

# 基于流固耦合的深部煤层采动底板突水机理研究

翟晓荣, 吴基文, 张红梅, 沈书豪, 田诺成  
(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**为了研究煤层深部开采底板采动破坏特征及与浅部开采的差异及底板突水机理,以淮北矿区内下组煤底板为研究对象,建立了3种不同采深的底板突水模型。基于FISH语言对FLAC<sup>3D</sup>软件进行二次开发,对流固耦合条件下不同深度煤层采动底板破坏特征进行了综合分析对比。研究结果表明:深部条件下煤层采动底板破坏形态与浅部明显不同,深部高地应力及高承压水耦合作用下,含水层顶部发育原位张裂带,且在采动影响下,会进一步出现递进导升现象,而浅部开采时无此现象;当采动破坏带与深部递进导升带沟通时,发生底板突水事故,揭示了矿井深部煤层底板原位张裂隙产生—与承压含水层导通—原位导升带发育—采动破坏带与递进导升带沟通这一突水机理。

**关键词:**深部矿井;流固耦合;煤层底板;底板突水

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)06-0170-06

## Study on water-inrush mechanism of mining floor of deep coal seam in mine shaft based on fluid-solid coupling

Zhai Xiaorong, Wu Jiwen, Zhang Hongmei, Shen Shuhao, Tian Nuocheng  
(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to research the damage characteristics and water-inrush mechanism of mining induced floor in the deep mine and the difference between in deep and shallow area, the floor of lower group coal in Huaibei Mining Area was set as study object, and three floor models of different mining depths were established. FLAC<sup>3D</sup> has been developed on the basis of FISH language and the damage characteristics in mining of floor of different depths under fluid-solid coupling were analyzed and compared comprehensively. The study results showed that the damage form of floor in deep area after mining was quite different from the one in shallow area. In-situ tensile fracture developed on the roof of aquifer under coupling of high crustal stress and confined water of high pressure in deep area. Progressive intrusion would happen under the influence of mining, while there was no such phenomenon in the shallow mining. Water inrush disaster could happen while the damage zone caused by mining connected with the progressive zone. The results show the damage characteristics of mining of floor in deep area and the mechanism of water-inrush that can be concluded as follows: in-situ tensile fracture developed fractures connected with the progressive zone, in-situ progressive zone developing, the damage zone caused by mining connected with the progressive zone.

**Key words:** deep mine; fluid-solid coupling; coal floor; water-inrush of floor

## 0 引 言

随着矿井开采深度的增加,煤层底板水压及地应力相应增大,造成底板水害事故日趋频发,严重威胁了矿井安全生产<sup>[1-3]</sup>。底板突水是采动应力及底

板水压共同耦合作用的结果,对于底板突水流固耦合机理,已有学者基于FLAC<sup>3D</sup>软件进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>。以往对于数值模型中流固耦合的实现大多是将某一固定的渗透系数赋予模型中不同岩层进行煤层的开采,但是在煤层开采过程中围岩的渗透性

收稿日期:2016-12-21;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.06.028

基金项目:安徽高校自然科学基金重点资助项目(KJ2017A073);安徽理工大学青年教师科研基金资助项目(QN201612)

作者简介:翟晓荣(1986—),男,山西阳泉人,讲师,博士。Tel:13675543128, E-mail:zhaixiaorong@sina.com

引用格式:翟晓荣,吴基文,张红梅,等.基于流固耦合的深部煤层采动底板突水机理研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):170-175.

Zhai Xiaorong, Wu Jiwen, Zhang Hongmei, et al. Study on water-inrush mechanism of mining floor of deep coal seam in mine shaft based on fluid-solid coupling[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 170-175.

