Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 11

Article 25

1-4-2019

Numerical Simulation of Borehole Stability in Underbalanced Drilling Coal Seam

Yumei Li

1.Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China; ;

Su Zhong

1.Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China; ;

Zhang Tao

1.Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China; ;

Delong Zhang

3. PetroChina Xinjiang Petroleum Engineering Construction Co., Ltd. Karamay 834000, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Borehole Stability in Underbalanced Drilling Coal Seam

Abstract

Abstract: According to the formation parameters of No.3 coal seam in the Qinshui Basin, Shanxi Province, considering the interaction between seepage and deformation in the borehole wall of coal seam, using the finite element method for establishing the stable elastoplastic numerical model of the borehole in coal seam, *the variation of pore pressure near the wellbore wall with the seepage time and the effect of time delay on wellbore stability under underbalanced drilling condition* were studied. *The variation law of maximum displacement and maximum plastic deformation around borehole wall with bottom pressure* were analyzed. The simulation results show that there is indeed a time delay effect on wellbore stability and the plastic analysis of coal and rock under consideration of seepage and deformation coupling conditions is more reasonable and effective, and it provides sufficient time conditions for guiding drilling construction.

Keywords

coalbed methane, borehole wall stability, wall seepage, pore pressure, time delay

Authors

Yumei Li, Su Zhong, Zhang Tao, Delong Zhang, Liwei Yu, and Si Na

Recommended Citation

Li Yumei, Su Zhong, Zhang Tao, Zhang Delong, Yu Liwei, Si Na. Numerical Simulation of Borehole Stability in Underbalanced Drilling Coal Seam[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4249-4255.

第 30 卷第 11 期	系统仿真学报©	Vol. 30 No. 11
2018年11月	Journal of System Simulation	Nov., 2018

欠平衡钻井煤层井壁稳定有限元数值计算研究

李玉梅¹,苏中¹,张涛¹,张德龙²,于丽维³,思娜⁴ (1.北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室,北京 100101; 2.北京探矿工程研究所,北京 100083; 3.中国石油新疆石油工程建设有限责任公司,克拉玛依 834003; 4.中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:根据山西沁水盆地 3#煤层地层条件参数,考虑煤层井壁渗流与变形耦合作用,利用数值模拟方 法建立煤岩井壁稳定弹-塑性数值模型,研究欠平衡钻井条件下近井壁孔隙压力随渗流时间的变化和时 间延迟效应对井壁稳定的影响规律。对煤层井壁最大位移量、井周塑性最大变形量随井底压力的变化 规律进行了研究分析。仿真结果表明,井壁稳定性确实存在时间延迟效应,并且在考虑渗流与变形耦 合条件下对于煤岩的塑性研究分析更为合理和有效,并为指导钻井施工提供充裕时间条件。 关键词:煤层气;井壁稳定;井壁渗流;孔隙压力;时间延迟

中图分类号: TE31 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 11-4249-07 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811025

Numerical Simulation of Borehole Stability in Underbalanced Drilling Coal Seam

Li Yumei¹, Su Zhong¹, Zhang Tao¹, Zhang Delong³, Yu Liwei³, Si Na⁴

(1.Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science & Technology, Beijing 100101, China;
 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;
 3. PetroChina Xinjiang Petroleum Engineering Construction Co., Ltd. Karamay 834000, China;
 4. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: According to the formation parameters of No.3 coal seam in the Qinshui Basin, Shanxi Province, considering the interaction between seepage and deformation in the borehole wall of coal seam, using the finite element method for establishing the stable elastoplastic numerical model of the borehole in coal seam, *the variation of pore pressure near the wellbore wall with the seepage time and the effect of time delay on wellbore stability under underbalanced drilling condition* were studied. *The variation law of maximum displacement and maximum plastic deformation around borehole wall with bottom pressure* were analyzed. The simulation results show that there is indeed a time delay effect on wellbore stability and the plastic analysis of coal and rock under consideration of seepage and deformation coupling conditions is more reasonable and effective, and it provides sufficient time conditions for guiding drilling construction.

