

断层及滑动构造复合构造区煤层顶板含水层渗流特征及突水危险性分析

董东林¹, 王焕忠², 武彩霞¹, 陈书客¹, 吕镇岐¹, 李泳慧¹

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 平煤集团梨园矿, 河南 汝州 467500)

摘要: 断层及褶皱的存在乃是导致煤矿突水的最重要的因素。为了研究均存在断层及滑动构造的华北型煤田的直接充水含水层的渗流特征, 以平煤集团梨园矿宁庄矿井为例, 应用有限差分软件 MODFLOW, 在空间离散、应力期确定、源汇项嵌入处理的基础上, 对同时存在断层及滑动构造的内部边界进行了 WALL 的处理, 建立煤层顶板砂岩含水层渗流场模型, 并预测了第 5、10 年后的渗流场的变化规律。研究表明, 认为在平煤宁庄矿井四₇煤底板含水层的水位仍然保持较高的水平, 尤其当 WN 方向开拓经过滑动构造时, 突水的危险性仍然较大。

关键词: 采矿工程; 断层及滑动构造; 渗流特征; 有限差分法; 突水; 危险性分析

中图分类号: TD 31; O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)02 - 0373 - 07

SEEPAGE CHARACTERS OF ROOF AQUIFERS IN FAULTS AND SLIDING STRUCTURE AND RISK ANALYSIS OF WATER INRUSH

DONG Donglin¹, WANG Huanzhong², WU Caixia¹, CHEN Shuke¹, LU Zhenqi¹, LI Yonghui¹

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. Liyuan Coalmine of Pingmei Group, Ruzhou, Henan 467500, China)

Abstract: Faults and folds are the key factors causing water inrush in mine. In order to study the seepage characteristics of direct water falling aquifer existing faults and sliding structure, roof aquifers of coal seam No.4₇ are simulated using finite difference software, MODFLOW, based on the analysis of hydrogeological conditions in Ningzhuang coalmine. Seepage fields of roofs of coal seam No.4₇ from 2003 to 2006 are simulated through spatial dispersing, stress field determining, wall treat of faults and input of sources and sink items. Then, aquifer model is established. Finally, seepage field laws after 5 and 10 years later are presented. It is shown that the water level of roof aquifer is higher, while in the place of sliding structure in mining, the water inrush risk is still high.

Key words: mining engineering; faults and sliding structure; seepage characters; finite difference method; water inrush; risk analysis

1 引言

豫西是我国重要的煤炭产地之一。随着我国经济体制改革发展的深入, 采煤技术的技术手段不断

改进, 开采水平也不断增大。但随着开采深度增大, 地质条件更为复杂, 煤层开采受地下水的影响越来越大^[1~3]。因此煤矿水文地质工作则成了煤炭持续开采的关键内容和前提。

煤层顶板砂岩含水层的渗流场演化规律研究,

收稿日期: 2008 - 09 - 12; **修回日期:** 2009 - 01 - 09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400)

作者简介: 董东林(1969 -), 男, 博士, 1994年毕业于西安矿业学院水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事矿井水文地质方面的教学与研究工作。E-mail: ddl@cumtb.edu.cn

对于宁庄煤矿井尤为重要。近年来,随着煤层开采水平的不断提高,复杂条件下的矿井水防治研究取得了长足进步,尤其是在对煤层的顶板砂岩含水层富水性、涌水量大小等方面做了大量卓有成效的工作。江东明和张国明^[4]系统地分析张集煤矿 13-1 煤层顶板砂岩裂隙含水层的水文地质特征,阐述裂隙发育程度与岩性、地质构造的关系。陈忠胜等^[5]论述了影响工作面顶板砂岩含水层涌水量大小、持续时间的主要因素及其机制,分析认为,自然因素有地下水动力环境、构造复杂程度、砂岩层的岩性、砂岩含水层的厚度;其人为因素有工作面的采高、工作面的推进速度、顶板砂岩水的疏放程度。车鸿煊^[6]探讨了梁宝寺煤矿煤层顶板砂岩裂隙水的特征及其综合防治水技术方法。曾方禄等^[7]也应用矿井音频电透视技术,对济三煤矿二叠系山西组 3 煤层顶板砂岩及侏罗系蒙阴组底部砾岩充水含水层进行了探测。李红旗^[8]提出了利用钻孔简易抽水试验,求得基岩裂隙含水层渗透系数的计算方法。这些成果对于研究顶板砂岩含水层渗流场特征有着重要意义,但是由于对构造的复杂性和多样性以及断层相互作用的处理,仍是目前数值模拟的弱点,因此许多研究有待进一步深入。

