

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0055

赵春虎. 深埋煤层采动覆岩渗透能力变异与地下水响应模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 171-176, 201. ZHAO C H. Study on permeability variation and groundwater response under disturbance of deep coal seam mining[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 171-176, 201. (in Chinese)

# 深埋煤层采动覆岩渗透能力变异与地下水响应模拟

赵春虎<sup>1,2</sup>

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710177)

**摘要:** 针对西部深埋矿区煤炭资源开发对地下水扰动的相关研究不足的问题, 依据弹塑性相关理论, 利用多物理场数值模拟软件(COMSOL), 研究了深埋煤层采动覆岩渗透能力变异与地下水的响应规律, 模拟得出案例矿井在不同采动应力状态区覆岩渗透能力变化具有差异性: 采动覆岩应力拉伸区岩体的渗透率相对增大, 在采掘空间的直接顶渗透率增大 26%, 在地表沉陷盆地边缘增大 3%; 覆岩压缩区渗透率相对减小, 在煤岩柱两侧渗透率减小 43%, 在采掘空间正上方约 300 m 处渗透率减小 18%。由于采掘后井下采掘空间直接与大气联通, 形成了以导水裂缝带范围为中心的水压降落漏斗, 导致垂向水力梯度与流速加剧; 而在煤层顶板 300 m 以上范围, 水压水头基本为原始状态。研究成果为我国干旱与半干旱矿区煤水资源的合理开发、科学管控提供技术依据。

**关键词:** 地下水; 渗透; 采掘扰动; 数值模拟; 导水裂缝带

**中图分类号:** TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0171-06

## Study on permeability variation and groundwater response under disturbance of deep coal seam mining

ZHAO Chunhu<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** There is a lack of research on groundwater disturbance caused by deep coal resource exploitation in western China. Based on the elastic plastic theory, this paper studies the variation mechanism of the seepage capacity of the overlying strata and the response of the groundwater by using the fluid solid coupling numerical simulation software COMSOL. The simulation results showed that the change pattern of overburden permeability is different in different mining stress states. The overburden permeability increased in the tensile stress zone: at the top of the excavation space it increased by 26%, and in the surface subsidence basin it increased by 3%. The overburden permeability decreased in the stress compression zone: on both sides of the coal pillar it decreased by 43%, and at about 300m above the mining space it decreased by 18%. A groundwater draw down funnel was formed with the water flowing fractured zone as the center. As a result, the vertical hydraulic gradient and flow velocity of groundwater both increased significantly, while the water pressure was basically in the original state at about 300 m above the mining space. The research results can provide theoretical support for reasonable exploitation of coal resources and scientific management of water resources in the arid area of China.

**Key words:** groundwater; permeation; mining disturbance; numerical simulation; water flowing fractured zone

收稿日期: 2017-06-11 修回日期: 2017-12-12 网络出版时间: 2018-01-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180127.1032.002.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501102; 2017YFC0804103); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(SHJT-16-30.9)

**Funds:** National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five-year Plan Period (2016YFC0501102; 2017YFC0804103); The Open Fund of the State Key Laboratory for the Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining (SHJT-16-30.9)

**作者简介:** 赵春虎(1981-), 男, 陕西扶风人, 副研究员, 博士, 从事矿山水害防治与水环境保护研究。E-mail: zhaochunhu@cctegxian.com

地下水是西部地区水资源主要组成部分,具有极其重要的资源功能和生态功能。而随着我国煤炭资源开发西进战略的实施,全国煤炭基地分布与水资源丰富程度已呈逆向分布。西部干旱矿区在规模化、现代化的煤炭资源开采不可避免地造成了对地下水影响和破坏,加剧了地区资源性缺水与生态环境破坏<sup>[1-2]</sup>。由于能源基础结构的不同,国外对地下水水动力扰动问题的研究极少,主要以煤矿区水污染风险评价、关闭矿井复垦等为主要研究方向<sup>[3-6]</sup>。国内众多学者采用不同技术方法针对西部地区煤炭开采造成的地下水位下降、地下水水量损失等水动力响应问题进行了研究,但主要集中在煤田的榆、神、府等浅部矿区<sup>[7-9]</sup>,深部矿区(榆横、呼吉尔特等矿区)相关研究较少(主采煤层大于200 m)<sup>[10-11]</sup>,且大多以宏观分析为主,其中覆岩破坏的“覆岩分带”<sup>[12]</sup>理论与岩层控制的“关键层”理论<sup>[13-14]</sup>是矿井顶板水害防治、保水采煤技术研发及地下水环境影响评价的最重要依据,其基本认识是以近地表的松散层地下水为“保水”对象,当采掘扰动形成的“导水裂缝带”未沟通含水层或“隔水关键层”,没有造成地下水资源大量漏失,即认为可以安全回采<sup>[15-17]</sup>,亦或保水成功<sup>[18-20]</sup>,因此,以浅部矿区为主的“上三带”与“关键层”理论对于深部矿区地下水响应的机制分析具有较强的局限性。不仅仅导水裂缝带对地下水存在直接影响,其采掘扰动引起的覆岩含水介质渗透能力变化对含水层地下水影响明显。一方面,当采动裂缝仅发育至基岩层内部时(或隔水关键层),由于“导水裂缝带”内的含水层地下水大量漏失,造成松散层地下水与“导水裂缝带”内含水层地下水的越流水位差加大,加剧含水层间的垂向越流。另一方面“导水裂缝带”以上覆岩变形导致含、隔水层的渗透能力发生变异,均导致地下水流动状态发生变化。因此,采动余留的保护层上下越流水位差越大,保护层变异渗透能力越强,采动潜水位降深越大<sup>[21]</sup>。

