

# 煤体脉动注水与恒压注水致裂特征模拟

朱红青, 申健, 张民波, 冯世梁, 徐纪元

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

**摘要** 为解决煤体恒压注水在实际应用中致裂效果不理想问题, 基于 FLAC3D 在岩土力学中的应用, 模拟了在脉动注水与恒压注水条件下煤体的起裂过程, 分析了煤体脉动注水与恒压注水致裂特征。数值模拟结果表明, 经水力压裂后, 脉动注水模型中走向方向压裂半径 3.3m, 垂直方向压裂半径 2.2m; 恒压注水模型中走向方向压裂半径 0.65m, 垂直方向压裂半径 0.96m。煤体脉动注水比恒压注水需要更长时间起裂, 脉动注水模型最终压应力比恒压注水低, 从而得出脉动注水对煤岩体卸压作用明显优于恒压注水。

**关键词** 脉动注水; 恒压注水; 疲劳损伤; 裂纹起裂

**中图分类号** TD713+.3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.18.009

## Simulation of Coal Induce-crack Characteristics on the Conditions of Pulsatile and Constant Pressure Water Injections

ZHU Hongqing, SHEN Jian, ZHANG Minbo, FENG Shiliang, XU Jiyuan

School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract** To solve the problem that fracturing effect is not perfect in the practical applications of coal constant pressure water injection, based on the application of FLAC3D computer simulation to the rock and soil mechanics, the crack initiation process of the coal on the conditions of pulsatile and constant pressure water injections is simulated, the induce-crack characteristics of the coal on the conditions of pulsatile and constant pressure water injections are analyzed. The results of numerical simulation show that after hydraulic fracturing, the fracturing radius of the strike direction in the model of pulsatile water injection is 3.3m, the fracturing radius of the vertical direction is 2.2m; the fracturing radius of the strike direction in the model of constant pressure water injection is 0.65m, the fracturing radius of the vertical direction is 0.96m. The coal needed more time to crack initiation on the condition of pulsatile water injection than that of constant pressure water injection, the ultimate compressive stress for the model of the pulsatile water injection is lower than that for the model of the constant pressure water injection, a conclusion that the pulsatile water injection is significantly better than the constant pressure water injection in the pressure relief of the coal-rock is drawn.

**Keywords** pulsatile water injection; constant pressure water injection; fatigue damage; crack initiation

水力压裂已有 60 多年的历史, 美国在 1947 年进行第一次水力压裂以来<sup>[1]</sup>, 该技术从理论研究到现场实践都取得了快速的发展<sup>[2]</sup>。岩体是众多裂纹的复合体, 采用断裂力学和损伤力学理论结合模拟岩体断裂失稳的破坏过程是很必要的<sup>[3]</sup>。

目前矿井注水系统一般采用井下静压注水或高压水泵加压注水。静压注水对于透气性良好的煤层效果良好, 但不适用于透气性较差的煤层。采用高压水泵加压注水虽然拓宽了适用范围, 但水泵提供的压力是有限的, 对于透气性较差的煤层, 难以达到理想效果, 同时注水泵的压力越高, 设备的

运行、维护和管理要求也越高。

当前, 煤层注水研究从以经验指导为主转向对注水机理的研究, 提出了许多新的学术观点, 脉动注水也逐渐被应用于工程实践。由于煤层多孔介质的特殊性和复杂性, 尚难于直接提出对注水动态过程的描述方法<sup>[4]</sup>。为此, 相关人员结合注水现象与理论分析, 开发煤层注水数值模拟计算机软件, 以图形方式显示注水后煤岩体破碎情况。脉动注水尤其对解决低渗透性、高硬度难注水煤层的注水工作, 具有重要的实际意义。

收稿日期: 2013-03-08; 修回日期: 2013-03-25

作者简介: 朱红青, 男, 教授, 研究方向为矿井通风与安全, 矿山防灭火, 瓦斯治理, 安全工程, 防灾减灾工程等领域的科研技术开发和实际应用, 电子信箱: zhq@cumt.edu.cn

