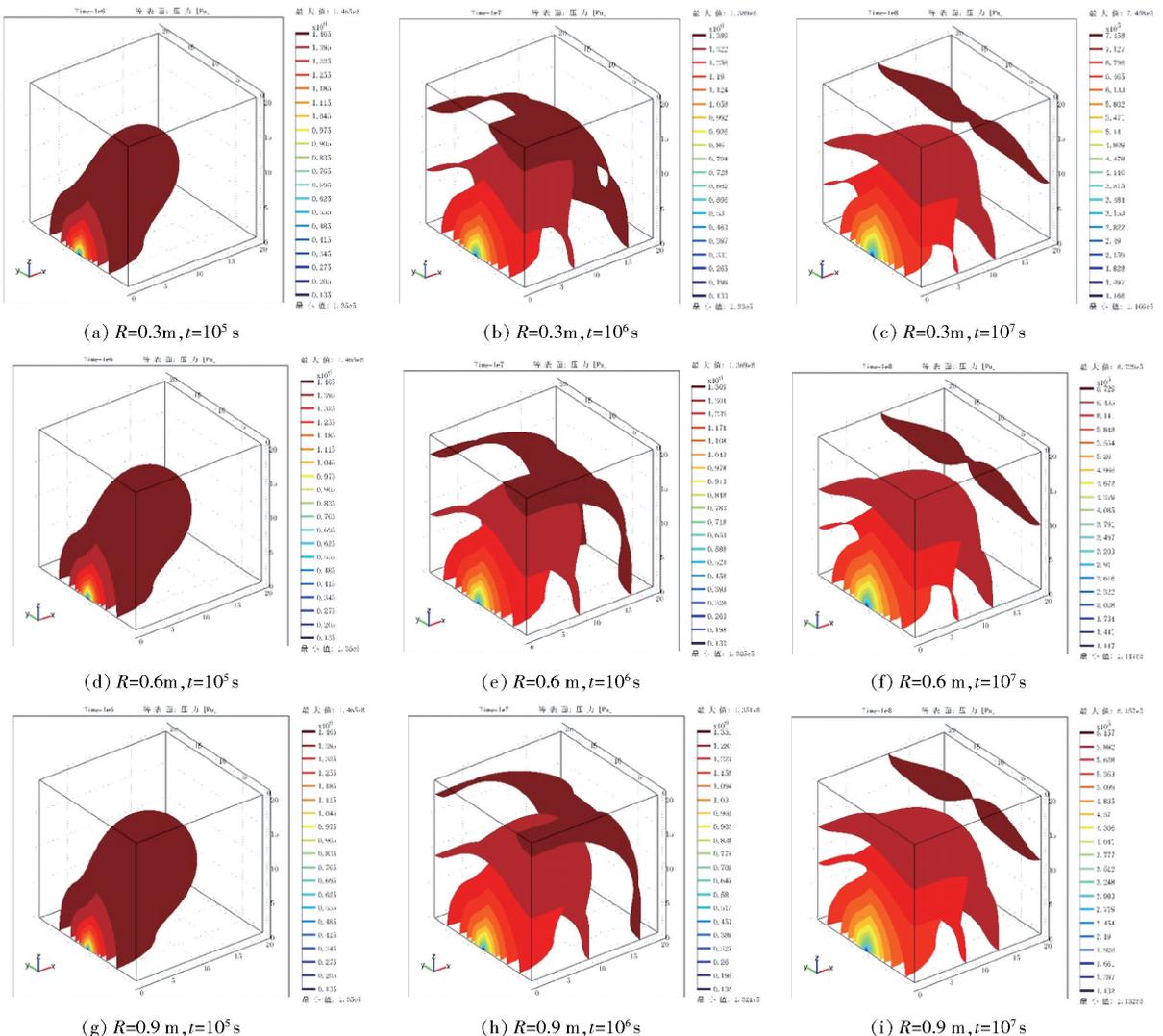


图3 不同造穴半径、不同抽采时间等瓦斯压力表面分布

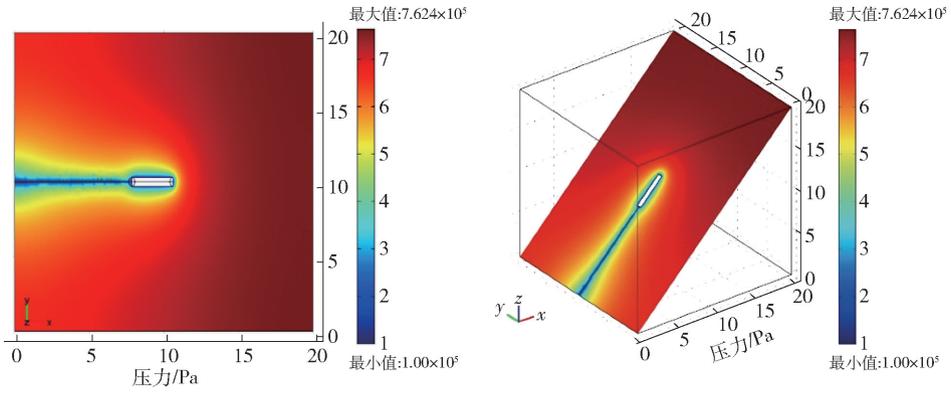


图 4 造穴半径 0.3 m 时等瓦斯压力表面分布钻孔平面(切面)图

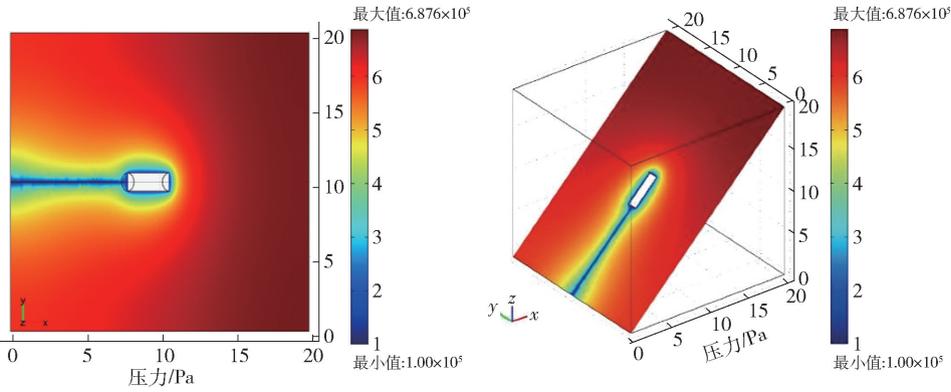


图 5 造穴半径 0.6 m 时等瓦斯压力表面分布钻孔平面(切面)图

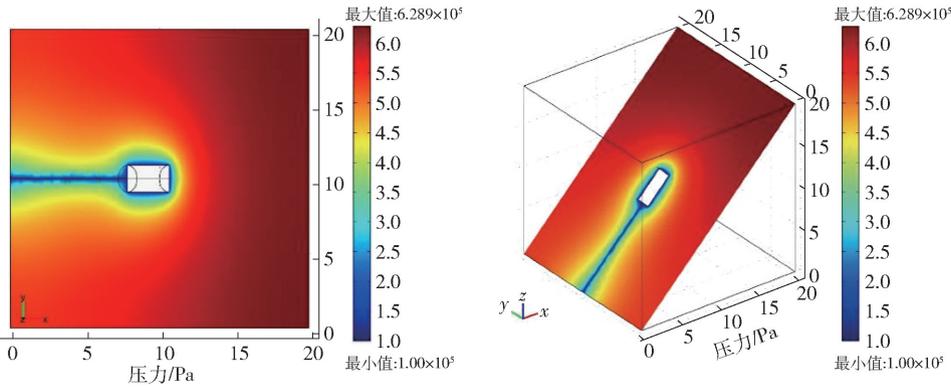


