

煤巷掘进过程煤层瓦斯运移规律的数值模拟

贾真真,冯涛

(湖南科技大学 能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:研究煤巷掘进过程中瓦斯运移规律对瓦斯灾害防治具有重要的意义.本文构建了瓦斯流动的固气耦合模型,应用 RFPA_GASFLOW 软件对煤巷掘进过程瓦斯运移进行数值模拟.研究表明,煤巷掘进过程中,掘进巷道周围产生瓦斯渗流场,瓦斯压力梯度等值线呈轴对称分布并随着巷道的掘进向前移动;掘进工作面前方和掘进巷道两帮煤壁内的瓦斯压力的变化规律相同,瓦斯压力在渗流场内呈抛物线分布,瓦斯压力梯度在巷道附近最大,并逐渐增加至煤层初始瓦斯压力,采掘作业只对巷道周围一定范围内的瓦斯压力有影响;随着煤壁暴露时间的增加,巷道周围煤层中的瓦斯压力和瓦斯流量逐渐降低,最终趋于稳定.

关键词:煤巷掘进;RFPA_GASFLOW 软件;瓦斯压力;数值模拟

中图分类号:TD712.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)02-0017-05

Numerical simulation on gas migration law during tunnel excavation in thick coal seam

JIA Zhenzhen, FENG Tao

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
Hunan University of science and technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Mine Safety Mining, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The study of gas migration law during tunnel excavation in thick coal seam is of important significance for preventing gas disasters. A coupling model between coal and gas is constructed, and then gas migration law during tunnel excavation in thick coal seam is simulated by means of RFPA software. Results show that the gas seepage field appears around the roadway during tunnel excavation in thick coal seam, gas pressure gradient is axis symmetry and moves forward with the tunnel excavation; the change of gas pressure before working face and in roadway wall are the same, the gas pressure distribution is parabolic in the gas seepage field, the gas pressure gradient around the roadway is largest, and then it gradually increases to the initial gas pressure. With the increase of exposure time of roadway wall, gas pressure and gas flow in the coal seam around the roadway gradually decreases, and finally tends to be stable.

Key words: tunnel excavation in thick coal seam; rock failure process analysis system (RFPA); gas pressure; numerical simulation

瓦斯事故造成了重大的财产损失和人员伤亡,是威胁煤矿安全生产的主要事故之一,研究瓦斯运移规律对瓦斯灾害防治具有重要的意义.瓦斯在煤层中的运移过程非常复杂,其与煤层开采方式、瓦斯赋存条件和煤体结构密切相关.当煤层开采后,由于开采空间直接与地面大气相互连通,所以开采空间内的气体压力基本上等于地面大气压,而煤层内部的瓦斯压力通常较大,存在瓦斯压力梯度;所以煤层内的高压瓦斯就会从煤层内部向开采空间流动,于是就形成具有一定流动范围的瓦斯流动场.国内外许多学者对瓦斯

收稿日期:2014-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674047;51374003)

通信作者:冯涛(1957-),男,河北泊头人,教授,博士生导师,研究方向:岩层控制、煤矿安全及矿山环境保护. E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

流动进行了大量研究,取得了丰硕的成果.周世宁、林柏泉等提出了煤层瓦斯的流动理论^[1,2],王佑安等提出了瓦斯扩散理论^[3],孙培德、A. Saghafi 等在瓦斯渗透-扩散理论方面进行了大量的研究^[4,5],马海峰、梁冰等基于 Comsol Multiphysics 软件模拟了煤巷掘进过程中周围煤体瓦斯运移规律^[6,7],高建良等利用有限差分法对移动掘进工作面巷道周围瓦斯压力分布以及瓦斯涌出规律进行了数值模拟^[8].本文在前人研究的基础上,构建了瓦斯流动的固气耦合模型,运用 RFPA_GASFLOW 软件对煤巷掘进过程瓦斯运移情况进行数值模拟,再现巷道两帮煤壁及掘进工作面前方煤体内瓦斯流动过程.