文章以采动应力变化-覆岩变形损伤-介质渗透能力变化-地下水响应为研究的技术思路,基于岩体弹性相关理论,采用数值模拟方法研究采掘扰动下覆岩渗透能力变异以及地下水动态响应规律,旨在正确认识煤矿开采对地下水环境的扰动机制,为我国干旱矿区煤-水资源合理开发、科学管控提供依据。

## 1 案例矿井概况

案例矿井沙拉吉达井田位于陕西省和内蒙古交界地区(图1),属于神东煤炭基地深部的呼吉尔特矿区,陕北黄土高原与毛乌素沙漠的接壤地带,生态

环境脆弱,水资源贫乏。

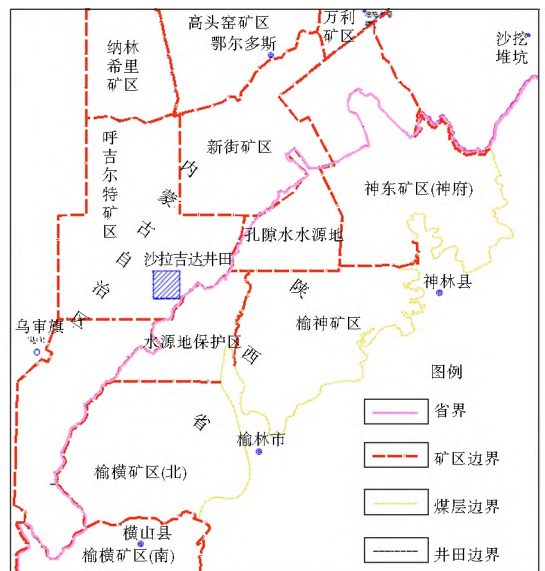


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Distribution of mining areas in western China

井田计划主采延安组( $J_{1-2y}$ ) $3^1$ 煤层,煤层采厚6.2 m,工作面采宽为300 m,埋深500 m左右。地表被第四系风积沙所覆盖,地形平缓,第四系风积层( $Q_{4ol}$ )与萨拉乌素组潜水含水层( $Q_{3s}$ )均厚达96 m左右,且与下伏白垩系洛河组和环河组碎屑岩类裂隙-孔隙含水层( $K_1$ )之间无稳定的隔水层存在,形成了厚层状的松散层类含水层组,潜水位埋深一般小于3 m,水位标高与地形基本一致。安定组( $J_{2a}$ )、直罗组( $J_{2z}$ )砂质泥岩地层构成了上覆松散类含水层组与侏罗系中下统延安组( $J_{1-2y}$ )砂岩裂隙含水层间的稳定隔水层。井田主体为一向北西倾斜的单斜构造(倾向 $28^\circ$ ),地层倾角 $1^\circ \sim 3^\circ$ ,未发现大的断裂等,构造属简单类型。

根据《煤矿防治水手册》中推荐的综放开采条件下导水裂隙带高度(包括冒落带)的计算公式(式1),计算得出井田 $3^1$ 煤层导水裂隙带高度在61.50~84.50 m之间。

$$H_f = \frac{100M}{0.26M + 6.88} \pm 11.49 \quad (1)$$

式中: $H_f$ 为最大导水裂隙带高度; $M$ 为累计采厚,取煤层平均厚度6.2 m。

由于 $3^1$ 煤层位于延安组中部,延安组地层本身砂岩裂隙含水层组,开采后将直接揭露与沟通该含水层,因而构成了直接充水水源; $3^1$ 煤距洛河组、环河组碎屑岩类裂隙-孔隙含水层间距大于 $3^1$ 煤层顶板冒裂带的发育高度,导水裂隙带高度不会直接波及松散类含水层底界,因而根据传统的采动覆岩分带理论,可以定性的认为煤层开采对松散含水层无直接影响。

