基于地下水数值模拟的控制疏干方案优化及矿坑涌水量预测*

王亮[1]，滕龙[2,3,4]，刘超[1]，马俊生[1]，张帅[1]，高超[2,3,4]

（1.北方矿业有限责任公司， 北京 100053；
2.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
3.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
4.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：地下矿山的矿坑涌水量及地下水渗流场时空变化的预测对于矿山防治水工程具有重要意义，直接关系到矿山安全生产和环境保护。刚果(金)某铜钴矿位于“赞比亚-刚果(金)”成矿带的一个小型推覆体中，水文地质条件复杂。若采用传统疏干方案，预计矿坑涌水量将超46 000 m^3/d。通过现场水文地质条件调查，利用矿区含水层垂向存在的多元结构和控制梳干原理，提出单层控制疏干方案。运用地下水流动理论和数值模拟技术，建立了能准确反映矿区水文地质特征的三维地下水数值模型。结合井下开拓期间的涌水点优化疏干钻孔布设方案，并预测940 m中段开采期的矿坑涌水量可降低至25 260 m^3/d。矿山按优化后的控制疏干方案施工，实现了首采矿段带压开采，相对于传统疏干方案，每年节约排水费用约234万美元。单层控制疏干方法可为非洲类似大水矿山提供借鉴，从而实现降低矿坑涌水量、保护矿区水资源，达到高效带压开采。

关键词：大水矿山；控制梳干；涌水量；数值模拟

中图分类号：TD74　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)07-0191-08

Optimization of Control Drainage Scheme and Prediction of Mine Pit Inflow Based on Groundwater Numerical Simulation

WANG Liang[1], *TENG Long*[2,3,4], *LIU Chao*[1], *MA Junsheng*[1], *ZHANG Shuai*[1], *GAO Chao*[2,3,4]

(1.Norin Minging Co., Ltd., Beijing 100053, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Hunan Engineering Research Center of Prevention and Management of Mine Geological Hazard and Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The prediction of mine pit inflow and the spatio-temporal variation of groundwater seepage fields in underground mines is of great significance for mine water control engineering, which is directly related to mine safety production and environmental protection. A copper-cobalt mine in the Democratic Republic of Congo (DRC) is located in a small nappe within the Zambia-DRC metallogenic belt, featuring complex hydrogeological conditions. If the traditional drainage scheme is adopted, the predicted mine pit inflow will exceed 46 000 m^3/d. Through on-site hydrogeological condition investigation, a single-layer control drainage scheme was proposed by utilizing the vertical multi-layer structure of the mining area's aquifer and the principle of control drainage. By applying the theory of groundwater flow and numerical simulation techniques, a three-dimensional groundwater numerical model was established to accurately reflect the hydrogeological characteristics of the mining area. Combined with the optimization of drainage borehole layout scheme based on water gushing points during underground development, the prediction shows that the mine pit inflow during the mining period of the 940 m level can be reduced to 25 260 m^3/d. The mine has been constructed according to the optimized control drainage scheme, achieving pressure-controlled

* **收稿日期**：2024-07-31
基金项目：中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(WKZB2412BJ0402105)
作者简介：王亮(1986—)，男，山东烟台人，硕士，高级工程师，主要研究方向为金属矿山防治水技术、矿山开采建设安全技术与应用。E-mail:164355236@qq.com
通信作者：滕龙(1994—)，男，湖北恩施人，硕士，工程师，主要研究方向为矿山水害防治理论与技术、地下水数值模拟技术及应用。E-mail:891629360@qq.com

mining in the first mining section. Compared with the traditional drainage scheme, it saves approximately 2.34 million US dollars in drainage costs annually. The single-layer control drainage method can provide a reference for similar high-water mines in Africa, thereby achieving the reduction of mine pit inflow, protection of mining area water resources, and efficient pressure-controlled mining.

