

doi: 10.11799/ce201811019

煤层瓦斯强化抽采工程试验与 多过程耦合渗流数值解

李志强^{1,2,3}, 成 墙^{1,2}

(1. 河南理工大学 煤矿灾害预防与抢险救灾教育部工程研究中心, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学 中原经济区煤层(页岩气)河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000;

3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 为提高低渗透煤层的瓦斯抽采能力, 采取了多种工程强化抽采煤层瓦斯, 措施包括: 高压水射流割缝卸压增渗、强化预抽、注气增压驱气、注水增湿抑制瓦斯解吸。首先在煤层底板岩巷中利用穿层钻孔实施高压水射流割缝, 以提高煤体的渗透性, 之后进行预抽煤层高压瓦斯; 达到抽采极限时间后, 采用注空气增压的方法提高瓦斯的流动能力, 以增加瓦斯的抽采能力; 达到注气极限时间后, 采用高压注水的方式湿润煤体, 达到增加煤体水分, 抑制残余瓦斯解吸的目的。试验结果表明: 实施强化抽采措施后, 煤层渗透性提高了100倍以上, 瓦斯抽采率从措施前的16.4%提高到了58.6%。多个工程实施过程中, 瓦斯—注入气—水等流体的流动具有前后继承性, 即后一个工程流体的渗流是在前一个工程流体渗流的终态基础上进行的。为此, 提出了多过程渗流的新概念, 据此建立了多过程耦合渗流力学方程, 将前一个流体的渗流压力——距离终态作为后一个渗流过程的初始条件, 代入后一个渗流方程进行耦合数值计算, 得到了符合实际的多过程、多流体的耦合渗流数值解。计算表明: 第一过程的抽采降压曲线终态为抛物线形态, 可用幂函数描述, 第二过程注气压力曲线初态呈现先下降后上升的波谷曲线形态, 末态可用幂函数描述, 第三过程的注水压力曲线为幂函数下降形态。

关键词: 瓦斯; 煤层气; 水力割缝; 注气; 多过程; 渗流

中图分类号: TD713.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)11-0074-05

Multi-process seepage engineering application and its numerical solutions in gas extraction field

LI Zhi-qiang^{1,2,3}, CHENG Qiang^{1,2}

(1. MOE Engineering Center of Mine Disaster Prevention and Rescue, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region (Henan Province), Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. State Key Laboratory of Coal mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to improve the ability of gas extraction in low permeability coal seam, different kinds of gas extraction methods are applied in engineering practice, including relief to increasing permeability by high pressure water jet slotting, strengthening pre-extraction method, displacing and driving gas method by air injection, and inhibiting gas desorption method by water injection. To increase the permeability of coal seam, the high pressure water jet slotting method is applied through boreholes in the rock under the floor of coal seam. Then the high pressure gas is extracted by pre-extraction

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004041); 河南省高校科技创新团队支持计划(17IRTSTHN030); 长江学者和创新团队发展计划资助(PCSIRT1235); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放课题(2011DA105287-KF201313)

作者简介: 李志强(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事瓦斯防治及煤层气开发研究, E-mail: 211501010005@home.hpu.edu.cn。

引用格式: 李志强, 成 墙. 煤层瓦斯强化抽采工程试验与多过程耦合渗流数值解 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(11): 74-78.

method. After reaching the limit time of pre-extraction method does not work, the air injection method is taken. When the air injection method becomes invalid, the new method that inhibiting gas desorption by water injection is applied to increase the moisture of coal seam and inhibit desorption of residual gas in coal seam. Field tests show that the permeability of coal seam increases more than 100 times after taking the multiple gas strengthening extraction methods and the gas extraction efficiency is increased from 16.4% to 58.6%. The flow ability of gas-injected air-water has a succession of these multiple processes. In other words, the later sub-process seepage commences just when the former sub-process seepage comes to an end. The new conception of multi-process seepage is introduced to study the whole process for the first time. The multi-process seepage equations are also built taking the seepage pressure distribution in the former sub-process as the initial condition of the following seepage sub-process. Then these equations are solved. These numerical solutions are more practical and reasonable, especially for the multi-process and multi-fluid seepage. The results show that the gas pressure curve is a parabola form in the first sub-process and the final state of this stage can be expressed by power function; in the following sub-process, the injecting air pressure curve decreases first and then increases in a trough form at initial state and decreases in a power function form; in the last sub-process, the injecting water pressure curve decreases in a power function form.