## 2 模型构建

### 2.1 数学模型

#### (1) 基本平衡方程。

本次以岩体弹塑性力学和地下水流体力学理论为基础建立研究问题的数学模型,其中式(2)地下水渗流方程描述地下水动态响应机制,式(3)位移场方程以描述采动覆岩损伤变形过程。为了便于模型位移方程与渗流方程进行耦合,将地下水水位、水头(单位:m)均换算为压力(单位:MPa),其数学模型可简化为如下形式:

地下水渗流场方程:

$$\Delta \left[ \frac{Q}{\mu} \Delta p \right] = 0 \quad (2)$$

固体位移场方程:

$$G \Delta^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \Delta \cdot (\Delta u) - \alpha \Delta p = 0 \quad (3)$$

式中: $k$ 为多孔介质绝对渗透率( $\mu\text{m}^2$ ); $\mu$ 为流体黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $p$ 为地下水压力(Pa); $\rho$ 为流体密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $G$ 为切变模量; $\nu$ 为介质的排水泊松比,其中, $G = 2E(1-\nu)$ , $E$ 为介质弹性模量; $u$ 分别为 $x$ 轴、 $y$ 轴及 $z$ 轴方向的位移; $\alpha$ 为Biot系数,其值取决于材料的压缩性能。

#### (2) 损伤变形对渗透能力的影响。

岩体的孔隙率又与其所处的应力状态有关,本次参考文献[22-23]建立其应力、孔隙率与渗透率之间数学关系:

$$\varphi = (\varphi_0 - \varphi) \exp(\alpha_e \cdot \alpha) + \varphi \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为高压应力状态下的孔隙率的极限值, $\varphi_0 \approx 0$ ; $\alpha_e$ 为应力影响系数,其值参考文献[24],可取 $5.0 \times 10^8 \text{Pa}^{-1}$ ; $\alpha$ 定义为平均效应力,可按如下公式计算:

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) / 3 + \alpha_p \quad (5)$$

按照式(5)计算; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 是三个主应力,通过上面公式,建立了采掘扰动影响下采动应力的状态与孔隙率指标关系。

岩体的渗透率与孔隙率之间满足如下关系<sup>[25]</sup>:

$$k = k_0 \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \quad (6)$$

式中: $k_0$ 为零应力状态的渗透率( $\text{m}^2$ ); $\varphi_0$ 为零应力状态时的孔隙率。

### 2.2 数值模型构建

根据研究问题的需要,模型模拟的范围为 $3^1$ 煤层至地表, $3^1$ 煤层底板为模型的下边界,地表为模型的上边界,综合井田的地质与水文地质特点,见图2,将概念模型剖分为 $3^1$ 煤层,基岩裂隙含水层组,

低渗透岩层组及近地表的松散层四个模拟分层。

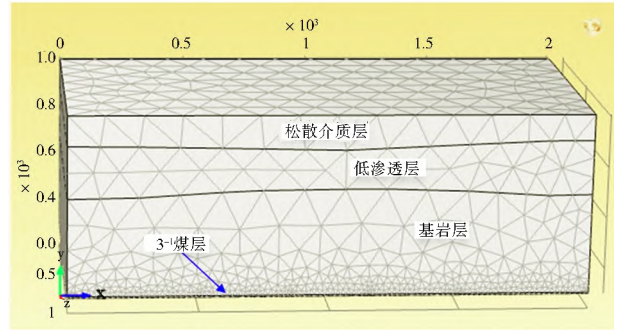


图2 剖分示意图

Fig. 2 Sketch map of numerical model

#### 2.2.1 初始条件

##### (1) 应力场。

在采掘活动没有发生以前,煤层应力状态相对平衡。为了便于问题分析,本次没有考虑构造应力的条件下,其垂直与水平应力计算公式如下:

$$\alpha_v = \gamma \cdot H \quad (7)$$

$$\alpha_h = \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \gamma \cdot H \quad (8)$$

式中: $\alpha_h$ 为水平应力( $\text{N}/\text{m}^2$ ); $\alpha_v$ 为垂直应力( $\text{N}/\text{m}^2$ ); $\nu$ 为岩石泊松比; $\gamma$ 为岩层平均重度( $\text{N}/\text{m}^3$ ); $H$ 为埋深(m)。