## 1 脉动注水破碎机理

煤层注水能有效改善煤体内部孔裂隙的张开性,同时有效改善煤层对水的渗透性,减少因开采而产生的浮游粉尘<sup>[5-7]</sup>。由于煤层的非均质性,各钻孔对水的渗透能力是不一致的,因此水总是沿着渗透能力强的钻孔进入煤层。在压力作用下水沿煤层中的裂隙和较大孔隙作紊流或层流运动,在这一过程中水在压力作用下,充满煤层所有内在裂隙、外在裂隙、再生裂隙和相互贯通的较大孔隙。煤层注水压裂效果的好坏,关键是煤层孔裂隙的大小和相互贯通的程度,而孔径大于水分子直径(0.26nm)的孔隙易于被水湿润<sup>[8]</sup>,这样的孔隙越密集,压裂效果越理想。

煤层脉动式注水通过钻孔向煤体注入压力水,利用脉动高压注水过程中水压力的波动性在煤体中形成的水击和水劈作用<sup>[9]</sup>,使煤体产生疲劳损伤积累,形成疲劳破坏,在煤层内部产生新的、相互关联的煤体裂隙网,而孔裂隙是压力水渗透流动的主要通道<sup>[10-12]</sup>,同时脉动注水通过产生振动波使煤层孔裂隙内的堵塞物疲劳损伤破坏,达到疏通孔裂隙通道的目的<sup>[13]</sup>。脉动式煤层注水过程是循序渐进的过程,而且其最大脉动水压限制在不导致煤层顶底板破坏的范围内。

## 2 数值模型建立

FLAC3D是在拉格朗日算法基础上开发的显式有限差分程序,能较好地模拟材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,分析渐变过程和失稳状态,特别适用于模拟大变形<sup>[14]</sup>。

平岗矿14#煤层,与地表垂深平均586m所建立模型主要研究在水力压裂作用下煤体变形和压裂情况,由于计算模型单元数有限,因此对计算模型单元不等划分,对压裂孔周围区域采用细分单元划分,外部区域单元格划分逐渐增大,建40m×180m×40m的水力压裂物理计算模型,模型中钻孔长度为138m,前后封孔各21m。模型由129600个单元体构成,共有131821个节点, $x$ 方向为工作面走向, $y$ 方向为倾向, $z$ 方向为竖直方向,如图1所示。

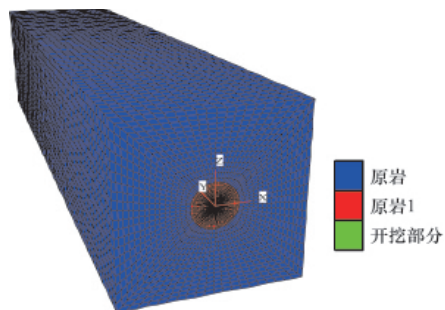


图1 数值计算模型

Fig. 1 Model for numerical calculation

生成初始地应力场,一般使用弹性法对地应力场进行初始化,即设置材料的本构模型为弹性模型,将体积模量与剪

切模量设置为最大值,然后运算。

使用快速应力边界法设置模型的边界条件,即在生成初始地应力场的过程中,不设置数值模型速度边界条件,而根据地应力场的分布情况在模型表面施加应力边界条件并保持恒定。在模型表面施加的应力边界可认为是模型最外层单元收到的应力,这一应力转化成节点力施加在模型最外层节点上。

计算模型的底面和侧面限制水平移动和垂直移动,模型的上部施加覆岩层的自重应力。数值模拟中煤的物理力学计算参数见表1。

表1 煤的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal

体积模量 $K$ / MPa	剪切模量 $G$ / MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	黏聚力 $C$ /MPa	抗拉强度 $T$ /kPa	密度 $D$ / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
119	36.8	20	1	35	1400

由于工作面采用边回采边压裂的方式,回采过程中煤壁走向方向和倾向方向上的水平应力释放最彻底,垂直方向上的应力基本没有释放,其计算式为

$$\sigma_z = 27h/1000 \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_z/1.2 \quad (2)$$

式中, $\sigma_z$ 为垂直方向上的应力,MPa; $h$ 为采深,m; $\sigma_x$ 为水平方向上的应力,MPa。

由于14#煤层平均采深为586m,可得垂直方向上的应力为15.84MPa,走向与倾向水平应力为13.2MPa,计算采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型。

