

煤层瓦斯有效抽采半径与 布孔间距的数值模拟

段林川¹, 罗文柯^{1*}, 张大伟², 周加庆², 唐建华³

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 安徽神源煤化工有限公司 邹庄煤矿, 安徽 淮北 235126;
3. 湖南理工职业技术学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 为探索不同间距下的瓦斯抽采效果, 基于煤体变形方程、瓦斯渗流方程、煤体孔隙率与渗透率变化方程, 建立煤层瓦斯渗流场和煤层固体力学变形场的耦合模型。以邹庄煤矿 7401 工作面风机巷顺层钻孔抽采瓦斯为例, 采用 COMSOL 数值模拟软件进行瓦斯抽采模拟, 得到瓦斯抽采的有效半径和瓦斯抽采孔的最优布孔间距。结果表明: 以直径为 94 mm 的钻孔预抽 3 个月, 测得单孔抽采的有效半径为 0.8 m; 瓦斯抽采效果仅在小范围内受到钻孔直径的影响; 瓦斯抽采效果几乎不受抽采负压的影响; 多孔抽采时, 最优布孔间距为 1.6~4.8 m。

关键词: 布孔间距; 瓦斯抽采; 数值模拟; 流固耦合; 有效抽采半径; COMSOL

中图分类号: TD712⁺.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)01-0036-06

Numerical Simulation on Effective Drainage Radius and Spacing of Coal Seam Gas

DUAN Linchuan¹, LUO Wenke¹, ZHANG Dawei², ZHOU Jiaqing², TANG Jianhua³

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Anhui Shenyuan Coal Chemical Co., Ltd., Zouzhuang Coal Mine, HuaiBei, 235126, China;
3. Hunan Polytechnic Institute of Technology, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In order to explore the effect of gas drainage at different intervals, based on the coal deformation equation, gas seepage equation, coal porosity and permeability change equation, this paper establishes a coupling model of the seepage field of the gas in the coal seam and the solid mechanical deformation field of the coal seam. Taking the gas drainage along the bed in the fan lane of 7401 working face of Zouzhuang Coal Mine as an example, the gas drainage simulation is carried out based on the COMSOL numerical simulation software, and finally the effective radius of gas drainage and the optimal hole spacing of gas drainage holes are obtained. The results show that the drilling hole with diameter of 94 mm is pre-pumped for 3 months, and the effective radius of single hole pumping is measured to be 0.8 m. The effect of gas drainage is only affected by the diameter of borehole in a small range. The effect of gas extraction is almost not affected by the negative pressure of gas extraction. The optimal spacing of holes is 1.6~4.8 m in the case of multi-hole extraction.

Keywords: hole spacing; gas drainage; numerical simulation; fluid-solid coupling; effective extraction radius; COMSOL

随着我国工业的迅速发展, 浅部煤层逐渐枯竭, 矿井的开采深度不断增加, 煤层的地应力与瓦斯压力不断增大, 容易诱导煤与瓦斯突出灾害的发生, 煤矿瓦斯灾害的治理难度也在逐渐增大。煤层瓦斯抽采是

一种降低煤层瓦斯压力,解除煤与瓦斯突出风险的一种关键技术手段.在瓦斯抽采过程中,合理的布孔间距十分重要,若钻孔间距过大,可能会出现抽采盲区,发生瓦斯事故;若钻孔间距过小,将造成人力物力资源浪费.所以,确定钻孔的有效抽采半径与合理的布孔间距对节约瓦斯治理成本和优化瓦斯治理效果具有重要现实意义.