Keywords: coalbed methane; borehole wall stability; wall seepage; pore pressure; time delay

引言

煤层气,是与煤伴生、共生的矿产资源并以吸 附、游离和溶解三态赋存在煤层中的非常规天然



收稿日期:2018-06-21 修回日期:2018-08-29; 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51374223), 北京信息科技大学师资补充与支持计划(5029011102), 北京信息科技大学科研水平提高重点研究培育项目 (5221835901); 作者简介:李玉梅(1981-),女,山东郓城,博士,助 理研究员,研究方向为复杂工况数值模拟计算方法。 气^[1-2]。在国际能源局势趋紧的情况下,作为一种 优质高效清洁能源和化工原料,煤层气的大规模开 发利用前景诱人。在煤层气钻井和开发过程中,由 于煤岩本身机械强度低,裂缝和原生损伤发育并且 存在大量天然破碎带等特点,当近井壁岩石所受 外载荷所引起的应力超过了其强度而诱发井壁周 围微裂纹张开并逐步扩展至远井地带,就会发生煤 层坍塌和破裂等现象^[3-4]。另外,不可忽略的一点

第 30 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 11
2018年11月	Journal of System Simulation	Nov., 2018

是煤层属多裂隙渗透性地层,在钻井过程中钻井液 渗透到井周煤岩缝隙并产生渗透压力,随着时间的 变化井壁周围的孔隙压力发生变化,影响地层坍塌 压力和破裂压力造成井壁失稳^[5]。

根据大量的现场实例和实验研究,发现钻井过 程中原本稳定的井眼一段时间后发生井壁垮塌事 故,这种井壁稳定的延迟效应其实质就是不稳定 流,即孔隙压力的变化生成的流固耦合产物^[6]。对 于煤层气井壁稳定渗流场的研究尤为重要,如渗透 率,孔隙度和孔压等的影响^[7]。由于数值模拟方法 可以不受环境因素影响,具有可重复性、参数易调 节等多个优点,作为岩石力学理论分析结果的验金 石在井壁稳定中也占有重要的地位。笔者针对煤层 气水平井欠平衡钻井过程中不稳定流问题,结合山 西沁水盆地煤层气钻井工程实例,利用 ABAQUS 数值模拟软件建立井轴坐标系下的三维有限元模 型,对井壁稳定问题展开了煤层孔隙压力变化以及 井周弹性与塑性变形分析。研究结果可在钻前为煤 层井壁稳定预测工程设计有直接的指导作用,从而 为降低井壁失稳风险提供了保证。

1 流固耦合数值计算理论模型

1.1 地层孔隙压力对煤层井壁稳定的影响

在上覆岩层的压力下,地层中孔隙水的存在会 形成孔隙压力,又称地层压力。孔隙压力对岩体的 影响可分为完整岩块和非连续面两类^[8]。对于含有 大量天然裂缝(割理)的煤岩,孔隙分为基岩孔隙和 裂缝孔隙,其中可将煤层裂隙和微裂隙看做裂缝孔 隙^[9-10]。对于煤岩这种存在复杂孔隙结构的岩体结 构,在煤层气井的钻井过程中,孔隙压力的变化将 对井壁稳定性预测具有重要的研究意义。

井壁处孔隙压力是影响井壁稳定性的重要因素,而孔隙压力的变化又与井壁的渗透性密切相关,若井壁无渗透性时孔隙压力并不受井筒压力的影响^[11-12]。欠平衡钻井(井底压力小于地层孔隙压力)过程中,远井处地层流体向近井筒地层流动, 而靠近井筒的地层流体通过岩石介质孔隙沿井筒 内径向井筒内发生渗流。随着时间的推移,地层较远处一点的孔隙压力会逐渐接近于井筒内的压力。 在煤层中钻井发现,原本稳定的井眼,经过一段时间后,常会发生井壁垮塌事故,这就是钻井液渗流时间延迟产生的效应。

1.2 流固耦合问题的基本理论

太沙基固结理论认为固结过程中土体的总应 力分布不变,忽略了应力加载的过程,这种假定对 三维模型有所局限。Biot 从较严格的固结机理出 发,给出了"真三维固结理论"^[13]可真实的反映 孔隙压力变化与岩体变形关系。假设岩石宏观各向 同性、线弹性、变形小、渗流各向同性且满足达西 定律,则以位移和孔隙压力表示的Biot 固结方程为:

$$\begin{cases} -G\nabla^{2}u^{s} - \frac{G}{1 - 2\nu}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u^{s}}{\partial x} + \frac{\partial v^{s}}{\partial y} + \frac{\partial w^{s}}{\partial z}\right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0\\ -G\nabla^{2}v^{s} - \frac{G}{1 - 2\nu}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u^{s}}{\partial x} + \frac{\partial v^{s}}{\partial y} + \frac{\partial w^{s}}{\partial z}\right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0\\ -G\nabla^{2}w^{s} - \frac{G}{1 - 2\nu}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u^{s}}{\partial x} + \frac{\partial v^{s}}{\partial y} + \frac{\partial w^{s}}{\partial z}\right) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0\\ -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u^{s}}{\partial x} + \frac{\partial v^{s}}{\partial y} + \frac{\partial w^{s}}{\partial z}\right) + \frac{K}{\gamma_{w}}\nabla^{2}u = 0 \end{cases}$$