定义模型在未采掘前的初始位移为零。

##### (2) 地下水渗流场。

采掘前,初始孔隙静水压力从模型顶部潜水面处 $0.1 \text{MPa}$ (大气压)至模型底边界,随着埋深加大增加 $6.5 \text{MPa}$ 。

#### 2.2.2 边界条件

(1) 定义模型底部为“固定边界”,即限制单元在三维空间上的变形,即位移为0。

(2) 模型顶部的松散层潜水位界面与地表大气联通,井下采掘扰动形成的导水裂缝带直接与井下采掘空间的大气相通,根据前面对导水裂缝带的计算成果,定义模型顶部和导水裂缝带圈闭(高度 $84.5 \text{m}$ 处)的界面均为自由边界,其边界压力值近似为大气压(值为 $0.1 \text{MPa}$ )。

(3) 采宽较模型研究范围相对较小,模型两侧在水平方向的变形基本可以忽略,因而定义模型两侧面为“辊边界”,即允许边界单位仅在垂向上有位移产生,水平方向位移为0。

(4) 模型渗流场中各个介质计算结点均受此孔隙压力 $p$ ,依据有效应力原理,“-”表示承压的孔隙水压力方向与固体的主应力方向相反,而剪应力不受水压影响,岩石物理力学与渗流参数,见表1。



表 1 岩石力学 渗流参数

Tab. 1 Rock's mechanical and seepage parameters

岩石	容重 $\gamma$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E/\text{MPa}$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦 角 $\alpha(^{\circ})$	泊松 比 $\mu$	初始渗透 率 $k/\text{mD}$
基(砂)岩	2 580	16 370	36	35	0.26	300
3 <sup>1</sup> 煤层	1 350	10 000	30	28	0.32	\
低渗透层	1 680	30	14	42	0.24	100
松散层	774	6	/	/	0.42	1500

注:  $1\text{mD} = 0.9869 \times 10^{-9}\text{m}^2$

### 3 流固耦合仿真模拟分析

本研究利用可塑性极强的有限元多物理场耦合软件 Comsol4.2a 为模拟平台,模拟以工作面设计宽度 300 m、采高 6.2 m 为模拟分析依据,其中孔隙率  $\rho$ 、渗透率  $k$  以自定义函数的形式参与模型的计算与输出。

#### 3.1 采动覆岩位移场分析

##### 3.1.1 应力场

模型中定义拉应力为“+”,压应力为“-”。图 3 采动应力状态模拟图。

压应力集中区:由于采掘扰动,采场周边发生应力集中现象,在煤岩柱向实体结构两侧达到最大值,约为  $-4.9 \times 10^7$  Pa,煤柱外侧正常区段压应力值为  $-1.51 \times 10^7$  Pa,即应力集中产生的附加应力约为正常应力的 3.3 倍;在采掘空间中上部 300 m 位置,出现近水平的压应力区,该区压应力最大值为  $-5 \times 10^6$  Pa。

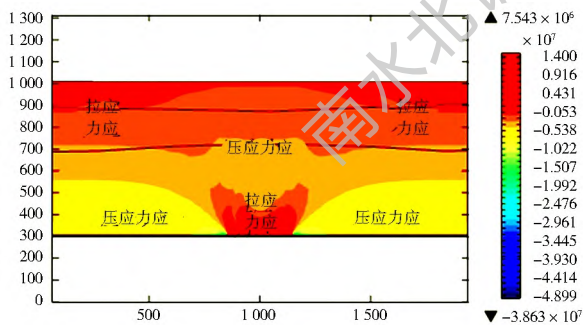


图 3 采动覆岩应力状态(单位: Pa)

Fig. 3 Stress state of mining overburden rock (unit: Pa)

拉应力区:采场上部的一定范围内应力由原来的压应力状态转化成向采空区的拉应力状态,拉应力区基本形态为一“马鞍形”,极大值位于采掘空间中部的直接顶,最大拉应力为  $7.5 \times 10^6$  Pa;在近地表采掘空间外围的两侧,亦出现拉应力区。

##### 3.1.2 位移场

如图 4 所示,采掘扰动使围岩以采掘空间为中心主要发生向下的位移变形,位移变化基本形态为

倒三角形“▽”,位移最大值即为采掘空间中心,位移量为 0.139 m;一直延伸至地表,地表形成的沉陷盆地中心的位移量约为 0.07 m;而在煤柱两侧压缩变形极小。

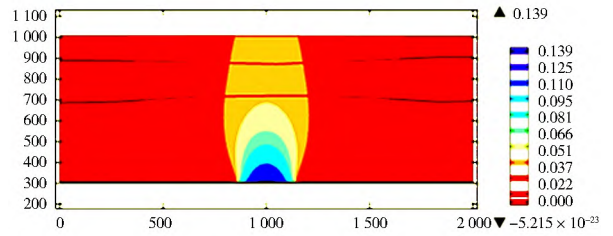


图 4 采动覆岩位移(单位: m)