瓦斯有效抽采半径的确定方法主要有现场实测法和理论计算法两种.现场实测法即在矿井下实地进行数据采集^[1-2],其准确性受实测环境和人为因素影响,误差和局限性较大;理论计算法是通过建立瓦斯流动计算模型,通过软件进行模拟,在获取矿井实际参数的情况下,模拟结果真实可靠.在理论计算中,模型的建立方法不同,对模拟结果会产生一定影响.有的学者^[3-5]仅根据瓦斯渗流方程构建数学模型,没有考虑煤体变形和孔隙率与渗透率的变化,其模拟结果与实际工况可能会有误差;有的学者^[6-11]根据矿井实际工况,结合瓦斯渗流方程、煤体变形方程、孔隙率与渗透率变化方程,采用不同的计算方程来构建耦合方程,提高了模拟结果的准确性.邱阳等^[12]研究了 Klinkenberg 效应对单孔抽采的影响,发现 Klinkenberg 效应会有效增大煤层渗透率,且随着时间的延长,煤层渗透率的变化速率显著增加;陈月霞等^[13]研究了不同数量钻孔对瓦斯抽采的影响,采用有效抽采面积确定瓦斯抽采效果,发现有效抽采面积与钻孔个数并非线性关系;邓林峰等^[14]研究了地应力对瓦斯抽采的影响,发现地应力会影响煤层渗透率,抽采效果与地应力成正比关系.本文基于瓦斯渗流方程、煤体变形方程及孔隙率与渗透率变化方程来构建理论计算模型,采用邹庄煤矿 7401 工作面风机巷的实际数据,基于 COMSOL 数值模拟软件进行模拟,通过修改模拟参数,最终确定该工作面瓦斯抽采的有效半径和布孔间距,为现场实践提供参考.

1 理论模型的建立

1.1 煤层瓦斯含量计算方程

煤是一种由孔隙、裂隙和基质组成的双重孔隙介质,基质被孔隙与裂隙分割^[15].瓦斯在煤层中赋存时,大部分以吸附态赋存于基质中,少部分游离瓦斯赋存于裂隙中.由于裂隙中瓦斯的渗流速度大于孔隙中瓦斯的扩散速度,吸附瓦斯受到瓦斯浓度差的影响,从基质中解析到孔隙中,然后从孔隙中扩散到裂隙中,再从裂隙中以达西渗流的方式运移到煤体外部.

游离瓦斯含量计算方程为

$$Q_1 = \varphi \rho_g \quad (1)$$

式中: Q_1 为单位体积煤体中游离瓦斯含量, kg/m^3 ; φ 为煤体孔隙率, %; ρ_g 为煤体中瓦斯密度, kg/m^3 .

将煤层中的瓦斯视为理想气体,瓦斯在煤层中的渗流过程看作等温过程,则瓦斯密度的计算方程为

$$\rho_g = \frac{pM_c}{RT} \quad (2)$$

式中: p 为煤层瓦斯压力, MPa ; M_c 为甲烷的摩尔质量, kg/mol ; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为煤层温度, K .

综合式(1)和式(2),可得到游离瓦斯含量为

$$Q_1 = \frac{\varphi p M_c}{RT} \quad (3)$$

吸附瓦斯含量计算方程为

$$Q_2 = \frac{abp}{1+bp} \frac{100-A-M}{100+31M} \rho_c \rho_a \quad (4)$$

式中: Q_2 为单位体积煤体中吸附瓦斯含量, kg/m^3 ; a 为煤体极限吸附瓦斯量, m^3/kg ; b 为煤体瓦斯吸附常数, MPa^{-1} ; M 为煤体水分比例, %; A 为煤体灰分比例, %; ρ_c 为煤体视密度, kg/m^3 ; ρ_a 为标准状况下瓦斯密度, kg/m^3 .

1.2 渗流控制方程

煤层中瓦斯流动符合达西渗流定律,计算方程为

$$v = -\frac{k_0}{\mu} \nabla p. \quad (5)$$

式中: v 为瓦斯渗流速度, m/s ; k_0 为煤层初始渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

瓦斯在煤层中流动符合质量守恒定律, 计算方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla(\rho_g v) = 0. \quad (6)$$

式中: Q 为单位体积煤中瓦斯总含量, kg/m^3 ; t 为运移时间, s .