平煤梨园矿宁庄矿井构造条件复杂,各种已经探明的断层 15 条之多,大规模的滑动构造一个,在开采过程中遇到的小断层无数,而该矿的水文地质工作开展十分薄弱,这为以后矿井的安全生产埋下了隐患。因此,对宁庄矿井的水文地质规律开展研究,对井田范围内的主要充水含水层充水体系和地下水模型进行研究,并进行数值模拟,最后根据渗流场特征,对突水的危险性进行了分析。

2 煤层顶板砂岩含水层特征

平顶山煤业集团梨园矿宁庄矿井四₇煤层顶板含水层位于下石盒子组(P₁²x)。该组根据岩性组合和含煤特征分为三、四、五煤段,与下伏地层整合接触。

目前四₇煤层是四₇采区的目标煤层。四₇煤层顶板含水层位于四煤段,由灰色、深灰色砂质泥岩、粉砂岩和浅灰色中~细粒石英砂岩、长石岩屑砂岩和煤层组成。底部 K₅ 砂岩为浅灰色、灰白色中立场是石英砂岩、岩屑长石石英砂岩,局部富集菱铁质鲕粒。K₅ 砂岩之上泥岩,砂质泥岩

通常发育紫斑。

四₇煤层顶板含水层主要是下石盒子组砂岩,由于局部出露地表,其接受大气降水补给,四₇煤层穿过多个正断层,正断层透水性相对较好,通过这些正断层间接补给区内含水层。水压较高,水量小,抽水试验时水位下降快,恢复水位困难,单位涌水量一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$ 型,矿化度小于 0.5 g/L 。

3 断层及滑动构造区煤层顶板含水层渗流模拟

本次对渗流模拟研究是通过 Visual MODFLOW (VMF) 软件进行的。VMF 是目前国际上最盛行、且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件包,它具有强大的可视化与模拟功能。水质点的向前、向后示踪流线模拟研究,任意水均衡域的水均衡研究,以及与其他常用软件(如 GIS, Excel 和 Surfer)的兼容,是它的主要特色。VMF 软件系统的最大特点,是将数值模拟过程中各个步骤有机地连接起来,从开始建模、输入和修改各类水文地质参数与几何参数、运行模型、反演校正参数,一直到显示输出结果,使整个过程从头到尾系统化、规范化^[9]。

VMF 是一个三维有限差分地下水流动模型,其基本方程^[10-13]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \omega = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad ((x, y, z) \in \Omega) \quad (1)$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \quad ((x, y, z) \in \Omega) \quad (2)$$

$$H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = \varphi_1(x, y, z, t) \quad (t \geq 0, (x, y, z) \in \Gamma_1) \quad (3)$$

$$K_{i,j} \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad (t \geq 0, (x, y, z) \in \Gamma_2) \quad (4)$$

$$T \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{w_j}} = -\frac{Q_j}{2\pi r_{w_j}} \quad (j=1, 2, \dots, v) \quad (5)$$

式中: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 分别为含水层沿 x , y , z 坐标方向的渗透系数(m/d); h 为含水层水头(m); ω 为源汇项(L/d); S_s 为含水层单位储水系数(1/m); Ω 为渗流区; $\partial h / \partial t$ 为水头随时间变化率(m/d); H_0 为水

头初值; φ_1 为第一类边界 Γ_1 上的已知函数; q 为第二类边界 Γ_2 上的单宽侧向补给量; n 为边界 Γ_2 的外法线方向; j 为抽水井的个数; Γ_1 为井的周边; r_w 为井的半径; T 为导水系数。