Fig. 4 Displacement of mining overburden rock (unit: m)

#### 3.1.3 孔隙率与渗透率变化

模拟结果见图 5,分别在拉伸区和压缩区岩体孔隙率发生不同程度的变化。

拉伸区:在采掘空间顶部约 100 m 范围内,出现了正三角形“△”的拉伸区,该区岩体的孔隙率相对增大,极大值位于采掘空间的直接顶,变化了 0.014,渗透率变化了 75.8 mD,增大了 26%;在地表沉陷盆地的两侧岩体发生拉伸变形,孔隙率同样增大,极大值位于地表沉陷盆地边缘,变化了 0.005,增大了 3.3%,渗透率变化了 13 mD,增大了 3%。

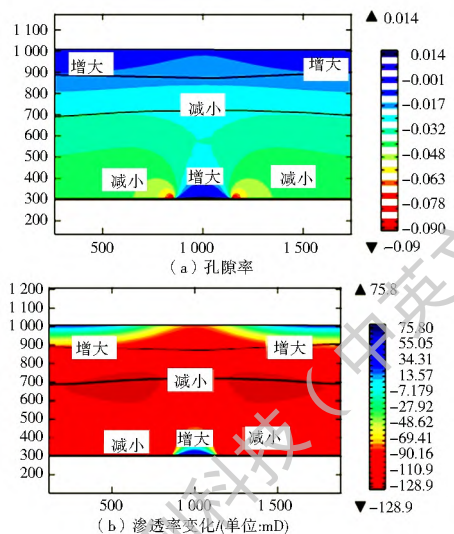


图 5 图 5 孔隙率与渗透率变化趋势示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the variation trend of porosity and permeability

压缩区:在采掘空间拉伸区顶部,出现了倒三角形“▽”的压缩区,该区岩体的孔隙率相对减小,极小值位于采掘空间正上方约 300 m 的位置,孔隙率减小了 0.02,渗透率减小了 54 mD,减小约 18%;在采掘空间的煤岩柱两侧的压缩区,压缩最为剧烈,渗透率最大变化了 129 mD,减小了 43%。

### 3.2 地下水渗流场分析

#### 3.2.1 水压

根据地下水动力学中水头概念:

$$H = z + p/r \quad (9)$$

式中:  $H$  为水头值(m);  $z$  为位置水头(m);  $p$  为孔隙水压力(MPa);  $r$  为地下水容重( $1\,000\text{ kg/m}^3$ )。

近地表松散层内地下潜水埋深约为 2 m, 在潜水面处直接与大气联通, 孔隙压力为大气压力, 因而为 0.1 MPa, 被称为“自由表面”。如图 6(a) 所示, 随着水位埋深的增大孔隙水压力增大, 煤层顶板孔隙水压力增大至 6.5 MPa; 如图 6(b), 该区地下水水头基本在+ 995 m 左右, 天然状态下在水平方向地下水水力梯度约为 1‰, 地下水流动平缓。垂向上水力梯度约为 0, 说明含水层间或含水层内的地下水垂向运动微弱。

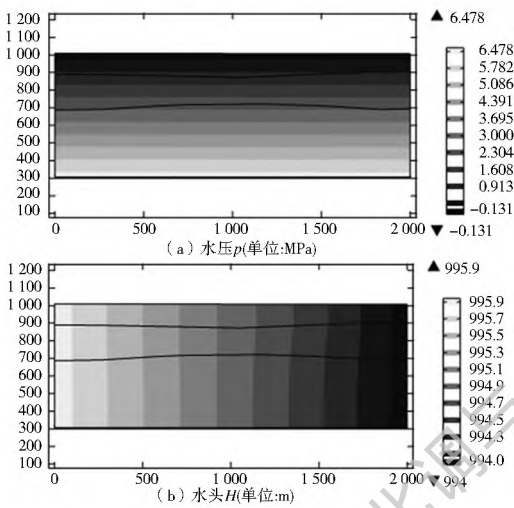


图 6 未采掘前水压(头)分布

Fig. 6 Distribution of water pressure and head before mining

如图 7(a) 所示, 采掘后井下采掘空间(采空区)直接与大气联通, 孔隙水压力亦变为大气压力(为 0.1 MPa), 即形成地面与井下的两个“自由表面”, 井下的“自由表面”由采掘扰动形成的导水裂缝带上限圈闭。如图 7(b) 所示, 水头形成以井下“自由表面”为中心的降落漏斗区, 该区在垂向上水力梯度急剧增大, 漏斗中心水头值从+ 995 m 降低为+ 300 m。井下“自由表面”至近地表梯度逐渐变小, 在煤层顶板 300 m 以上范围, 水压水头基本为原始状态, 未形成较为明显的降落漏斗, 说明煤层顶板 300 m 以上范围地下水水力状态受采掘扰动影响小, 基本为天然状态下的地下水水流场。

