

GMS 在露天转地下水害防治中的应用

邓红卫, 朱哲, 周科平, 田坤

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了评价再造阻水墙在露天转地下防治水工程的适应性,以安徽新桥矿业有限公司露天转地下防治水工程为例,考虑强降雨条件下露天坑积水、地表河流渗漏、北部侧向径流大量补给的情况,利用 3DMINE 建立地层模型,通过切分剖面导入 GMS 8.0 软件 Map 模块建立复杂多图层概念模型,并基于 Modflow 模块建立多灾源条件下露天转地下工程地下水区域渗流数值模型,对再造阻水墙的适应性进行数值模拟。结果表明:利用 GMS 8.0 软件可以精细、实时地模拟再现水文地质条件复杂的防治水工程的阻水动态过程。再造阻水墙在该矿山-180m 标高以上部分墙内外水力梯度变化较大,阻水效果明显,适应性强。

关键词 再造阻水墙;适应性;露天转地下开采;GMS;数值模拟

中图分类号 X936

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.009

Applications of GMS in the Prevention and Control of Water Disasters During the Transfer from Open Pit Mining to Underground Mining

DENG Hongwei, ZHU Zhe, ZHOU Keping, TIAN Kun

School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to evaluate the adaptation of reconstructed water-resisting wall for the prevention and control of water disasters during the mining transferring period from open-air to underground, by taking water control project of Xinqiao Mining Corporation in Anhui Province as example, a numerical analysis was conducted. Considering the large supply of open pit water, surface water seepage, and northern lateral flow in the condition of strong rainfall, a stratigraphic model is established by using 3DMINE, and through syncoating profile into the Map module of software GMS 8.0, a complex concept model with many layers is created and then based on the Modflow module of GMS 8.0, a seepage numerical model of ground water region during open pit mining transferring to underground mining under the condition of many plagues source is established. Results show that GMS 8.0 software is able to finely and real-time simulate and rebuilt a water-resisting dynamic process for the prevention and control of water under complex hydrogeological conditions. For the part of reconstructed water-resisting inside and outside wall that the elevation is above -180m, the hydraulic gradient change is large. And water block effect is obvious and has strong adaptability.

Keywords reconstructed water-resisting wall; adaptation; transfer from open pit mining to underground mining; GMS; numerical simulation

0 引言

国内外露天转地下开采矿山经验表明,一个大中型露天矿山要完全转入地下开采,必须攻关解决一些关键技术难题,而防治水工程成为露天转地下中的一大关键工程,如何将再造阻水工程在露天转地下防治水功能最大化成为露天转地下防治水方案优选必须考虑的问题,为此从经济节约的角度出发,借助数值模拟手段展开再造阻水工程在地下水害防治中的适应性分析与评价有着重要的现实指导意义。目

前,国内外矿山防治水方面应用较多的地下水数值模拟软件主要有 GMS (Groundwater Modeling System)、Visual Modflow、Fellow、Visual Groundwater 等,其中 GMS 因其强大的前后处理功能而应用广泛^[1]。GMS 在地下水方面的应用研究主要集中在地面沉降预测^[2]、矿井涌水量预测^[3]、地层实体建模^[4]、地下水资源评价与突水预测防治^[5]等方面,如胡艳卉等^[6]基于 GMS 对煤矿采掘面底板突水进行了模拟研究;韩程辉等^[7]介绍了 GMS 在矿井防治水中的应用;戴岩柯等^[8]则以西石门铁

收稿日期:2012-09-03;修回日期:2012-11-06

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC09B00);湖南省科技重大专项计划项目(2011FJ1003);中南大学研究生学位论文创新资助项目(2011ssxt272)

