

MODFLOW 在三门峡铝土矿疏干排水模拟中的应用

周念清¹, 傅 莉¹, 江思珉¹, 孙新礼²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 中铝矿业有限公司, 河南 郑州 450041)

摘要: 根据三门峡铝土矿区地层分布、地质构造及水文地质条件, 对矿区赋水的寒武—奥陶系灰岩岩溶裂隙含水系统水文地质条件进行概化, 建立了地下水流数学模型, 采用 Visual MODFLOW 有限差分方法模拟地下水位变化和预测涌水量。结合矿区群井抽水试验地下水位观测资料对地下水流数学模型进行校正和参数反演, 利用校正后的数学模型和参数预测并在不同采矿设计疏干水平下地下水的水位分布和矿区涌水量的变化, 为有效防治地下水和安全合理开采铝土矿提供可靠的依据。

关键词: 铝土矿; 疏干排水; 模拟; 涌水量; MODFLOW; 三门峡

中图分类号: P 641.1

文献标识码: A

Application of MODFLOW to Groundwater Drainage Numerical Simulation in Sanmenxia Bauxite

ZHOU Nianqing¹, FU Li¹, JIANG Simin¹, SUN Xinli²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Aluminum Mining Co. Ltd., Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Based on the stratigraphic distribution, the geologic structure and hydrogeologic conditions of Sanmenxia bauxite, the hydrogeologic conceptual model of karst-fracture aquifer system of water enrichment Cambrian-Ordovician Period limestone was generalized, and the numerical model of groundwater flow was established with the finite difference method of Visual MODFLOW to simulate variation of groundwater level and to predict water discharging. The groundwater flow mathematical model was corrected and the hydrogeological parameters were inversed in combination with the observation value of groundwater level of group drilling pumping tests in mining area boreholes, and then the corrected mathematical model and parameters were adopted to predict the groundwater level distribution and mine discharge changes

at different designed mining drainage level in well. The reliable basis is provided for controlling groundwater effectively and safe rational mining bauxite.

Key words: bauxite; groundwater drainage; simulation; discharge; MODFLOW; Sanmenxia

地下水问题一直是矿山设计和开采过程中需要重点研究的课题。为了有效解决地下水对矿山开采的影响, 防止突水事故的发生, 在水文地质调查的基础上, 需要对矿区地下水流疏排进行数值模拟和计算, 准确预测矿坑涌水量, 以便合理地制订不同开采水平下地下水疏干和排水方案。地下水数值模拟常采用有限元和有限差方法, 这方面的研究成果很多, 但大多是针对孔隙含水介质进行模拟。如, 薛禹群等采用多尺度有限元方法研究水文地质参数渐变的流场变化规律^[1], 王旭生采用有限差分法研究自流井模拟校正模型^[2]。但对于矿山而言, 含水介质的各向异性明显, 特别是岩溶裂隙介质尤其如此, 这就需要采用先进的模拟手段对计算方法不断改进, 以准确地模拟地下水流场的分布和涌水量的变化。目前, Visual MODFLOW 是国际上流行的地下水资源评价和矿井涌(突)水量预测的 3 维可视化标准专业软件^[3-4], 它具有仿真度高、方便灵活等特点^[5]。本文采用 Visual MODFLOW 软件对三门峡铝土矿地下水进行了数值模拟和评价, 解决人为开采条件下地下水流场的分布和涌水量随季节的变化, 为矿山地下水疏排方案的最终确定提供了可靠依据, 具有重要的实际意义。

1 矿区地质及水文地质条件

三门峡铝土矿区位于三门峡渑池县段村—雷沟一带, 矿区呈北西—南东向延伸, 北西—南东长约 14

收稿日期: 2008-10-06

作者简介: 周念清(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下水渗流数值模拟与计算。

E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

km, 宽 400 ~ 1 500 m, 其地理坐标为: 东经 $111^{\circ}50'30'' \sim 111^{\circ}59'00''$, 北纬 $34^{\circ}45'45'' \sim 34^{\circ}49'24''$, 矿区登记面积 13.85 km^2 , 有效面积约 8.5 km^2 . 矿区隶属仁村乡和洪阳乡, 地形上西高东低、南北高中间低, 属低山丘陵. 矿区位于义马向斜北翼, 区内断裂构造发育, 有大小断裂 10 余条, 复杂的差异性断裂升降运动致使矿区水文地质条件比较复杂. 矿区东起岸上断层, 北以扣门山和弥陀寺断层为界, 南以碛石逆断层和义马逆断层为限. 由北向南依次出露元古界、寒武—奥陶系、石炭—二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系地层, 大体上组成一个不完整的向斜. 矿区水文地质条件受地质构造控制, 它不仅影响着各类含水岩组的埋藏条件及岩溶、裂隙或孔隙的发育程度, 对含水层的富水程度、富集规律及地下水的运动条件等都起着明显的控制作用.