Keywords: gas; coal mine methane (CMM); hydraulic cutting; air injection; multi-processes; seepage

中国的能源结构主要由煤炭、石油、天然气、水电等构成,近年来有新能源开发以调整能源结构和补充能源不足,但在现阶段,煤炭依然在能源结构中占有60%以上的比例。在大部分煤炭中存在一种危险性气体-瓦斯。瓦斯既是一种有害气体,也是一种气体能源(煤层气)。煤与瓦斯突出和瓦斯超限爆炸已成为制约中国煤炭安全生产的重大地质灾害。抽采已经成为防治瓦斯地质灾害的根本措施。

煤层低渗是当前制约瓦斯抽采的瓶颈问题。为高效抽采瓦斯,工程师和科学家们采取了各种方法以提高瓦斯抽采率,代表性的措施有:水力压裂^[1,2]、高压水射流割缝^[3-7]、注气驱替^[8,9]、注水抑制^[10-12]等。各种方法针对特殊煤层条件取得了一定效果,然而对于地质条件复杂的瓦斯灾害,单一的措施并不能取得预期的效果,原因是单一措施仅能处理某一类主要致灾因素,如水力割缝仅对高压低渗的软煤起到了卸压增渗的作用,但对于低压(或后期残余瓦斯压力较低)的煤层效果不佳,注气措施对低压高渗煤层有效,但对于高压低渗却无能为力。中国南方瓦斯地质特征表现为:瓦斯压力高,煤层渗透性低,煤层松软,地应力大,煤体干燥,因而采用多种措施防治瓦斯灾害是必要的。在多种措施过程中,煤层瓦斯和其他多种工程流体经历了多个渗流过程,即后一种流体渗流是在前一种流体渗流的基础上进行的,如,瓦斯抽采后进行的注气,注气渗流过程是在前期残余瓦斯压力场的基础上进行的,随后的注水渗流又将前期注气压力场作为初始条件而进行渗流。本文把这种渗流过程称之为多过程渗流。

对于多过程渗流的理论研究目前还比较少,大多是单过程工程条件下的多场耦合,如渗流场、应力场、温度场^[13]等多场同时作用下的耦合计算,未能体现出渗流的多过程特征,本文提出的多过程渗流特指前一渗流过程结束后,后一渗流过程才发生,这类渗流特征在多种综合工程措施中较为普遍。本文以中国重庆天府矿区为例对这种特殊的渗流问题进行了初步研究。

1 工程背景

中国重庆天府矿业公司 K₄ 煤层走向 N35°~55°E, 倾角

35°, 埋深 852~900m, 厚度 0.9m。煤层基本参数见表 1。

表 1 煤层基本参数

参数	值
煤层瓦斯压力/MPa	2.3
煤层瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	16.48
渗透率/mD	4.175×10 ⁻⁵
煤层平均地应力/MPa	31.5
坚固性系数 f 值	0.2
水分/%	0.65
孔隙率	0.0342
Langmuir 吸附常数 a/(m ³ ·t ⁻¹)	31.723
Langmuir 吸附常数 b/MPa ⁻¹	0.715

从煤层及瓦斯地质情况来看, K₄ 煤层高地应力是导致瓦斯压力、含量较高及低渗透性的主要原因, 煤层水分低、煤质松软是导致突出的物质基础, 多种原因导致该地区煤与瓦斯突出灾害严重。为解决此类灾害, 本文作者在 K₄ 煤层底板岩石巷道采用穿层钻孔实施了高压水力割缝、强化抽采、注气驱替、注水增湿等多种措施以防治瓦斯突出灾害。

2 多过程渗流工程试验

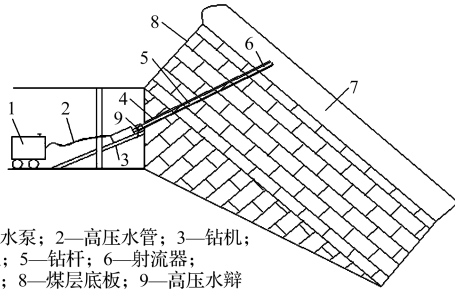
2.1 水力割缝卸压增渗强化抽采瓦斯

在 K₄ 煤层底板岩石巷道中采用 ZYG-150B 钻机配合 Φ89mm 钻头向 K₄ 煤层中打穿层钻孔, 采用 5m×5m 的孔间距布孔, 即钻场间距 5m, 每个钻场的钻孔间距 5m, 在岩层中钻进时采用静压水洗孔, 当钻遇软煤层时, 启动高压泵, 换用高压水进行水力割缝, 当钻孔中出清水时, 采用静压水洗孔, 直至钻孔通畅。无煤粉排出时结束水力割缝。水力割缝方法如图 1 所示。