Key words: High-water mine, Control drainage, Mine pit inflow, Numerical simulation

0 引言

矿山涌水量预测在矿业工程中具有重要意义,直接关系到矿山安全生产和环境保护。目前,矿山涌水量预测主要采用统计方法和数值模拟方法。统计方法通过分析历史数据,采用回归分析、时间序列分析等方法进行预测[1]。这些方法简便易行,但对数据质量和数量有较高要求。数值模拟方法则基于地下水流动理论,利用有限元、有限差分等数值方法建立水文地质模型,模拟矿山涌水过程[2-5]。数值模拟方法能较好地反映复杂水文地质条件下的涌水动态,但对模型参数和初始条件的依赖性较强[6-8]。目前矿山涌水量的预测面临着诸多挑战,比如复杂的地质条件、多变的气候因素以及人类活动的影响[9-10],这些因素使得预测具有较高的不确定性,仍需不断探索新方法和新技术,以应对复杂多变的实际情况,确保矿山的安全生产和环境保护[11-13]。

卡莫亚铜钴矿处于著名的中非铜矿成矿带中,矿产资源条件优良。矿区的地下水位约在海拔 1 310 m,在工程的开展过程中,斜坡道及竖井等工程结构会进入含水层中,地下水可能对基建工程构成安全威胁[14-16]。前期通过经验公式计算,未来采矿作业时,若按照传统疏干方案,预计排水量将超过 46 000 m^3/d,迫切需要进一步研究经济合理的疏干方案,以保证矿体的安全回采,并减少长期排水的运营成本。

1 研究区概况

1.1 研究区地层岩性及地质构造

图 1 为研究区的地质简图。卡莫亚矿的矿床位于一个小型的推覆体之中,矿区地层自下而上主要是上孔德龙古群(Ks)粉砂岩、中元古界加丹加群的罗安群(R)白云岩含矿地层及第四系(Q)松散层。逆冲推覆作用将深部较老的罗安群矿山亚群(R2)的含矿地层逆冲推覆至浅部,上覆于相对较新的上孔德龙古群。矿区经历多次推覆运动,相互叠加,从上到下有两套完整或不完整的 R2 矿山段地层,在垂向上地层划分为浅部 R2 段、深部 R2 段两个地质体,深部 R2 段矿体的赋存标高约为 940～1 270 m,矿区地表标高约 1 400 m。

构造发育的形式和强度是控制本区主要含水层富水性的主导因素。矿区的 F2 逆冲推覆断层及其下盘条带状粉砂岩(Ks)地层为矿区西、北、东三面的隔水边界;矿区南面由 F1 断层及其上推使倾向朝南的木瓦夏亚群往北逆冲推覆在“卡莫亚-坎博韦推覆体”之上,为矿区南部的弱补给边界,在雨季南部地表分水岭内的风化裂隙水侧向补给,冲沟地表水对矿区浅部 R2 含水层渗漏补给。地层的岩性结构特征对含水层的透水性具有显著影响。在研究区内,由于地层岩性结构的异质性,含水层透水性在空间分布上表现出较强的非均质性。同时,由于研究区域内部构造的活跃性,特别是在 R2 区域,部分岩组的岩层厚度相对较小,这导致了 R2 区域的白云岩含水层之间存在紧密的水力联系。这种水力联系促使这些含水层构成了一个统一的地下水含水系统。

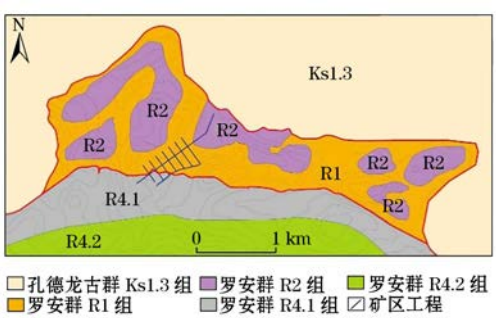


图 1 研究区地质简图

Fig.1 Geological map of the research area

1.2 研究区水文地质条件

卡莫亚矿区的地下水系统结构复杂,按地下水赋存条件可分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水和碳酸盐岩类岩溶裂隙水三种类型。碎屑岩裂隙水透水性弱,主要分布于矿区外围;碳酸盐岩岩溶裂隙水透水性强,主要分布于矿区内部,富水性显著,但

空间分布不均。

矿区的主要水补给来源为大气降水。研究区的降水量较为丰沛,加之适宜的降水入渗条件,共同确保了地下水补给过程的稳定性。在自然状态下,矿区地下水呈现自南西向东北的径流特征。自 1962 年坎博韦矿区开始开采以来,伴随着疏干排水的影响,卡莫亚矿区的地下水位出现了显著下降,导致地下水的流动方向发生了改变,向东流入坎博韦矿区。此外,矿区南部和西部的弱含水层中的浅层地下水,通过谷底下降泉的形式进行排泄,随后汇集成河流,继续沿东北方向进行径流。