作者简介:邓红卫,副教授,研究方向为采矿安全技术、尾矿库安全技术、矿山水资源安全管理等,电子信箱:denghw208@126.com

矿为例借助 GMS 对矿坑深部涌水量进行预测。然而借助 GMS 软件数值模拟预测再造阻水墙在后续新建工程防治水中的适应性相关研究还比较少见。

笔者拟借助 GMS 8.0 中的 Map、Grid、Scatter Points、Modflow 模块来模拟预测矿区分阶段开采情况下再造阻水工程对非均质各向异性和复杂边界条件的地下水水流系统的影响,并基于预测流场展开适应性评价分析。

1 GMS 软件介绍

GMS 是地下水模拟系统的简称,是美国 Brigham Young University 环境模型研究实验室和美国军队排水工程试验工作站综合已有多个地下水模型开发的综合性地下水模拟面软件,由 Modflow、Femwater、Modpath、MT3D、RT3D、SEAM3D、SEEP2D、Utchem、Pest、Ucode、Nuft、Map、Mesh、Borehole Data、TINs、Solid 等模块组成^[7]。该软件主要原理是基于网格的有限差分法来刻画地下水流的运动规律,通过在时间和空间上离散研究区,建立研究区域每个网格的水均衡方程表达式,将所有方程联立成大型线性方程组,继而利用迭代法求解方程组以得到每个网格的水头值。

2 地下水流运动基本数学模型

对非承压含水层和承压含水层的水流运动,基于达西定律和质量守恒定律,地下水运动的基本微分方程可表示为^[9-10]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \omega = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \quad (1)$$

式中, H 为地下水水头; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 为 x, y, z 方向渗透系数; μ_s 为含水层给水度或比储水系数,对非承压含水层取给水度 S_y ,承压层取储水系数 S_z ; ω 为源汇项; Ω 为渗流区域。

方程(1)的有限差分方程可表示为^[11]

$$\begin{aligned} CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (DEL C_i \cdot DEL R_j \cdot THICK_{i,j,k}) \cdot \\ \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $h_{i,j,k}^m$ 为第 m 时段在单元 i, j, k 的水头; CR, CC 和 CV 为结点 i, j, k 和相邻结点间的导水系数; $P_{i,j,k}$ 表示源汇项水头系数; $SS_{i,j,k}$ 表示给水度和储水系数; $Q_{i,j,k}$ 为源汇项, $DEL C_i$ 表示各列第 i 行的单元宽度; $DEL R_j$ 表示各行第 j 列的单元宽度; $THICK_{i,j,k}$ 表示单元 i, j, k 的垂直厚度; t 为时间。

求解地下水运动基本微分方程需给定初始条件和边界条件及源汇项,其通常都是时间 t 的函数。

(1) 初始条件:方程(1)初始条件须给定初始时刻区域内水头,设水头 $H=H(x, y, z, t)$, 得其表达式为

$$H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (3)$$

式中, $H_0(x, y, z, t)$ 为某已知水头分布函数。

(2) 边界条件:第 1 类已知水头边界条件表示为

$$H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in s \quad (4)$$

式中, s 为边界曲面。

第 2 类已知流量边界条件表示为

$$q_n = qn = -q_b(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in s \quad (5)$$

式中, q 为二类边界单位面积过水断面补给流量; n 为渗流区域边界单位外法线方向。

第 3 类已知水头和水头的法向导数组合边界条件,即

$$\frac{\partial h}{\partial n} + \lambda(x, y, z)h = f(x, y, z) \quad (x, y, z) \in s \quad (6)$$

式中, λ, f 为已知函数, λ 称为交换系数。

在差分方程(2)中相应地针对初始条件给定 $h_{i,j,k}^0$, 对已知边界条件给定 $h_{i,j,k}^m$, 其中 i, j, k 为网格单元编号, m 为时间分段序号。该方程通常用迭代计算法求解,如隐式、逐次超松弛法等。