不发生变化,仅孔隙水压力随采动应力的变化而变化<sup>[7-9]</sup>。显然,这与实际采煤过程不符,受开采扰动影响,工作面回采过程中,围岩渗透性会不断发生变化从而使流体渗透力发生改变,渗透力的变化会造成有效采动应力的变化,二者相互影响,此即流固耦合原理<sup>[10-12]</sup>。

国内近年来不同学者对深部开采界限问题进行了探讨,勾攀峰等<sup>[13]</sup>根据我国煤矿地质条件、现有开采技术水平、矿井装备水平等特征,一般认为采深 800 m 以上为深部开采,软岩矿井采深 600 m 以上为深部开采;蓝航等<sup>[14]</sup>从瓦斯突出、底板突水、地温、冲击地压、巷道变形等方面综合考虑,结合我国煤炭开采与勘探时期的实际情况,将深部矿井上限定为 600~800 m,将 800~1 200 m、1 200 m 以上定为深部亚类,并指出受高承压岩溶水威胁的华北型矿井,研究重点区域是 800~1 200 m。随着煤矿开采深度的增加,底板突水次数及强度较过去都有了明显的升高<sup>[15]</sup>。此外,深部突水后水量较浅部突水明显增大,主要是深部承压水升高所致,极易造成重大突水事故,如 2013 年 2 月 3 日发生在淮北桃园煤矿 1035 工作面的下组煤底板突水事故,最大突水量近 30 000 m<sup>3</sup>/h,最终造成了淹井事故,给矿井造成极大损失<sup>[16]</sup>。

因此,笔者以淮北矿区下组煤为研究对象,基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件内嵌的 FISH 语言对软件进行二次开发,实现煤层回采过程中底板渗透力与采动应力的同步影响,对不同深度条件下煤层开采进行流固耦合分析,揭示深部条件下煤层底板破坏形态与浅部的差异及底板突水流固耦合机理。

## 1 矿区地质概况

淮北矿区位于华北聚煤区南部,主要含煤层组为二叠系山西组和下石盒子组,其中山西组下部煤层在宿北断裂以北矿区称为 6 号煤,而宿北断裂以南称为 10 号煤,该组煤在淮北矿区称之为下组煤,如图 1 所示。

淮北矿区主要含水层有 4 个,分别为新生界松散层孔隙含水层、煤系砂岩裂隙含水层、太原组灰岩溶含水层及奥陶系灰岩含水层。其中下组煤距太原组岩溶承压含水层一灰顶之间距离 43.76~70.00 m,是淮北矿区开采下组煤 6(10)号煤时的主要威胁含水层。淮北煤田水文地质条件复杂,下组煤开采普遍受到下伏太原组灰岩水和奥陶系灰岩水的严重威胁,具有华北煤田的基本特征。

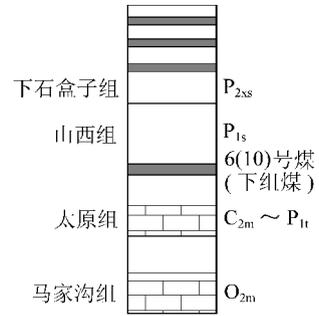


图 1 淮北矿区主采煤层柱状

Fig. 1 Chart of main coal seams in Huaibei Mining Area

## 2 流固耦合数学模型

FLAC<sup>3D</sup> 流固耦合模块中,将岩体视为多孔介质,流体在岩体中的流动满足 Darcy 定律,同时满足 Biot 流固耦合方程,其表达式为

$$\begin{cases} G \nabla^2 u_j - (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_j} + f = 0 \\ K \nabla^2 P = \frac{1}{S} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G$  为剪切模量; $\lambda$  为 Lamé 常数; $P$  为孔隙水压; $\varepsilon_v$  为体应变; $x_j$ 、 $u_j$ 、 $f$  分别为  $j$  向的坐标、位移及体积力; $K$  为渗透系数; $S$  为孔隙度; $\partial P / \partial x_j$  为渗流场对岩体骨架的影响,其本质为流体流动产生的渗透性影响了固体骨架的有效应力,进而影响其变形; $\partial \varepsilon_v / \partial t$  表示了固体骨架体应变对渗流场的影响,该公式为软件内部流固耦合的实现原理。

