

合山煤田矿井涌水量的数值模拟探讨

刘国¹, 毛邦燕¹, 许模¹, 周小义²,

(1. 成都理工大学国家地质灾害防治与地质环境保护实验室, 成都 610059;

2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

[摘要] 矿井涌水问题一直是困扰煤矿安全生产的重大问题之一。如何准确的预测煤矿井下涌水量一直是国内外专家、学者、工程技术人员都在努力探求的问题, 尤其对于地质条件复杂的煤矿井下涌水量的预测评价更为突出。本文在充分认识和掌握了研究区水文地质条件、含水介质的空间结构, 建立了与实际情况相符合的数学模型, 重点研究了模型的边界条件、模型的时间和空间离散、含水介质的水文地质参数的确定, 制定了预测模型的检验标准, 并运用目前较为流行的地下水数值模拟软件 Visual Modflow 对研究区进行了长达30年的井下涌水量数值模拟, 得出了比较合理的各矿各阶段的井下涌水量。

[关键词] 合山煤田 复杂地质条件 矿井涌水量 数值模拟

[中图分类号] P641.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2007)04-0098-06

矿井涌水一直都是煤矿安全生产中倍受重视的问题。涌水量预测的准确与否将直接影响矿山设计部门是否能准确的设计井下排水方案, 制定合理的防治水措施。就矿井涌、突水问题本身来说就是一个复杂的地质问题, 如果再叠加上人类采煤活动带来的诸多方面对矿井涌、突水的影响, 就使原本复杂的地质问题变得更加难以被人们认识、了解。

1 研究区水文地质概况

拟选研究区——合山煤田位于广西山字型构造马蹄形盾地西侧。整个矿区处于合山向斜内, 该向斜是一个东陡西缓、北阔南窄, 轴向20°左右的不对称向斜构造; 向斜轴靠近煤田东侧, 东翼岩层倾角陡峻, 一般60°~80°, 局部倒转, 弧形逆断层发育, 并发生有次级褶曲; 西翼平缓, 倾角由北往南增大, 北部和东北部5°~6°, 中部7°~9°, 南部15°~20°。区内岩溶发育, 表现出明显的平面上的分带性和垂向上分层性。本区出露的地层为三叠系(T)至石炭系(C)地层, 第四系(Q)松散层主要分布在谷地、洼地和山麓地带。

区内合山组与大隆组分界线以内, 由于存在大隆组(P_2d)和罗楼组(T_1L^1)两层厚度较大、阻水性

能良好的隔水层, 使得区域在垂向上被分成了上、下两个含水层位, 即上部含水层(浅部含水层 $T_1b + T_1L^2$)、下部含水层(深部含水层 $P_2h + P_1m^2$), 且上下两层之间不存在明显的水力联系。上部含水层为潜水含水层, 主要分布在煤田的表浅部位以及四煤线以外的深部区域, 主要接收大气降水的补给; 下部含水层为埋藏的承压含水层, 主要分布在四煤线以内大隆组以下的合山向斜内, 主要接收北面地下水的侧向补给和红水河影响段的河水侧渗补给。

2 模型的建立

2.1 数学模型的建立

合山煤田地下水都属于合山向斜岩溶水, 在合山组与大隆组分界线外缘地区由裸露至半覆盖型岩溶区为主, 地下水以降雨的入渗或灌入补给为主。在峰丛洼地区岩石裸露, 入渗系数在0.40~0.56; 在谷地和平原区, 有大面积第四系松散层覆盖, 降水和灌溉水通过土层以入渗形式补给为主, 入渗系数一般为0.2~0.3; 合山组与大隆组分界线以内, 浅部含水层($T_1b + T_1L^2$)主要接受大气降水的补给; 处于向斜盆地深部的合山组和茅口阶灰岩含水岩层中的地下水, 则以北面地下水的侧向补给和红水河

[收稿日期] 2007-03-01; [修订日期] 2007-06-12。

[第一作者简介] 刘国(1971年—), 男, 2002年毕业于成都理工大学, 获硕士学位, 现为成都理工大学教师, 主要从事研究方向为环境科学与工程、环境地质。

影响段的河水侧渗补给为主。向斜东翼受 F3 逆断层组的影响,使 F3 逆断层组东侧的地下水系统向盆地深部含水系统补给径流极为微弱。根据位于煤田南部向斜东翼附近的 0911、1521 孔的水位观测表明,东翼的地下水对两孔水位影响不明显。因此深部含水层不接受合山向斜及向斜东翼区域地下水的补给。