在本次地下水渗流模拟中, 边界条件和初始条件的确定是模拟正确与否的关键。平煤梨园矿宁庄矿井的边界条件为井田的除了 WN 一小部分侧向补给边界外, 东面、西面和南面均为边界断层所圈闭(见图 1), 在边界处理中, WN 作为 2 类边界(流量边界)处理; 边界断层均为正断层, 在矿井精查阶段和开拓阶段, 发现断层带中均含大量的断层泥, 而且不导水, 因此作为 0 通量边界处理。因此梨园矿宁庄矿井是一个 WN 有补给的独立的水文地质单元。初始条件以 2003 年调查的地下水位(包括矿区内的水文观测孔)和当时的水井抽水量和矿井排水量、水文地质参数等为初始值进行模拟。

3.1 空间离散

根据研究区的含水层结构、边界条件和地下水渗流场特征, 将模拟区剖分为 60×60 个规则矩形网络, 单元数为 1 200 个/层。根据宁庄矿井水文地质条件, 将模型概化为 2 层(四₇煤层顶板隔水层(泥岩)、四₇煤层顶板砂岩含水层), 共有 $1\ 200 \times 2 = 2\ 400$ 个单元, 剖分情况如图 1 所示。

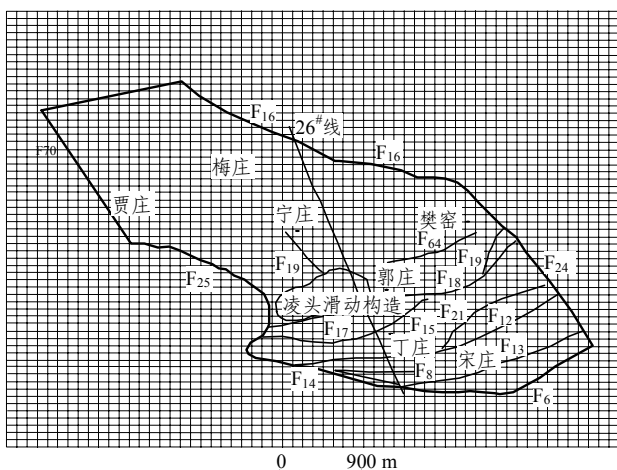


图 1 宁庄矿井有限差分剖分图

Fig.1 Diagram of finite difference mesh generation in Ningzhuang Mine

3.2 应力期确定

依据收集到的地下水资料, 宁庄矿井的数值模拟期为 2003~2006 年。根据自然月将整个模拟期细分为 36 个应力期, 每个应力期又分为 12 个时间步长。在每个应力期内, 所有外部源汇项的强度保持不变。在 2003 年, 初始渗透系数的分布见图 2(图

中为大地坐标, 下同), 其他初始水文地质参数(储水系数和导水系数)可通过抽水试验, 根据 S. P. Neuman 理论计算出来。以 2003 年的水位作为模型的初始水位, 2006 年的水位作为拟合水位。

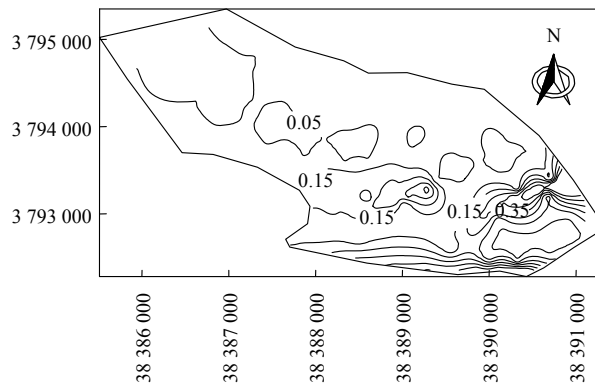


图 2 2003 年四₇煤顶板砂岩渗透系数等值线(单位: m/d)

Fig.2 Isolines of permeability coefficients of sand rock in coal seam roof No.47 in 2003(unit: m/d)