可以看出,方程式(1)能够反映出渗透力对固体骨架变形间的影响,但方程中岩体介质的渗透系数为定值。目前大多数流固耦合数值模拟中,对于岩体渗透系数都作为定值考虑,不够合理。J. A. Wang 等<sup>[17]</sup>认为导致煤矿底板发生突水事故的主要原因是由于采动影响底板岩体发生破裂而引起的渗透性增强。已有研究证明<sup>[18-20]</sup>,岩石在受力状态下其渗透率不是常数,而是随应力-应变过程中岩体内部裂隙发育而不断变化的,主要表现在,当岩石处于弹性阶段,随着应力增加,岩石内部微裂隙被压实,渗透性减小;当达到屈服强度后,应力增幅不大的情况下,岩石中新的裂隙不断形成、贯通,岩石渗透率发生明显增大。这一过程应力不发生明显变化,但应变仍不断增加,因此,用应力反映渗透系数的变化就不再适用,具有一定局限性。

笔者对渗透系数的选取主要依据文献[21]提出的流固耦合数值模拟渗透系数的控制依据,其表达式为

$$K = k_0 \left( \frac{1 + \Delta \varepsilon}{n} \right)^2 \quad (2)$$

式中： $k_0$ 为岩体的初始渗透系数， $m^2 / (Pa \cdot s)$ ，需要指出的是，FLAC<sup>3D</sup>中渗透系数的单位与水力学中渗透系数单位有所不同，需要进行换算，二者间的换算关系为： $1 m^2 / (Pa \cdot s) = 1.02 \times 10^{-6} cm \cdot s$ ； $\Delta \varepsilon$ 为体应变增量； $n$ 为岩体孔隙度。

式(2)能够实现煤层开采过程中渗透系数的改变，在式(1)的基础上，基于式(2)通过编写程序嵌入软件中，则可实现在煤层回采过程中底板渗透性随岩体变形的同步变化。

### 3 不同深度底板采动破坏形态特征

#### 3.1 不同深度模型的建立

综合淮北矿区现有开采技术水平、矿井装备水平及下组煤岩性特征等因素，将采深 600~800 m 定义为深部开采上限。为了研究煤层深部开采底板采动破坏形态与浅部开采的差异，建立了不同采深的数值模型，根据对淮北矿区不同深度，太灰水位资料统计，本次对煤层采深 400 m，底板水压 4 MPa，煤层采深 600 m，底板水压 6 MPa 及煤层采深 800 m，底板水压 8 MPa 三种不同条件下，底板采动效应分别进行了模拟。

表 1 底板采动效应数值模拟模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of numerical model

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	渗透系数/ (m <sup>2</sup> · Pa <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )	孔隙度/%
顶板	2.90	2.27	2.62	2.29	32	1.71	9.00×10 <sup>-12</sup>	4.0
粉砂岩	2.58	1.59	2.53	2.80	33	2.30	2.00×10 <sup>-11</sup>	5.0
细砂岩	1.54	1.68	2.54	3.00	35	2.40	4.00×10 <sup>-11</sup>	6.0
泥岩	1.19	1.26	2.38	2.00	30	1.50	1.00×10 <sup>-11</sup>	4.0
6煤	0.09	0.08	1.42	1.50	25	0.30	8.00×10 <sup>-11</sup>	5.0
灰岩	1.79	1.89	2.75	4.20	38	3.00	1.00×10 <sup>-10</sup>	7.0

研究表明，华北型岩溶矿区工作面基本顶初次来压引起的底板突水点突水占总突水次数的 65% 以上，二次来压占 25% 左右<sup>[22]</sup>。可以看出，工作面初次来压前后底板破采动效应的研究应对揭示底板突水机理更具普适性与针对性，因此重点对工作面开采初次来压期间底板采动效应进行模拟分析，根

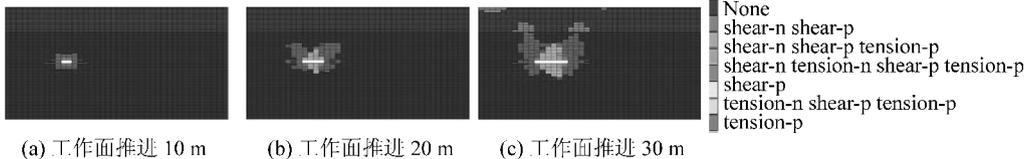


图 3 采深 400 m 承压水水压 4 MPa 底板塑性破坏区

Fig. 3 Plastic damage zone of coal floor with 4 MPa water pressure and 400 m depth

