

# 基于 GMS 数值模拟的某矿床涌水量预测研究

陈 帅

(中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 某矿床在开采过程中遇到一定程度的涌水。为解决涌水问题, 并为防治水方案提供依据, 以该矿床为研究对象, 通过分析矿床水文地质条件、含水层类型及特征、地下水补给径流和排泄条件、地质构造特征、水文地质试验资料 and 矿床开采设计资料等, 对矿床水文地质条件进行了概化, 对研究区水文地质单元进行了划定, 采用 GMS 软件建立了地下水流数值模型, 预测得到了一 200 m 以下中段的矿坑涌水量。

**关键词:** 水文地质概念模型; 数值模拟; 涌水量预测; GMS; 地下水流

**中图分类号:** TD868; TD11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)01-0020-07

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2023.09.06

开凿矿山巷道、隧道、开发地下空间等都可能引起地下水涌出, 合理地预测涌水量对于地下工程的安全至关重要<sup>[1]</sup>。涌水量预测的常用方法有解析法、比拟法、数值法等<sup>[2-4]</sup>, 其中解析法、比拟法对水文地质条件的认识依赖性很大, 计算结果通常与实际出入较大<sup>[5]</sup>。数值法是目前常用的较先进的技术手段之一, 能更加真实地刻画研究区的水文地质特征, 可以模拟地质模型和复杂的水文地质条件, 从而解决很多复杂条件影响下的涌水量预测问题。数值法常用的软件有 Visual MODFLOW、GMS、FEFLOW 等, 其中 GMS 软件是被多数国家认可的地下水有限差分法数值模拟软件, 广泛应用于孔隙、裂隙介质地下水的模拟计算中<sup>[6]</sup>。

某矿山 1969 年建矿, 采矿方法为地下开采, 开拓方式为竖井开拓。一期工程从地表开拓至 50 m 标高; 二期工程从 50 m 开拓至 -150 m 标高, 2004 年年底开工建设, 2009 年建成投产。根据矿井三期工程初步设计建造计划, 三期工程于 2020 年开工建设, 服务年限 24 年, 其中基建期为 4 年, 生产期为 20 年(正常生产期 19 年, 减产期 1 年), 从 -150 m 开拓至 -440 m 标高, 预计运行至 2044 年后矿山退役<sup>[7]</sup>。

在现场的水文地质勘探孔中, 部分钻孔有涌水现象, 在 37 线附近, 涌水量较大, 钻孔单位涌水

量为 0.019~0.028 L/(s·m), 水温为 40.0~46.5 °C<sup>[8]</sup>。涌水尤其是热水问题将对矿床下一步开采产生较大影响<sup>[9]</sup>。通过建立地下水流数值模型来预测矿山建设和运行过程中涌水量的动态变化, 对该矿山开采时矿坑水的防治, 特别是地下热水的防治具有重要意义<sup>[10]</sup>。

## 1 矿床水文地质特征

矿区内岩性主要为印支、燕山期花岗岩侵入体, 花岗岩分布广泛, 次为脉岩零星分布, 断裂构造发育; 由于构造的多期次活动, 使带内岩石较为破碎, 为区内主要含水带。

地下水类型主要有花岗岩风化壳裂隙潜水、构造破碎带脉状裂隙水、花岗岩裂隙水 3 类。矿区地下水含水系统接受南山区域水流的侧向补给, 流经棉花坑矿床区域, 向西北方向径流, 通过棉花坑断裂排泄出去, 地下水径流方向及地下水水位整体上与地势起伏保持一致。