在天然状态下,红水河是该区地下水排泄基准

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W + Q_i \delta(x - x_i, y - y_i, z - z_i) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \\ H(x, y, z, t_0) = H_a(x, y, z) \Big|_{t=0} \\ H(x, y, z, t) = H_b(z, y, z, t) \Big|_{t=t_0} \\ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \cos(n, z) \Big|_{\Gamma_1} = 0, t \geq t_0, x, y, z \in \Gamma_1 \\ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \cos(n, z) \Big|_{\Gamma_{2,3}} = q_1(x, y, z, t), t \geq t_0, x, y, z \in \Gamma_{2,3} \end{cases}$$

式中:

K_{xx}, K_{yy} 和 K_{zz} —分别为渗透系数在 x, y 和 z 方向的分量,单位(LT^{-1});

h —水头(L);

W —补给强度(m^3/d);

S_s —孔隙介质的贮水率(L^{-1})或给水率(L^{-1});

t —时间(T);

Q_i —表示区域内第 i 个井的井下涌水量(m^3/d);

$\delta(x - x_i, y - y_i)$ —对应于井坐标的狄拉克函数;

H —表示承压水水头;

Γ_1 —表示第二类边界(隔水边界);

Γ_2 —表示第一类边界(定水头边界);

Γ_3 —表示第三类边界(混合边界)。

2.2 模型的边界条件概化

岩土体中的地下水渗流特点是由渗透介质的空间结构特征来描述的,表征这种特性的概念模型,是建立岩土体渗流数学模型的基础。在实际工作中,有些单元水头值已知,而有些单元可能位于所研究的问题边界之外,为此,Modflow 将计算单元分成了三大类:定水头单元、无效单元和变水头单元。

2.2.1 现状条件下边界条件概化

北部边界:根据 zk1、zk1-1、zk1-2 和 zk1-3 水位观测资料表明在枯季地下水位无明显变化,表明无侧向补给,而在雨季观测孔水位变化较大,主要是由于该边界位于研究区北部的岩溶裸露区,地下水主要受降雨的影响。因此,把北部边界概化为变

面,各层位地下水均通过水平和深部径流汇集于地下河或地下水强径流带,以集中径流的形式向红水河排泄;在煤矿开采条件下,由于井下的疏干排水使该区形成了较深的疏干降压(落)漏斗,而且漏斗中心水位远低于红水河水位,使含水层出现反向水力坡度,造成红水河河水倒灌现象。

根据以上研究区的水文地质概况,建立了如下的数学模型:

水头边界。

东部边界:东部构造比较复杂,断层较为发育,规模最大的为 F₃ 断层组,它由三条以上基本同向的压性断裂组成,而且挤压构造作用强烈,使得向斜东翼岩层紧密,裂隙闭合,阻碍了地下水运动,使断层及其挤压带以东的地下水与向斜盆地深部的承压水含水岩层水力联系微弱。故将概化为隔水边界。

西部边界:该边界主要位于红水河段。该河段由鹅滩至十五滩流程范围内基本都直线切割煤系含水岩层,使得该河段既是天然状态下地下水的排泄边界,又是矿区开采强排疏干条件下的地下水补给边界。因此,把该段红水河概化为定水头边界。

南部边界:该段主要接受西面区域的地下水补给,因此该区段概化为变水头边界。

2.2.2 边界条件的动态演化

边界条件的动态演化是一个自然而且普遍存在的问题,但却总是被人们所忽视。有的时候由于水文地质条件的复杂性,很难查明和确定边界条件动态演化的规律,但是如果不重视这个问题,则所建立起来的数学模型的可用性及精确程度是不能保证的。因此,本文在建立区内的水文地质概念模型的时候收集、整理了大量关于边界动态演化的资料,有效的控制了研究区内边界条件的动态演化规律。

研究表明,在未来的采煤过程中区内各边界的性质不会发生根本的变化,但边界条件的取值要发生很大变化。北部边界主要受降雨的控制,采用多年平均降雨量来代替;西部边界主要根据下游桥巩