式(1)中前 3 个方程式为固结微分方程,第 4 个方程式为流体的连续性方程。G 为剪切模量; v 为固体颗粒的泊松比; u 为孔隙流体应力; y_w 为流体的容重; k 为固体颗粒的渗透系数; u^s , v^s , w^s 分别为x、y、z 方向的位移; ∇^2 为拉普拉斯算子,表示为:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
(2)

式(1)的微分方程组中包含 u^s, v^s, w^s和 u 四个 未知量,他们都是坐标 x、y、z 和时间的函数。在 一定的初始条件和边界条下,可解出这 4 个变量。

2 有限元数值计算模型

2.1 数值计算基本假设

井壁稳定性的力学机理研究关键在于分析井 眼的受力状态和应力分布情况,针对煤层井壁周围 复杂的受力状态,建立合理的力学分析模型假设如 下:①煤层井眼周围岩石初始化采用孔隙弹性方 法,岩石骨架变形和破坏由有效应力控制;②当煤 岩达到弹性极限后,符合"弹-塑性"破坏特征, 认为地层发生破坏,强度准则采用 Mohr-Coulomb 准则;③假设钻井液滤液的渗流符合线性达西定 律,不考虑井壁温度变化和钻井液与地层水化作用 的影响。

2.2 煤岩力学参数测定

煤岩基本力学参数的选择常常是数值模型中 最困难的问题,根据山西沁水盆地 3#煤层煤样室 内试验结果和声波测井资料的解释,可确定煤岩部 分基础力学参数。如图 1 所示,沁水盆地 3#煤层 岩心物理性质据肉眼鉴定存在一定差异,由于煤岩 自身较强的脆性,有部分岩心在实验室过程中发生 碎裂。从表 1 数据看,煤岩的黏聚力较低,接近于 致密砂岩。从泊松比数据分析,大部分煤岩泊松比 接近 0.4 左右,也反映出地层岩石强度较低,压实 作用较弱。

2.3 有限元数值模型的建立

地层模型为 5 m×2 m×5 m 的长方体,对应的 坐标轴 z 为垂向。以地层模型 xz 平面的中心点为 起钻点,沿着最大水平主应力方位(y 坐标轴)钻水 平井眼,井径为 Φ152.4 mm,如图 2 所示。为了实 现直接流固耦合分析,计算模型采用位移和孔压耦 合的六面体单元 C3D8P。为提高计算速度和精度, 将几何模型分区进行网格划分,对井筒进行网格细 划,地层区域网格可粗划。

地下工程实际上是半无限域问题,但数值模拟 只能在有限的范围内进行。因此,模型的设计必须 考虑其边界效应,合理的边界条件对获得可靠的计 算结果具有重要意义。本模型的边界条件设置为初 始地应力和初始边界孔隙压力。最大水平主应力为 12 MPa,最小水平主应力为10 MPa,垂直地应力 为14 MPa,地层初始孔隙压力为5 MPa。数值计 算所需的各项力学参数均来自山西沁水盆地 3#煤 层岩心实验数据。渗透率为0.1~0.3 md,孔隙度为 3%,饱和度1。煤岩力学参数为:弹性模量为4.12 GPa, 泊松比为0.39,抗张强度为2.0 MPa,内聚 力 6.23 MPa,内摩擦角为31.59°,密度为1 440 g/cm³。采用 Mohr-Coulomb 准则来判断井壁煤岩是 否破坏,通过该失效准则判断井壁应力状态对井壁 周围的耦合场的稳定性。



图 1 沁水盆地 3#煤岩测试岩心 Fig. 1 No.3 coal and rock core in Qinshui basin

1 ab. 1 No. 3 coal and rock mechanics parameters of cores in Snanxi Qinshui basin										
岩芯编号	直径/mm	长度/mm	围压/MP	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/Deg		
2-V-1	37.6	80.8	0	11.0	3.04	0.37				
2-V-2	37.7	82.6	3	25.5	5.05	0.39				
2-V-3	38.1	88.3	6	37.2	4.41	0.38				
2-V-4	37.9	73.5	9	49.9	5.04	0.43	6.23	31.59		
2-V-5	38.1	87.9	12	75.6	5.36	0.40				
2-V-6	38	73.7	15	88.6	5.21	0.39				
2-V-7	37.9	58.4	0	24.5	4.56	0.38				
	III X L				N.4.1	- III X I.I II				