当全部施工完 8 个钻孔后, 全部进行卸压增渗后的瓦斯强化抽采。水力割缝卸压增渗强化抽采效果见表 2。

表 2 措施前后抽采参数对比

参数	透气性系数	抽采率/%	有效抽采半径/m
	/(m ² ·MPa ⁻² ·d ⁻¹)		
原始煤层	1.47×10 ⁻³	16.4	<0.5
措施后煤层	0.15	52	1.5



1—高压水泵；2—高压水管；3—钻机；
4—钻孔；5—钻杆；6—射流器；
7—煤层；8—煤层底板；9—高压水阀

图1 高压水力割缝示意图

2.2 注气增压驱替抽采瓦斯

当钻孔中瓦斯浓度降低到5% (6~9个月)后,煤层中的瓦斯压力衰减极小,认为瓦斯抽采已达到极限,再延长抽采时间已无意义,此时结束抽采,进行第二阶段的注气驱替瓦斯抽采瓦斯。第一阶段水力割缝后的卸压抽采后,煤层中残余瓦斯压力为0.2~0.6MPa,为了能驱动瓦斯,采用1MPa的空气增大瓦斯流动能力。注气的方式为一个孔注气,邻近孔抽气,例如8号孔注气,7号孔抽气,6号孔注气,5号孔抽气,其余类推,注气方式如图2所示。

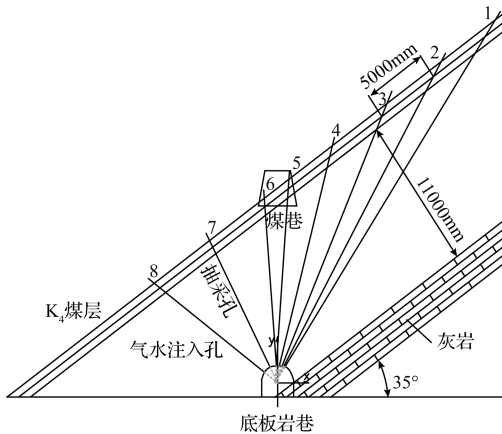


图2 注气增压驱替抽采瓦斯示意图

注气结束后,对瓦斯抽采率进行了测定,抽采率由第一阶段的52%提高到了58%。

2.3 注水增湿抑制瓦斯解吸

K_4 煤层水分较低,煤体干燥使得煤层硬分层易于发生脆性破坏,冲击性明显,而软分层煤颗粒的离散型较强,煤体的粘结力较低,易诱发煤与瓦斯突出。考虑到上述不利因素,当注气结束后,在抽采孔中进行了高压注水措施,以增加煤体粘结力,并抑制残余瓦斯涌出。

采用125/31.5水泵,注水压力10~12MPa,试验注水时间1~2h。注水试验结果如图3所示。

从图3中可以看出,注水量与时间关系为阶跃式曲线,即开始8min左右,进水量上升较快,表明水流开始时候迅速充满煤层近孔口段的大裂隙,10min后进水量平缓上升,表明水流进入煤层深部,并在煤层中发生渗流,60~70min时,煤体被高压水压开,进水量微增。注水流量、压力与

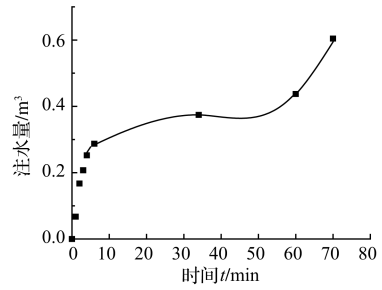


图3 注水量与时间关系

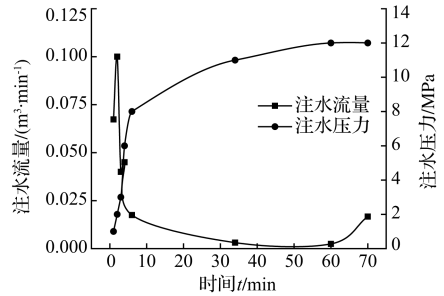


图4 注水流量、压力与时间关系

时间关系如图4所示。图4的压力曲线表现为开始8min内,压力陡增,10min后压力平缓上升,压力曲线呈现抛物线形态。流量为一负指数递减曲线,同样为前8min,流量突降,10min后,流量缓慢下降,表明此时发生缓慢渗流,60~70min时,流量微增。注水1h后,测定煤层水分,水分增加了1.25%。