3 矿区地下水数值模型构建

3.1 工程概况

安徽新桥矿位于安徽省铜陵市东郊狮子山区新桥村境内,区内年平均降水量 1375.9mm,年最大降水量 2174mm,年最小降水量 788.5mm;年平均蒸发量 1359.8mm。该矿水文地质条件较复杂,矿区含水层主要有第四系含水层、茅口灰岩含水层、栖霞灰岩含水层、矿体含水层,矿区地下水主要补给来源有圣冲水库及其上游对灰岩地下水的侧向补给,大气降水及地表水通过第四系对栖霞灰岩含水层的垂直补给。目前矿山拟由露天转入地下开采,届时矿山区水文地质条件、环境等条件将有较大变化,需要进一步查明矿区水文地质条件及矿床充水因素,预测分析当前再造阻水工程在露天转地下开采工程中的适应性。

3.2 水文地质概念模型

研究区属沿江丘陵平原区,面积约为 4.65km²,见图 1。由于构造运动的作用,研究区被分成东西两翼,从水文地质角度看,目前东西两翼已不存在水力联系,为相对独立的两个水文地质单元。地表水体主要有圣冲河下游及新西河,地下水主要有栖霞、茅口灰岩岩溶水及第四系孔隙水,其常年静水位标高为 15—35m,由于西翼地下和东翼露天的开采,矿区地下水流向从原来的由南向北改变为由北向南流动。模型的侧边界均根据地下水水位的变化状态及岩层分布状况,设定断层接触区域、岩体岩层接触区域及地下水水位比较稳定的区域,即将东南部的高骊山组(C_{1g})及五通组(D_{3w})砂页岩为隔水边界,35 线—39 线之间的西侧孤峰组(P_{1g})为西侧隔水边界,北北西方向的大隆组(P_{2d})砂页岩为北北西方向的隔水边界;东北方向由 F_1 断裂组成弱透水边界,北西及北北东方向由茅口灰岩(P_{1m})为无限补给边界,西南方向由栖霞灰岩(P_{1q})为无限补给边界。区内的新西河、圣冲河及岩溶塌陷区构成

局部越流补给边界。上边界为自由潜水面,其边界条件由降雨入渗、蒸发排泄、河流沟渠灌溉入渗等因素确定。模型中将志留系隔水岩组定为底边界,因此底边界设定为零流量边界。

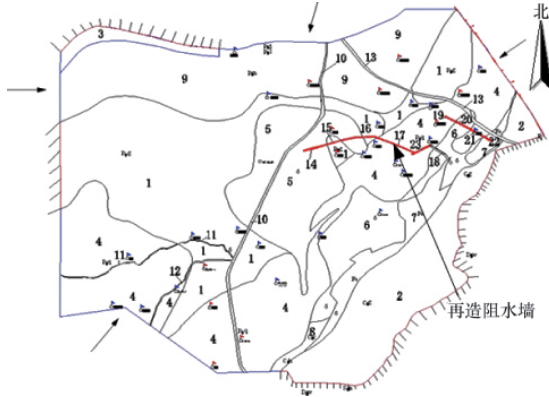


图 1 研究区范围示意图

Fig. 1 Scheme of research area

3.3 网格剖分

研究区地下水模型的分布范围为南北长 2044m, 东西宽 2275m, 水平方向采用 100×100 网格数的等距剖分, 垂向上采用不等距剖分, 因此模型剖分的网格共有 100 行, 100 列, 6 层; 其中有效单元的面积 为 3243284m², 其基于 GMS 生成的有限差分网格如图 2 所示。