模型长 200 m、宽 250 m、高 100 m，下组煤采厚 3 m，工作面宽度 150 m，底板隔水层厚度 45 m，模拟地层倾角 0°，地质模型如图 2 所示。

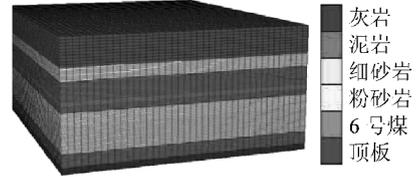


图 2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

模型力学边界条件为：底部采用全约束边界条件；模型顶部采用自由边界，通过施加面力来代替模型未能模拟到的岩层及上部松散层；煤层顶板采用自由边界条件；模型前、后、左、右边界采用 X、Y 方向固定；渗流边界条件为：含水层底板采用固定水压边界模拟灰岩含水层水压，其余为隔水边界，工作面回采之后，采空区为排水边界。计算中取采用 Mohr-Coulomb 塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 屈服准则。

模拟重点研究底板采动效应特征，因此，对于煤层部分覆岩进行了概化，用“顶板”替代，模拟所取岩体力学参数与渗透系数见表 1。

据淮北矿区实际条件，顶板初次来压步距一般为 30 m。

#### 3.2 流固耦合结果分析

对不同采深条件下，底板塑性特征进行了模拟，结果如图 3—图 5 所示；初次来压条件下，不同采深条件下，底板渗流场特征如图 6 所示。

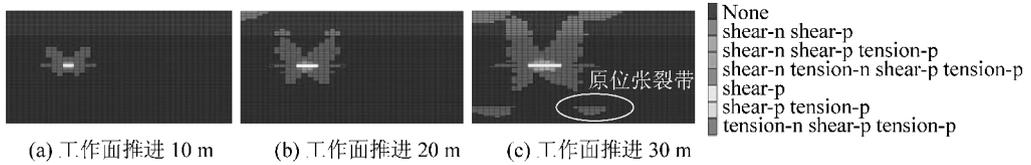


图4 采深600 m承压水水压6 MPa底板塑性破坏区

Fig. 4 Plastic damage zone of coal floor with 6 MPa water pressure and 600 m depth

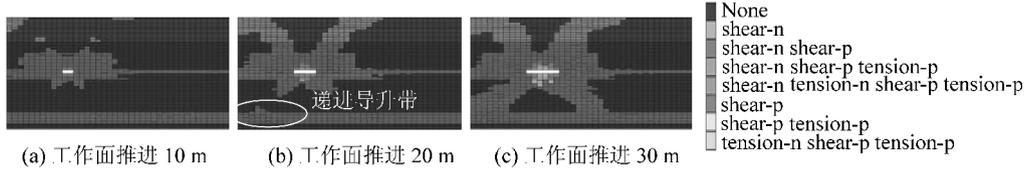


图5 采深800 m承压水水压8 MPa底板塑性破坏区

Fig. 5 Plastic damage zone of coal floor with 8 MPa water pressure and 800 m depth

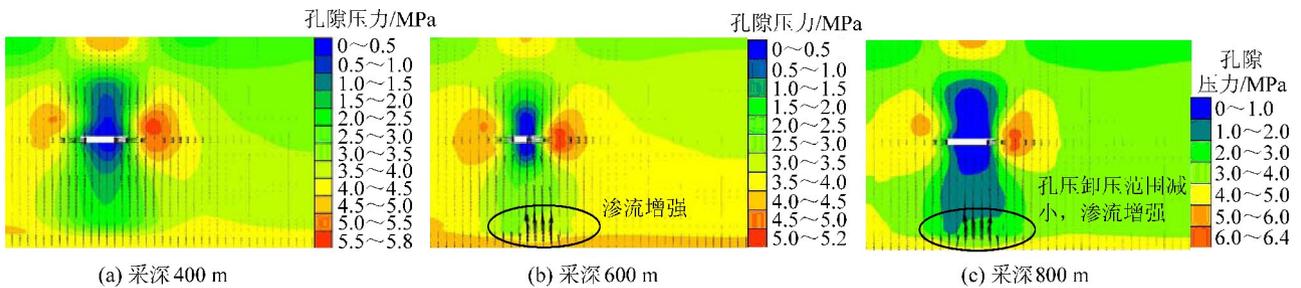


图6 不同采深条件下顶板初次来压时底板渗流场

Fig. 6 Seepage field characteristics of coal floor under different mining depth during initial roof weighting