## 3 数值模拟计算过程

模拟思路:在数值模型中选取钻孔周边合适的参考点,模型计算过程中记录各参考点 $x,y,z$ 方向的应力值,并输出应力曲线,分析对应点的单元状态,得出钻孔周边单元的应力应变情况,测得脉动注水和恒压注水压裂半径,最后对比分析脉动注水和恒压注水的压裂特征。

取模型 $y=90\text{m}$ 处的断面为研究对象,在钻孔周围选取参考点,其中在 $xz$ 坐标轴内点的坐标依次为 $A(2,2),B(0,2),C(0,1),D(1,0),E(2,0),G(-2,2),I(-2,0),J(-1,0),K(-2,-2),L(0,-2),M(0,-1),N(2,-2)$ ,如图2所示。模型中注水压力施加在圆形钻孔壁上,脉动注水过程中对钻孔内壁施加压力按正弦函数变化,幅值为30MPa;恒压注水过程中对钻孔内壁施加30MPa的恒定压力。用FLAC3D内嵌语言FISH程序实现脉动注水水压变化函数及渗流-应力关系方程,钻孔压应力施加状态如图3所示。

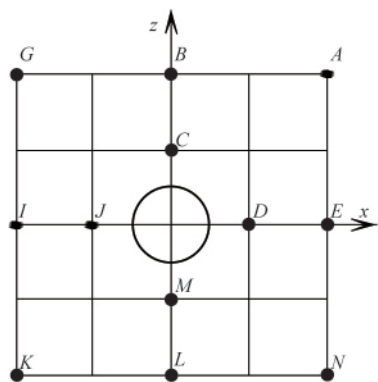


图 2 参考点布置

Fig. 2 Layout for reference points

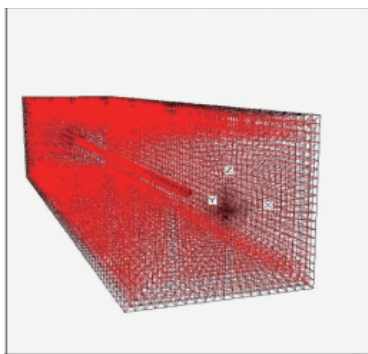


图 3 模型压应力施加状态

Fig. 3 Compressive stress status of model

#### 4 数值模拟结果分析

所建模型材质分布均匀,关于  $z$  轴对称的点  $A$  与  $G$ ,  $D$  与  $J$ ,  $E$  与  $I$ ,  $N$  与  $K$  有相同的应力曲线,因此仅需考虑第 1、4 象限和  $x, z$  坐标轴上的点,而第 1、4 象限关于  $x$  轴对称的点应力状态微小不同的因素为模型的自重作用,在模型中此作用可以忽略,即点  $C$  与  $M$ ,  $B$  与  $L$ ,  $A$  与  $N$ ,  $G$  与  $K$  具有相似的应力曲线,因此只对  $A, B, C, D, E$  5 个点进行分析。

模型地应力达到平衡后,对平衡后的模型分别进行脉动注水和恒压注水模拟,以确保脉动注水和恒压注水模型各点初始应力相同。分析各参考点的脉动注水与恒压注水应力变化曲线,如图 4~图 13,纵坐标为对应点的应力  $\sigma, 10^7 \text{Pa}$ ,向上方向为压应力值减小的方向,横坐标为时步,单位为  $10^5$  时步。

脉动注水过程中,  $A$  点运行 1830 时步后,水平方向压应力急剧下降,发生压裂破坏,完成 2500 时步后,始末态压应力下降 1.7MPa,最终压应力为 11.45MPa,如图 4 所示。在恒压注水过程中,运行 200 时步后,  $A$  点水平方向压应力急剧下降,发生压裂破坏,完成 2500 时步后达到平衡,始末态压应力下降 0.08MPa,最终压应力保持在 13.07MPa,如图 5 所示。

在脉动注水过程中,  $B$  点运行 1240 时步后,水平方向压应力急剧下降,发生压裂破坏,完成 2500 时步后,始末态压应力下降 2.6MPa,最终压应力为 10.61MPa,如图 6 所示。在恒