综上, 将式(2)~式(5)代入式(6)可得煤层瓦斯运移方程:

$$\frac{\partial \left(\frac{\varphi p M_c}{RT} + \frac{abp}{1+bp} \frac{100-A-M}{100+31M} \rho_c \rho_a \right)}{\partial t} + \nabla \left(\frac{p M_c}{RT} \right) \left(-\frac{k_0}{\mu} \nabla p \right) = 0. \quad (7)$$

1.3 煤体变形控制方程

假设煤层各向同性, 考虑吸附膨胀效应, 结合 Terzaghi 有效应力公式、本构方程, 可得煤体变形计算方程^[16-18]:

$$G u_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu_c} u_{j,ij} + \alpha p_i + \frac{2ab\rho_c RT}{3V_m(1+bp)} p_i + F_i = 0. \quad (8)$$

式中: G 为切变模量, MPa ; u_i 为煤体在 i 方向上的位移, m ; $u_{i,jj}, u_{j,ij}$ 为位移分量, m ; p_i 为各方向上的瓦斯压力, MPa ; F_i 为煤体内部体积力, MPa/m^3 ; ν_c 为煤体泊松比; α 为煤层瓦斯含量系数; V_m 为标准状况下甲烷摩尔体积, L/mol .

1.4 煤体孔隙率与渗透率控制方程

在瓦斯抽采过程中, 若不考虑温度对孔隙率的影响, 孔隙率会随瓦斯压力和煤体变形发生变化^[19], 其计算方程为

$$\varphi = 1 - \frac{\left(1 - \frac{\Delta p}{k_s}\right) (1 - \varphi_0)}{1 + \varepsilon_v}. \quad (9)$$

式中: Δp 为抽采过程中瓦斯压力变化量; k_s 为煤骨架体积模量, MPa ; φ_0 为煤体初始孔隙率, %; ε_v 为煤基体体积应变.

通过 Kozeny-Carman 方程可得动态瓦斯渗透率变化方程为

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v + \Delta p(1 - \varphi_0)/k_s}{\varphi_0} \right]^3. \quad (10)$$

式中: k 为煤体渗透率, m^2 .

1.5 总控制方程

联立式(7)、式(8)和式(10), 建立瓦斯抽采流固耦合控制方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \left(\frac{\varphi p M_c}{RT} + \frac{abp}{1+bp} \frac{100-A-M}{100+31M} \rho_c \rho_a \right)}{\partial t} + \nabla \left(\frac{p M_c}{RT} \right) \left(-\frac{k_0}{\mu} \nabla p \right) = 0; \\ G u_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu_c} u_{j,ij} + \alpha p_i + \frac{2ab\rho_c RT}{3V_m(1+bp)} p_i + F_i = 0; \\ k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v + \Delta p(1 - \varphi_0)/k_s}{\varphi_0} \right]^3. \end{cases} \quad (11)$$

2 钻孔瓦斯抽采数值模拟

2.1 工作面概况及参数

邹庄煤矿 7₂ 煤埋藏深度大约为 440 m, 煤层厚度 0.63~15.92 m, 平均煤厚 5.09 m, 为大部分可采的较稳

定煤层7401工作面位于四采区南翼,为了确定瓦斯抽采有效影响半径和合理的布孔间距,采用数值模拟的方式进行瓦斯预抽采,为现场施工提供合理的参考。根据现场测定的参数进行模拟,现场测定的煤层瓦斯基本参数如下:煤的弹性模量 E 为 2.4×10^9 Pa,煤的视密度 ρ_c 为 1380 kg/m^3 ,水分 M 为 1.42% ,灰分 A 为 13.52% ,初始孔隙率 φ_0 为 5.95% ,初始渗透率 k_0 为 $1.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$,初始瓦斯压力 p_0 为 1.56 MPa ,极限吸附瓦斯量 a 为 $23.48 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯吸附常数 b 为 1.32 MPa^{-1} ,瓦斯气体动力黏度系数 μ 为 $1.06 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,泊松比 ν_c 为 0.3 。