3 多过程耦合渗流数值解

如前所述,水射流割缝卸压后的抽采、注气驱替、注水增湿过程为一多过程、多相、多组分渗流,后一渗流过程是在前一渗流终态的基础上发生的,本文称为多过程渗流;由于多过程渗流中存在瓦斯与注入空气两种不同的可混气体,因而还存在多组分渗流现象;此外,由于多过程渗流中还存在气体(瓦斯与空气)和水等两相流体介质,因而还存在气水两相流现象。如果将所有因素全部考虑在内,再考虑多过程耦合,问题将变得异常复杂,导致无法用渗流力学理论描述。为了便于计算,反映主要现象,本文对多过程耦合渗流问题作如下假设:①暂不考虑瓦斯、注入空气的多组气体混合、置换解吸;②暂不考虑水、气两相流中水驱气的问题,亦不考虑水气饱和度的问题;③仅考虑水、空气、瓦斯的压力分布,并将这三种流体的压力视为同一物理量,主要将前一渗流的终态压力作为初始条件代入后一渗流过程进行计算;④暂不考虑多孔渗流情况,仅考虑单孔渗流问题,因对称性,故仅计算孔间距一半范围内的压力分布。

3.1 增渗后抽采瓦斯渗流数值解

采取水力割缝卸压后,煤层的渗透性大大提高,之后

进行的瓦斯抽采为一单项、单组分渗流，渗流方程采用周世宁院士提出的径向渗流方程。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P_1(r, t)}{\partial t} = \frac{4\lambda p_1(r, t)^{1.5}}{\alpha} \left[\frac{\partial^2 P_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_1(r, t)}{\partial r} \right] \\ p_1(r, 0) = 2.3\text{MPa} \\ p_1(0, t) = 0.07\text{MPa} \\ \left. \frac{\partial p_1(r, t)}{\partial r} \right|_{\Omega} = 0 \\ P_1(r, t) = p_1^2(r, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $p_1(r, t)$ 为煤层中瓦斯压力，MPa； λ 为煤层透气性系数， $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ； α 为瓦斯含量系数； r 为距离，m； t 为时间，月。

计算式(1)得到的抽采后瓦斯压力分布如图 5 所示，从图 5 中可以看出，瓦斯抽采压降曲线为抛物线形状，当到抽采后期，瓦斯压力下降幅度降低，到一定时间后压降曲线趋于稳定，此时可认为瓦斯压力稳定，进入稳态渗流阶段，其压降曲线仅仅是距离的函数，对最后一条压降曲线(6mon)与距离进行拟合，得到如式(2)的形式：

$$p_1(r, t_1) = Ar^m = 0.7r^{0.28} \quad (2)$$

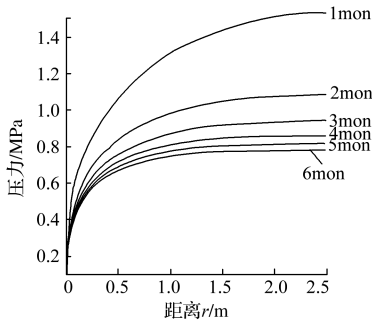


图 5 瓦斯抽采压降曲线

3.2 抽采后注气的渗流数值解

煤层注气可用下述渗流方程描述，其中气压初始条件用式(2)代替，见式(3)：

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P_2(r, t)}{\partial t} = \frac{k_{\text{air}} p_2(r, t)}{\mu_{\text{air}} \varphi} \left[\frac{\partial^2 P_2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_2(r, t)}{\partial r} \right] \\ p_2(r, 0) = p_1(r, t_1) = Ar^m = 0.7r^{0.28} \\ p_2(0, t) = 1\text{MPa} \\ \left. \frac{\partial p_2(r, t)}{\partial r} \right|_{\Omega} = 0 \\ P_2(r, t) = p_2^2(r, t) \end{cases} \quad (3)$$

式中， $p_2(r, t)$ 为注入的空气压力，MPa； k_{air} 为空气渗透率，mD； μ_{air} 为空气动力粘性系数， $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ； φ 为煤层孔隙率； t 为时间，d。

对(3)进行解算后，得到注气过程中的气压分布，如图 6 所示。

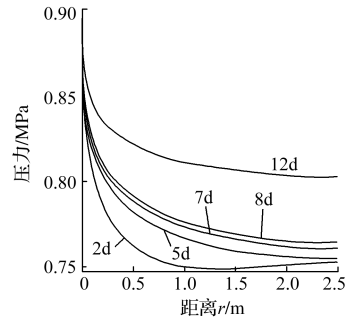


图 6 注气过程中空气压力分布图

从图 6 中可以看出，开始注气时(<3d)，由于煤层中存在残余瓦斯压力，煤层内气压随距离呈现先下降后上升的形态，当注气时间足够长时，煤层内压力逐步上升，气压压降曲线呈现负幂函数形态，注气 12d 后，煤层中气压超过残余瓦斯压力，此时认为注气可全部驱动瓦斯流动，12d 时的气压分布可用式(4)描述。