1 煤层瓦斯流动的固气耦合模型

煤巷掘进过程中,瓦斯在煤层渗流场中的流动方程主要由 4 种方程组成^[9]:瓦斯渗流方程、煤岩体变形方程、透气系数-损伤方程和煤岩体流变特性方程.

1.1 瓦斯渗流方程

根据质量守恒和连续性方程,可得出瓦斯气体在煤岩体中流动的渗流方程为

$$\alpha_p \nabla^2 (\lambda_i P) = \frac{\partial P}{\partial t}; \quad \alpha_p = 4A^{-1} P^{\frac{3}{4}}.$$

式中, λ_i :煤层透气性系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; P :瓦斯压力 p 的平方, $P = p^2$, MPa^2 ; A :瓦斯含量系数, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$.

1.2 煤岩体的变形场方程

根据力的平衡方程和煤岩体的本构方程可得出其变形场方程为

$$(\kappa + G) u_{j,j} + G u_{i,jj} + f_i + (\alpha \sqrt{p})_i = 0.$$

式中: G, κ :剪切模量和拉梅常数; u :煤岩体的变形位移; f_i :煤岩体的体积力分量, MPa ; α :瓦斯的孔隙压力系数, $0 < \alpha < 1$; p :瓦斯压力, MPa .

1.3 煤岩体细观基元的透气系数-损伤方程

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & D = 0; \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & D > 0. \end{cases} \quad (\text{单轴压缩})$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & D = 0; \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & 0 < D < 1; \\ \xi' \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - p)} & D = 1. \end{cases} \quad (\text{单轴拉伸})$$

式中, D :损伤变量; λ_0 :无应力状态下的初始透气系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; β :应力对孔隙压力的影响系数; σ_3 :煤岩体的有效应力, MPa ; α :孔隙压力系数; p :孔隙压力, MPa .

1.4 煤岩体流变特性方程

$$\sigma = \sigma_\infty + (\sigma_0 - \sigma_\infty) e^{(-Bt)}.$$

式中, σ_0 :细观基元的瞬时抗压强度; σ_∞ :细观基元的长期强度; B :煤岩体的强度衰减系数,由试验确定,为一经验常数.

2 煤巷掘进时巷道周围瓦斯流动数值模型及边界条件

某矿 3 号煤层为主采煤层,平均厚度为 4.2 m,煤层倾角 $5^\circ \sim 8^\circ$,结构单一;巷道沿底板掘进,巷道断面为矩形,宽 4 m,高 2.4 m.根据前面建立的煤层瓦斯流动的固气耦合模型,运用 RFPA_GASFLOW 软件对该掘进煤巷两帮煤壁及掘进工作面前方煤层内瓦斯压力分布及运移规律进行模拟.根据该矿实际情况,现建立如图 1 所示的煤巷掘进时巷道周围瓦斯流动的力学及渗流模型.数值模型采用平面应变分析,模型中煤层尺寸为 40 m (y 方向) \times 60 m (x 方向),划分为 $200 \times 300 = 60\,000$ 个网格单元,模型周边固定,煤层瓦斯气体的初始压力为 1.2 MPa.在掘进过程中共分 8 步进行开挖,开挖宽度 4 m,每步开挖 5 m.设定模型的左边界是不透气岩层,即瓦斯在左边界的流量为 0,瓦斯从模型右边界自由流出,瓦斯在模型的上下边界处压力均为 1.2 MPa.对该煤样的物理力学参数及渗流参数进行测试,根据相关理论^[10]确定出数值模拟中所采用的参数值:煤层均值度取 2,弹性模量均值取 2 720 MPa,抗压强度均值取 50 MPa,泊松比取 0.34,内摩擦角取 30° ,压拉比取 11,透气性系数取 $0.002\,3 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,瓦斯含量系数取

$2.0 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{MPa}^{1/2})$, 孔隙压力系数取 0.5, 耦合系数取 0.2. 在模拟过程中, 认为煤层是非均匀的, 其细观基元体的物理力学参数服从 Weibull 数理统计分布. 图 1 中的灰度反映了煤体弹性模量的非均匀性, 灰度越亮表示这些基元体单元的弹性模量越高, 灰度越暗则表示这些基元体单元的弹性模量越低.