## 2 水文地质概念模型

### 2.1 模拟范围

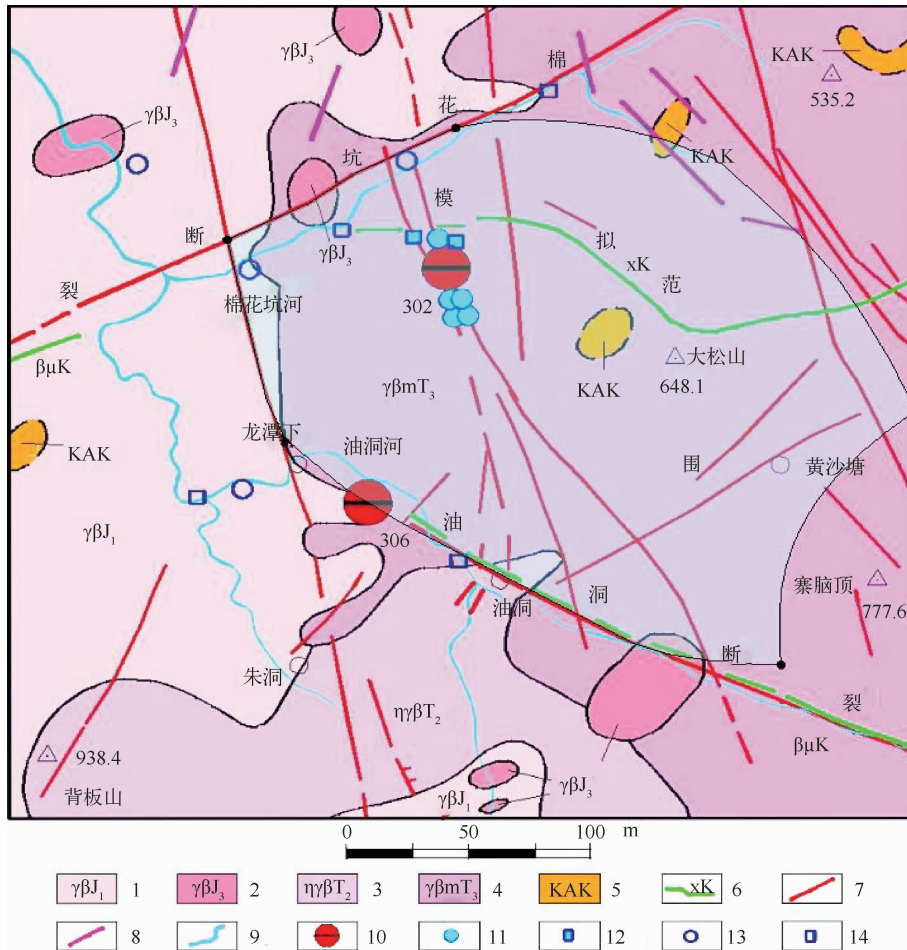
地下水数值模拟通常选择完整的水文地质单元(地下水系统)为模拟区, 综合考虑水文地质单元位置、矿床所处研究区位置、区域地下水流向等因素布置<sup>[11]</sup>。本矿床地下水流的模拟范围为: 南

收稿日期: 2023-09-15

第一作者简介: 陈帅(1991—), 男, 河北滦平人, 硕士, 工程师, 主要从事铀矿水文地质研究。

部以油洞断裂为边界,西北部以棉花坑断裂为边界,西部以蚀变带为边界,东南、东北部的边界由硅化带和人为划定的界限共同组成,由此构成了

1 个区域相对独立且完整的水文地质单元(图 1)。模拟区南北向长约 2.5 km,东西向长约 3.0 km,模拟面积约为 7.5 km<sup>2</sup>。



1—中粒黑云母花岗岩;2—细粒黑云母花岗岩;3—中粒二云母花岗岩;4—中细粒二云母花岗岩;5—碱交代岩;6—辉绿岩或煌斑岩;7—断裂带;8—石英脉;9—水系;10—矿床;11—地下热水;12—坑道裂隙水;13—地表泉水;14—地表河水。

图 1 模拟范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation range

## 2.2 边界条件

**侧向边界:**根据矿区附近的地形地貌、地质条件、水文地质条件综合确定<sup>[12]</sup>。南部边界以油洞断裂为界限,根据已有的地质构造资料可知,油洞断裂性质为压性断层,在模型中概化为隔水边界。西北部以棉花坑断裂为边界,棉花坑断裂带切割了一组南北向构造蚀变断裂带产生构造复合,断裂发生转折,在断裂发生偏转的部位具有张性或张扭性,由于棉花坑断裂带处于沟谷汇水地段,因此将其设定为天然状态下模型的流出边界;考虑到矿山开采后形成降落漏斗,其流入流出性质可

能发生变化,将其概化为第三类边界(混合边界)。东南部边界接受南山、寨脑顶区域的侧向径流补给,设定为模型的流入边界,同样概化为第三类边界(混合边界)。其他部分沿着地下水流线方向人为划定,均概化为隔水边界。