图 6 造穴半径 0.9 m 时等瓦斯压力表面分布钻孔平面(切面)图

刻的压力随抽采时间分布规律,具体如图 7 所示。

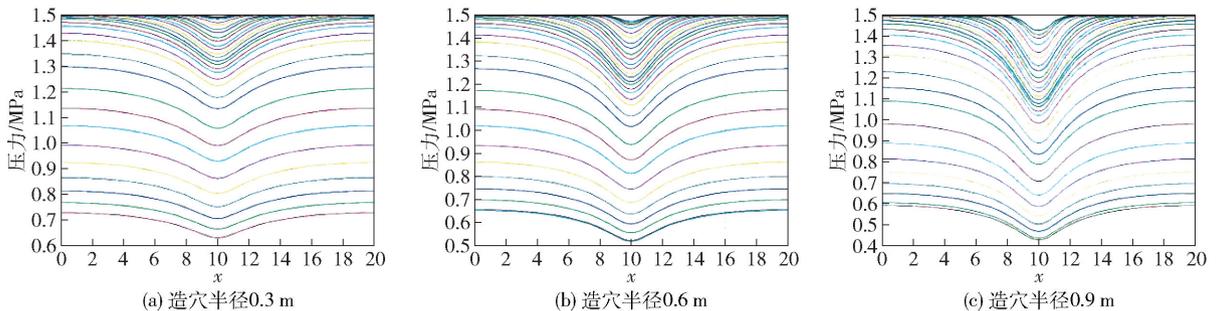


图 7 不同造穴半径直线 L 上瓦斯压力随时间变化曲线

4.3 模拟结果分析

数值模拟结果表明,煤层造穴后随着瓦斯不断抽采,钻孔周围瓦斯压力随之下降,随着抽采时间逐渐增加,瓦斯压力降低区逐渐扩大,卸压范围不断增大;以瓦斯压力 0.74 MPa 为消突临界指标,半径 0.3 m 的造穴孔隙,时间步长 0.87×10^7 s 时钻孔