3.3 断层及滑动构造条件(边界)的处理

边界条件的研究是建立矿井水文地质立体模型的一个重要方面。在宁庄矿井中, 外边界有贾庄正断层 F_{70} , 毛寨正断层 F_{25} , 孟庄正断层 F_8 , 樊窑正断层 F_{24} , 梅庄正断层 F_{16} , 大张正断层和西北部的补给边界, WN 部边界处理为二类边界。内边界包括剩余的 9 条正断层、逆断层以及陵头滑动构造等(见图 3)。另从 26[#]线的剖面图(见图 2, 即图 1 中的 26[#]线)可以看出, 四₇煤层和煤层顶板数次被断开, 使得渗流场更为复杂, 尤其是处理断层和陵头滑动构造的影响上。

在前人对断层等构造边界的处理中, 仅仅考虑了单个断层的作用, 简单地赋以固定的影响范围, 而忽视了断层的相互作用。因此在模型模拟中, 将断层看作是一个系统, 具体地点的影响域根据该点处的每个断层的性质及断距, 采用不同规模的 WALL 模式进行处理, 尤其在断层交汇部位(复合构造), 根据断层的产状和断距, 在交汇部位采用各断层的 Thickness 之和(见表 1)。另外在对滑动构造处理中, 将其分为 3 个方面进行考虑, 滑动构造东翼、滑动构造西翼和滑动构造核部。滑动构造西翼与断层 F_{17} 接近, 而且靠近 26[#]线东翼的四₇煤, 对东翼的 F_{17} 附近的四₇煤的开采影响较大; 滑动构造的核部与 F_{18} 断层对接, 且与 F_{17} , F_{18} , F_{63} 和 F_{15} 连通(见图 3), 形成局部统一渗流场, 所以在 WALL 处理中, 赋以相近的 Thickness 值。

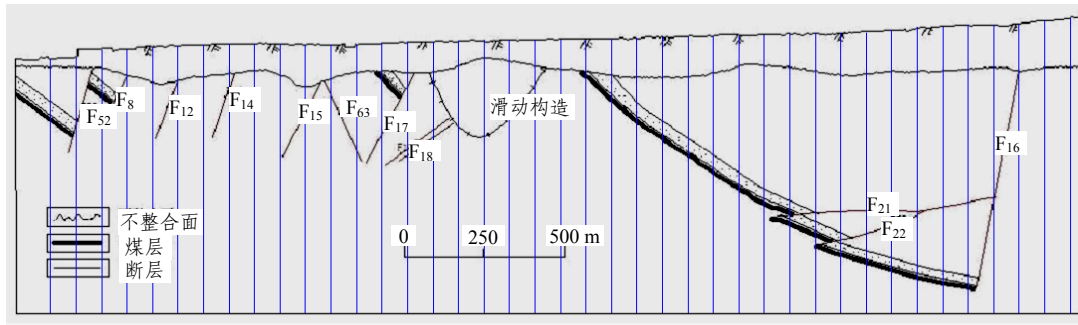


图 3 26#线中断层及滑动构造的分布图

Fig.3 Profile of faults and sliding structure distributions in line 26

表 1 研究区断层和滑动构造及 MODFLOW 处理

Table 1 Faults and sliding structure and their treatments with MODFLOW

断层名称	产状			断距/m	渗透系数/(m · d ⁻¹)	MODFLOW 中 Thickness 的值
	走向	倾向	倾角/(°)			
孟庄正断层 F ₈	N80°~85°W	S	45~50	200~340	0.154~0.859	80
郭庄正断层 F ₁₈	EW~N60°E	S~SE	25~35	70~165	0.067~0.373	35
樊窑正断层 F ₂₄	N40°W	SW	65	75	0.069~0.380	37
毛寨正断层 F ₂₅	N55°E~S65°	SE~S~W~NW	40~50		0.009~0.054	5
贾庄正断层 F ₇₀	N40°	SW	60	100	0.096~0.536	50
梅庄正断层 F ₁₆	N72°W~N55°W	SSW	75~85	160	0.039~0.214	20
逆掩断层 F ₂		NW~S~W	0~5	10~100	0.115~0.644	60
断层 F ₁₉	N40°	SW	40		0.009~0.054	5
正断层 F ₆₁	N80°	NE	55	85	0.082~0.462	43
正断层 F ₆₂	N75°	SSW	60	10~45	0.019~0.107	10
正断层 F ₆₄	N80°E	SSE	45	50	0.048~0.268	25
正断层 F ₂₀	N50°E	SE	65	15~20	0.019~0.107	10
逆掩断层 F ₂₁	EW	S	15	15~30	0.154~1.150	80
正断层 F ₁₇	N70°E	S	55	100~200	0.096~0.536	50
正断层 F ₁₅	S80°E~N80°E~EW	S	45	20~60	0.039~0.214	20
滑动构造核部					0.212	90
滑动构造东翼					0.150	60
滑动构造西翼					0.100	40