电站建成后回水水位确定;南部边界主要依据红水河水位壅高计算确定。

2.3 模型的空间离散与时间离散

模拟空间范围为 X 方向 14400m, Y 方向 28800m, Z 方向最大厚度 400m。在平面共剖分单元 72×144 个;垂向上,分为大隆组以上层、合山上段、合山上段底板到四煤层顶板、四煤层、四煤层底板到合山下段底板、茅口阶上段至标高为 -1300m 共 6 层。如此剖分后每层单元格 10368 个,6 层共剖分了 62208 个单元。

在进行模型时间离散时主要根据研究区的降雨量以及红水河水位的逐月变化规律,将一个完整水文周期划分为 12 个应力期(stress period),365 个时段(time steps)。

2.4 水文地质参数的选取

复杂地质条件下含水介质的渗透性受多方面的因素的影响,利用单一方法求解出来的含水介质的渗透系数 K 值精度不能达到所需要满足的精度。因此,本文采用了传统方法与反演方法相结合的综合求参法来求解研究区的渗透系数 K 值。既把传统方法计算出来的一系列渗透系数 K 值按照区域的富水性特征进行初步参数分区,然后输入计算机模型。利用计算机模型的反演调参功能,不断的调式输入的参数值及分区,最终得出符合实际情况的渗透系数参数分区及对应的值。

3 模型校验

在建立好计算机模型以后,首先进行初始渗流场的拟合。本次拟合主要利用了研究区现有的 54 个长观孔的观测资料,采用采用克里格(kriging)插值法计算全区地下水位,作为初始水头赋给计算模型的各个单元,进行一个时间段的稳定流模拟,然后利用稳定流模拟结果作为模型的初始水位。

为了掌握模型的拟合精度,在进行三维模型校验的时候把 54 个长观孔设置为模型中的观测孔,然后把实际观测值和拟合水位值进行比较以统计本次模拟的拟合精度(表 1)。另外,在煤田北部、南部分别找出了一个具有代表性的长观孔,研究其拟合水位的历时过程。长观孔分别为 1704 孔、0802 检、0109 孔,其观测水位与模拟水位历时曲线图如图 1、图 2、图 3 所示。

由表 2 可以看出:水位拟合误差 $<3\%$ 的长观孔总数为 29 个钻孔,占总的长观孔的 53.7%;水位拟合误差在 $3\% \sim 5\%$ 的长观孔总数为 22 个钻孔,占

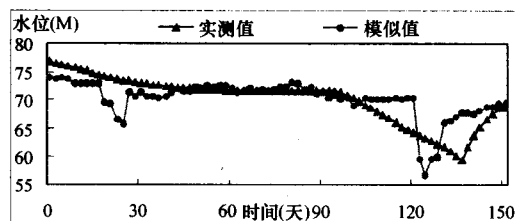


图 1 1704 孔观测水位与模拟水位历时曲线图

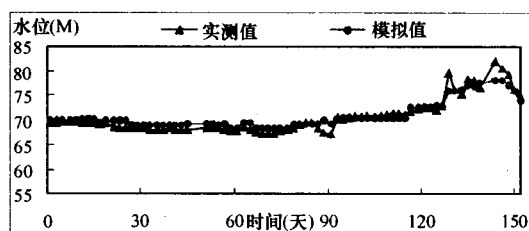


图 2 802 检观测水位与模拟水位历时曲线图

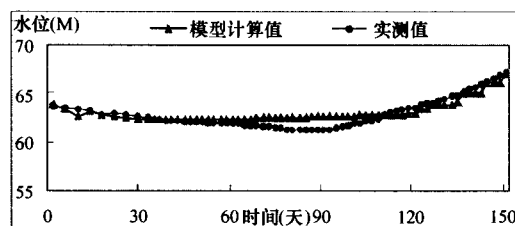


图 3 0109 孔观测水位与模拟水位历时曲线图

总的长观孔的 40.7%;水位拟合误差 $>5\%$ 的长观孔总数为 3 个钻孔,占总的长观孔的 5.6%。由此可以看出本次的拟合结果误差应该在工程允许的范围之内,可用于后续研究区内煤矿井下涌水量的预测模拟。

通过图 1、图 2、图 3 可以看出,观测点在拟合模拟时间段内的观测水位与模拟水位基本吻合,部分不一致的地方主要是由于偶然误差引起的,但是这些误差都在本次的精度范围之内。所以,可以认为本次所建立的研究区的水文地质模型是比较符合实际的,可用于后续研究区内煤矿井下涌水量的预测模拟。