2 m 范围内煤层消突, 1×10^7 s 时模型整体消突;半径 0.6 m 的造穴孔隙,时间步长 0.67×10^7 s 时 2 m 范围内煤层消突, 0.87×10^7 s 时模型整体消突;半径 0.9 m 的造穴孔隙,时间步长 0.37×10^7 s 时钻孔 2 m 范围内煤层消突, 0.67×10^7 s 时模型整体消突。随抽采时间不同造穴半径消突范围结果见表 3。

表 3 随抽采时间不同造穴半径消突范围结果

时间步长/s	0.11×10^7	0.21×10^7	0.37×10^7	0.67×10^7	0.87×10^7	1×10^7
0.3 m 造穴半径消突范围/m	0	0	0	0	2	10
0.6 m 造穴半径消突范围/m	0	0	0	2	10	-
0.9 m 造穴半径消突范围/m	0	0	2	10	-	-

三种不同半径的造穴孔隙瓦斯压力分布曲线明显可见,半径 0.9 m 的造穴孔隙,钻孔 2 m 范围消突时间较 0.3 m 造穴孔隙缩短 58.3%,较 0.6 m 造穴孔隙缩短 47.4%;整体消突时间较 0.3 m 造穴孔隙缩短 33.3%,较 0.6 m 造穴孔隙缩短 23.1%。半径 0.9 m 的造穴孔隙模型瓦斯压力下降速度更为明显,能在更短时间内对煤层进行卸压增透,实现煤层消突。

研究认为,当造穴半径增大时,高压水射流从钻孔中冲出大量煤体和瓦斯,破坏了煤层应力分布状态,使钻孔周围形成应力集中区,应力集中区的煤体在应力作用下产生裂缝并发生破裂,在造穴钻孔周围的煤体内形成一个比钻孔直径大很多的破碎区。随着煤体不断破碎卸压,应力集中区向煤体深处运移,使煤层形成更多的裂隙,增加了煤层透气性,瓦斯释放通道畅通,从而大幅度降低煤层内瓦斯压力,实现煤体卸压增透效果^[20]。

5 结论

论文通过建立弹性介质在应力与渗流两个场耦合条件下的数学方程,采用 COMSOL Multiphysics 数值模拟煤层瓦斯抽采过程,研究了造穴孔隙周围煤体在造穴过程中的瓦斯压力的分布及变化规律,得到了水力大直径造穴孔隙的卸压增透效果,主要得出以下结论:

(1)通过数值模拟结果表明,半径 0.9 m 的造穴孔隙,钻孔 2 m 范围消突时间较 0.3 m 造穴孔隙缩短 58.3%,较 0.6 m 造穴孔隙缩短 47.4%;整体消突时间较 0.3 m 造穴孔隙缩短 33.3%,较 0.6 m 造穴孔隙缩短 23.1%。半径 0.9 m 的造穴孔隙模型瓦斯压力下降速度更为明显,能在更短时间内对煤

层进行卸压增透,实现煤层消突。

(2)大直径分级造穴时,高压水射流从钻孔中冲出大量煤体和瓦斯,破坏了煤层应力分布状态,使钻孔周围形成应力集中区,应力集中区的煤体在应力作用下产生裂缝并发生破裂,在造穴钻孔周围的煤体内形成一个比钻孔直径大很多的破碎区。随着煤体不断破碎卸压,应力集中区向煤体深处运移,使煤层形成更多的裂隙,增加了煤层透气性,瓦斯释放通道畅通,从而大幅度降低煤层内瓦斯压力,实现煤体卸压增透效果。

[参考文献]