铝土矿层分布在石炭系上统本溪组中段, 矿层的直接顶板为石炭系上统本溪组上段, 主要由页岩、黏土岩和炭质页岩组成, 厚度变化较大, 属隔水层; 矿体的直接底板为石炭系上统本溪组下段, 主要由

铁质页岩组成, 分布广泛, 属隔水层, 但常见有“天窗”. 矿区内存在 4 类含水岩组: 寒武—奥陶灰岩岩溶裂隙含水岩组、石炭系上统—二叠系下统灰岩、砂岩含水岩组和第四系砂卵石孔隙含水岩组. 其中, 位于铝土矿层之下的寒武—奥陶灰岩岩溶裂隙含水层, 岩溶裂隙较发育, 水量大且不易被疏干, 是威胁矿山开采的主要含水层.

2 水文地质模型概化

2.1 模拟范围及边界条件

根据矿区地质构造及水文地质条件, 将奥陶系—寒武系岩溶裂隙含水层概化为非均质各向同性的承压—无压含水层, 属 2 维非稳定流, 计算区域面积约为 156 km^2 . 该含水层东面以龙涧泉为界, 为一类水头边界, 水头取值 328.21 m ; 北面以灰岩裸露区的底部边界为界, 为隔水边界; 西部以坡头断层为界, 为隔水边界; 南面以地表分水岭之下的深埋区为界, 为隔水边界. 矿区水文地质单元及边界分布如图 1 所示.

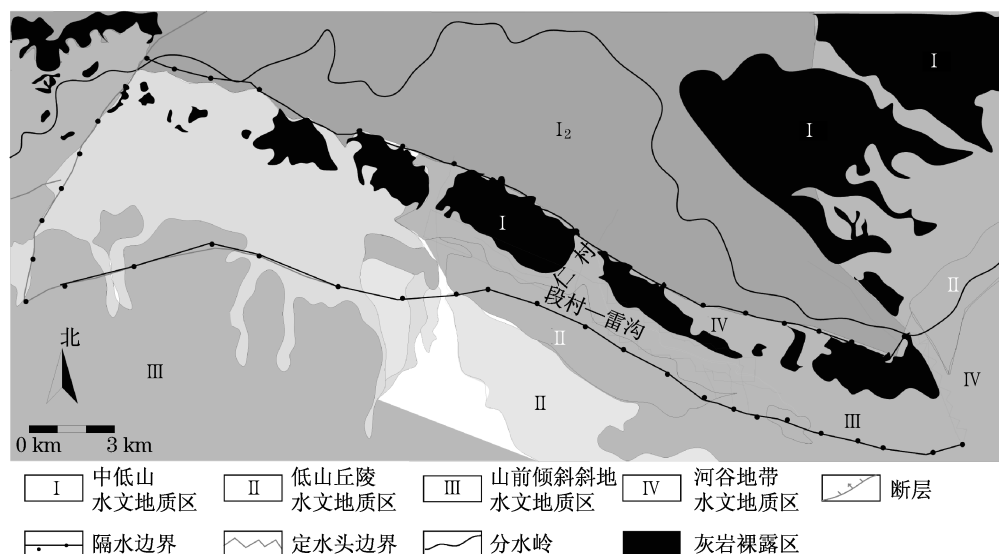


图 1 矿区断层分布及边界条件

Fig.1 Faults distribution and boundary conditions

2.2 源汇项处理

研究区地下水主要受大气降水入渗及河流入渗补给, 地下水以人工开采为主要排泄方式^[6]. 研究区年平均降水量为 659.9 mm , 主要集中在 7, 8, 9 三个月. 根据灰岩裸露情况不同, 将研究区分为灰岩直接裸露及间接裸露, 这 2 种类型的面积分别为 35 km^2 和 121 km^2 . 大气降水入渗系数分别取为 0.30 和 0.12. 区内地表水主要有北涧河和石河 2 条季节性河流. 根据观测资料,

北涧河由西向东流经灰岩裸露地段时, 其漏失量平均为 $113 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 有效面积为 86 km^2 ; 石河由北向南流经灰岩裸露地段时, 也存在明显的漏失现象, 其平均漏失量取为 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 有效面积为 52 km^2 .

矿区周围有工业用水及生活供水水源地, 自西向东分别有二电厂和乡政府村民用水井、水泥厂和义马煤矿供水基地, 水源地实际供水能力约为 $17\,100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. 河流分布、降水入渗补给及各水源

地开采井的位置分布如图 2 所示.