卡莫亚矿区地质构造复杂,含水层受构造运动影响显著。区域褶皱和断层发育,构造形式和强度控制了主要含水层的富水性。矿区东、西、北三面以 F2 逆冲断层为界,断层下盘为条带状粉砂岩(Ks)弱含水层,其与推覆体内部存在较高水位差,因此可视为隔水边界。南面以 F1 断层为界,断层上盘为木瓦夏亚群弱-强含水层,可作为弱补给边界。研究区含水层结构如图 2 所示。

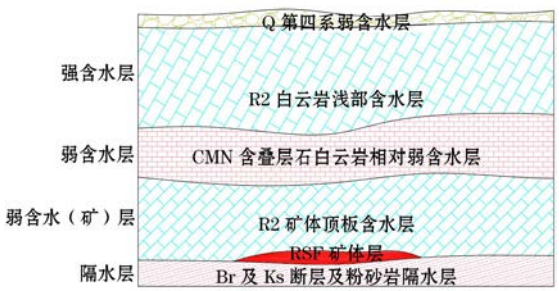


图 2 研究区含水层结构示意

Fig.2 Schematic of the aquifer structure in the research area

2 控制疏干方案

2.1 单层控制疏干原理

矿区含水层在剖面上存在多元结构(见图 2),就可能出现“两层水”现象。所谓“两层水”,就是在巨厚的含水体中,通过单层或下层放水(或抽水),使天然状态下具有同一个水位的同一个含水体中形成上、下两个(或两个以上)水位,在放水的全过程中,这两个水位长期并存而不消失。它不同于传统的两个含水层,也不同于一个含水层中的垂直分带或“上强下弱”的现象,而是一个新概念,实质上是含水层在人工活动下的一种动态反映,也可以称为“人工双层水位”。“两层水”的形成机理是地下水在渗流过程中,由于条件的改变而使水流在某个范围内形成一种水流间断现象,在间断区域内,地下水流线产生间断而不连续,为了满足能量守恒定律,地下水流则以水头补偿的形式表现出来,这就形成了“两层水”。由于各种地质原因,含水层在剖面上往往是不连续的,而且这种不连续会呈现规律性变化,这个规律就是含水层的渗透性从上到下呈现出“强→弱→次强(或强)”变化的三元结构。具备这种三元结构才有可能在下层单独疏干的条件下形成“两层水”现象。

2.2 单层控制疏干方案

单层疏干法作为一种有效的矿山水害防治技术,其核心理念包括疏干、避水、堵水和带压开采四个关键步骤。在这一方法中,“疏干”是指对下层含水层进行排水,通过设置放水孔或截水孔,对矿区周边的侧向水补给以及矿区内部的垂向水补给进行有效的疏干或截流,以确保采矿作业的安全性。“避水”策略则是利用地质结构中的弱透水层或设置防水矿柱,对上部的强含水层及富水断裂带进行有效的规避。这一措施旨在减少矿坑内的涌水量,同时控制地面沉降的范围,以维护矿区的稳定性。整体而言,单层疏干法通过综合运用上述技术手段,实现对地下水的有效管理和控制,以保障矿山开采的安全性和效率。“堵水”是针对沟通上下含水层的“天窗”、构造裂隙、断裂及未封钻孔进行注浆堵水,人为造成“两层水”,达到保护矿区水资源、防止地面塌陷等目的。“带压开采”主要是对上层水而言,由于上层水不完全疏干,地下水位高挂在采矿工作面之上,对采矿来说,整个采矿过程都处于带水压作业的状态。但因为上、下两层水之间经过注浆改造的岩层坚硬完整、厚度大,又采用了尽量不破坏顶板的采矿方法,且井下有较大的排水能力做保障,因此带压开采仍然是安全的。

本矿深部矿体岩溶裂隙含水层与浅部岩溶含水层间有近 120 m 厚的含叠层石白云岩隔水层,深部与浅部没有直接的水力联系,为保证单层疏干法顺利实施,形成较理想的两层水位,拟开展超前探水、水位监测、下层疏干试验、留设防水矿柱、注浆堵水、封堵钻孔、下层疏干(或截水)、采矿方法匹配及预留安全高度等方面的工作,见图 3。