**顶部边界:**模型上边界为地表,含水系统主要接受大气降水入渗补给,靠蒸发进行排泄。

**底部边界:**在-440 m 标高以下,基岩裂隙不发育,透水性极差,地下水径流极缓,构成了研究区的隔水底板,在模型中将其处理为隔水边界。

为模拟矿坑排水过程,矿床开采区域设定为

排水沟边界。

### 2.3 模型结构

矿区总体地势为东南高、西北低,以地表作为模型的上边界。矿床的最低开采中段标高为 $-440\text{ m}$ ,模型底板应低于此标高,因此下边界定为 $-500\text{ m}$ 。

模拟区含水层岩性主要为花岗岩,地下水类型为基岩裂隙水,导水通道主要是研究区内的几条断层及蚀变带影响带形成的构造裂隙,在垂向上将含水层概化为一层<sup>[13]</sup>。

## 3 地下水流数值模型的建立

建模整体思路:1)将模型设置为稳态,不考虑井巷开挖,不设置人工开采排泄边界,对稳定流模型进行识别验证;2)进行非稳定流模拟,将模型设置为瞬态,将稳定流模型识别验证后的运行结果作为非稳定流运行计算的初始水头,并对矿区重点研究区进行加密细化处理,在矿床开采区根据实际开拓情况和未来工程计划设置排水沟边界,并且借助 GMS 软件中的排泄子程序包(DRN—Drain Package)对此边界进行定量化处理,来刻

画矿山实际开采工作中的人工排水过程,进行非稳定流模型的运行计算<sup>[14]</sup>。

### 3.1 网格剖分

研究区的模拟范围为矿床所处水文地质单元区域,根据 GMS 软件算法的设定,初步确定在平面上对研究区进行矩形网格剖分。可根据实际情况和项目需求在建模过程中对网格剖分进行调整,矿区作为重点研究区域,可采用局部加密方式对该区域进行处理<sup>[15]</sup>。

根据研究区水文地质结构、边界条件和地下水补给径流排泄特征,将模拟区剖分为 $40\text{ 行}\times 40\text{ 列}$ ,在垂向上将含水层设定为 $1\text{ 层}$ ,共计 $1\ 600\text{ 个}$ 网格,其中活动单元格 $443\text{ 个}$ ,非活动单元格 $1\ 157\text{ 个}$ ,平面上单个网格大小为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ ,见图 2(a)。

在非稳定流模拟中对网格进行细化,矿区范围内单个网格加密为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 。在对矿区重点研究区进行加密处理后,行列数增加为 $92\text{ 行}\times 52\text{ 列}$ ,总网格数增加至 $4\ 784\text{ 个}$ ,其中活动单元格 $2\ 555\text{ 个}$ ,非活动单元格 $2\ 229\text{ 个}$ ,见图 2(b)。