对比不同采深条件下底板塑性破坏可以看出,浅部开采(采深400 m,水压4 MPa)条件下,工作面形成后,煤层底板下方仅存在采动破坏带,如图3所示;而采深超过600 m后,随着工作面的推进会在底板深部,承压含水层顶部形成一定范围的原位张裂带,如图4c所示;当采深到达800 m后,工作面推进20 m时,会在原位张裂带之上形成递进导升带,如图5b所示,工作面在推进至顶板初次来压步距30 m时,递进导升带与底板采动破裂带相沟通,形成了底板突水通道,如图5c所示。

从底板采动破坏塑性图(图4—图5)中可以看出,随着煤层采深及底板承压水水压的增大,底板采动破坏带发育深度也随之增大,浅部开采条件下工作面初次来压时底板破坏深度为14 m、采深600 m条件下,同样步距条件下底板采动破坏带深度为21 m,而当采深增大至800 m时,在工作面初次来压时,会发生底板突水事故。

此外,对顶板初次来压时,不同采深条件下底板渗流场特征进行了分析,如图6所示,从图6看出,随着采深及底板水压的增大,底板渗流场也不断变化,表现为随着深度增加,地下水渗流强度增

大,底板深部孔压卸压范围明显减小,如图6c所示,主要是由于底板采动破坏带与下伏强含水层相同,其补给充分,“补压”及时所致,说明受采动应力与承压水压力共同作用,底板结构发生了变化,底板破坏带内孔隙度进一步增大,渗透性随之增强,此时,若底板破裂带与下伏含水层沟通则会发生底板突水事故,渗流场特征与底板采动破坏特征能够较好对应。

通过对比可以发现,随着煤层采深及底板承压水水压的增加,底板采动突水危险性也随之增大。同样条件下,煤层在浅部开采无突水风险,但当进入深部后,在采动影响下底板可能发生突水事故。当进入深部开采后,底板在采动应力及高承压水压共同耦合作用下,会在底板深部形成一定范围的原位张裂区,且该区段的范围与采深有明显关系,即采深越大,底板水压越高,原位张裂区的范围也越大,出现的时间也越早。当煤层采深为600 m时,工作面推进至30 m时,底板深部才出现原位张裂区,且其范围仅在工作面两端下方,而当采深增大至800 m时,工作面开挖10 m,底板深部即出现了原位张裂区,其塑性范围较采深600 m时明显扩大,随着工作

面继续推进,受高地应力及高承压水压共同影响,承压水会突破原位张裂带,继续向上形成新的导升带,即递进导升带,之后采动导升带不断向上发展,而底板采动破坏向下发展,最终二者连通,发生底板突水。

从底板突水的过程来看,可以揭示出深部开采完整型底板在流固耦合条件下的突水规律。受采动影响,煤层底板下方与底板承压含水层之间存在着“四带”,底板深部的原位张裂带发育规律为自上而下逐渐向承压含水层靠近,随着推进底板原位张裂带范围厚度不断扩大,最终与含水层连通,之后承压水沿张裂带进入底板,并形成原位采动导升带,使底板有效隔水层厚度减小,随着工作面继续推进,受采动影响与底板承压水共同影响,导致采动裂隙带继续增大,原位采动导升带继续上升,直至二者相互连通,形成底板突水通道,造成承压水沿裂隙进入采空区,导致底板突水发生。这一过程可简要概括为原位张裂的萌生—与承压含水层沟通—递进导升带的发育—递进导升带与采动破坏带连通,即矿井深部开采,流固耦合条件下,工作面回采后底板突水机理。