4 涌水量预测模型检验标准

建立预测模型的目的就是为了能够正确的去预报未来,但是如何去确定一个预测模型结果的准确性呢?因此,必须制定一个预测模型的检验标准来对所建立的预测模型的精度进行全面检验和评价。

表1 拟合误差表

孔号	初始水位	拟合水位	误差	孔号	初始水位	拟合水位	误差	孔号	初始水位	拟合水位	误差
1704	73.7	74.2	0.61	135A	58.4	58.1	0.50	ZK3	99.6	95.3	4.30
4412	116.8	112.2	3.90	1521	65.2	62.7	3.80	ZK4	73.3	71.6	2.40
0102	68.1	66.8	1.80	1700B	70.7	70.8	0.20	ZK5	71.4	72.6	1.80
0104A	19.6	18.9	3.60	1701	70.3	70.1	0.20	ZK5-2	72.1	74.3	3.00
0106	18.6	16.9	9.00	1704(p)	72.8	76.2	4.60	ZK5-3	71.3	72.3	1.40
0109	63.7	63.4	0.42	2115	60.0	57.0	5.00	ZK5-4	71.5	73.4	2.60
0302	81.5	80.5	1.30	2410A	58.6	56.2	4.10	ZK5-5	71.4	73.0	2.20
03B	72.2	74.6	3.40	2513	88.1	84.0	4.70	ZK5A	71.0	71.7	1.00
0402A	58.5	54.8	6.20	2812	62.1	59.3	4.60	ZK7	68.0	66.5	2.20
0404 检	58.1	54.0	7.00	2901	74.5	72.1	3.20	ZK8	67.1	65.1	3.00
0605	65.7	63.5	3.40	303A	70.9	71.3	0.60	ZK9	68.0	66.2	2.60
0700B	69.0	68.3	1.00	3902	68.9	68.0	1.40	截5	86.3	82.0	4.90
0703	59.0	57.7	2.10	802 检	69.4	68.9	0.60	思甘井	72.2	74.9	3.80
0705	42.3	40.8	3.50	ZK1	128.5	123.7	3.70	南1	82.5	81.8	0.89
0801	57.4	56.7	1.20	ZK1-1	132.7	128.6	3.10	南2	82.5	82.0	0.63
0902	57.7	57.1	0.98	ZK1-2	132.5	136.8	3.30	石村井	89.7	90.8	1.30
0905	84.5	88.0	4.10	ZK1-3	132.4	127.7	3.50	水2	73.5	72.7	1.10
135A	58.4	58.1	0.50	ZK2	101.4	97.3	4.10	注2	72.6	74.9	3.20

表2 各矿涌水量模拟值(m³/h)

时段	矿井名称	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	柳花岭	1190	1194	1212	1267	1390	1458	1459	1421	1312	1289	1259	1197
	里兰中北	2704	2682	2702	2769	2960	3222	3317	3148	3078	2964	2927	2744
	石村二号井	1918	1920	1931	1964	2039	2082	2083	2059	1994	1979	1961	1923
	石村竖井	2905	2892	2909	2969	3130	3325	3389	3265	3189	3107	3074	2934
	中许井	2433	2412	2429	2492	2819	3078	3174	3006	2944	2684	2649	2472
	上布井	1905	1892	1903	1943	2148	2310	2370	2265	2225	2063	2041	1930
	平阳斜井	2478	2458	2472	2524	2807	3037	3124	2975	2930	2698	2670	2514
	平阳168 北翼	1419	1426	1448	1512	1707	1774	1768	1732	1600	1525	1490	1426
	平阳168 南翼	1079	1097	1125	1211	1405	1439	1402	1392	1198	1177	1131	1079
	柳花岭	1924	1915	1930	1977	2086	2163	2173	2128	2041	2012	1987	1923
2040	石村二号井	3519	3517	3528	3562	3644	3715	3730	3687	3630	3602	3584	3529
	中许井	4784	4736	4770	4888	5544	6078	6282	5936	5835	5297	5231	4867
	上布井	5204	5153	5186	5305	5981	6537	6752	6391	6295	5734	5667	5290
	平阳斜井	3319	3293	3311	3374	3726	4012	4122	3936	3883	3594	3559	3364
	平阳168 北翼	1637	1645	1668	1738	1952	2027	2021	1981	1837	1753	1715	1644
	平阳168 南翼	1372	1385	1409	1481	1656	1696	1671	1655	1496	1463	1424	1373
	王所竖井	3288	3272	3287	3336	3585	3778	3847	3723	3671	3479	3451	3317
	中岭竖井	5094	5059	5083	5167	5638	6020	6165	5919	5849	5463	5416	5154