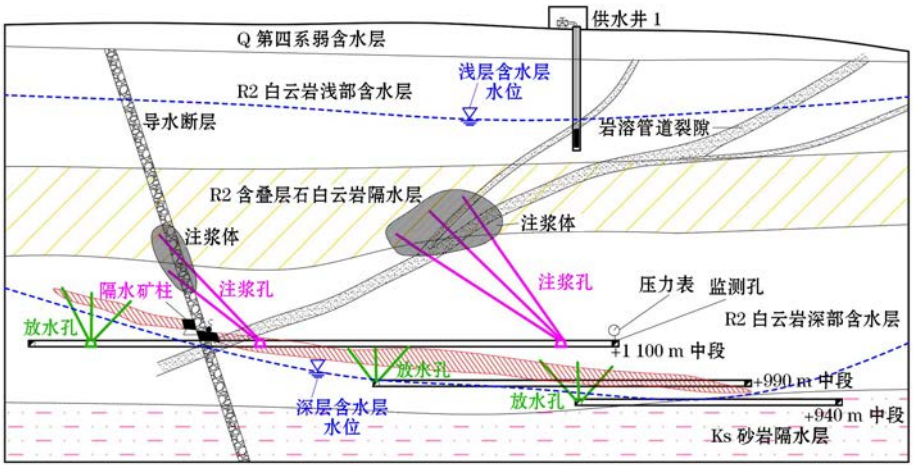


图 3 含矿层单层控制疏干方案示意

Fig.3 Schematic of single-layer control drainage scheme for ore-bearing strata

3 三维地下水数值模拟

3.1 数值模型建立及其精度评估

数值法应用于矿井涌水量预测的优势明显,除了能较真实地刻画矿区的水文地质条件外,还能量化各种复杂的开采条件和各种类型与强度的疏干过程,反映预报区内疏干过程中各种水文地质条件的变化以及疏干对天然排泄点水量的袭夺,因而能实现其他评价方法无法实现的目标。

卡莫亚铜钴矿床及其东邻的坎博韦铜钴矿床共同赋存于"卡莫亚-坎博韦推覆体"内。推覆体东西向展布,长 6 km、宽 0.7～1.8 km,面积约 5.5 km^2。矿区的东、西、北三面可作为隔水边界,南面为弱补给边界。

根据矿区地下水流系统特征,上部含水层与深部含水层以中等-强富水为主,地下水运动以水平向为主,即概化为平面二维流;基岩含叠层石白云岩相对隔水层中地下水运动以垂向为主,即作为主含水层的越流层处理。因此可把研究区地下水概化为非均质各向异性三维流。

模拟区东西方向长约 5 550 m,南北方向宽 700～2 000 m,面积约 5.5 km^2,地面高程为海拔 1 400.03 m 至 1 545.43 m。用三角网络(Triangle Mesh)对模型进行划分,在岩性分界处、开拓巷道、涌水点及疏干钻孔等位置进行加密。垂向上,按含水层结构以钻孔插值数据进行分层,980 m 以下至 940 m 中段每 10 m 为一个分层,以 900 m 标高为模型底部,共剖分 9 层、10 片。三维网格共计有结点 12 750 个,有限单元 227 376 个。时间剖分按天然期和施工期进行划分,每个阶段的时间步长采用软件自动剖分。数值模型如图 4 所示。

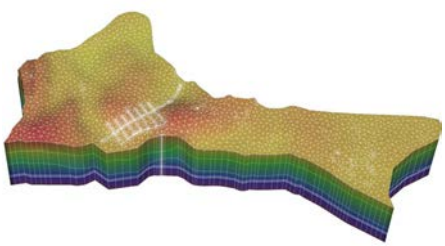


图 4 三维数值模型

Fig.4 3D numerical model

对构建好的数值模型采用 PEST 程序对各分区的水文地质参数进行反演调整,反演调整的目标函数见式(1),通过迭代计算约束拟合误差,使 E 值达到最小,最终实现对模型水文地质参数的优化。

$$E=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}W_j(H_{i,j}^{c}-H_{i,j}^{0})^2 \tag{1}$$

式中:E 为目标函数;n 为时段总数;m 为观测孔总数;W_j 为权重系数;$H_{i,j}^{c}$ 为对应于 i 时段第 j 号地下水动态观测孔的计算水头;$H_{i,j}^{0}$ 为 i 时段第 j 号地下水动态观测孔的实际测量水头。

优化后的参数见表 1,经过参数优化后模型的均方根误差(RMSE)值能够达到 0.087,矿区二期 34 个长期观测钻孔水位的观测值与模拟值的最大误差为 2.13 m,误差超过 2 m 的仅有两个钻孔,其余均在 2 m 以下,相对误差最大为 0.16%,说明参数优化后的模型具有较高的仿真精度,能够准确地预测矿区地下水的变化趋势。