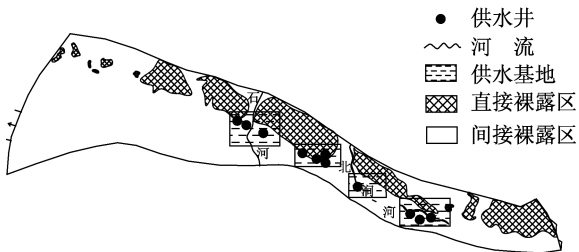


图 2 研究区源汇项分布图
Fig.2 Distribution diagram of source and sink in the study area

3 地下水流数学模型的建立

根据矿区水文地质条件,可建立如下相应的地下水流数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_s = E \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} KM & \text{承压水区} \\ K(h - z) & \text{潜水区} \end{cases} \quad (2a)$$

$$E = \begin{cases} \mu^* & \text{承压水区} \\ \mu & \text{潜水区} \end{cases} \quad (2b)$$

$$\begin{cases} H(x, y, 0) = H_0(x, y), (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t) = f(x, y, t), (x, y) \in \text{东部边界} \\ \partial H / \partial n = 0, (x, y) \in \text{其他边界} \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 是渗透系数, $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$; h 为水头, m ; M 为含水层厚度, m ; z 为含水层底板标高, m ; q_s 为单位时间单位面积的流量, $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$, 代表源汇项; μ^* 为承压含水层介质的贮水系数; μ 为潜水含水层介质的给水度; t 为时间, d ; Ω 代表空间区域.

3.1 空间离散与时间离散

选用有限差分法的网格中心节点对研究区进行剖分离散以建立数值模型,并对断层破碎带、“天窗”及抽水井等处进行了剖分网格加密处理^[4],如图3

所示.取正东方向为 x 轴正方向, x 方向节点数为 204,取正北方向为 y 轴正方向, y 方向节点数为 107,共计 21 828 个单元,其中有效计算单元为 7 423个.

整个模拟过程分为 11 个应力期,以每个自然月为应力期,时间步长取为 3 d.

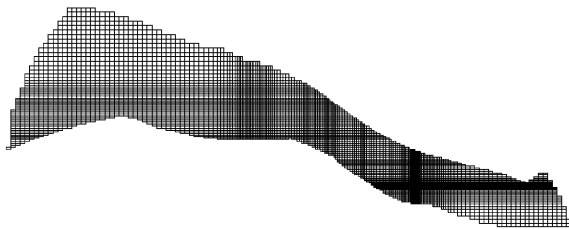


图 3 研究区有限差分剖分图
Fig.3 Finite difference subdivision graph of the study area

3.2 模拟参数和参数分区

数值模型包含的水文地质参数主要是含水层的渗透系数 K 、贮水率 S_s 和给水度 μ . 水文地质参数分区综合考虑含水层的富水性、断裂构造的特点以及观测孔的分布和数目^[7],由西往东共布置了 7 个观测井(G1~G7). 本次模型参数分区如图 4 所示. 图 5 是地下水数值模拟的初始流场分布.

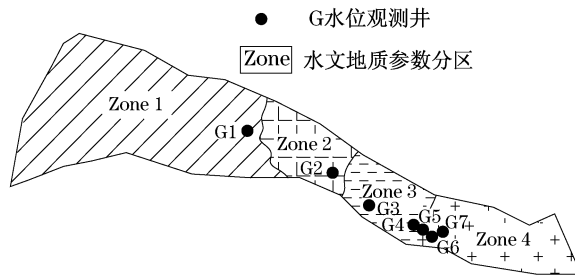


图 4 水文地质参数分区和观测孔分布
Fig.4 Hydrogeologic parameter zoning and observation hole distribution

3.3 模型识别与参数反演

根据研究区的水文地质条件和抽水试验资料,先给定各分区含水层的水文地质参数一个初值以及取值区间,如表 1 所示.

表 1 参数初值及取值区间

Tab.1 Initial value of parameters and value-taking interval

矿区	$K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$			S_s/m^{-1}			μ		
	初值	最小	最大	初值	最小	最大	初值	最小	最大
Zone 1	0.178	0.001	20	5×10^{-5}	1×10^{-9}	2×10^{-4}	0.05	0.005	0.12
Zone 2	0.110	0.001	20	5×10^{-5}	1×10^{-9}	2×10^{-4}	0.05	0.005	0.12
Zone 3	0.400	0.001	20	5×10^{-5}	1×10^{-9}	2×10^{-4}	0.05	0.005	0.12
Zone 4	1.210	0.001	20	5×10^{-5}	1×10^{-9}	2×10^{-4}	0.05	0.005	0.12

采用试估校正法和 PEST 程序对各分区的参数进行合理调整,并根据式(2)给出的目标函数来约束拟合误差,使 E 达到最小,最终获得反映该区水文地质特征的数值模型^[8],参数反演结果见表 2.

$$E_{ms} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j (H_{c,ij} - H_{o,ij})^2 \quad (4)$$

式中: E_{ms} 为目标函数; n 为时段总数; m 为观测孔总数; W_j 为权系数; $H_{c,ij}$ 为对应于 i 时段第 j 号地下水动态观测孔的计算水头; $H_{o,ij}$ 为 i 时段第 j 号地下水动态观测孔的实际测量水头.