注:由于本文篇幅有限,本表只列出了2010年、2040年的矿井涌水量模拟值。

在进行区内矿井涌水量预测时,虽然知道未来各矿在各阶段的开采水平,但是由于该煤田含水介质极为复杂。历史资料表明不能将开采水平作为矿井地下水位降低的最低水平,也就是说在我们进行预测的时候矿井涌水量与水位两个参数都是待求的,这就给我们制定井下涌水量预测模型的检验标准增加了难度。在这种情况下,最好的处理方法就是根据历史的矿井涌水量和地下水位观测数据建立涌水量与矿区地下水位(或者矿区地下水位降深)

之间的数学关系。但是,区内历史矿井涌水量资料缺乏,该方法无法在实际应用中实现。本次采用数值模拟方法,利用数学模型的反馈调节功能,通过涌水量调试与水位拟合来实现对开采状态下各矿井涌水量的预测。

从研究区的水文地质条件来看,虽然未来的几十年和现状年状态下各矿井下开采水平不同,但区内含水介质的渗透性能并没有发生太大的变化。所以,在同一开采水平情况下只要保持相对不变的地

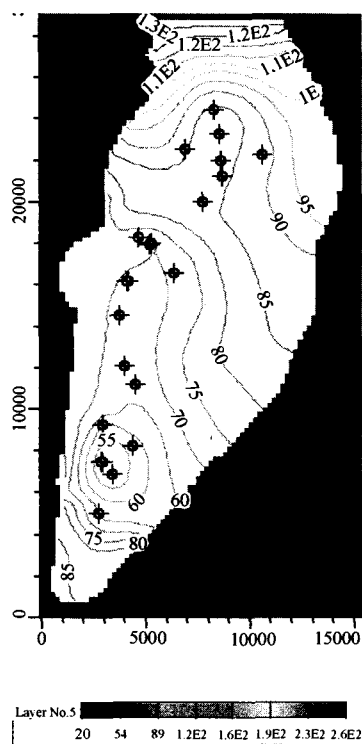


图4 开采状态下2010年流场图

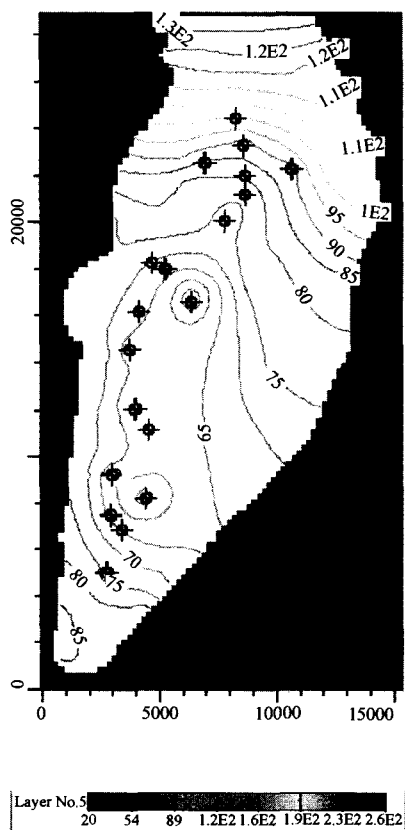


图5 开采状态下2040年流场图

煤要求;对于不同开采水平而言,由于该区岩溶发育规律是随深度增加而减弱的,含水介质的渗透性同样也遵循这一规律。因此,本文尝试采用水位折减法来处理这种情况。折减系数的选取主要根据各矿所处渗流区的渗透系数 K 的折减来获取。依此为水文地质模型的约束条件,经反复调试各矿涌水量使井下地下水位保持在该安全地下水位,并将各矿井水位拟合误差控制在 $<5\%$ 以内,这样经过反复调试的结果就是研究区内各矿未来井下涌水量值。

5 模拟结果分析

本次采用三维数值模拟方法预测井下涌水量,以控制各矿井水位拟合误差控制在 $<5\%$ 为标准,不断调试模型,最后模拟出了合山煤田2010年到2040年各矿井分时段井下涌水量值(表2,由于篇幅有限只列举了2010年、2040年两个时段)。模拟结果显示合山煤田2010年井下涌水量为 $235642 \text{ m}^3/\text{h}$,2040年涌水量为 $392502 \text{ m}^3/\text{h}$ 。煤田2040年涌水量相对于2010年增加了 $156860 \text{ m}^3/\text{h}$,占总数的 39.96% ,其主要原因是由于合山煤田在未来的30年内各矿井开采水平都有相应的下降,另外,还有两口竖井投入使用。