表 1 模型初始水文地质参数

Table 1 Initial hydrogeological parameters of the model

序号	层名	岩性	渗透系数 K/(m/d)	给水度	弹性储水系数
1	第四系弱含水层	第四系	3.6	0.5	5.00E-04
		全风化白云岩	5.4	0.3	
		粉质黏土	0.03	0.15	
		构造角砾岩	0.008	0.02	
2	浅部岩溶裂隙含水层	硅质白云岩	3.3	0.25	1.00E-04
		块状白云岩	2.8	0.20	
		白云质页岩	2.5	0.20	
3	中部含叠层石白云岩相对隔水层	含叠层白云岩	0.003	0.1	1.00E-05
		其余白云岩	0.02	0.15	
4	深部矿体岩溶裂隙含水层	R2 白云岩	0.137～0.636	0.1	1.00E-04
		构造角砾岩	0.002	0.02	1.00E-05
		砂岩	0.005	0.01	
5～8	巷道及采场层		同上		
9	模型底部	砂岩	0.005	0.01	1.00E-05

模型的仿真性能达到初步要求之后,结合 2022 年 10 月井下涌水点实地调查,在模型不同层位设置概化后对应的涌水点,涌水设置见图 5,涌水点的平面坐标(X,Y)和高程 H 及涌水量 Q 见表 2,进行一年的非稳定流模拟,同时对比观测井 ZKS36-4 的观测数据与模拟数据(见图 6),进一步验证模型仿真性能。结果表明,模型能够较为准确地刻画矿区地下水的动态变化过程。

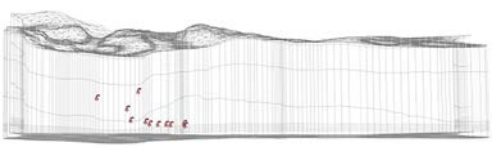


图 5 非稳定流时期井下涌水点设置

Fig.5 Setting of downhole water gushing points during the unstable flow period

表 2 非稳定时期井下涌水点参数

Table 2 Parameters of downhole water gushing points during the unstable period

涌水点	X	Y	H/m	Q/(m³/h)
W-1	262 861.80	292 322.66	1 165	50
W-2	262 716.09	291 692.98	1 043	5
W-3	262 344.32	291 404.94	1 091	60
W-4	262 717.77	291 510.44	1 030	20
W-5	263 429.51	292 034.62	980	50
W-6	262 865.15	291 405.72	980	50
W-7	262 942.24	291 490.71	970	35
W-8	263 027.66	291 529.37	970	35
W-9	263 192.38	292 646.62	960	30
W-10	263 264.46	291 706.80	960	30
W-11	263 368.55	291 724.39	960	30
W-12	263 124.19	291 580.14	960	30

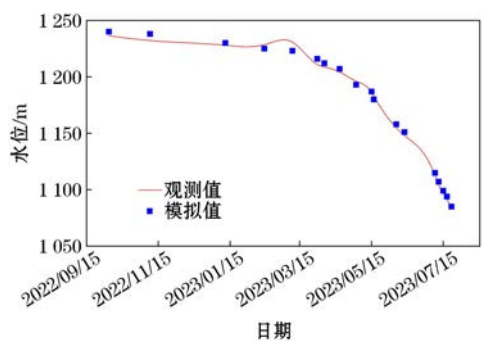
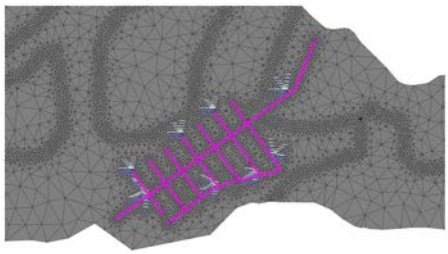


图 6 非稳定流时期 ZKS36-4 钻孔水位拟合曲线

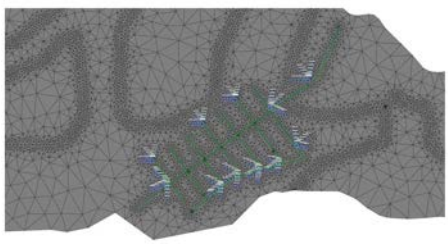
Fig.6 Fitting curve of water level in ZKS36-4 borehole during unstable flow period