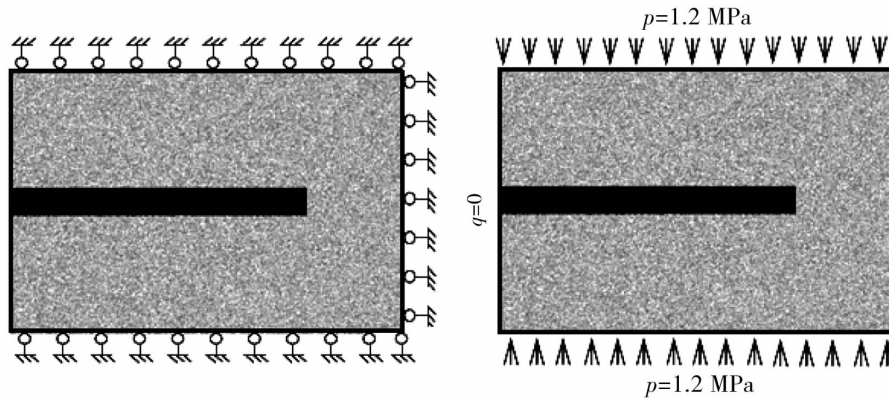


图 1 煤巷掘进时工作面周围瓦斯流动的力学及渗流模型

3 模拟结果及分析

3.1 煤层瓦斯压力梯度分析

图 2 为煤巷掘进过程中巷道周围瓦斯压力梯度图, 从图 2 中可以看出: (1) 随着巷道的掘进, 煤层被扰动, 在巷道周围形成瓦斯渗流场, 掘进长度越长, 瓦斯渗流场的影响范围越广, 瓦斯压力梯度等值线随着巷道掘进向前移动; (2) 掘进巷道周围煤体内的瓦斯压力等值线呈轴对称分布, 所以在研究巷道掘进过程中瓦斯压力沿巷帮方向的变化情况时, 可以只考虑巷道一侧煤壁瓦斯压力的变化情况; (3) 在瓦斯压力梯度的作用下, 掘进工作面前方煤体内的瓦斯流动近似于径向流动, 而掘进巷道两帮煤壁内的瓦斯流动则近似为垂直于巷道掘进方向的单向流动; (4) 距离巷道越近, 瓦斯压力等值线越密集, 这说明越靠近巷道其瓦斯压力梯度越大, 从而瓦斯运移速率亦越大^[2].