6 结论

本文尝试性的采用数值模拟方法来预测井下涌水量,该方法不但能够考虑较多的影响因素,用来解决实际工程中比较复杂的问题,还能够比较充分地反映出煤田井下含水介质的水动力学特性和特定的边界条件,能够更加深入和全面地反映煤田井下涌水的全过程。

模拟结果表明:所建立的研究区的数学模型及边界条件的处理是合理的;制定的模型检验标准不仅在理论上是合理的,而且在实际的模拟技术上也是可行的。最后的模拟结果正确的反应出了研究区未来的开采过程,以及随着开采规模的变化所呈现出来的矿区地下水位的变化,与模型检验过程中所设定的地下水位值基本吻合。其模拟结果为煤田各矿在未来的矿山排水设备的设计设计和防治水措施的制定都提供了依据,同时也为将要启动的桥巩电站库区合山煤田浸没影响评价奠定了基础。

[参考文献]

- [1] 滕凯,陈贺. 利用单孔两次稳定流抽水试验资料确定水文地质参数. 地下水,1995,17(2):59-61.
- [2] 唐依民,肖江,等. 矿井涌水量时间序列的多重分形维数谱

下水的水头值就能够满足在未来开采状态下井下采

- 计算. 煤炭学报, 2001, 26(4): 394 - 398.
- [3] 王国利. 关于数值法用于复杂型矿床涌水量预测中存在问题
的讨论. 冶金地质动态, 1991, 11: 43 - 46.
- [4] 许 模. 渗流场分析及其在多孔介质中的应用. 地质灾害与
环境保护, 1996, 7(2): 56 - 60.
- [5] Bridget R. Scanlon, Robert E. Mace, Michael E. Barrett. Can
we simulate regional groundwater flow in a karst system using equiv-
alent porous media models Case study Barton Springs Edwards aq-
uifer. USA Journal of Hydrology, 2003, 276: 137 - 158.
- [6] 王国利. 关于数值法用于复杂型矿床涌水量预测中存在问题
的讨论. 冶金地质动态, 1991(11): 43 - 46.
- [7] 孙 勇. 地下水数学模型中动态边界的一种处理方法. 岩土工
程技术, 1996(4): 19 - 22.
- [8] 滕 凯, 陈 贺. 利用单孔两次稳定流抽水试验资料确定水文
地质参数. 地下水, 1995, 17(2): 59 - 61.
- [9] Eung Seok Lee, Noel C. Krothe, A four - component mixing model
for water in a karst terrain in south - central Indiana USA. Using
solute concentration and stable isotopes as tracers, Chemical Geolo-
gy 179(2001) 129 - 143.
- [10] B. J. Barfield, G. K. Felton, E. W. Stevens, M. McCann, A sim-
ple model of karst spring flow using modified NRCS, procedures
Journal of Hydrology 287 (2004) 34 - 48.
- [11] 成建梅, 陈崇希. 广西北山岩溶管道 - 裂隙 - 孔隙地下水流
数值模拟初探. 水文地质工程地质, 1998, 25(4): 50 - 54.

DISCUSSION SIMULATION FOR THE MINE DISCHARGE OF HESHAN COALFIELD

LI Guo¹, MAO Bang - yan¹, XU Mo¹, ZHOU Xiao - yi²,

(1. The National Laboratory of Hazard Prevention & Geological Environment Protection Chengdu University of
technology, Chengdu 610059; 2. College Of Civil Engineering Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: Problem of the mine discharge is always serious to security produce in mine. How to more accurate forecast the mine - discharge is till a question which the domestic and foreign experts and scholar are making great efforts to seek, especially pay attention to the mine discharge of the complex condition. This article established the mathematical model on the basis of knowing and grasping the hydrology geology condition, space structure of the water bearing medium. The model time and spatial separate, the boundary condition generalizing and the hydrological parameter selection are deeply researched. Using the popular groundwater numerical simulation software Visual Modflow simulate the mine discharge of the Research area for 30 years. And obtain the more satisfied mine discharge of every stage each mine.

Key words: Heshan coalfield, complicated geological condition, mine - discharge, numerical simulation