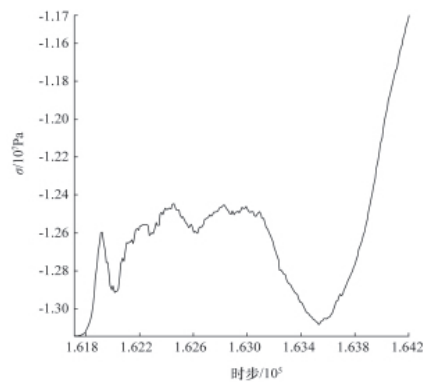


图 4 A 点脉动注水应力变化

Fig. 4 Stress change chart at point A on the conditions of pulsatile water injection

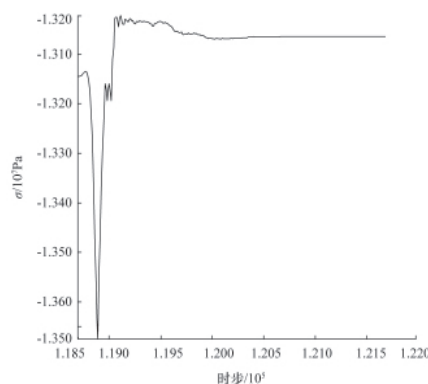


图 5 A 点恒压注水应力变化

Fig. 5 Stress change chart at point A on the conditions of constant pressure water injection

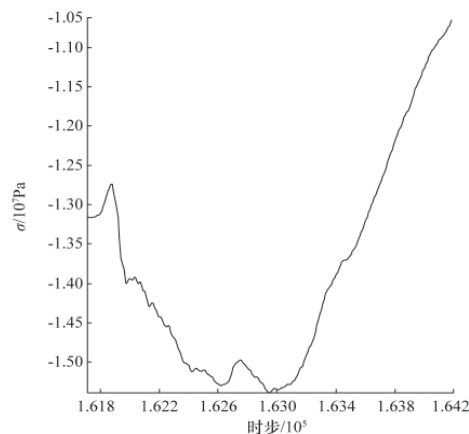


图 6 B 点脉动注水应力变化

Fig. 6 Stress change chart at point B on the conditions of pulsatile water injection

压注水过程中,运行 150 时步后,  $B$  点水平方向压应力急剧下降,发生压裂破坏,完成 2500 时步后达到平衡,始末态压应力下降 1.31MPa,最终压应力保持在 11.9MPa,如图 7 所示。

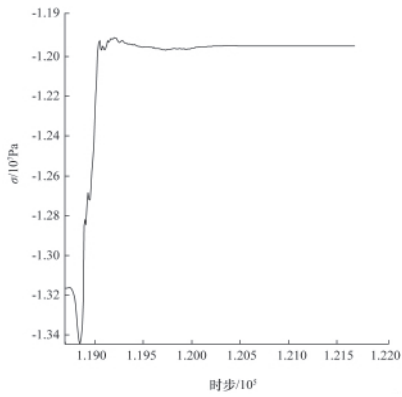


图 7 B 点恒压注水应力变化

Fig. 7 Stress change chart at point B on the conditions of constant pressure water injection

在脉动注水过程中, C 点运行 400 时步后, 水平方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后, 始末态压应力下降 7.47MPa, 最终压应力为 5.73MPa, 如图 8 所示。在恒压注水过程中, 运行 100 时步后, C 点水平方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后达到平衡, 始末态压应力下降 4.8MPa, 最终压应力保持在 8.4MPa, 如图 9 所示。

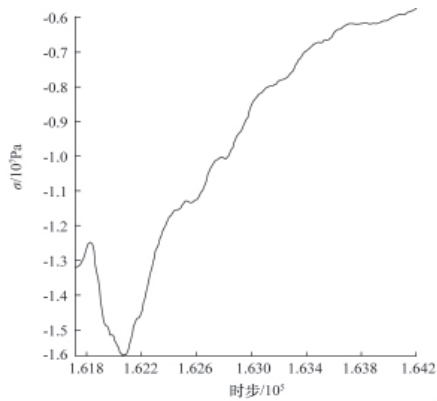


图 8 C 点脉动注水应力变化

Fig. 8 Stress change chart at point C on the conditions of pulsatile water injection