3.2 控制疏干方案的确定

为了模拟不同疏干工况下,矿区地下水流场的变化情况,本次研究设计了两种疏干方案。方案一布置了 8 个疏干点位,每个点位包含 3 个疏干钻孔,共 24 个疏干钻孔,见图 7(a)。方案二布置了 11 个疏干点位,每个点位包含 3 个疏干钻孔,共 33 个疏干孔,见图 7(b)。模拟不同疏干方案下矿区地下水降至稳定状态所需时长。将疏干孔按设计方位、长度、仰角等设置输入模型,处理为线汇,将其节点设为渗流边界,渗流边界的水头值为其位置水头,以此模拟自然条件下疏干孔的工作模式[17-19]。当首采采场区域水头降为 960 m 以下时,结束模拟。疏干方案一的模拟运行 115 d 后达到要求,疏干方案二的模拟运行 77 d 后达到要求。不同疏干方案对应的地下水流场如图 8 所示。



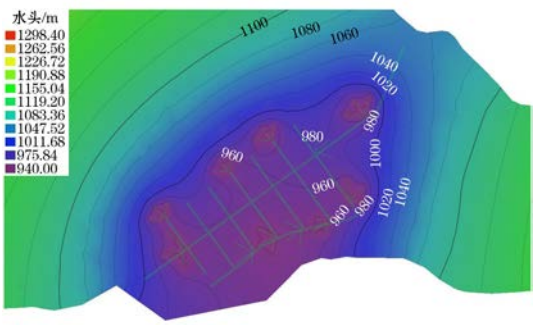
(a) 方案一



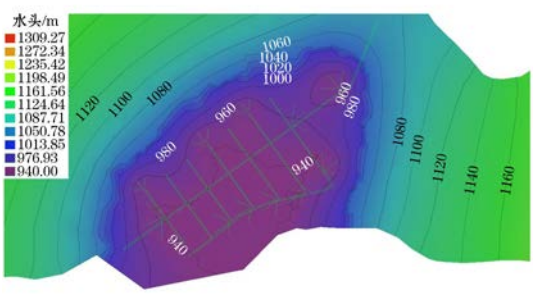
(b) 方案二

图 7 疏干钻孔的布置

Fig.7 Layout of drainage boreholes



(a) 方案一



(b) 方案二

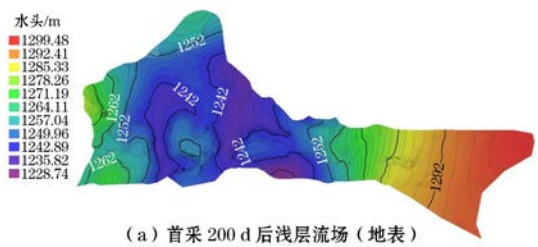
图 8 不同疏干方案下的地下水流场

Fig.8 Groundwater flow field under different drainage schemes

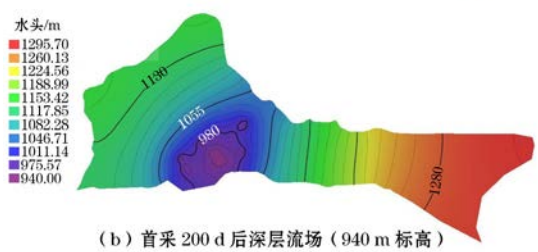
由图 8(a)可知,采用方案一疏干 115 d 后,首采采场大部分区域水头已经降至 960 m 以下;采用方案二疏干 77 d 后可以达到同样的效果。方案一虽然需要较长的疏干时间,但较方案二少了 9 个钻孔,降低了工程成本。综合考虑施工成本及疏干效率,推荐使用方案一来开展工程实践。