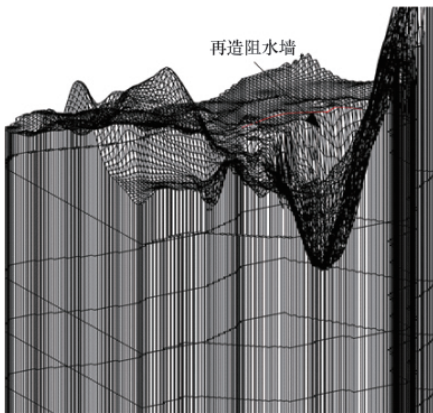


图 2 有限差分网格模型

Fig. 2 Finite difference grid model

3.4 初始条件及边界条件

根据所建立的数学模型, 将 2010 年 9 月研究区 17 个观测井水位数据进行空间插值, 作为其初始水头。根据模拟区水文地质条件, 将上边界处理为开放边界, 存在降雨入渗、灌溉补给、蒸发排泄, 用 Modflow 中的 Recharge 模块处理; 将底边界定为隔水边界; 侧边界概化为变流量边界, 利用达西定律计算各边界流量, 并根据观测井水位动态变化按时步对边界流量进行赋值与调整。此外圣冲河和新西河处理为定流量边界。

3.5 参数选取

利用矿区前期抽水试验资料确定渗透系数及给水度值,

参考已有研究报告^[2]的试验成果, 结合各种岩性的经验值与研究区水文地质实际情况, 综合确定各模拟分区渗透系数、给水度及单位储水系数值。研究区域划分主要借助于 3DMINE 软件利用已有的地质剖面资料、钻孔资料以及前人研究成果建立矿区地层模型 (图 3), 通过划分割面导入至 GMS 软件 Map 模块来划分计算区域, 各参数取值见表 1 和表 2。渗透系数及给水度分区见图 4 所示 (图 4 仅为第一图层渗透系数及给水度分区图, 其余各图层分区与第一层分区类似)。

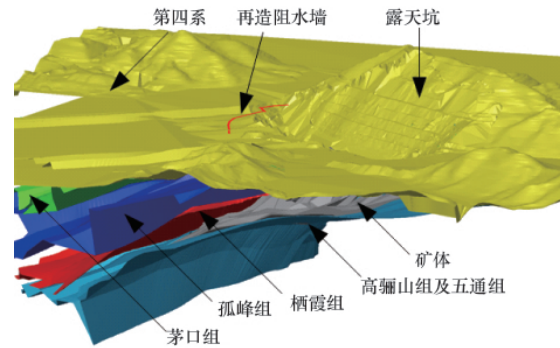


图 3 三维地层模型

Fig. 3 3D stratigraphic model

表 1 渗透系数 K 初值表 (单位: m/d)

Table 1 Initial value list for permeability coefficient K (unit: m/d)

岩层	K_x	K_y	K_z
I	1.7600	1.7600	0.5800
II	13.6100	13.6100	3.5700
III	8.0600	8.0600	2.3600
IV	0.0540	0.0540	0.0086
V	1.1520	1.1520	1.1520
VI	0.0290	0.0290	0.0016
VII	0.0024	0.0024	0.0024
VIII	0.0600	0.0600	0.0600
IX	0.6000	0.6000	0.6000

表 2 各分区给水度值分区初值表

Table 2 Initial value list for specific yield in each division

岩层	S_x	S_y
I	0.00040	0.07000
II	0.00500	0.30000
III	0.00400	0.20000
IV	0.00005	0.00600
V	0.00040	0.08000
VI	0.00004	0.00500
VII	0.00003	0.00200
VIII	0.00006	0.00800
IX	0.00030	0.02000

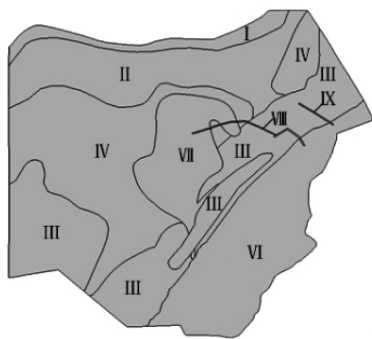


图4 第一层渗透系数给水度分区
Fig. 4 Permeability coefficient specific yield division for first layer