## 4 结 论

1) 基于 FISH 语言对 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行二次开发,实现了底板承压水渗透力与采动应力的互相影响条件下,工作面开采模拟。

2) 矿井进入深部开采后,煤层底板破坏形态与浅部明显不同,在深部高地应力及高底板水压耦合作用下,工作面回采之后,在含水层顶部会出现原位张裂带,受采动影响,原位张裂带会进一步形成向上扩展的递进导升带,而浅部开采底板无此现象。

3) 通过研究揭示了矿井深部开采,流固耦合条件下底板采动突水机理,底板突水这一过程可概括为原位张裂的产生—原位张裂带与承压含水层沟通—原位采动导升带的发育—采动破坏带与递进导升带连通,这即是流固耦合条件下,工作面回采后底板突水机理。

### 参考文献 (References):

[1] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:18-20.  
[2] 施龙青,谭希鹏,王娟,等.基于 PCA\_PSO\_SVA 的底板突水危险性评价[J].煤炭学报,2015,40(1):167-171.

Shi Longqing, Tan Xipeng, Wang Juan, *et al.* Risk assessment of water inrush based on PCA\_PSO\_SVA [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 167-171.  
[3] 张蕊,姜振泉,于宗仁,等.煤层底板采动破坏特征综合测试及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):531-537.  
Zhang Rui, Jiang Zhenquan, Yu Zongren, *et al.* Comprehensive testing and numerical analysis on the failure characteristics of mining coal seam floor [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 531-537.  
[4] 彭志涛,王晓红,张彦宾.高承压水上开采底板突水危险性评价及防治[J].中州煤炭,2014(10):34-37.  
Peng Zhitao, Wang Xiaohong, Zhang Yanbin. Assessment on floor water inrush risk of mining above high confined water and its control [J]. Zhongzhou Coal, 2014(10): 34-37.  
[5] 徐智敏,孙亚军,巩思园,等.高承压水上采煤底板突水通道形成的监测与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1699-1704.  
Xu Zhimin, Sun Yajun, Gong Siyuan, *et al.* Monitoring and numerical simulation of formation of water inrush pathway caused by coal mining above confined water with high pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1699-1704.  
[6] 卢兴利,刘泉声,武昌勇,等.断层破裂带附近采场采动效应的流固耦合分析[J].岩土力学,2009,30(S1):165-168.  
Lu Xingli, Liu Quansheng, Wu Changyong, *et al.* Hydro-mechanical coupling analysis of mining effect around fault fractured zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 165-168.  
[7] 牛建立.煤层底板采动岩水耦合作用与高承压水体上安全开采技术研究[D].西安:煤炭科学研究总院西安研究院,2008.  
[8] 胡巍,徐德金.有限元强度折减法在底板突水风险评价中的应用[J].煤炭学报,2013,38(1):27-32.  
Hu Wei, Xu Dejin. Application of finite element strength reduction method to risk assessment of groundwater inrush from coal seam floor [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 27-32.  
[9] 孙变变,王中华,孙燕青,等.煤层底板破坏流固耦合数值模拟[J].煤田地质与勘探,2013,41(3):55-58.  
Sun Luanluan, Wang Zhonghua, Sun Yanqing, *et al.* Fluid-solid coupling numerical simulation of coal seam floor failure [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 55-58.  
[10] 姚多喜,鲁海峰.煤层底板岩体采动渗流场—应变场耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2738-2744.  
Yao Duoxi, Lu Haifeng. Seepage field-strain field coupling analysis for rock masses of coal seam floor during mining above confined aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2738-2744.  
[11] 赵庆彪,蒋勤明,高春芳.邯邢矿区深部煤层底板突水机理研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):117-121,176.  
Zhao Qingbiao, Jiang Qinming, Gao Chunfang. Study on floor water inrush mechanism of deep seam in Hanxing Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 117-121, 176.