2.2 几何模型

结合7401工作面,构建长度为 20 m ,宽度为 5 m 的二维模型,中心钻孔直径为 94 mm 。模型网格如图1。

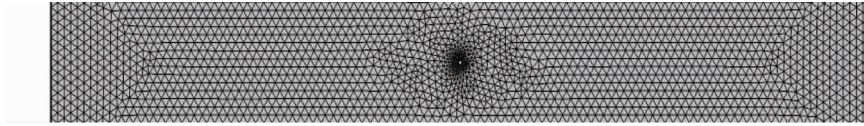


图1 单孔抽采模型网格

2.3 初始条件与边界条件

初始条件:参考煤层瓦斯压力现场参数,将初始瓦斯压力设为 1.56 MPa ,钻孔抽采负压设为 22 kPa 。

边界条件:顶板承受 10 MPa 的应力,煤层两侧设置为辊支撑,煤层底板为固定约束,煤层四周瓦斯通量为 0 ,钻孔周围为狄利克雷边界条件,中心为抽采负压。

2.4 单孔瓦斯抽采数值模拟结果及分析

2.4.1 残余瓦斯压力变化规律

单孔抽采时,随着抽采时间的变化,钻孔抽采的瓦斯压力云图如图2所示。抽采负压和煤层瓦斯压力差导致煤层中的瓦斯逐渐向钻孔附近靠拢,随着抽采时间的增加,钻孔周围瓦斯压力逐渐减小,且影响范围逐渐扩大。

为进一步分析钻孔周围的瓦斯压力变化情况,选取抽采钻孔中心位置 $(0,0)$ 和煤层右边界 $(10,0)$ 之间的瓦斯压力作为研究对象,绘制出不同抽采时间的瓦斯压力数据,如图3所示。

由图3可知:钻孔周围的瓦斯压力下降较为明显,且距离钻孔越远,瓦斯压力下降程度逐渐减弱;随着抽采时间增加,同一点的瓦斯压力下降速度也减小。这是由于在钻孔附近形成了小范围的卸压区,钻孔附近煤体渗透率较大,抽采较容易;随着时间的增加,钻孔附近的瓦斯不断被抽采,使钻孔附近煤体发生变形,导致渗透率降低,抽采难度增大。

根据《防治煤与瓦斯突出细则》^[20]规定,突出矿井必须将瓦斯压力卸载到 0.74 MPa 以下才可以进行采煤活动。即以煤层瓦斯压力下降到 0.74 MPa 以下作为钻孔预抽瓦斯有效半径的判定依据,结合图3可知,抽采1个月的有效半径为 0.4 m ;抽采2个月的有效半径为 0.5 m ;抽采3个月的有效半径为 0.8 m 。

2.4.2 有效半径影响分析

为研究钻孔直径对瓦斯抽采有效半径的影响,选取直径 d 为 $75, 94, 120 \text{ mm}$ (代表小孔、中孔、大孔)这3种不同钻孔分别进行单孔抽采模拟,并在距离钻孔 $0.5, 2.0, 5.0 \text{ m}$ (代表近、中、远)这3处监测瓦斯压力,监测结果如图4所示。在这3处监测点,当钻孔直径为 75 mm 时,剩余瓦斯压力最大;当钻孔直径为 120 mm 时,剩余瓦斯压力最小。当距离钻孔 0.5 m 时,不同直径的钻孔剩余瓦斯压力有明显差距;当距