3.4 源汇项处理

梨园矿宁庄矿井田南部庇山、狼牙山，北部牛头山均有砂岩含水层出露。三叠系砂岩含水层受大气降水补给，局部区段以上层滞水赋存，旱季常干枯，对煤层开采没有影响。二叠系砂岩含水层中以大占砂岩、沙锅窑砂岩、田家沟砂岩、平顶山砂岩沉积厚度较大、赋存稳定，在纵向上具有明显的多波回旋律。平顶山砂岩出露位置较高、距离煤层较远，遇隔水板后往往以下降泉形式排泄，流量不大，动态变化常具有明显的季节性。其单位涌水量一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$ 型，矿化度小于 0.5 g/L。

在 Visual MODFLOW 中，降水入渗补给量可应用 Recharge 程序包进行处理，其他源汇项则采用井流程序包处理。

3.5 模型识别和验证

根据模型研究区的水文孔资料，选择已有水文长观孔 2642，2637，2640 及 2644 作为重点水位拟合孔。计算水位和模拟水位曲线如图 4 所示(因篇幅关系，只给出了 2642 孔的拟合图)。由图 4 可知，最大拟合相对误差为 2.4%，各重点孔的拟合效果好(最大拟合相对误差为 3.1%)。

3.6 水文地质参数识别

水文地质参数是表征含水介质储水、释水和地

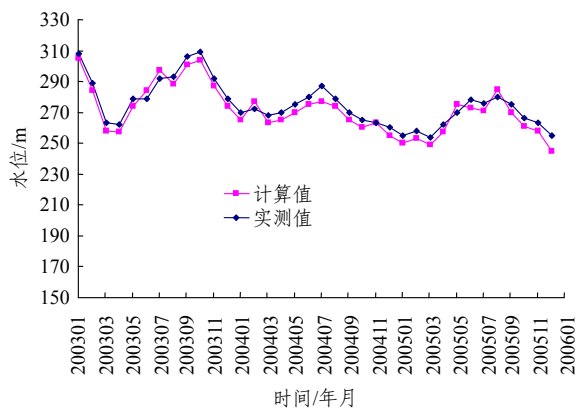


图 4 四₇煤层顶板砂岩含水层水位拟合图

Fig.4 Water level fitting of sand aquifer on the coal seam No.4₇

下水运动能力的指标。分析、研究、求取水文地质参数,是本次建立煤层底板含水系统的渗流场模型的关键。

本次模拟的研究区的初始水文地质参数(包括渗透系数、储水系数等)是基于宁庄矿井精查期间(即煤炭工业部一二九煤田地质勘探队提交的 2[#]井田精查地质报告)所做的抽水试验,通过克里金差值方法获得的。

经过模型拟合和验证,效果良好,拟合相对误差只有 2.4%,从而获得本次模拟的宁庄矿井的渗透系数分区如图 5 所示;识别后的渗透系数见表 2。

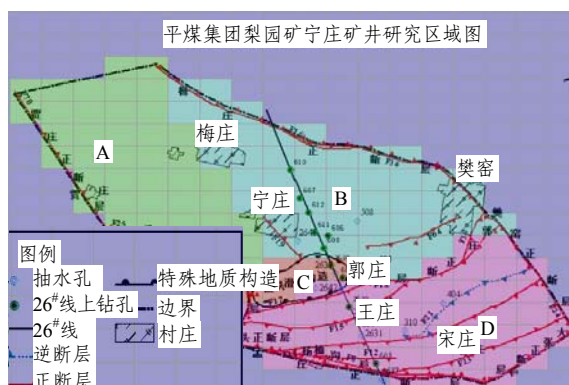


图 5 识别好的渗透系数分区图

Fig.5 Map of permeability coefficient zoning after being identified

表 2 识别后的渗透系数

Table 2 Permeability coefficients after being identified

渗透系数/(m·d ⁻¹)	A 区	B 区	C 区	D 区
K_x	0.049 0	0.050	0.20	0.055 0
K_y	0.049 0	0.050	0.20	0.055 0
K_z	0.004 9	0.005	0.02	0.005 5