$$p_2(r, t_2) = Br^n = 0.81r^{-0.0151} \quad (4)$$

3.3 注气后注水的渗流数值解

注水的渗流过程可用式(5)描述，其中把注气过程的终态压力分布式(4)作为注水的初始条件代入式(5)，可得到下式。

$$\begin{cases} \frac{\partial p_3(r, t)}{\partial t} = \frac{k_w}{\varphi \mu_w C_1} \left[\frac{\partial^2 p_3(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_3(r, t)}{\partial r} \right] \\ p_3(r, 0) = p_2(r, t_2) = Br^n = 0.81r^{-0.0151} \\ p_3(0, t) = 12\text{MPa} \\ \left. \frac{\partial p_3(r, t)}{\partial r} \right|_{\Omega} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中， k_w 为水渗透率，mD； μ_w 为水的动力粘性系数， $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ； C_1 为综合压缩系数； $p_3(r, t)$ 为水压力，MPa。

将式(4)表示的气体压力作为初始条件代入式(5)即进行计算，得到水的压力分布曲线，如图 7 所示。

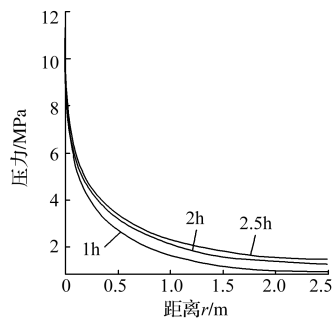


图 7 注水过程中水压分布

从图 7 中可以看出，注水 1h 后，在距离孔口 2.5m 的位置，水压达到了 1MPa 以上，2.5h 后水压大于 2MPa，前一过程注气形成的初始压力分布(式 4)对注水压力未造成较大影响，主要是因为注气压力最高不过 0.9MPa，相比注

水压力 12MPa 要低的多。

4 结 论

1) 为提高低渗透煤层瓦斯抽采能力, 采取了水力割缝强化预抽、注气增压驱气、注水增湿抑制解吸等多工程措施, 使瓦斯抽采率从 16.4% 提高到了 58.6%。

2) 提出了多过程耦合渗流的科学问题, 即前一个渗流过程的终态压力作为后一个渗流过程的初始条件, 后一个渗流过程是在前一个渗流结束的基础上发生的, 据此建立了瓦斯抽采、注气、注水的三过程耦合渗流力学方程组。

3) 多过程耦合渗流计算结果表明, 瓦斯抽采的第一渗流过程压降曲线为抛物线形态, 终态可用幂函数描述, 注气的第二渗流压降曲线开始时为先下降后上升的波谷曲线, 注气后期为负幂函数形态的下降曲线, 表明注气压力分布明显受到了前期残余瓦斯压力的影响。注水的第三过程渗流曲线为负指数下降形态, 由于注水压力远高于残余气体压力, 水压分布曲线受残余注气压力影响较小。

参考文献:

- [1] 王耀锋, 李艳增. 预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1326-1331.
- [2] 李全贵, 翟成, 林柏泉, 等. 低透气性煤层水力压裂增透技术应用 [J]. 煤炭工程, 2012, 44(1): 31-34.
- [3] 沈春明, 林柏泉, 吴海进. 高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2058-2063.
- [4] 于红. 高压水射流割缝提高穿层钻孔瓦斯抽放效果的试验 [J]. 煤炭工程, 2011, 43(9): 37-39.
- [5] 林柏泉, 吕有厂, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 959-963.
- [6] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究 [J]. 煤炭学报, 2008(12): 1386-1390.
- [7] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010(1): 55-58, 69.
- [8] 赵瑜, 李晓红, 卢义玉, 等. 瓦斯压力对非均质煤岩抗压强度尺寸效应的影响 [J]. 煤炭学报, 2009(8): 1081-1085.
- [9] YUAN B, KANG Y, HU Y, et al. Research on transient switching pressure behaviours and control of hydraulic cutting in coal seams [J]. Disaster Advances, 2013, 6(S1): 137-144.
- [10] 李志强, 王兆丰. 井下注气强化煤层气抽采效果的工程试验与数值模拟 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 72-77.
- [11] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 547-554.
- [12] 冯增朝, 赵东, 赵阳升. 块煤含水率对其吸附性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 28(S2): 3191-3295.
- [13] 姜永东, 阳兴洋, 鲜学福, 等. 应力场、温度场、声场作用下煤层气的渗流方程 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 434-438.

(责任编辑 杨蛟洋)