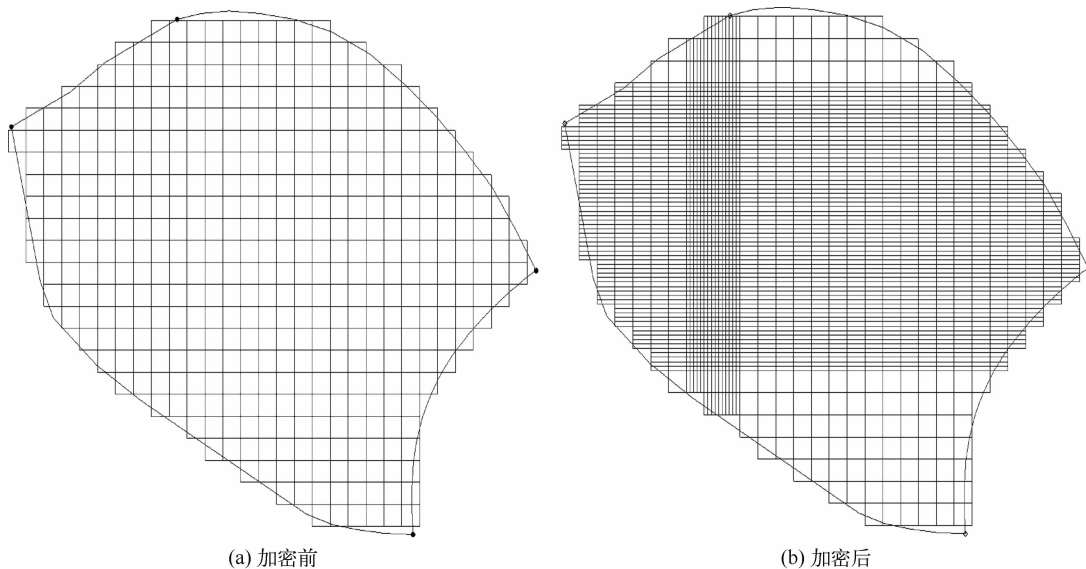


图 2 加密前后的网格剖分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid division before and after encryption

### 3.2 时间离散

由于研究区地下水流初始水头近于天然状态,故先建立研究区地下水稳定流模型,用实际地下水水位平均观测值对其进行识别验证。在稳定流

的基础上进行矿井涌水量计算。

### 3.3 初始水头

根据已有观测水位数据资料,利用 GMS 软件对水位数据进行处理,采用克里金插值法得到

模拟区地下水未开采条件下的初始流场(图 3)。可以看出,东南部水位最高,西北部水位最低,矿区地下水含水系统接受南山、寨脑顶区域水流的侧向补给,流经矿床所在区,向西北方向径流,通过棉花坑断裂排泄出去,地下水径流方向及地下水水位整体上与地势起伏保持一致。

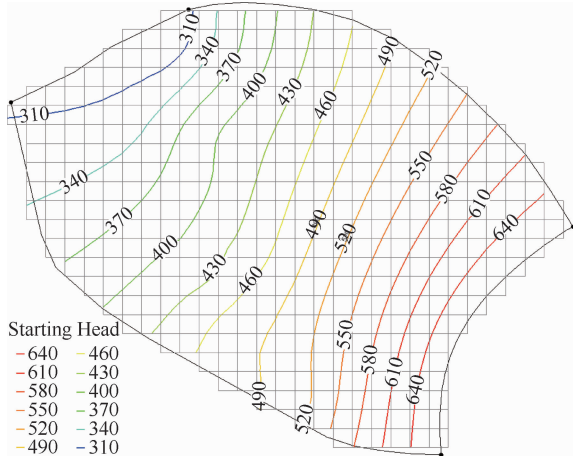


图 3 模拟区地下水初始流场图

Fig. 3 Initial flow field diagram of groundwater in the simulation area

### 3.4 边界条件

棉花坑断裂设定为第三类边界(混合边界),借助 GMS 软件中的通用水头边界子程序包(GHB—General-Head Boundary)对第三类边界(混合边界)进行量化处理<sup>[16]</sup>;油洞断裂和其他边界沿着地下水流线方向人为划定,均划为隔水边界。

### 3.5 源汇项

模拟区降水补给量采用多年年均降雨量(2 368 mm/a),蒸发量采用多年年均蒸发量(1 300 mm/a),其中降雨入渗系数采用经验值,蒸发高程取顶板活动单元格的最高标高,降水和蒸发均为统一设定。在 GMS 软件里借助 Recharge(补给)子程序包和 Evapotranspiration(蒸发蒸腾)子程序包进行计算。矿井开采抽水排泄项会在后边涌水量预测部分进行单独说明。

### 3.6 稳定流模型识别验证

模型校准是调整模型输入项,直到模型输出变量与实际观测值达到适当匹配程度的过程。基于对研究区水文地质条件的总结分析,使用试估-校正法进行地下水数值模型的校准,每次对水文

地质结构及源汇项等进行调整,直到模拟结果与实际观测值基本吻合<sup>[17]</sup>。

经过不断调整和修改,最终得到模拟区地下水水流场(图 4)。可以看出,模拟区地下水径流方向及地下水水位标高基本与地势整体起伏保持一致;从趋势上看,模拟的地下水水流场与实际地下水天然流场基本一致。软件模拟所得流场可以反映该地下水系统补给径流排泄的规律。

对勘察钻孔水位标高实测值与模拟值的误差进行了分析(图 5)。可以看出,经过软件数值模拟得到的水位值与实际观测的水位值较为接近,大部分钻孔水位误差较小,可以为矿床区域水文地质条件的刻画提供依据。