从图 5 可以看出,在滑动构造和断层的交汇部位,出露的四₇顶板砂岩得到很好的补给,研究区的渗流场的北部弱于南部,这明显受控于该区构造的控制作用。

4 煤层顶板砂岩含水层渗流场预测及突水危险性分析

根据突水系数,突水的危险性由水压和隔水层厚度决定。水头越高,有效隔水层厚度越薄,突水危险性越大,因此后面结合渗流场预测结果,来分析突水的危险性。

应用识别好的渗流模型预测了第 5, 10 年的渗流场的变化规律(见图 6)。四₇煤层顶板砂岩含水层的水位持续下降,整体呈现出西北部、东南部水头高,中心底的特点。在 2011 年形成了以宁庄为中心的降落漏斗,中心水位只有 268 m 左右(见图 6(a)),漏斗边缘在 274 m 的等水位线处,在宁庄矿井西北部,其水头增大,但煤层顶部与砂岩含水层之间的隔水层厚度也比较大,因此其突水的危险性不是很大(突水系数小于 0.3),在郭庄和下庄(滑动构造和边界断层的交汇部位),有效隔水层厚度降低,其突水的危险性明显增大(见图 7(a)),超过了 0.6,根据矿井水文地质规程,受构造破坏块段突水系数一般不大于 0.6(即突水临界值为 0.6),因此在郭庄、丁庄附近开采中很容易造成突水,应该注意降低砂岩含水层的水压;而在 2016 年降落漏斗的范围逐渐扩大,在郭庄、丁庄和宋庄也完全处于扩展后的降落漏斗中,水位继续下降,但仍保持较高水平(见图 6(b)),在贾庄水位出现明显的波动,这与开拓方向是一致的。当向 WN 方向开拓经过郭庄和丁庄附近的滑动构造时,由于水位高且叠加在断层、滑动构造的核部汇水部位,有效隔水层厚度变小,使得突水的危险性较大,但是突水系数大于 0.6 的范围则明显变小(见图 7(b)中圈闭部分),突水系数在 0.5 范围内的却由于开采扰动的影响,突水的危险性加大,因此在以后的开采过程中应充分予以重视西部、西北部的探放水工作。另外四₇煤层顶板的砂岩含水层在牛头山、牛蛋山以及鹿山均有出露,且在滑动构造和断层的交汇出分布,主要接受大气降雨的补给,因此在开采过程中,时刻注意滑动构造和气象条件的影响,应建立矿井涌水量和气象条件的日观测制