3.6 源汇项处理

该研究区域中的源汇项主要包括降雨入渗、农田灌溉回渗、渠系渗漏、地下侧向径流补给等补给项,以及蒸发排泄、河道排泄、地下径流排泄、人工开采等排泄项。马传明等^[3]对上述源汇项的计算公式及过程均进行了分析研究。降水入渗是此区的主要补给来源,河流渠系渗漏根据河床的高程、岩性、厚度、流量以及渗透系数综合确定。人工开采、地下径流均通过井模块处理,灌溉回渗、蒸发排泄处理为面排泄与补给。其图层主要包括边界条件及河流补给、人工开采图层,入渗补给图层,蒸发排泄图层。图5给出了边界条件及河流补给、人工开采的示意图层。

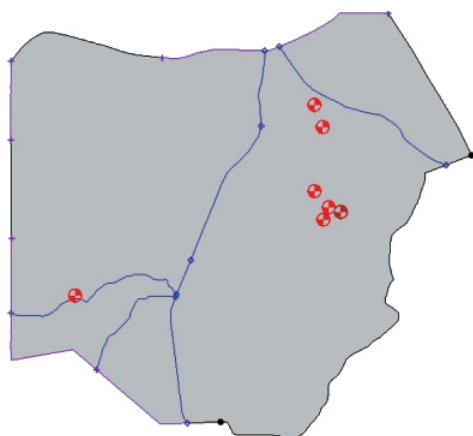


图5 边界条件及河流补给、人工开采图层
Fig. 5 Scheme of boundary conditions, river supplies, and artificial mining layers

3.7 模型校正与参数识别

在数学模型模拟预报前,对模型进行校正与参数识别是为了使数学模型能够真实反映实际流场的特点,一般遵循区域水均衡原则,对比分析数学模型内各观测点的计算水头值与实测水头值数据,以此来反求相关水文地质参数。计算以研究区2010年1月—2011年1月时间段17个长观孔水位动态观测资料作为参数识别的依据。

通过数值模拟的结果,经过调试与优选,对渗透系数、单

位储水系数、给水度3种参数进行调整,使观测水头与计算水头值尽量吻合,从中选取有代表性的3个长观孔来拟合水位变化过程,研究区东翼选取G06-2观测孔,阻水墙内外选取G4与G5观测孔进行拟合,拟合结果图见图6。

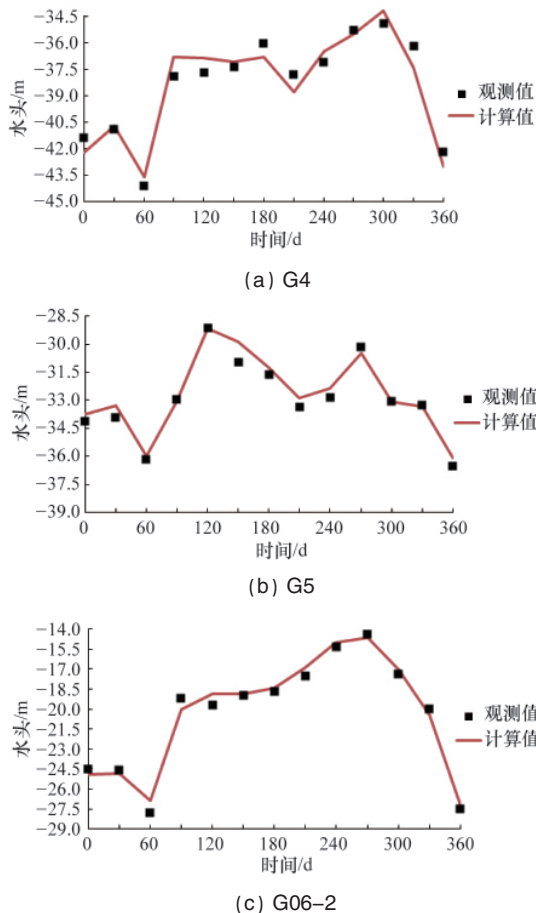


图6 数值模型计算值与观测值拟合图
Fig. 6 Fitting diagram of calculation and observation for the numerical model