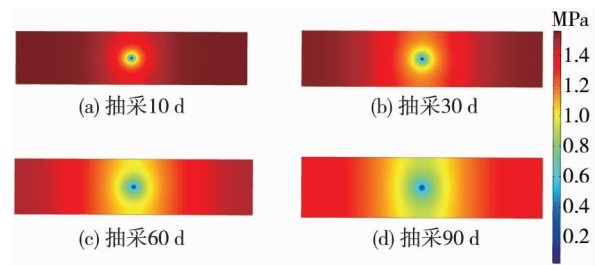


图2 不同时间下单孔抽采钻孔周围瓦斯压力云图

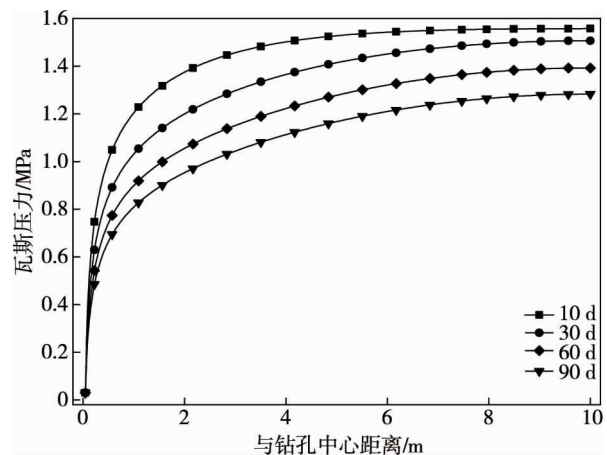


图3 钻孔周围瓦斯压力变化曲线

离钻孔 2 m 时,不同直径的钻孔剩余瓦斯压力的差距逐渐缩短;当距离钻孔 5 m 时,不同直径的钻孔剩余瓦斯压力差距很小.由此可以看出,单孔瓦斯抽采效果与钻孔直径成正比,但随着与钻孔距离的增大,这种效果逐渐减弱,当到达一定距离后,瓦斯抽采效果与钻孔直径几乎无关.在实际施工中,钻孔直径并不是越大越好,大钻孔难以保证其封孔质量,甚至可能导致塌孔等危害.综上,选择 94 mm 直径的钻孔既能保证抽采效果,又可以减小实际施工时封孔质量对抽采效果的影响.

为研究抽采负压对瓦斯抽采有效半径的影响,分别在抽采负压 P_b 为 10, 20, 30 kPa 下进行单孔抽采模拟,并选择距离钻孔 0.5, 2.0, 5.0 m(代表近,中,远)这 3 处监测瓦斯压力,监测结果如图 5 所示.不同抽采负压下,在瓦斯抽采初期,瓦斯抽采效果基本相同;在瓦斯抽采后期,瓦斯抽采效果会随着抽采负压的增大而微弱提升.因此瓦斯抽采效果与抽采负压几乎无关.