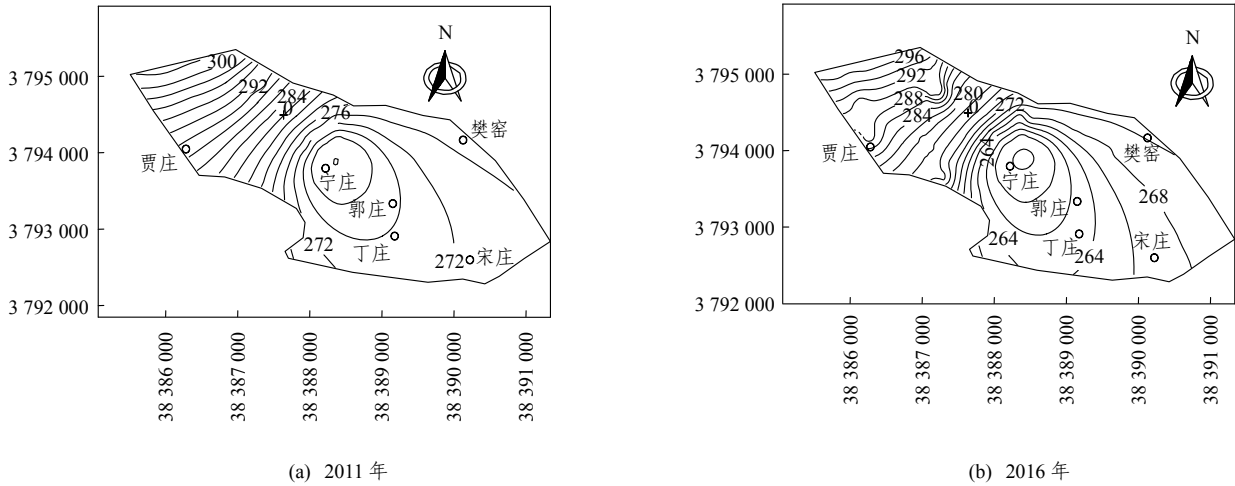


图 6 四₇煤顶板砂岩含水层渗流场(单位: m)
Fig.6 Seepage fields of sandstone as a roof of coal seam No.4₇(unit: m)

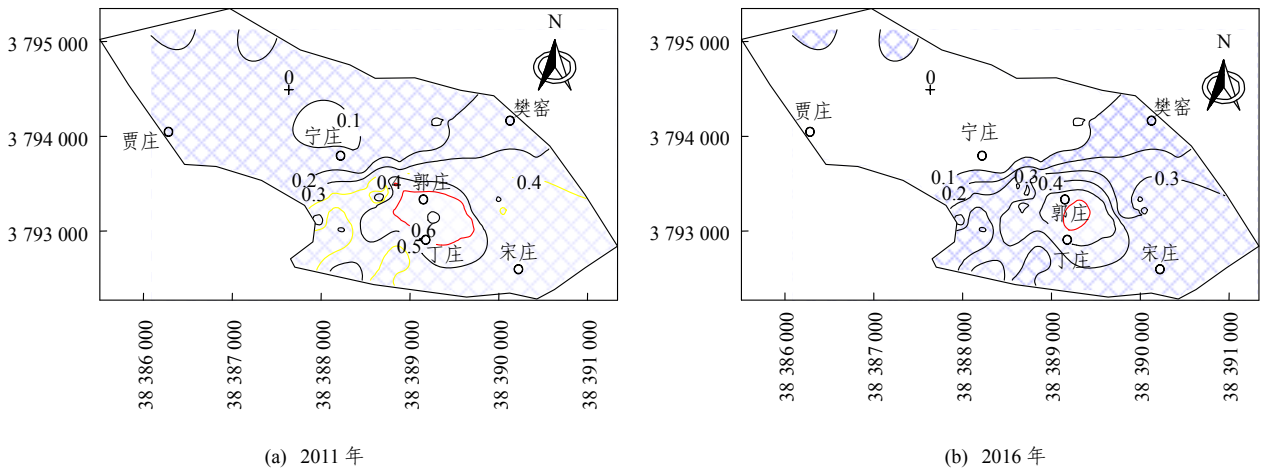


图 7 突水系数等值线图
Fig.7 Contour maps of water inrush coefficients

度,对其相关性进行研究,从而提前采取相应措施,以减轻大气降雨的影响。最后应建立完善的井下排水系统,矿井排水系统应按照加大东翼区井下排水能力,以保证进行必要的砂岩含水层的水文地质钻探,注意流砂层,降低四₇顶板砂岩含水层水位,确保安全开采。

在宁庄矿井田具体应用中,采用本次研究成果,成功通过滑动构造,取得了显著的经济效益和社会效益。

5 结 论

(1) 重点研究了在断层和滑动构造区中构造的模拟处理。利用 WALL 模块对断层及滑动构造的复

合部位进行了处理,解决了相互作用的边界处理问题。

(2) 基于 MODFLOW 对平煤集团梨园矿宁庄矿井的渗流场进行了模拟和预测,并进行了突水危险性分析,认为在 2011,2016 年四₇煤层顶板砂岩含水层的地下水位具有西北、东南高,中间低的规律,且水头处于较高水平,研究认为在郭庄和丁庄(滑动构造和断层的交汇部位),突水系数大,突水危险性高,在宁庄矿井的北部突水危险性小。