通过对比模拟水头与计算水头,模拟计算的平均误差为0.111m,误差绝对值的平均值为0.492m。从水位拟合结果来看观测值与计算值拟合较好,模型所识别的参数值见表3、表4。

表3 渗透系数K值校核表(单位:m/d)

Table 3 Checking list for permeability coefficient K value (unit: m/d)

岩层	K_x	K_y	K_z
I	2.2000	2.2000	0.7600
II	12.5000	12.5000	3.4000
III	8.3000	8.3000	2.4100
IV	0.0600	0.0600	0.0090
V	1.2000	1.2000	0.8000
VI	0.0300	0.0300	0.0010
VII	0.0030	0.0030	0.0017
VIII	0.0600	0.0600	0.0090
IX	0.6000	0.6000	0.0800

表4 各分区给水度值校核表

Table 4 Checking list for specific yield in each division

岩层	S_s	S_y
I	0.00050	0.09000
II	0.00600	0.20000
III	0.00300	0.15000
IV	0.00006	0.00600
V	0.00040	0.08000
VI	0.00005	0.00500
VII	0.00001	0.00200
VIII	0.00006	0.00600
IX	0.00010	0.05000

4 数值计算及结果分析

4.1 流场分析

本模型的建立旨在分析再造阻水墙在露天转地下开采工程水害防治中的适应性,为后续防治水方案的制定提供决策依据。模型主要考虑强降雨条件下露天坑积水、地表河流渗漏、北部侧向径流补给对露天转地下开采工程的影响,并通过数值模型来验证预测阻水墙在防治水过程中的作用。依据研究区可行性研究报告中有关设计内容,研究模型范围为露天转地下开采一期工程,开采至-380m标高,开采年限为24a,模型模拟时间设为24a,模型结果分析主要分析1—4层的预测流场,其预测流场模拟结果见图7所示。

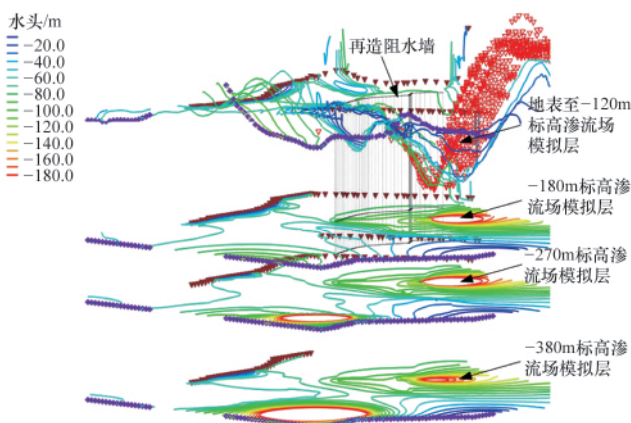


图7 1—4层等水头线模拟结果

Fig. 7 Equipotential head lines from layer one to layer four

对比分析露天转入地下开采前阻水墙内外的观测数据与模拟数据,在强降雨及露天坑未进行严格防渗处理的情况下,并且不考虑阻水墙截流能力逐渐衰减的现象,当露天转地下开采至-180m标高时,阻水墙内外的模拟水头差为18m;开采至-270m标高时,阻水墙内外的模拟水头差为6m;开采至-380m标高时,阻水墙内外的模拟差为4m。从各层渗流场分布趋势模拟图(图7)及模拟数据(表5)对比分析墙内外水

头差随开采深度的增加逐渐变小,在-120m标高时,阻水墙外的水力梯度值较墙内的小,截流效果明显;在-180m标高时,墙外的水力梯度值较墙内有缓和趋势,但仍较小,截流效果较明显;在-270m与-380m标高时,墙内外水头差逐渐减小,墙外的水力梯度值较墙内的变化趋势已趋于缓和,这表明开采至深部时阻水墙截流效果不再十分明显,阻水墙只对浅部含水层控制效果显著。整个流场模拟结果表明阻水墙北侧为地下水主要补给来源,露天转地下一期工程防治水的重点应集中于北部,阻水墙的截流效果在-180m标高以上比较明显,在-180m标高以下仍需着重控制北部地下水和露天坑积水的绕流补给。