#### 3.2.2 渗流速度

地下水动力学渗流速度:

$$v = Q/A \quad (10)$$

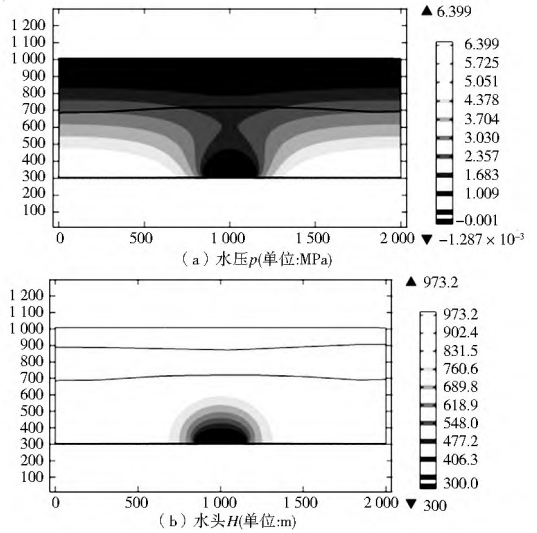


图 7 采掘后水压(头)分布

Fig. 7 Distribution of water pressure and head before mining

式中:  $v$  为渗流速度(m/d), 也称达西流速或比流量;  $Q$  为过水断面的渗流量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $A$  为过水断面面积( $\text{m}^2$ )。

如图 8(a) 所示, 未采掘之前地下水主体流为水平向的由西往东, 在给定两侧定水头的边界条件下, 松散层渗透能力较强, 流速较快, 基岩含水层流速次之, 相对隔水层流速极小; 如图 8(b), 采掘之后在模型的研究区内地下水整体流向被扰动, 形成以采掘空间为中心的汇流, 且越趋近采掘空间垂向地下水流速越快。

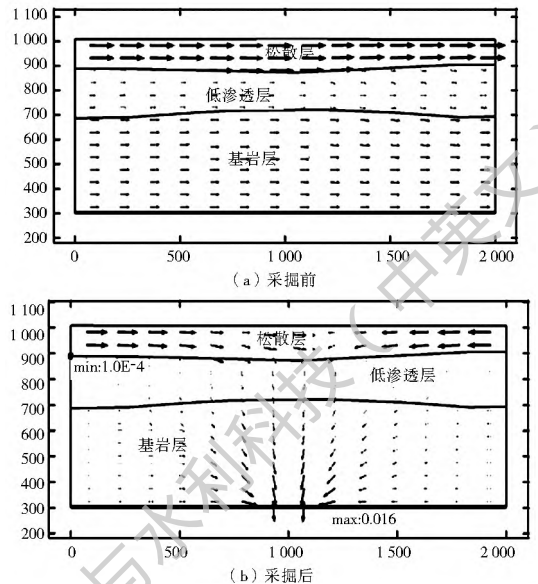


图 8 地下水流速变化(单位: m/d)

Fig. 8 Groundwater flow rate variation (unit: m/d)

### 4 结语

应用基于流-固耦合数值模拟手段, 以采动附加应力变化-覆岩变形损伤-介质渗透能力变化-地下水

响应为分析研究的技术思路,研究了案例矿井煤层开采扰动下采动覆岩渗透能力演化及地下水响应机制,得到如下基本结论。

(1)采动覆岩应力状态分区明显,在不同采动应力状态区覆岩渗透能力变化具有差异性,压应力区岩体渗透能力减小,拉应力区渗透率增加。

(2)采掘后井下采掘空间直接与大气联通,即形成井下水压“自由表面”,以“自由表面”为中心的降落漏斗明显,垂向水力梯度、流速加剧;在煤层顶板300 m以上范围,水压水头基本为原始状态。

(3)本模型是基于岩体弹塑性力学相关理论和有限元数值方法构建,岩体在采动前后均为连续介质,模拟冒裂带内渗透率变化存在局限性,下一步应结合断裂力学的相关理论和离散元数值处理方法对煤层采动覆岩渗透能力变异进行研究。