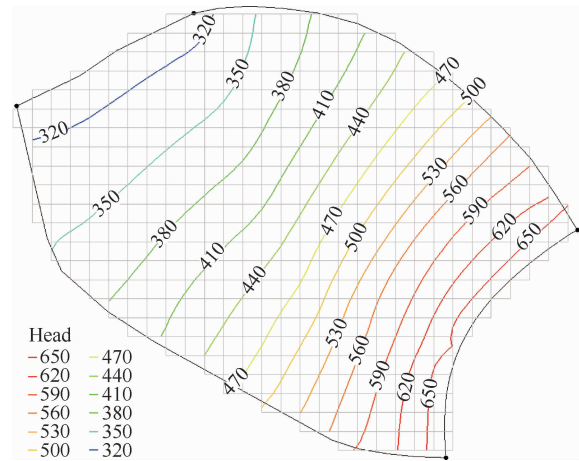


图 4 研究区地下水稳定流模拟流场

Fig. 4 Simulated flow field of stable groundwater flow in the research area

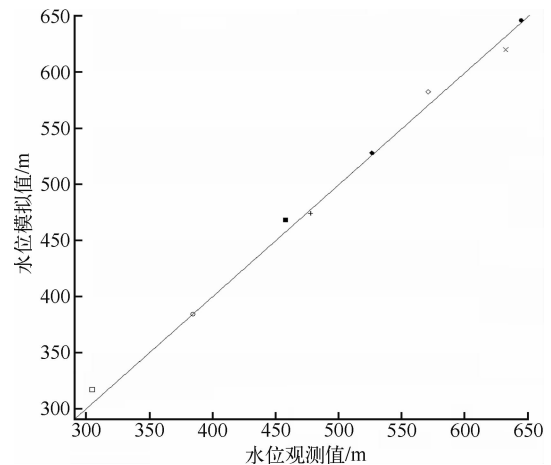


图 5 水位模拟误差分析

Fig. 5 Error analysis of water level simulation

### 4 涌水量预测

#### 4.1 非稳定流数值模拟

非稳定流模拟期为 1969—2044 年,共 76 年,

总计 76 个应力期,252 个时间步长,由此建立矿山开拓生产全寿命期的地下水数值模型。

运行地下水数值模型输出的地下水二维水位等值线图(图6),展示了不同开采阶段矿区地下

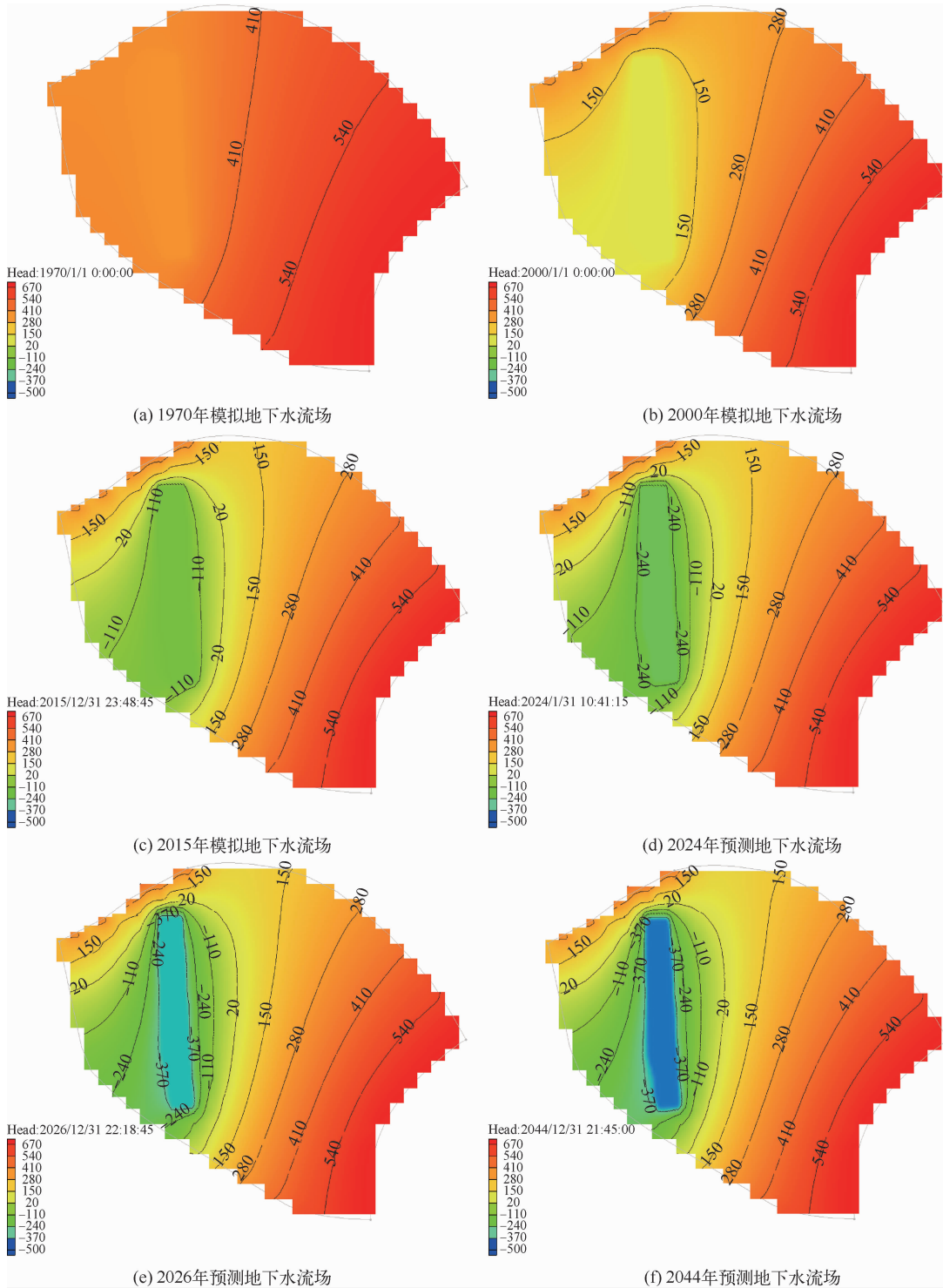


图 6 地下水流场动态变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of dynamic changes in groundwater flow field