表 2 研究区水文地质参数反演
Tab.2 Hydrogeologic parameters inversion
in the study area

水文地质参数	$K/(m \cdot d^{-1})$	S_s/m^{-1}	μ
Zone 1	0.022 2	6.528×10^{-5}	0.046 5
Zone 2	0.085 0	1.25×10^{-4}	0.100 0
Zone 3	0.206 0	2.432×10^{-5}	0.008 0
Zone 4	0.675 0	1.464×10^{-9}	0.008 0

在表 2 的水文地质参数组合下得到观测孔在拟合阶段末时刻的计算误差如表 3 所示.从表中可以看出,大多数观测孔的计算值和观测值拟合程度较高,但 G7 观测孔的计算误差较大,可能与其观测存在误差或参数分区不够细有关.

表 3 观测孔的计算误差
Tab.3 Calculation error of observation wells m

观测孔	观测值	计算值	误差
G1	504.500	504.508	-0.008
G2	284.640	285.578	-0.938
G3	280.500	280.028	0.472
G4	292.280	291.274	1.006
G5	296.260	295.277	0.983
G6	464.400	466.790	-2.390
G7	386.000	378.794	7.206

4 矿坑涌水量预测

矿坑涌水量预测分为定流量疏干和定水头疏干 2 个阶段.首先,根据水文地质条件和疏干井布局,确定各疏干水平的总疏干水量,并将其分配到各疏干井上,进行定流量疏干模拟;其次,当降至疏干水平后,进行定水头阶段的疏干模拟,直到水头相对稳定,计算出稳定条件下的矿坑涌水量即为平水年(经

验频率 $P = 50\%$)平均稳定的矿坑涌水量,然后计算偏丰水年($P = 16\%$)1998 年的雨季下的矿坑涌水量.

4.1 定流量疏干

根据矿床开采设计方案,取段村疏干水平为 420 m、雷沟段疏干水平为 330 m 来预算矿坑的疏干水量、正常涌水量及最大涌水量.取 2007 年 7 月 1 日为计算初始时刻,其水头等值线由前述的校正后数值模型计算可得,如图 5 所示.

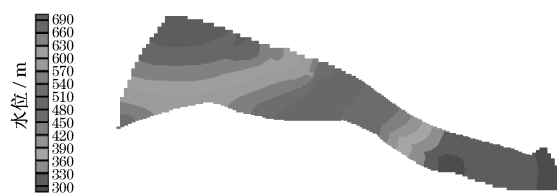


图 5 2007 年 7 月 1 日的地下水流场(模型计算)
Fig.5 Groundwater flow field on July 1,2007
(counted according to model)

设计 10 口疏干井,自西向东排列,分别为 P1—P10,具体位置分布如图 6 所示.每口井疏干能力设计为 $5\,000\,m^3 \cdot d^{-1}$,总疏干量为 $50\,000\,m^3 \cdot d^{-1}$.抽水历时 629 d 后,即到 2009 年 3 月 21 日,水位变化已趋于稳定,并且满足段村 420 m 和雷沟 330 m 疏干设计水平.

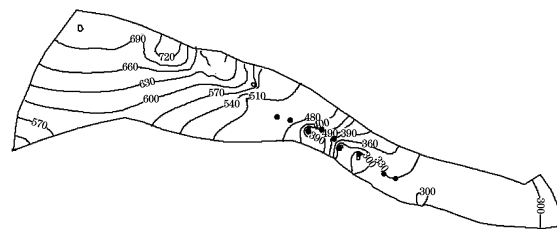


图 6 2009 年 3 月 21 日的地下水流场(单位:m)
Fig.6 Groundwater flow field on March 21,2009(unit:m)

4.2 定水头疏干

根据段村 420 m、雷沟 320 m 定流量疏干后的水头分布,将已建立的地下水模型给定第一类边界条件,同时将疏干井改为定水头降水,计算定水头条件下矿坑的涌水量.对大气降水量分别以平水年的平均降水量(日降水 $0.001\,7\,m \cdot d^{-1}$)和偏丰水年的雨季降雨量($0.006\,2\,m \cdot d^{-1}$)输入模型,计算得到平水年的平均降水量和偏丰水年的雨季降雨量的矿坑疏干量分别为 $28\,548$ 和 $30\,978\,m^3 \cdot d^{-1}$.

(下转第 1699 页)