- [12] 孟祥瑞,徐铖辉,高召宁,等.采场底板地应力分布破坏机理[J].煤炭学报,2010,35(11):1832-1836.  
Meng Xiangrui, Xu Chenghui, Gao Zhaoning, *et al.* Stress distribution and damage mechanism of mining floor [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1832-1836.
- [13] 勾攀峰,汪成兵,韦四江.基于突变理论的深井巷道临界深度[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4137-4144.  
Gou Panfeng, Wang Chengbing, Wei Sijiang. A study on the critical depth deep entry with catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4137-4144.
- [14] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.  
Lan Hang, Chen Dongke, Mao Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [15] 杨参参,申青春,张春光,等.矿井特大型突水原因分析及防治对策[J].中州煤炭,2015(5):16-18.  
Yang Cancan, Shen Qingchun, Zhang Chunguang, *et al.* Reason analysis and control measures of super-huge water inrush in mine shaft [J]. Zhongzhou Coal, 2015(5): 16-18.
- [16] 翟晓荣.矿井深部煤层底板采动效应的岩体结构控制机理研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [17] Wang J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process [J]. Engineering Geology, 2002, 63(3): 291-300.
- [18] 彭苏萍,孟召平,王虎,等.不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):742-746.  
Peng Suping, Meng Zhaoping, Wang Hu, *et al.* Experimental study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 742-746.
- [19] 李世平,李玉寿,吴振业.岩石全应力-应变过程对应的渗透率-应变方程[J].岩土工程学报,1995,17(2):13-19.  
Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. The permeability-strain equations related to complete stress-strain path of the rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 13-19.
- [20] 朱珍德,张爱军,徐卫亚.脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J].岩土力学,2002,23(5):555-558,563.  
Zhu Zhende, Zhang Aijun, Xu Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristic of brittle rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 555-558, 563.
- [21] Elsworth D, Bai M. Flow-deformation response of dual-porosity media [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(1): 107-124.
- [22] 张金才,张玉卓,刘天泉.岩体渗流与煤层底板突水[M].北京:地质出版社,1997:23-25.
- (上接第54页)
- Edition, 2009, 28(5): 93-96.
- [14] 郭保华.单孔岩样水压致裂的数值分析[J].岩土力学,2010,31(6):1965-1970.  
Guo Baohua. Numerical analysis of hydraulic fracturing on single-holed rock specimens [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1965-1970.
- [15] 杨宏伟.低透气性煤层井下分段点式水力压裂增透[J].北京科技大学学报,2012,34(11):1235-1239.  
Yang Hongwei. Underground segmentation point hydraulic fracturing antireflection for low-permeability coal seams [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(11): 1235-1239.
- [16] 闫少宏,宁宇,康立军,等.用水力压裂处理坚硬顶板的机理及实验研究[J].煤炭学报,2000,25(1):32-35.  
Yan Shaohong, Ning Yu, Kang Lijun, *et al.* The mechanism of hydro breakage to control hard roof and its test study [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 32-35.
- [17] 林柏泉,李子文,翟成,等.高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):452-455.  
Lin Baiquan, Li Ziwen, Zhai Cheng, *et al.* Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(3): 452-455.
- [18] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等.煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):167-173.  
Huang Bingxiang, Cheng Qingying, Liu Changyou, *et al.* Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173.
- [19] 唐书恒,朱宝存,颜志丰.地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J].煤炭学报,2011,36(1):65-69.  
Tang Shuheng, Zhu Baocun, Yan Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.
- [20] 张国华.本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
- [21] 同林.煤岩层水力压裂造缝机理分析[J].天然气工业,1997,17(4):53-56.  
Tong Lin. Analysis on mechanism of crack formation in coal and rock by hydraulic fracturing [J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(4): 53-56.
- [22] Martynyuk P A. Features of hydraulic fracture growth in the compression field [J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(6): 544-553.
- [23] 富向.井下点式水力压裂增透技术研究[J].煤炭学报,2011,36(8):1317-1321.  
Fu Xiang. Study of underground point hydraulic fracturing increased permeability technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1317-1321.
- [24] 王魁军,富向,王宇鹏,等.分段水力压裂煤层卸压装置及卸压方法:中国,CN102704905A[P].2012-10-03.
- [25] 杨天鸿,唐春安,徐涛,等.岩石破裂过程的渗流特性:理论与模型与应用[M].北京:科学出版社,2004.