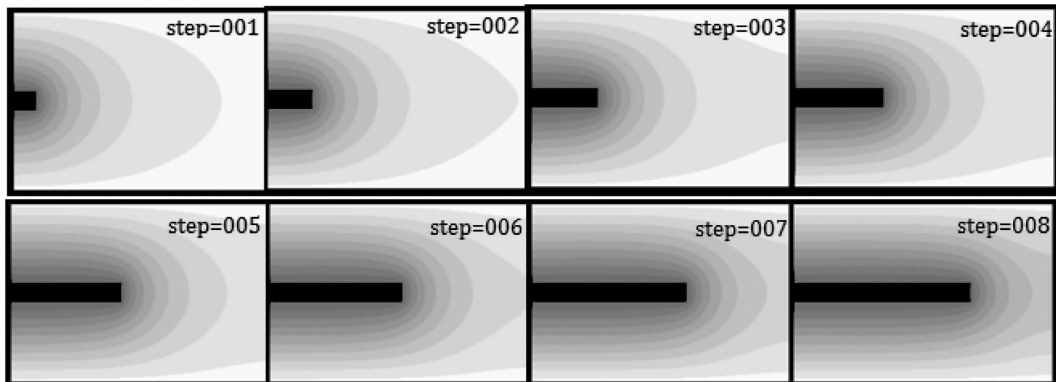


图 2 掘进过程中瓦斯压力梯度图

3.2 掘进长度对瓦斯压力的影响

3.2.1 掘进长度对掘进工作面前方煤层内瓦斯压力的影响

图 3 为巷道掘进不同长度时, 煤层中瓦斯流动转化为稳定流动时, 掘进工作面前方煤层瓦斯压力沿轴线方向变化情况, 从图 3 中可以看出: (1) 巷道掘进过程中, 工作面前方煤层的瓦斯压力沿巷道走向在渗流场中呈抛物线分布, 并逐渐增加直到煤层初始瓦斯压力. (2) 随着掘进长度的增加, 工作面前方煤层的瓦斯压力逐渐下降; 当巷道掘进长度超过 20 m 时, 工作面前方煤层内瓦斯压力的变化情况基本相同; 这说明掘进速度一定的情况下, 在每个掘进循环, 掘进工作面前方煤层内瓦斯压力分布的变化规律相同. (3) 无论掘进长度为多少, 在距离工作面前方煤壁 15 m 范围内, 瓦斯压力的变化较为剧烈; 与工作面前方煤壁距离超过 15 m 的煤层内瓦斯压力基本等于初始瓦斯压力.

3.2.2 掘进长度对巷道两帮煤壁内瓦斯压力的影响

从前面分析可知, 巷道两帮煤壁内瓦斯压力分布情况相同, 所以仅仅对沿巷道掘进方向距离开挖点

20 m 处的一侧巷道煤壁(以下简称为参考面)的瓦斯压力分布情况进行分析. 图 4 为不同掘进距离,煤层中瓦斯流动转化为稳定流动时,在参考面处瓦斯压力沿巷帮方向的变化曲线,从图 4 中可以看出:(1)当掘进长度还没有达到 20 m 时,掘进形成的瓦斯渗流场对参考面处煤层的瓦斯压力影响较小,参考面处的煤层基本处于初始瓦斯压力状态;当掘进长度达到 20 m 以后,参考面处的煤层暴露,煤层被扰动,形成瓦斯渗流场,巷帮处瓦斯压力等于标准大气压;当掘进长度超过 20 m 时,巷帮两帮煤壁内瓦斯压力的变化规律基本相同,这说明掘进速度一定的情况下,在每个掘进循环,掘进工作面前方煤层内瓦斯压力分布的变化规律相同.(2)巷道掘进过程中,巷道两帮煤壁内的瓦斯压力沿巷帮方向在渗流场中呈抛物线分布,并逐渐增加直到煤层初始瓦斯压力,瓦斯压力下降速率随着与巷帮距离的增大而降低.(3)当掘进距离超过 20 m 时,在距离工作面前方煤壁 15 m 范围内,瓦斯压力的变化较为剧烈;与工作面前方煤壁距离超过 15 m 的煤层内瓦斯压力基本等于初始瓦斯压力.