注: 围压 "0" 做单轴, 测量弹性模量、泊松比, 同时检测声发射。其他试件根据单轴强度设计围压, 测三轴。

http://www.china-simulation.com



系统仿真学报

Journal of System Simulation

第 30 卷第 11 期 2018 年 11 月



Fig. 2 Numerical calculation model

煤岩井壁稳定流固耦合数值计算过程和研究 方法为:1)在 Geostatic 分析步将地应力的 6 个分 量(地层三向地应力)和孔隙压力施加在岩石上,以 模拟地层岩石的实际受力状态,见图 3(a);2)采用 生死单元法将井筒单元杀死,模拟钻井过程,见图 3(b);3)井筒形成后,注入钻井液并在井壁边界施 加流体孔隙压力和流体压力面载荷(井底压力)支 撑井壁稳定,见图 3(c)。



(b) 井筒挖除后



Vol. 30 No. 11

Nov., 2018

(c) 注入钻井液



Fig. 3 Wellbore stability fluid-structure coupling computation and analysis process

3 结果讨论

3.1 井壁稳定的时间延迟效应

对于欠平衡钻井煤层井眼,井底压力小于地层 压力,所以钻井过程中地层流体向井眼渗流。计算 结果如图 4 中的(a)~(f),渗漏时间为 100 s、500 s、 1 000 s、10 000 s、50 000 s、100 000 s 时近井壁孔 隙压力的变化云图,图中显示蓝色和绿色区域是压 降变化区域。计算发现:随着时间的增加,压降范 围逐渐远离井壁向外扩展,压降漏斗半径逐渐增 加。以孔隙压力刚下降时边界范围对应的半径为前 沿半径,前沿半径和时间 *t* 的关系如图 5 所示,可 知前沿半径随着时间的增加,增长速率逐渐减慢。 当*t*=100 000 s 的时候,压降漏斗的前沿半径已扩 展到距井壁约 2.5 m 的范围,根据数值计算的结果, 拟合出时间和前沿半径的关系为:

 F_r =-3.85×10⁻¹⁰ t^2 +6.358×10⁻⁵t-0.015 5 (3) 式中: F_r 为前沿半径, m; t为时间, s。

3.2 井壁岩石塑性应力状态

钻井过程中影响井壁稳定的两个主要因素是 井眼缩径和井壁坍塌。对井壁围岩的应力状态的研 究大都是基于弹性力学理论,但实际上岩石大部分 表现出一定程度的塑性破坏。井壁周围煤岩在较低 的井底液柱压力作用下,在破坏前会经过一段弹塑 性变形,而非直接破坏。井眼周围煤岩塑性应力状 态没有解析解,需要进行数值求解。图6给出了某 第 30 卷第 11 期 2018 年 11 月

据分析井壁稳定性。

围岩进入了弹塑性应力状态。井周塑性区存在一个

临界状态,一旦超过这个临界状态将导致井周煤岩

大范围的松动而坍塌,因此,应以井周塑性区为依

一井底压力下井周煤岩塑性区,该区域位于应力集 中程度最高的低地应力方位。图7给出了井眼柱状 坐标系下,井周径向应力和周向应力的计算结果。 由计算结果可知,在一定的井底压力作用下,井周



Fig. 4 Pore pressure contours near borehole wall

http://www.china-simulation.com

 第 30 卷第 11 期
 系统仿真学报
 Vol. 30 No. 11

 2018 年 11 月
 Journal of System Simulation
 Nov., 2018



图 5 孔隙压力下降区域的前沿半径和时间关系 Fig. 5 Relationship between frontier radius and time of pore pressure drop area









计算结果表明,井底压力作用下,井周煤岩可 以产生较大的位移,从而造成起下钻阻卡。如图 8 所示,井底液柱压力对井壁周围煤岩最大位移的影 响。图9给出了井周塑性区面积随井底液柱压力的 变化规律,计算结果表明,随着井底压力的降低, 塑性区的扩大同样可以分成缓慢扩大和快速扩大 两个阶段,同样对应一个临界压力,但是,该压力 高于井壁最大位移变化的临界压力。



图 8 井壁最大位移量随井底压力的变化规律 Fig. 8 Wall maximum displacement variation with bottom hole pressure



pressure

通过上述分析可知:对于煤层井眼,随着井底 压力的降低,井壁最大位移和井周塑性区面积都经 历缓慢增加和快速增大两个阶段,这表明井周塑性 区存在一个临界状态,一旦超过这个临界状态将导 致井周煤岩大范围的松动,进而坍塌。根据计算结 果井壁最大位移对应的临界压力由于低于井周塑 性区对应的临界井底压力,因此,应以井周塑性区 为依据分析井壁稳定性。根据计算分析结果井周煤 岩临界状态的塑性区面积为井眼面积的1.5倍,与