以上研究为我国西部干旱矿区煤炭资源的合理开发和水资源科学保护提供一定的技术依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 王力,卫三平,王全九.榆神府煤田开采对地下水和植被的影响[J].煤炭学报,2008(12):1408-1414.(WANG L,WEI S P,WANG Q J.Effect of coal exploitation on groundwater and vegetation in the Yushenfu Coal Mine[J].Journal of China Coal Society,2008,33(12):1408-1414.(in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2008.12.023.
- [2] 李强,李永春,陈大勇,等.神东矿区水资源可持续利用问题研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):141-147.(LI Q,LI Y C,CHEN D Y,et al.The water resource utilization in Shendong mining area[J].Journal of Arid Land Resources & Environment,2013,27(9):141-147.(in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2013.09.033.
- [3] CHUGH Y P,BEHUM P T.Coal waste management practices in the USA:an overview[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(2):163-176.) DOI:10.1007/s40789-014-0023-4.
- [4] SKOUSEN J,ZIPPER C E.Post-mining policies and practices in the Eastern USA coal region[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(2):135-151. DOI:10.1007/s40789-014-0021-6.
- [5] 胡振琪,龙精华,王静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.(HU Z Q,LONG J H,WANG X J.Institute of land reclamation and ecological restoration.self healing,natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J].journal of the China Coal Society,2014,39(8):1751-1757.(in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9029.
- [6] MANCA P P,DESOGUS P,ORRÙ G.The reuse of abandoned acquasmi mine voids for storage of the Masua flotation tailings[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(2):213-220. DOI:10.1007/s40789-014-0030-5.
- [7] 范立民,马雄德,蒋辉,等.西部生态脆弱矿区矿井突水危险性分区[J].煤炭学报,2016,41(3):531-536.(FAN L M,MA X D,JIANG H,et al.Risk evaluation on water and sand inrush in ecologically fragile coal mine[J].Journal of China Coal Society,2016,41(3):531-536.(in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1297.
- [8] 李杨.浅埋煤层开采覆岩移动规律及对地下水影响研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2012.(LI Y.Study on the movement law of overlying strata in shallow coal seam mining and its influence on groundwater[D].Beijing:China University of Mining and Technology (Beijing),2012.(in Chinese))
- [9] 白乐,李怀恩,何宏谋,等.煤矿开采区地表水-地下水耦合模拟[J].煤炭学报,2015,40(4):931-937.(BAI L,LI H E,HE H M,et al.Integrated simulation of surface water and groundwater in a high intensive coal mining area[J].journal of the China Coal Society,2015,40(4):931-937.(in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.1655.
- [10] 李培月.人类活动影响下的地下水环境及其研究的方法体系[J].南水北调与水利科技,2016(1):18-24.(LI P Y.Groundwater environment under human intervention and the methodological system for research in this field[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2016(1):18-24.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddq.2016.01.003.
- [11] 刘丹,王丽萍,李荣波,等.基于水资源系统健康的区域水资源承载力评价[J].南水北调与水利科技,2015(2):214-219.(LIU D,WANG L P,LI R B,et al.Assessment of regional water resources carrying capacity based on the water resources system health[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2015(2):214-219.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddq.2015.02.006.
- [12] 刘天泉,仲维林,焦传武.煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1981.(LIU T Q,ZHONG W L,JIAO C W.Application of surface movement and overburden failure in coal mine China Coal Industry Publishing House[M].1981.(in Chinese))
- [13] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996(3):225-230.(QIAN M G,MIAO X X,XU J L.Theoretical study of key stratum in ground control[J].Journal of China Coal Society,1996(3):225-230.(in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.1996.03.001.
- [14] 缪协兴,浦海,白海波.隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(1):1-4.(MIAO X X,PU H,BAI H B.Principle of Water-Resisting Key strata and its application in water preserved mining[J].Journal of China University of Mining & Technology,2008,37(1):1-4.(in Chinese))
- [15] 朱伟.高强度综采中至坚硬覆岩裂缝带发育规律研究[J].煤炭工程,2011(1):60-63.(ZHU W.Study on crack zone development law of medium and hard overburden strata above high intensive fully mechanized coal mining face[J].Coal Engineering,2011(1):60-63.(in Chinese))

(下转第201页)