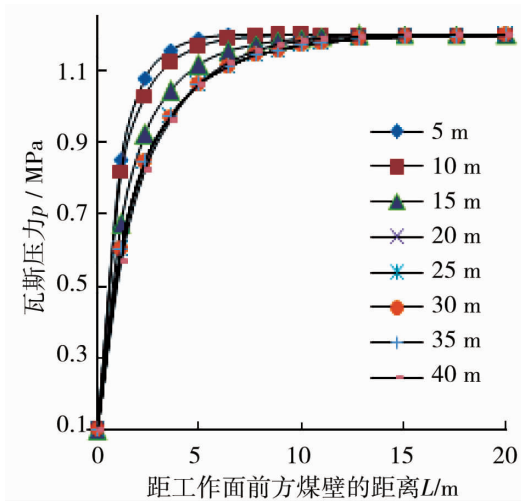


图 3 不同掘进长度,工作面前方沿轴线方向煤层瓦斯压力变化曲线图

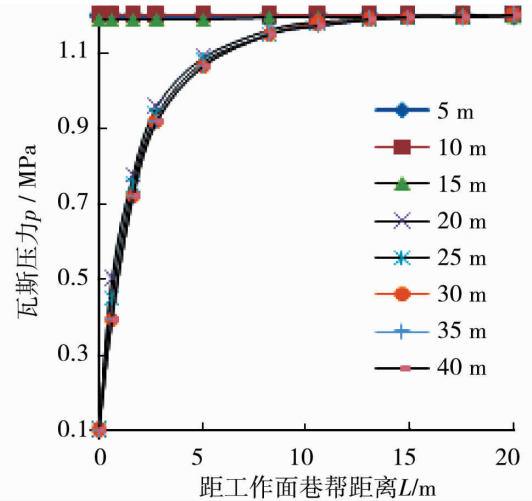


图 4 不同掘进长度,距开挖点 20 m 处巷道煤壁瓦斯压力沿巷帮方向分布图

3.3 煤壁暴露时间对瓦斯压力的影响

图 5 和图 6 为巷道掘进 30 m 时,掘进工作面前方和掘进巷道两帮煤壁内煤体瓦斯压力随煤壁暴露时间的变化规律. 从图 5 和图 6 中可以看出:瓦斯压力沿巷帮方向和沿巷道走向的变化规律相似,瓦斯压力在渗流场中呈抛物线分布,逐渐增加至初始瓦斯压力;在瓦斯流动的初始时刻,瓦斯压力梯度较大(抛物线曲率较大),随着煤壁暴露时间的增加,渗流场中的瓦斯压力梯度逐渐降低,瓦斯压力的变化减慢(同一位置处曲线的曲率变小).