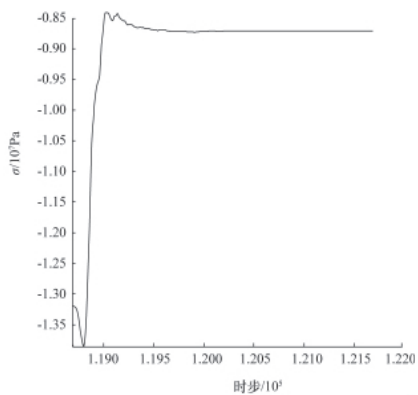


图 9 C 点恒压注水应力变化

Fig. 9 Stress change chart at point C on the conditions of constant pressure water injection

在脉动注水过程中, D 点运行 350 时步后, 垂直方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后, 始末态压应力下降 10.6MPa, 最终压应力为 5.3MPa, 如图 10 所示。在恒压注水过程中, 运行 100 时步后, D 点垂直方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后达到平衡, 始末态压应力下降 2.01MPa, 最终压应力保持在 13.89MPa, 如图 11 所示。

在脉动注水过程中, E 点运行 840 时步后, 垂直方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后, 始末态压应力下降 4.78MPa, 最终压应力为 11.02MPa, 如图 12 所示。在恒压注水过程中, 运行 140 时步后, E 点垂直方向压应力急剧下降, 发生压裂破坏, 完成 2500 时步后达到平衡, 始末态压应力下降 0.87MPa, 最终压应力保持在 14.93MPa, 如图 13 所示。

比较脉动注水与恒压注水压裂前后各参考点压降, 如表 2 可知, 各参考点脉动注水致裂煤体产生的压降都比恒压注水大。最终, 脉动注水压裂模型中破碎区域如图 14 所示。恒压注水压裂模型中破碎区域如图 15 所示。脉动注水的压裂区域明显比恒压注水压裂区域大。

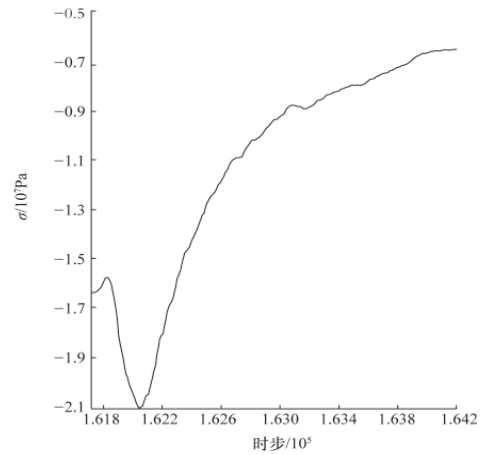


图 10 D 点脉动注水应力变化

Fig. 10 Stress change chart at point D on the conditions of pulsatile water injection

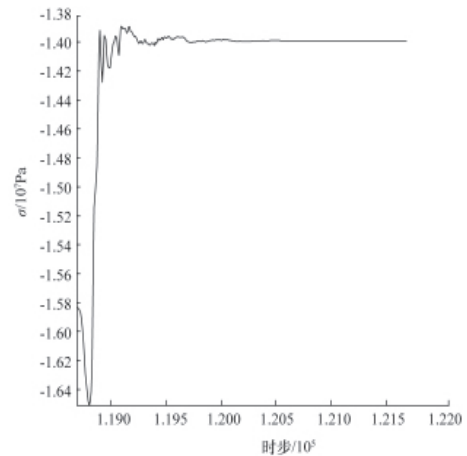


图 11 D 点恒压注水应力变化

Fig. 11 Stress change chart at point D on the conditions of constant pressure water injection