表5 各模拟层阻水墙内外水力梯度变化表

Table 5 List of hydraulic gradient changes of inside and outside wall for each simulation layer

模拟层/m	阻水墙内水力梯度	阻水墙外水力梯度
-120	0.1515	0.0413
-180	0.1347	0.0568
-270	0.1136	0.0610
-380	0.1028	0.0649

4.2 渗透系数敏感性分析

再造阻水墙参数的敏感性表现在阻水墙渗透系数的变化,其衡量标准是水力梯度值的变化,随着开采年限及开采范围深度的增加,开采扰动、地下水压及阻水墙自身强度等成为影响再造阻水墙防水效果的重要因素。通过分析2007—2011年阻水墙内外G3、G4观测孔的水位变化,如表6所示,经模拟拟合阻水墙渗透系数值以每5年0.03m/d的速率递增,至露天转地下开采一期工程结束渗透系数数值约为0.24m/d。

表6 2007—2011年阻水墙内外观测孔水位埋深变化

Table 6 Change of water level burial depth at the observation hole of inside and outside wall from 2007 to 2011

观测年份	墙内观3孔年平均水位/m	墙外观4孔年平均水位/m	水位差/m
2007	-94.04	-63.46	30.58
2008	-94.26	-67.09	27.17
2009	-95.27	-68.78	26.49
2010	-94.91	-69.42	25.49
2011	-97.60	-74.43	23.17

图8给出了经数值计算后再造阻水墙渗透系数与观3观4孔水位差(指的是分时间步长的计算值)之间的关系曲线。随着阻水墙渗透系数递增,墙内外的水头差变小,表明阻水墙的截流作用减弱。但是当阻水墙渗透系数递增到一定程度以后,阻水墙截流作用并不明显减弱,其对地下水的影响

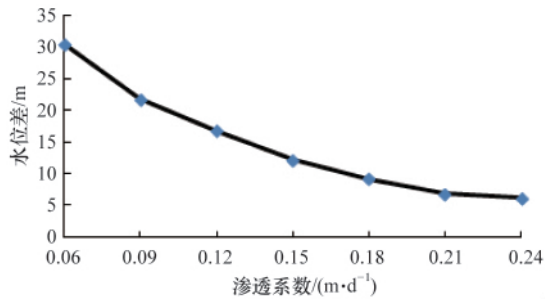


图 8 阻水墙内外水头差与渗透系数之间的关系

Fig. 8 Relationship between head difference and permeability coefficient of inside and outside wall

程度和范围也不会明显增加,这表明该处地下水运动受到阻水墙影响的制约较小,阻水墙在后续工程中的适应性不再明显。为保证阻水墙的防渗效果可以在后期对该阻水墙工程进行加固处理。

5 结论

本文通过 3DMINE 和 GMS 软件耦合建立露天转地下开采地下水渗流数值模型,分析了矿区分阶段开采情况下再造阻水工程的防水适应性,得出以下结论。

(1) 通过数值模拟结果与现场观测结果的对比可知,两者吻合较好,证明本文的 GMS 概念建模方法和计算思路是正确可行的,能够模拟复杂条件下再造阻水墙随开采深度变化的动态阻水过程。

(2) 模拟结果显示:再造阻水墙在该矿山-180m 标高以上部分墙内外水力梯度变化较大,阻水效果明显;开采至-270m 标高时墙内外的水头差为 6m;至-380m 标高时墙内外的水头差为 4m。再造阻水墙的防渗效果,不但与地表水补给、地下水压和开采扰动有关,还与阻水墙渗透系数的衰减有关,阻水墙渗透系数的衰减变化程度直接决定阻水墙在露天转地下开采过程中的阻水效果。