- [1] 程远平,付建华,俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
- [2] 王兆丰,范迎春,李世生. 水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用[J]. 煤炭科学技术,2012,40(2):52-55.
- [3] 丁昊明,戴彩丽,高静,等. 国内外煤层气开发技术综述[J]. 煤,2013,22(4):24-26.
- [4] 王凯,李波,魏建平,等. 水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(5):778-784.
- [5] 刘明举,孔留安,郝富昌,等. 水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J]. 煤炭学报,2005,30(4):451-454.
- [6] 王新新,石必明,穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究[J]. 煤炭学报,2012,(3):467-471.
- [7] 魏建平,李波,刘明举,等. 水力冲孔消突有效影响半径测定及钻孔参数优化[J]. 煤炭科学技术,2010,38(5):39-42.
- [8] 杨运峰,王念红. 义安矿水力冲孔卸压增透技术分析[J]. 煤炭科学技术,2010,38(7):48-50+95.
- [9] 王新新,夏仕柏,石必明,等. 潘三矿 13-1 煤层水力冲孔试验研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(4):60-

- 64.
- [10] Lu TK, Yu H, Dai YH. Longhole waterjet rotary cutting for in-seam cross panel methane drainage [J]. Mining Science and Technology (China), 2010, 20(3): 378 - 383.
- [11] Lu T, Yu H, Zhou T, et al. Improvement of methane drainage in high gassy coal seam using waterjet technique [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79(1-2): 40 - 48.
- [12] 王兆丰, 范迎春, 李世生. 水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 52 - 55.
- [13] 夏永军, 文光才, 孙东玲. 高压水射流对煤的冲蚀机理研究 [J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(B06): 4 - 6.
- [14] 王新新, 石必明, 穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究 [J]. 煤炭学报, 2012, (03): 467 - 471.
- [15] 王耀锋. 三维旋转水射流与水力压裂联作增透技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [16] 张永将, 陆占金. 超高压水力割缝煤层增透成套装置研制及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 97 - 104.
- [17] 王伟. 高压旋转水射流破煤及其冲孔造穴卸压增透机制与应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [18] 马永峰. 工作面水力卸压防突作用的数值模拟 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(10): 27 - 31.
- [19] 孙四清, 张俭, 安鸿涛. 松软突出煤层穿层洞穴完井钻孔瓦斯抽采实践 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 49 - 51.
- (上接第 40 页)
- [3] 罗科. 河曲露天矿采场防排水系统布局的合理性研究 [J]. 煤炭技术, 2017, 36(5): 206 - 208.
- [4] 黄小荣. 矿山凹陷排水泵站的设计应用 [J]. 露天采矿技术, 2006(5): 24 - 25.
- [5] 刘杰, 马永亮. 某露天矿采区高效排水研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(21): 13 - 15.
- [6] 尹政, 崔振卿, 巴建文, 等. 天然环境同位素技术判定金川矿区井巷排水补给来源 [J]. 甘肃地质, 2009, 18(4): 56 - 59.
- [7] 朱常春, 韩玉杰, 刘佩贵, 等. 相邻矿山干扰开采对地下水水流场的影响分析 [J]. 地下水, 2014, 36(4): 99 - 102.
- [8] 李新旺, 关天强, 张红升, 等. 望田煤矿开采对地下水影响的研究 [J]. 中国煤炭, 2012, 38(1): 41 - 44.
- [9] 刘佩贵, 陶月赞, 周加鸿, 等. 丘陵区采矿排水对周边地下水流动系统影响分析 [J]. 工程勘察, 2011, 39(8): 51 - 54.
- [10] 张伟, 李铎, 法蕾. 矿山排水引发的环境问题及其调控 [J]. 石家庄经济学院学报, 2002(2): 160 - 164.
- [11] 张化吉. 某露天采矿场降雨径流量预测 [J]. 有色矿冶, 2020, 36(5): 11 - 12, 35.
- [12] 闫杰, 李福平, 李伟. 露天矿含断层边坡地下水渗透特性研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31(2): 92 - 98.
- [13] 徐敏. 基于 GMS 的再生金属项目地下水环境影响预测 [J]. 资源节约与环保, 2022(3): 8 - 10.
- [14] 王亚明. 刚果(金) SICOMINES 矿区工程地质特征及分区评价 [J]. 河北地质大学学报, 2017, 40(4): 12 - 19.
- [15] 陈兴海, 刘运纪, 杨焱, 等. 刚果(金) SICOMINES 铜钴矿床地质特征及成因探讨 [J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 64(6): 31 - 37.
- [16] 李响. 刚果(金) SICOMINES 铜钴矿矿坑涌水量预测及矿山防治水 [J]. 地下水, 2014, 36(3): 34 - 35, 39.
- [17] 安建军. SICOMINES 铜钴矿二期疏干排水方案分析与选择 [J]. 矿业工程, 2017, 15(1): 18 - 20.
- [18] 尹芝华, 孙晖, 任锋, 等. 基于 Visual MODFlow 的西北某铜金属冶炼项目地下水环境影响预测模拟 [J]. 有色冶金节能, 2021, 37(5): 45 - 50.