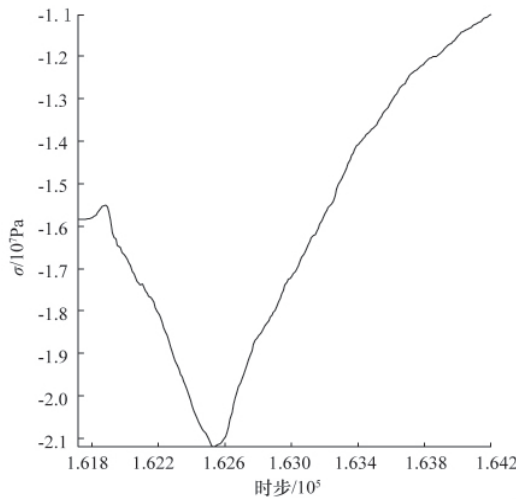


图 12 E 点脉动注水应力变化  
Fig. 12 Stress change chart at point E on the conditions of pulsatile water injection

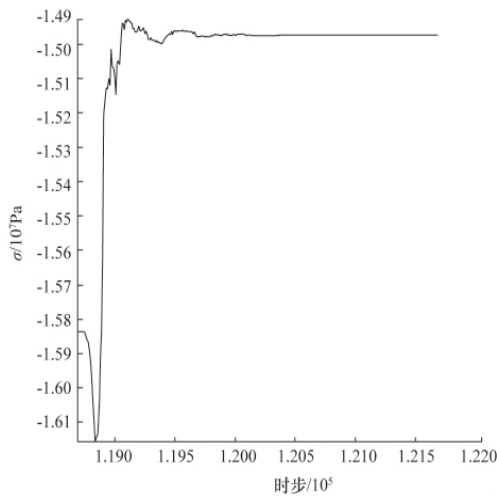


图 13 E 点恒压注水应力变化  
Fig. 13 Stress change chart at point E on the conditions of constant pressure water injection

表 2 参考点卸压压降

Table 2 Pressure drop of reference points

参考点	脉动注水压降/MPa	恒压注水压降/MPa
A	1.70	0.08
B	2.60	1.31
C	7.47	4.80
D	10.60	2.01
E	4.78	0.87

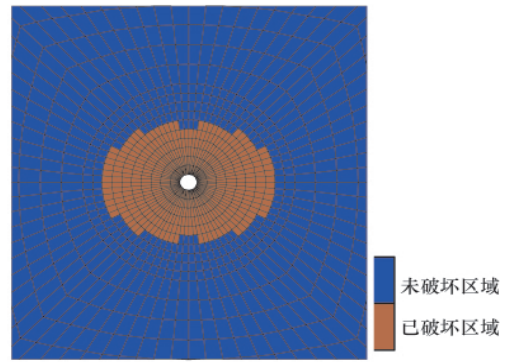


图 14 脉动注水最终压裂状态  
Fig. 14 Final fracturing state diagram of pulsatile water injection

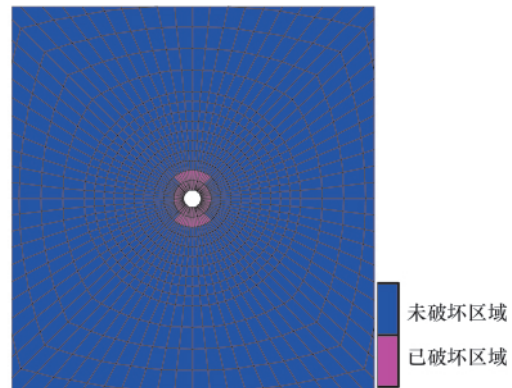


图 15 恒压注水最终压裂状态  
Fig. 15 Final fracturing state diagram of constant pressure water injection

## 5 结论

(1) 由最终压裂状态图可测得,脉动注水模型中走向方向压裂半径 3.3m,垂直方向压裂半径 2.2m;恒压注水模型中走向方向压裂半径 0.65m,垂直方向压裂半径 0.96m。

(2) 对各参考点脉动注水与恒压注水始末态应力值进行比较分析,可知煤体在两种注水方式下都趋于卸压,而脉动注水比恒压注水卸压效果更明显,最终压应力值更低。

(3) 恒压注水模型中,水压始终保持在 30MPa,压裂需要的时间极短,而脉动注水水压按正弦曲线变化,幅值为 30MPa,经脉动水压冲击后煤体产生疲劳损伤而破坏,在数值模型中,脉动注水比恒压注水需要更多时步才能压裂煤体。

## 参考文献 (References)

[1] 姜瑞中, 蒋延学, 汪永利. 水力压裂技术的近期发展及展望[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(4): 52-56.  
Jiang Ruizhong, Jiang Tingxue, Wang Yongli. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(4): 52-56.