水流场的形态变化情况,其中图 6(a)、6(b)、6(c)分别为 1970、2000、2015 年的矿区地下水流场,对矿床一期和二期建成投产后地下水的水位动态变化进行了模拟;图 6(d)、6(e)、6(f)分别为 2024、2026、2044 年的矿区地下水流场,对矿床三期建成投产后地下水的水位动态变化进行了预测。

从图 6 可看出,在矿山采矿时,排水过程会在整个矿区形成一定规模的降落漏斗,并且随着矿床不同时期开采阶段的变化,以及巷道开拓及排水中段的不断加深,降落漏斗的规模也随之发生变化。随着开拓不断深入,降落漏斗的影响面积和深度也不断增加,矿区附近的水位均有一定幅度的降低,等水位线的水力梯度明显加剧。

在稳定流模型中将西北部的棉花坑断裂带设定为天然状态下的流出边界,并将其概化为第三类边界(混合边界),即矿床地下水系统矿床接受南山、寨脑顶区域水流的侧向补给,流经矿床区域,向西北方向径流,通过棉花坑断裂带排泄出去。而在矿山开采排水形成降落漏斗后,棉花坑断裂带的流入流出性质发生了变化,由排泄边界变成了补给边界,通过棉花坑断裂带流入的水流和来自南山、寨脑顶方向的水流一起,构成了矿床地下水的补充来源,与矿山补充勘探钻孔和本次水文地质勘察孔所揭露的地下水情况一致。

#### 4.2 矿床涌水量预测

在 GMS 软件的概念模型图层中将矿山排水区设置为 1 个水均衡分区,运行模型,查看地下水流均衡列表,可以得到模型各补给项和排泄项的流量,进而可分析模拟区整个地下水系统的均衡情况<sup>[18]</sup>。提取相应时段排水沟水均衡分区的流量数据,得到各开采中段矿井涌水量的预测结果(表 1)。