(3) 通过本文建立的数值方法和水力梯度判别准则,可以确定矿山露天转地下开采过程中防水工程区域渗流形态,并能计算防水区域内的水力梯度值和水头分布范围。

(4) 由于再造阻水墙的适应性分析方法是应用 GMS 中 MAP、Grid、Scatter Points 和 Modflow 多模块耦合的数值计算方法,比解析法具有更广阔的应用前景,可处理复杂边界条件下各向异性非均质问题,直接用于求解各种复杂的防治水工程问题。

参考文献 (References)

[1] 张洪霞, 宋文. 地下水数值模拟的研究现状与展望 [J]. 水利科技与经济, 2007, 13(11): 794-796.
Zhang Hongxia, Song Wen. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2007, 13(11): 794-796.

- [2] 王凤林, 毛绪美, 王傲. 基于 GMS 的佛山市软土地面沉降预测研究[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(6): 26-29.
Wang Fenglin, Mao Xumei, Wang Ao. *Safety and Environmental Engineering*, 2009, 16(6): 26-29.
- [3] 宋业杰. GMS 在矿井涌水量预测中的应用 [J]. 煤矿开采, 2011, 16(1): 104-107.
Song Yejie. *Coal Mining Technology*, 2011, 16(1): 104-107.
- [4] 覃荣高, 高建国, 臧小豹, 等. 基于 GMS 基岩矿区地下水三维实体模型的构建[J]. 地下水, 2009, 31(6): 15-17.
Qin Ronggao, Gao Jianguo, Zang Xiaobao, et al. *Ground Water*, 2009, 31(6): 15-17.
- [5] 赵国红, 宁立波, 王现国. 新郑市浅层地下水流数值模拟及评价[J]. 地下水, 2007, 29(6): 43-46.
Zhao Guohong, Ning Libo, Wang Xianguo. *Ground Water*, 2007, 29(6): 43-46.
- [6] 胡艳芹, 张文泉, 任仰辉, 等. 安徽五沟煤矿 1016 面底板突水 GMS 模拟模型研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 35-39.
Hu Yanhui, Zhang Wenquan, Ren Yanghui, et al. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 28(4): 35-39.
- [7] 韩程辉, 刘文生. 地下水模拟系统(GMS)与矿井防治水[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(1): 25-26.
Han Chenghui, Liu Wensheng. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2005, 32(1): 25-26.
- [8] 戴岩柯, 崔世新, 张坤. 水均衡法和数值模拟法在矿坑深部涌水量预测中的比较——以西石门铁矿为例 [J]. 地下水, 2010, 32 (1): 24-26, 48.
Dai Yanke, Cui Shixin, Zhang Kun. *Ground Water*, 2010, 32 (1): 24-26, 48.
- [9] 易立新, 徐鹤. 地下水数值模拟: GMS 应用基础与实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Yi Lixin, Xu He. *Groundwater numerical simulation: GMS application foundation and case[M]*. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [10] 宁立波, 董少刚, 马传明. 地下水数值模拟的理论与实践 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
Ning Libo, Dong Shaoqiang, Ma Chuanming. *Groundwater of numerical simulation of theory and practice [M]*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [11] 魏文清, 马长明, 魏文炳. 地下水数值模拟的建模方法及应用 [J]. 东北水利水电, 2006, 24(3): 25-28.
Wei Wenqing, Ma Changming, Wei Wenbing. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 2006, 24(3): 25-28.
- [12] 长沙矿山研究院. 岩溶大水矿山改性粘土帷幕注浆水害控制技术研究报告[R]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2007.
Changsha Institute of Mining Research. *Research report about modified clay curtain grouting for water damage control technology in karst and waters mine[R]*. Changsha: CIMR, 2007.
- [13] 马传明, 宁立波, 王现国, 等. 中牟县浅层地下水资源评价 [J]. 水文, 2007, 27(3): 80-84.
Ma Chuanming, Ning Libo, Wang Xianguo, et al. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(3): 80-84.

(责任编辑 许冰, 吴晓丽)