- [2] 章毅, 杨胜强. 脉动水力压裂技术应用于煤层注水综述[J/OL]. [2010-01-29]中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201001-1281>.  
Zhang Yi, Yang Shengqiang. Sciencepaper Online, 2010, 5(11): 902-906.
- [3] 赵延林, 曹平, 汪亦显, 等. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1634-1643.  
Zhao Yanlin, Cao Ping, Wang Yixian, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1634-1643.
- [4] 黄新杰. 煤层注水湿润半径的数值模拟研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2007.  
Huang Xinjie. The research of coal seam infusion numerical simulation [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [5] 姚金林, 彭担任, 裴晓东. 综采工作面注水防尘研究[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(4): 10-13.  
Yao Jinlin, Peng Danren, Pei Xiaodong. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2004, 19(4): 10-13.
- [6] 张峰, 张和生, 肖谨. 综放工作面煤层注水及效果分析 [J]. 煤矿安全, 2006(4): 23-25.  
Zhang Feng, Zhang Hesheng, Xiao Jin. Safety in Coal Mines, 2006(4): 23-25.
- [7] 刘新河, 刘波. 煤层注水降尘效果探讨 [J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(5): 81-82.  
Liu Xinhe, Liu Bo. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(5): 81-82.
- [8] 赵振保. 变频脉冲式煤层注水技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 486-489.  
Zhao Zhenbao. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 486-489.
- [9] 孟昭君, 颜世华, 赵正均. 2BZ-40/12 型脉冲式煤层注水泵的应用[J]. 煤矿安全, 2006(9): 37-39.  
Meng Zhaojun, Yan Shihua, Zhao Zhenjun. Safety in Coal Mines, 2006(9): 37-39.
- [10] 孙超, 宋维源. 煤层注水水气驱替的理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(12): 93-95.  
Sun Chao, Song Weiyuan. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(12): 93-95.
- [11] 宋维源, 章梦涛, 潘一山, 等. 煤层注水中的水渗流规律研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(2): 86-88.  
Song Weiyuan, Zang Mengtao, Pan Yishan, et al. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(2): 86-88.
- [12] 宋维源, 李大广, 章梦涛, 等. 煤层注水的水气驱替理论研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 147-150.  
Song Weiyuan, Li Daguang, Zhang Mengtao, et al. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 147-150.
- [13] 张南翔, 赵洋, 孙新艳. 脉动注水在油田应用的可行性论述 [J]. 国外油田工程, 2005, 21(11): 44-45.  
Zhang Nanxiang, Zhao Yang, Sun Xinyan. Foreign Oilfield Engineering, 2005, 21(11): 44-45.
- [14] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
Peng Wenbin. FLAC3D practical course [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

(责任编辑 赵业玲)

## ·学术动态·



## 国家最高科学技术奖

国家最高科学技术奖创立于2000年,由国家科学技术奖励委员会主办,奖金为500万元人民币。国家最高科学技术奖授予在当代科学技术前沿取得重大突破或者在科学技术发展中有卓越建树、在科学技术创新、科学技术成果转化和高技术产业化中创造巨大经济效益或者社会效益的科学技术工作者,每年授予人数不超过2名。

年度	获奖者(学科领域)	
2000	吴文俊(数学)	袁隆平(杂交水稻)
2001	王选(汉字激光照排系统)	黄昆(物理学)
2002	金怡濂(高性能计算机)	—
2003	刘东生(地球环境科学)	王永志(航天技术)
2004	—	—
2005	叶笃正(气象科学)	吴孟超(肝脏外科)
2006	李振声(遗传学)	—
2007	闵恩泽(石油化工催化剂)	吴征镒(植物学)
2008	王忠诚(神经外科)	徐光宪(化学)
2009	谷超豪(数学)	孙家栋(运载火箭与卫星技术)
2010	师昌绪(金属学及材料科学)	王振义(内科血液学)
2011	谢家麟(加速器物理学)	吴良镛(建筑与城市规划)
2012	郑哲敏(力学、爆炸力学)	王小谟(雷达工程)