表 1 矿床各开采中段涌水量预测

Table 1 Prediction of water inflow in each mining section of the deposit

中段标高/m	平均涌水量/(m <sup>3</sup> /h)	最大涌水量/(m <sup>3</sup> /h)
-200	65	98
-250	69	104
-300	71	107
-350	76	113
-400	82	123
-440	89	134

地下水流数值模型综合考虑了整个区域流场的水文地质条件、地下水动力学特征和补给径流排泄条件,预测得出的结果较为合理。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

通过对研究区水文地质条件进行归纳总结,分析了地下水的补给、径流和排泄条件,对水文地质单元进行了划分,采用 GMS 软件建立了地下水流数值模型,对-200 m 以下中段的矿坑涌水量进行了预测,得到了各中段的平均涌水量和最大涌水量,为矿山防治水提供了依据。

### 5.2 建议

由于矿山施工的水文地质钻孔数量较少,覆盖面较窄,对地下水补给通道的揭露程度不够,影响了对研究区水文地质条件的认知,建议开展更大规模的水文地质钻探和试验工作。建议对地下水水位、流量等进行更长时期的动态监测,以获得更加全面、详实的水文地质资料和数据。

### 参考文献:

- [1] 雷明信,徐强. Visual MODFLOW 在某矿山防治水研究中的应用[J]. 铀矿冶,2011,30(1):44-49.
- [2] 梁聪,咸玉建,赵燕容,等. 基于 FEFLOW 的某深埋长隧洞典型段涌水量预测[J]. 勘察科学技术,2020(3):32-37.
- [3] 刘吉磊,刘宇成,柴旺,等. 青海恰冬铜矿水文地质特征及矿井涌水量预测研究[J]. 地下水,2020,42(6):11-14+39.
- [4] 李明骏. 武山铜矿深部矿坑涌水量预测[J]. 铜业工程,2020(4):28-33.
- [5] 雷明信. 铀矿山矿坑涌水量计算方法修正与优化[J]. 铀矿冶,2020,39(4):250-260.
- [6] 李月. 生态环境约束下的格尔木河流域地下水资源评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2017.
- [7] 任赛. 中核韶关锦原铀业有限公司棉花坑矿井三期工程项目申请报告[R]. 石家庄:中核第四研究设计工程有限公司,2023.
- [8] 徐文雄. 广东省仁化县棉花坑(302)铀矿床资源储量核实报告[R]. 韶关:核工业二九〇研究所,2016.
- [9] 雷明信,霍晨琛,王新锐,等. 水文地质条件对铀矿床生产安全的影响[J]. 铀矿冶,2022,41(4):448-453.
- [10] 王锐. 目前铀矿山开采中存在的水文地质、工程地质问题及对今后勘探、设计和开采的某些意见[J].

- 放射性地质,1983(4):1-11.
- [11] 孟春晓. 水下隧道水文地质概念模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [12] 张人权,梁杏,靳孟贵,等. 水文地质学基础:第六版[M]. 北京:地质出版社,2011.
- [13] 范东东,徐卫东,刘金辉,等. 兴国县高兴幅、均村幅水文地质结构特征及水文地质概念模型研究[J]. 地下水,2019,41(6):92-95+130.
- [14] 赵磊. 梅林庙井田地下水环境影响评价数值模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.
- [15] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [16] 吴吉春,薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [17] 谢秀娟. 都兰冲洪积平原地下水数值模拟及资源评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [18] 陈艳丽. 北京市平原区地下水模拟模型研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006.

## Research on Prediction of Water Inflow in a Certain Deposit Based on GMS Numerical Simulation

CHEN Shuai

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** A certain deposit encountered a certain degree of water inflow during the mining process. In order to solve the water inflow problem and provide a basis for water prevention and control plan, the deposit was taken as the research object, the hydrogeological conditions of the deposit were generalized by analyzing the hydrogeological conditions, types and characteristics of aquifers, groundwater recharge and discharge conditions, geological structural characteristics, hydrogeological parameters, hydrogeological test data, and mining design data. The hydrogeological units of the study area were delineated, and a three-dimensional groundwater flow numerical model was established using GMS software, the predicted water inflow of the mining pit in the middle section below  $-200$  m was obtained.

**Key words:** hydrogeological conceptual model; numerical simulation; prediction of water inflow; GMS; groundwater flow