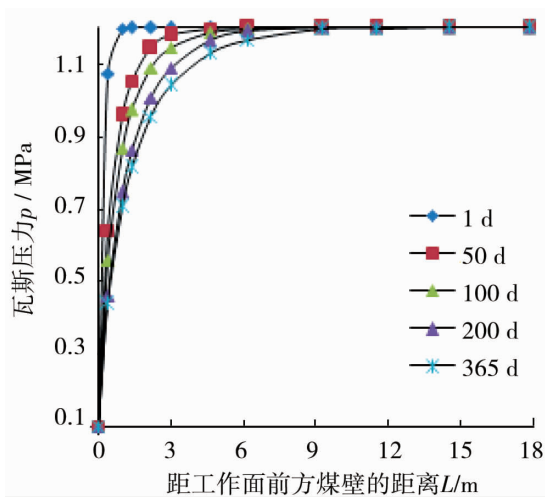


图 5 掘进 30 m 时,瓦斯压力沿工作面走向的变化

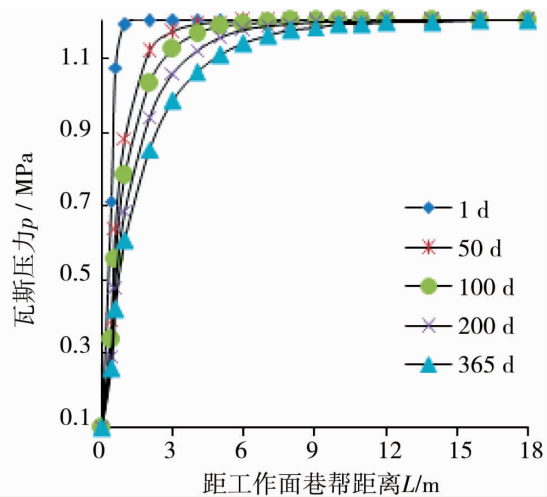


图 6 掘进 30 m 时,距开挖点 20 m 处巷道煤壁瓦斯压力沿巷帮方向分布图

3.4 煤壁流量分析

掘进活动扰动了煤层,在巷道周围形成瓦斯渗流场,煤层内的瓦斯在瓦斯压力梯度的作用下,从压力高的地方流向压力低的地方,即从煤层的初始瓦斯压力带向巷道煤壁流动.从前面的分析可知,掘进工作面前方和巷道两帮煤壁内瓦斯变化规律基本相同,因此在掘进方向20 m处选取一点(即33 099节点)并对其流量进行分析,从而研究掘进巷道周围瓦斯流量的变化规律.图7为煤壁不同暴露时间,瓦斯流量随掘进长度的变化;从图中可以看出:当巷道的掘进长度没有达到20 m时,33 099节点处的基元体单元未受到瓦斯渗流场的影响,瓦斯流量为0;当掘进长度达到20 m时,33 099节点处煤体受到扰动,瓦斯流量达到最大;当掘进长度超过20 m后,33 099节点处的瓦斯流量逐渐减小,最后趋于稳定.此外,还可以看出:随着煤壁暴露时间的增加,33 099节点处的瓦斯流量逐渐减小,最后逐渐趋于稳定;这说明随着煤壁暴露时间的延长,渗流场中瓦斯的流动由非稳定流动逐渐转变为稳定流动.

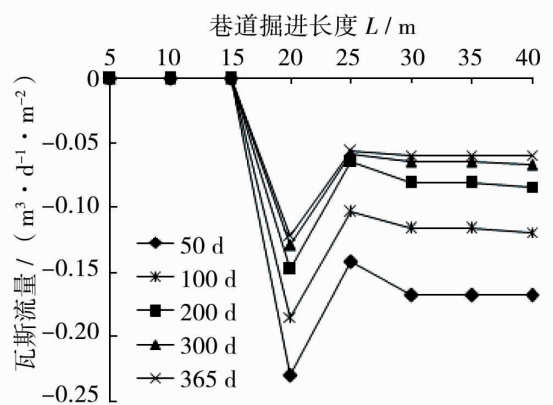


图7 不同暴露时间,掘进长度对瓦斯流量的影响

4 结论

1) 巷道的掘进扰动了原始煤层,使巷道周围形成瓦斯渗流场,渗流场内的瓦斯压力等值线呈轴对称分布,并随巷道掘进向前推进;在瓦斯压力梯度作用下,掘进巷道两帮煤壁内的瓦斯流动近似为垂直于巷道掘进方向的单向流动,掘进工作面前方煤体内的瓦斯流动近似于径向流动;距离巷道壁面越近,瓦斯压力梯度越大,瓦斯流动速度亦越大;当与巷道壁面的距离超过一定值时,煤层内的瓦斯压力逐渐趋于稳定.

2) 煤巷掘进过程中,掘进工作面前方煤层和掘进巷道两帮煤壁内的瓦斯压力的变化规律相同,瓦斯压力在渗流场中呈抛物线分布,并逐渐增加直到煤层初始瓦斯压力;这说明巷道掘进作业仅对巷道周围一定范围内煤体的瓦斯压力有影响,在本文实例中通过数值模拟计算得出采掘作业的影响范围不超过15 m.

3) 随着煤壁暴露时间的增加,巷道周围煤层中的瓦斯压力和瓦斯流量降低,直至趋于稳定.

4) 在巷道掘进过程中,煤壁暴露初期,巷道周围煤壁内瓦斯流量较大,随着时间的延长,煤体内瓦斯流量逐渐减小,最终趋于稳定.

参考文献:

- [1] 周世宁,孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报,1965,2(1):24-37.
- [2] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999:69-127.
- [3] 杨其銮,王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报,1986,11(3):87-94.
- [4] 孙培德. 煤层瓦斯流场流动规律的研究[J]. 煤炭学报,1987,12(4):74-82.
- [5] Saghafi A, Willams R J. 煤层瓦斯流动的计算机模拟及其在预测瓦斯涌出和抽放瓦斯中的应用[J]. 煤矿安全,1988,19(4):23-24.
- [6] 梁冰,刘蓟南,孙维吉,等. 掘进工作面瓦斯流动规律数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(4):46-51.
- [7] 马海峰,王磊,殷志强,等. 掘进煤巷瓦斯渗流模型及运移规律研究[J]. 中国煤炭,2013,39(8):93-96.
- [8] 高建良,候三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报,2007,32(11):1127-1131.
- [9] 徐涛,唐春安,杨天鸿. 含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理[M]. 北京:煤炭工业出版社,2009:54-59.
- [10] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003:81-92.