3.3 矿坑涌水量预测及疏干效果模拟

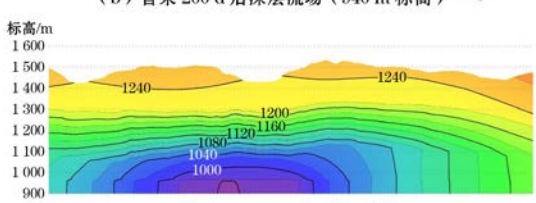
根据首采采场疏干初步设计,以方案一实施完成后的流场状态为初始条件,进一步开展 200 d 的采矿期间数值模拟。据模型预测,采矿期间 940 m 中段正常涌水量为 25 260 m^3/d。渗流场模拟结果如图 9 所示。完成井下疏干并开始正常采矿活动后,浅层渗流场形态变化不大,但卡莫亚区域浅层整体水位下降明显,1 250 m 等水位线外移明显,大部分浅层区域水位下降 20～30 m,因巨厚含叠层石白云岩的相对隔水作用,浅层含水层最低水位一直持续在 1 240 m 左右,浅层地下水通过该层越流补给深部,而深层流场形态变化明显,由原本的出水点控制变为疏干井和开采面控制,采场区域水头整体下降到 980 m 以下,平均水位下降 70～80 m。平面上,浅层区域两矿中间地带等水位线密集、水力梯度大,卡莫亚区域流场平缓;深层区域,采场两侧水力梯度较大,采场内部水力梯度很小,水位基本保持不变。垂向上,浅层水与深层水始终存在约 200 m 的水头差,在辅以有效的工程措施(如封堵"天窗"、钻孔及构造裂隙,留防水矿柱等)保证含叠层白云岩隔水层完整的情况下,可人为造成"两层水",最大限度降低涌水量,保护矿区水资源,达到高效带压开采。



(a) 首采 200 d 后浅层流场(地表)



(b) 首采 200 d 后深层流场(940 m 标高)



(c) 首采 200 d 后矿区剖面流场

图 9 开采 200 d 后的矿区地下水流场

Fig.9 Groundwater flow field in the mining area after 200 days of mining

4 结论

(1) 在充分了解刚果(金)卡莫亚铜矿的矿区地质、水文地质条件的基础上,利用数值模拟技术分析该矿山开采过程中地下水流场的变化特征,通过合理的参数分区设置及参数优化构建的数值模型能够实现地下水流场的准确预测,揭示矿区地下水运动规律。

(2) 通过不同疏干方案的疏干效果数值模拟,发现结合井下现有涌水点,另设 8 个疏干点位(24 个疏干钻孔)的疏干方案就能达到降低水头至 960 m 的工程要求,可大大节省疏干工程成本。

(3) 数值模型的预测结果显示,实施控制疏干方案后,该矿区可正常采矿,940 m 中段的正常涌水量约为 25 260 m^3/d,远低于传统疏干方案的 46 000 m^3/d。单层疏干的控制疏干方案可为“赞比亚—刚果(金)”成矿带类似矿山提供借鉴,从而降低矿井涌水量、保护矿区水资源,达到高效带压开采的目的。

(4) 刚果(金)卡莫亚铜钴矿按优化后的单层控制疏干方案施工,现已实现首采矿段高效采矿,当前井下涌水量为 21 000 m^3/d,预计整个中段开采后涌水量不超过 25 000 m^3/d,与模型预测结果一致。该疏干方案每年可为矿山节省排水费用超 234 万美元,矿山生产 15 a 可节约电费 3 500 万美元。

参考文献(References):

[1] 张发旺,陈立,王滨,等.矿区水文地质研究进展及中长期发展方向[J].地质学报,2016,90(9):2464-2475.
ZHANG Fawang, CHEN Li, WANG Bin, et al. Progress of hydrogeological research in mining areas and its mid-and-long term trend[J]. Acta Geologica Sinca,2016,90(9):2464-2475.

[2] 李贵仁,赵珍,陈植华.复杂岩溶矿区疏干条件下的地下水数值模拟:以福建省马坑铁矿为例[J].中国岩溶,2012,31(4):382-387.
LI Guiren, ZHAO Zhen, CHEN Zhihua. Numerical simulation for groundwater under draining condition in complex karst mining area:an example from the Makeng Iron Mine in Fuiian Province[J]. Carsologica Sinca,2012,31(4):382-387.

[3] ZHANG Ying, GAO Lianfeng, YANG Wenbin, et al. Hydrogeological conditions and mine inflow water forecast of the western long beach in Junggar coalfield[J]. Energy Procedia,2012,16:915-920.

[4] 谭廷静,曹振东.基于数值模拟技术的地下水流场变化特征分析[J].地下水,2016,38(5):214-216.
TAN Tingjing, CAO Zhendong. Analysis of characteristics of groundwater flow field based on numerical simulation[J]. Groundwater,2016,38(5):214-216.

[5] CHEN Shilei, XU Ke, YU Shubin, et al. Comparison study on two methods of water inflow prediction of coal mining[J]. Advanced Materials Research,2015,1092-1093:1379-1382.