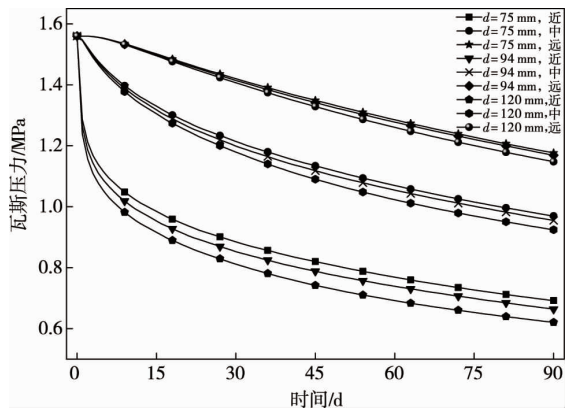


图 4 不同直径的钻孔瓦斯压力变化曲线

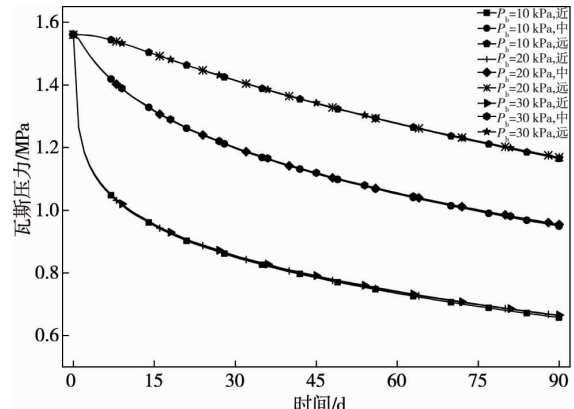


图 5 不同抽采负压下瓦斯压力变化曲线

2.5 多孔瓦斯抽采数值模拟结果及分析

在实际抽采中,瓦斯抽采钻孔是相邻布置的,需要考虑多孔抽采时相邻钻孔之间产生的叠加效应,因此进行多孔瓦斯抽采数值模拟.为同时模拟不同钻孔间距下瓦斯压力变化情况,将工作面长度增加到 50 m,根据单孔抽采得到的数据来模拟多孔瓦斯抽采,以得到合理的布孔间距.以单孔抽采 3 个月的有效半径 0.8 m 的 8 倍、7 倍、6 倍、4 倍、2 倍(即 6.4, 5.6, 4.8, 3.2, 1.6 m)为布孔间距,模拟抽采 3 个月,对比不同抽采间距的多孔瓦斯抽采效果,模拟抽采瓦斯压力云图如图 6 所示.由图 6 可以看出:抽采 90 d 时,在叠加效应的影响下,钻孔间距越近,两钻孔中心颜色越深,代表残余瓦斯压力越小,抽采效果越好;钻孔间距越远,两钻孔中心颜色越浅,代表残余瓦斯压力越大,抽采效果越弱.

以中心抽采孔左侧的瓦斯压力为基准进一步分析钻孔周围瓦斯压力变化情况,瓦斯压力变化曲线如图 7 所示.由图 7 看出,当钻孔布孔间距为 1.6 m 时,两钻孔中心位置瓦斯压力为 0.38 MPa,远小于《防治煤与瓦斯突出细则》中要求的抽采达标瓦斯压力 0.74 MPa;当钻孔布孔间距为 3.2 m 时,两钻孔中心位置瓦斯压力为 0.51 MPa,符合抽采要求;当钻孔间距为 4.8 m 时,两钻孔中心位置瓦斯压力为 0.73 MPa,刚好符合抽采要求;当钻孔布孔间距为 5.6 m 和 6.4 m 时,两钻孔中心位置瓦斯压力分别为 0.82 MPa 和 0.88 MPa,不符合抽采要求.