- search of gas ultrasonic flow meter [J]. Instrumentation Standardization and Measurement, 2013 (4) : 34-35. (in Chinese)
- [23] 王茹. 超声波流量计和电磁流量计特点及区别比较分析[J]. 科技与企业, 2012 (15) : 357-357. (WANG R. Characteristics and differences of ultrasonic flow meters and electromagnetic flow meters[J]. Technology and Enterprises, 2012 (15) : 357-357. (in Chinese))
- [24] 邹蓬, 吕传玉, 李凤名. 时差法超声波流量计的原理和设计[J]. 建设科技, 2012 (4) : 88-89. (ZOU P, LYU C Y, LI F M. The principle and design of ultrasonic flowmeter of jet lag method[J]. Construction Technology, 2012 (4) : 88-89. (in Chinese))
- [25] 王梅. 便携式超声波流量计在循环水管道上的应用[J]. 数字技术与应用, 2012 (6) : 113-113. (WANG M. Application of portable ultrasonic flowmeter in circulating water pipeline [J]. Digital Technology and Application, 2012 (6) : 113-113. (in Chinese))
- [26] 李超. 超声波流量计在能源计量中的应用[J]. 江苏现代计量, 2013(11) : 31-33. (LI C. Application of ultrasonic flow meter in energy measurement[J]. Jiangsu Modern Metrology, 2013 (11) : 31-33. (in Chinese))
- [27] 李玉华. 超声波流量计和电磁流量计各自特点及区别比较[J]. 能源与节能, 2012 (9) : 94-96. (LI Y H. Characteristics and differences of ultrasonic flow meters and electromagnetic flow meters[J]. Energy and Energy Conservation, 2012 (9) : 94-96. (in Chinese))
- [28] 陈中华. 超声波流量测量技术在企业中的实践应用[J]. 广东科技, 2012, 21(9) : 126-127. (CHEN Z H. The practical application of ultrasonic flow measurement technology in enterprises[J]. Guangdong Science and Technology, 2012, 21 (9) : 126-127. (in Chinese))

(上接第 176 页)

- [16] 李文生, 李文, 尹尚先. 综采一次采全高顶板导水裂缝带发育高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6) : 104-107. (LI W S, LI W, YIN S X. Study on development height of water flow crack zone in roof Above Fully Mechanized One Passing Full Seam Mining Face[J]. Coal Science & Technology, 2012, 40(6) : 104-107. (in Chinese) DOI: 0.13199/j.cst.012.6.109.iwsh.034.
- [17] 尹会永, 魏久传, Liliana Leticariu, 等. 下组煤露头区导水裂缝带高度综合确定[J]. 煤矿开采, 2015(3) : 89-92. (YIN H Y, WEI J C, Liliana, Leticariu, et al. Water-conducting fissure zone height of outcrop area of lower group coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2015 (3) : 89-92. (in Chinese) DOI: 10.13532/j.cnki.cn11-677/t.d.2015.03.026.
- [18] 徐海红, 乔皎, 王铮. 小庄矿井采煤对地下水的的影响及保水采煤措施[J]. 煤田地质与勘探, 2014 (6) : 64-67. (XU H H, QIAO J, WANG Z. The influence of underground coal mining on groundwater and measures for water conservation while mining in Xiaozhuang mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014(6) : 64-67 (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.06.013.
- [19] 余学义, 刘樟荣, 赵兵朝, 等. 王家沟煤矿条带充填开采导水裂隙发育规律研究[J]. 煤炭工程, 2015(5) : 83-86. (YU X Y, LIU Z R, ZHAO B C. Research on law of water flowing fracture development due to strip filling mining in wangjiagou coal mine[J]. Coal Engineering, 2015 (5) : 83-86. (in Chinese) DOI: 10.11799/ce201505028.
- [20] 缪协兴, 王安, 孙亚军, 等. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2) : 217-227. (MIAO X X, WANG A, SUN Y J, et al. Research on basic theory of mining with water resources protection and its application to arid and semi-arid mining areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(2) : 217-227. (in Chinese))
- [21] 李涛, 王苏健, 韩磊, 等. 生态脆弱矿区松散含水层下采煤保护层合理厚度[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1) : 98-105. (LI T, WANG S J, HAN L, et al. Reasonable thickness of protected loess under loose aquifer in ecologically fragile mining area, 2017, 42(1) : 98-105. (in Chinese)). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.5016.
- [22] 朱万成, 魏晨慧, 张福壮, 等. 流固耦合模型用于陷落柱突水的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009 (5) : 928-933. (ZHU W C, WEI C H, ZHENG F Z, et al. Investigation of water inrush from karst subsidence column by using a coupled hydro-mechanical model [J]. Chinese Journal of Underground Space & Engineering, 2009(5) : 928-933. (in Chinese))
- [23] LOUIS C. Rock Hydraulics[A]. In: Rock Mechanics[C]. ed. by LMuller, 1974.
- [24] 李地元, 李夕兵, 张伟, 等. 基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5) : 1056-1064. (LI D Y, LI X B, ZHANG W, et al. stability analysis of surrounding rock of multi-arch tunnel based on coupled fluid-solid theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007. 2007, 26(5) : 1056-1064. (in Chinese))
- [25] RUTQVIST J, TSANG C F. A study of cap rock hydro-mechanical changes associated with CO<sub>2</sub> injection into a brine formation [J]. Environmental Geology, 2002, 42: 296-305. DOI: 10.1007/s00254-001-0499-2.