[6] YIN Huiyong, WEI Jiuchuan, LILIANA Lefticariu, et al. Numerical simulation of water flow from the coal seam floor in a deep longwall mine in China[J]. Mine Water and the Environment,2016,35(2):1-10.

[7] 李贵仁,赵珍,折书群,等.复式推覆体内矿坑涌水量预测的地下水数值模拟[J].地质科技情报,2019,38(6):212-220.
LI Guiren, ZHAO Zhen, ZHE Shuqun, et al. Groundwater numerical simulation for predicting mine water inflow in a compound nappe[J]. Geological Science and Technology Information,2019,38(6):212-220.

[8] LEI Junqin, ZHENG Xiuqing, ZANG Hongfei. The effect of coal mining on the multi-aquifer system[J]. Advanced Materials Research,2014,919-921:1252-1256.

[9] SURINAIDU L, GURUNADHA RAO V V S, SRINIVASA RAO N, et al. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India[J].Water Resources & Industry,2014,7-8(C):49-65.

[10] 容玲聪,李栋.MODFLOW 三维地下水数值模拟设计城门山铜矿疏干系统[J].中国矿业,2009,18(12):96-99.
RONG Lingcong, LI Dong. 3-D numerical simulations MODFLOW groundwater dewatering system Chenqmenshan[J]. China Mining Magazine,2009,18(12):96-99.

[11] 施龙青,王雅茹,邱梅,等.时间序列模型在工作面涌水量预测中的应用[J].煤田地质与勘探,2020,48(3):108-115.
SHI Longqing, WANG Yaru, QIU Mei. et al. Application of time series model in water inflow prediction of working face[J].Coal Geology & Exploration,2020,48(3):108-115.

[12] 徐拴海,薛炜.矿区疏干地下水三维流与二维流对比研究[J].煤田地质与勘探,1998(3):39-43.
XU Shuanhai, XUE Wei. Contrast between three-dimension and two-dimension flow of drainage in coal mining area[J]. Coal Geology & Exploration,1998(3):39-43.

[13] 陈植华,孙璐,龚星.马坑铁矿疏干条件下地下水温度场特征及其指示意义[J].地质科技情报,2012,31(5):136-142.
CHEN Zhihua, SUN Lu, GONG Xing. Characteristics of groundwater temperature field and its indicative significance under drainage condition of Makeng Iron Mine[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5):136-142.

[14] 孙茂贵,朱承敏.基建矿山超前截流疏干技术应用[J].现代矿业,2023,39(11):67-69.
SUN Maogui, ZHU Chengmin. Application of advanced intercepting and dewatering technology in infrastructure mine[J]. Modern Mining,2023,39(11):67-69.

[15] 赵斌,刘大金,赵珍,等.西南某铅锌矿区三维流数值模拟研究[J].河南科技,2022,41(9):67-70.
ZHAO Bin, LIU Dajin, ZHAO Zhen, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow in a lead-zinc mining area in southwest China[J]. Henan Science and Technology, 2022,41(9):67-70.

[16] 王洪亮.刚果(金)卡莫亚铜钴矿水文地质条件浅析[J].地下水,2020,42(4):136-138.
WANG Hongliang. Research of the hydrogeological condition of Kamoya copper and cobalt mine, Congo[J]. Ground Water,2020,42(4):136-138.

[17] 李向前,毛景文,闫艳玲,等.中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征[J].矿床地质,2009,28(3):366-380.
LI Xiangqian, MAO Jingwen, YAN Yanling, et al. Reqional geology and characteristics of ore deposits in Katangan copper-cobalt belt within Congo (Kinshasa), Central Africa[J]. Mineral Deposits,2009,28(3):366-380.

[18] 范丽娟.巷道与降水孔联合疏干在露天矿疏干排水中的应用[J].煤炭工程,2006(4):12-14.
FAN Lijuan. Application of roadway and precipitation hole in drainage of open pit[J]. Coal Engineering, 2006(4): 12-14.

[19] 郭广君,苗强,苏建勋.浅谈矿床地质条件对疏干井结构设计的影响[J].黑龙江水利科技,2002(3):83-84.
GUO Guangjun, MIAO Qiang, SU Jianxun. On the influence of deposit geological conditions on the structural design of dry shaft[J]. Heilongjiang Science and Technoloqy of Water Conservancy,2002(3):83-84.