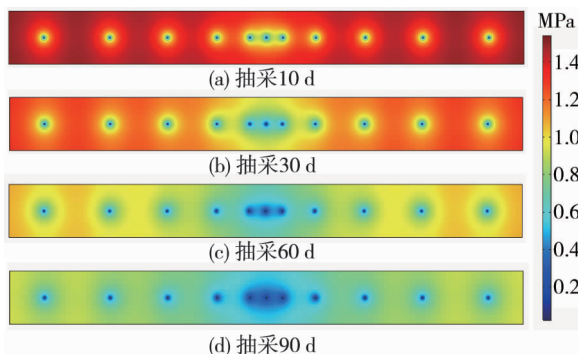


图 6 不同时间下多孔抽采钻孔周围瓦斯压力云图

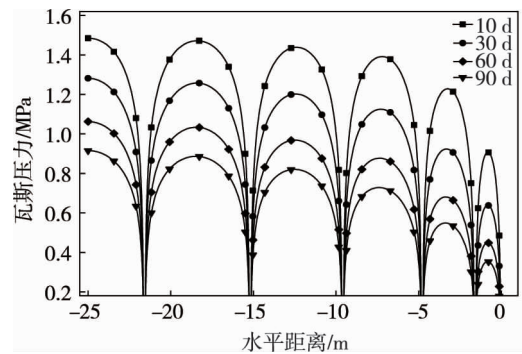


图 7 多孔抽采时钻孔周围瓦斯压力变化曲线

由此可以得出,当钻孔间距为有效半径的2倍时,两钻孔中心瓦斯压力较小,导致过度抽采,造成资源浪费;当钻孔间距为有效半径的7倍时,瓦斯压力降低主要受到叠加效应的影响,导致两钻孔中心位置瓦斯压力不达标,出现抽采盲区.从经济与施工角度考虑,钻孔布孔间距应在有效半径2倍的基础上适当增大;从安全角度考虑,钻孔布孔间距应在有效半径7倍的基础上适当减小.所以钻孔布孔间距应大于瓦斯抽采有效半径的2倍,小于瓦斯抽采有效半径的6倍,即合理的布孔间距为1.6~4.8 m.

3 结论

1)单孔瓦斯抽采时,抽采有效半径与钻孔直径呈正相关;抽采有效半径与抽采负压基本无关.多孔瓦斯抽采时,会产生叠加效应,钻孔中心残余瓦斯压力与钻孔间距呈正相关,随着抽采时间的增大,叠加效应越明显.

2)本工作面采用直径为94 mm钻孔抽采90 d时,抽采有效半径为0.8 m.布孔间距设置为有效抽采半径的2~6倍(1.6~4.8 m)时,既可以保证瓦斯抽采效果,又可以降低抽采时的投入成本.

参考文献:

- [1] 郑雷. SF₆ 气体示踪法测定低透气性高瓦斯煤层瓦斯抽放半径[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(3): 122-124.
- [2] 张伟, 许开立, 雷云. 煤层巷道预排瓦斯带的流固耦合效应数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(11): 1628-1632.
- [3] 胡杰, 隆清明, 李建功, 等. 顺煤层钻孔瓦斯抽采时空演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 83-88.
- [4] 王兆丰, 李炎涛, 夏会辉, 等. 基于 COMSOL 的顺层钻孔有效抽采半径的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 4-6.
- [5] 邹士超, 辛嵩. 煤层瓦斯钻孔有效抽采半径研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 53-59.
- [6] 鲁义, 申宏敏, 秦波涛, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 156-162.
- [7] 李胜, 张浩浩, 范超军, 等. 煤层双重介质模型及瓦斯抽采合理布孔间距研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1284-1289.
- [8] 徐刚, 张凯文, 范亚飞. 叠加效应影响下钻孔有效抽采半径的数值模拟及布孔间距优化[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(1): 91-96.
- [9] 张波, 谢雄刚, 许石青. 某矿顺层钻孔瓦斯抽采及布孔参数数值模拟[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 49-56.
- [10] 陈月霞, 褚廷湘, 陈鹏, 等. 瓦斯抽采钻孔间距优化三维数值模拟量化研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 78-84.
- [11] 郭欣, 李克文, 令狐建设, 等. 瓦斯有效抽采半径影响因素的数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 119-122.
- [12] 邱阳, 聂琪, 刘聪. 基于气固耦合的 Klinkenberg 效应对单孔瓦斯抽采的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 14-17.
- [13] 陈月霞, 褚廷湘, 陈鹏. 不同数量钻孔瓦斯抽采有效区域数值模拟分析[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(5): 23-27.
- [14] 邓林峰, 杨洋, 郑春山. 新集二矿地应力实测分析及其对瓦斯抽采的影响研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(10): 120-124.
- [15] 邢玉忠, 张俭让. 矿井灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017.
- [16] 张鹏冲. 含水煤层热流固耦合模型建立及数值模拟研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(5): 29-33.
- [17] 李大旺. 顶底板岩层透气性对煤层瓦斯抽采的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(5): 28-32.
- [18] 陆红波. 温度、应力作用下非均质煤体蠕变—渗流规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [19] 任黎明. 120502 工作面瓦斯抽采参数测定及布孔优化试验研究[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2020.
- [20] 国家安全生产监督管理总局. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.