一般的砂泥岩地层可以承受的 1.6~1.8 倍井周塑性 区相比要小一些。

4 结论

(1) 验证了有限元法中单元生死功能模块和 流固耦合计算方法相结合的有效性和准确性,其计 算结果能够满足井壁稳定预测分析的工程需要。

(2) 近井壁的孔隙压力会受到井底压力和渗 流时间的干扰发生变化,由井壁渗流效应引起的孔 隙压力变化导致了井壁稳定性存在时间延迟效应。 可通过调整井底压力来预测井眼时间延迟效应对 井壁失稳的影响,从而指导现场施工。

(3) 井壁最大塑性变形经历缓慢增加和快速 增大两个阶段,这表明井周塑性区存在一个临界状态,应以井周塑性区为依据分析井壁稳定性。不同 煤层渗透率对近井壁塑性最大位移量有影响。

参考文献:

 董银涛,张遂安,梁涛,等.基于干扰试井的煤层气储 层优势渗流方向研究[J].煤田地质与勘探,2017,45(4): 70-75.

Dong Y T, Zhang S A, Liang T, et al. Predominant percolation direction of coalbed methane reservoirs based on interference well test[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 70-75.

- [2] 王乔, 吴财芳, 李腾. 煤层气井间干扰主控因素数值 模拟[J]. 煤矿安全, 2014, 45(6): 1-4.
 Wang Q, Wu C F, Li T. Numerical Simulation of Main Control Factors for CBM Inter-well Interference [J]. Coal Mine Safety, 2014, 45(6): 1-4.
- [3] 陈科贵,夏亚良. 斜井井壁稳定的测井预测方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(6): 172-174.
 Chen K G, Xia Y L. Logging prediction method for wellbore stability of deviated wells[J]. Petroleum Geology and Development, 2011, 30(6): 172-174.
- [4] 李涛, 董平川, 曹丽丽.双区复合煤层气压力动态特 征分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(5): 79-82.
 Li T, Dong P C, Cao L L. Two-zone composite coalbed methane pressure dynamics analysis[J]. Petroleum Geology and Development, 2012, 31(5): 79-82.
- [5] 张涛, 王龙军. 沁端区块煤层气渗流过程中压力变化 规律[J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(4): 31-35.
 Zhang T, Wang L J. The law of pressure variation during

the seepage of coalbed methane in the Qin Duan block[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2016, 39(4): 31-35.

[6] 杨刚,李普光,谢飞,等.基于灰色关联法的煤层气井
 完井方式评价[J].大庆石油地质与开发,2013,32(4):
 164-167.

Yang G, Li P G, Xie F, et al. Evaluation of Completion Pattern of CBM Well Based on Grey Correlation Method[J]. Petroleum Geology and Development, 2013, 32(4): 164-167.

[7] 张丹丹, 冯雨实, 李永臣, 等. 基于有限元软件的煤层
 气水平井井壁稳定数值模拟[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3):
 144-147.

Zhang D D, Feng Y S, Li Y C, et al. Numerical Simulation of Shaft Stability in Horizontal Wells Based on Finite Element Software[J]. Coal Mine Safety, 2018, 49(3): 144-147.

- [8] 彭瑞东,张玉军,杨永明,等. 孔隙煤岩损伤破坏行为 的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1039-1048.
 Peng R D, Zhang Y J, Yang Y M, et al. Numerical simulation of damage and failure behavior of pore coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1039-1048.
- [9] Lanru Jing, Yue Ma, Zulie Fang. Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences (S1365-1609), 2001, 38(1): 343-355.
- [10] Mark W McClure, Mohsen Babazadeh, Shiozawa Sogo, et al. Fully coupled hydro-mechanical simulation of hydraulic fracturing in three-dimensional discrete fracture networks [J]. SPE Journal (S1086-055X), 2015, 21(4): 1-11.
- [11] 屈平,申瑞臣. 煤层气钻井井壁稳定机理及钻井液密 度窗口的确定[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 64-68.
 Qu P, Shen R C. CBM drilling shaft stability mechanism and determination of drilling fluid density window [J].
 Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 64-68.
- [12] 屈平,申瑞臣,付利,等. 煤层井壁稳定的时间延迟效应探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 255-260.
 Qu P, Shen R C, Fu L, et al. The effect of time delay on coal wall stability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 255-260.
- [13] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics (S0021-8979), 1941, 12(2): 155-164.

http://www.china-simulation.com