(3) 根据模拟结果,分析了突水危险性,认为注意滑动构造和气象条件的影响,应建立矿井涌水量和气象条件的日观测制度,对其相关性进行研究,注意流砂层,降低四₇顶板砂岩含水层水位,确保安全开采。

参考文献(References):

- [1] 武强, 张志龙, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42 - 47.(WU Qiang, ZHANG Zhilong, MA Jifu. A new practical methodology of the coal floor water inrush evaluating method I[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42 - 47.(in Chinese))
- [2] 武强, 金玉洁. 华北型煤矿矿井防治水决策系统[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.(WU Qiang, JIN Yujie. Mine water control decision-making system in North China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [3] 葛亮涛, 叶贵钧, 高洪烈. 中国煤田水文地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 5 - 10.(GE Liangtao, YE Guijun, GAO Honglie. Hydrogeology of coalmine in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000: 5 - 10.(in Chinese))
- [4] 江东明, 张国明. 张集矿 13 煤顶板砂岩裂隙水特征及防治[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(增): 150 - 152.(JIANG Dongming, ZHANG Guoming. Fracture water characteristics in coal seam roof No.13 sandstone and related control measures in Zhangji coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(Supp.): 150 - 152.(in Chinese))
- [5] 陈忠胜, 常文林, 张景钟. 影响徐州矿区煤层顶板砂岩涌水的主要因素及机制[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(4): 44 - 47.(CHEN Zhongsheng, CHANG Wenlin, ZHANG Jingzhong. Main factors and mechanics influencing water inrush from roof sandstone[J]. Coal Geology and Exploration, 2003, 31(4): 44 - 47.(in Chinese))
- [6] 车鸿焕. 梁宝寺煤矿顶板砂岩裂隙水防治技术[J]. 华北科技学院学报, 2007, 4(2): 8 - 10.(CHE Honghuan. Prevention and control of the sandstone fracture water in the roof in Liangbaosi coal mine[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2007, 4(2): 8 - 10.(in Chinese))
- [7] 曾方禄, 李慕平, 高建华. 矿井音频电透视技术探查顶板砂岩水——以济三煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 74 - 76.(ZENG Fanglu, LI Muping, GAO Jianhua. The voice frequency electric perspective technique for detecting top sand water: a case study at Jisan coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2007, 35(6): 74 - 76. (in Chinese))
- [8] 李红旗. 一个求基岩裂隙含水层渗透系数的实例[J]. 西部探矿工程, 2006, (11): 120 - 121.(LI Hongqi. An example of obtaining permeation coefficient in bedrock[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, (11): 120 - 121.(in Chinese))
- [9] 贾金生, 田冰, 刘昌明. Visual MODFLOW 在地下水模拟中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(2): 71 - 78.(JIA Jinsheng, TIAN Bing, LIU Changming. Visual MODFLOW and its application to groundwater simulation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(2): 71 - 78.(in Chinese))
- [10] 武强, 李树文. 地下水渗流系统灰色数值仿真模拟研究[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(1): 122 - 133.(WU Qiang, LI Shuwen. Research on grey simulation of groundwater seepage system[J]. Science in China(Series D), 2002, 32(1): 122 - 133.(in Chinese))
- [11] 武强, 朱斌, 徐华, 等. MODFLOW 在淮北地下水数值模拟中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(4): 500 - 503.(WU Qiang, ZHU Bin, XU Hua, et al. Application of MODFLOW to groundwater numerical simulation in Huaibei City[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(4): 500 - 503.(in Chinese))
- [12] 武强, 董东林, 石占华, 等. 可视化地下水模拟评价新型软件系统(Visual MODFLOW)与矿井防治水[J]. 煤炭科学技术, 2000, (2): 18 - 20.(WU Qiang, DONG Donglin, SHI Zhanhua, et al. Visual MODFLOW and mine-water prevention and cure[J]. Coal Science and Technology, 2000, (2): 18 - 20.(in Chinese))
- [13] 王仕琴. 地下水模型 MODFLOW 与 GIS 的整合研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国地质大学, 2006.(WANG Shiqin. Integration research on groundwater model MODFLOW and GIS[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.(in Chinese))