

动水位自动监测技术在地浸采铀矿山中的应用

徐 奇, 李 鹏, 逯 瑶, 崔 博, 李光辉, 任保安

(中核内蒙古矿业有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 针对某矿床试验采区存在的钻孔动水位差异大、地下水补给不足、单元抽注不平衡及浸出率差异大等问题, 以动水位自动化监测为抓手, 通过开展地下水位动态监测, 实现地下水动态的可视化。结合计算机数字处理与模拟技术, 对监测数据进行分析, 建立了以地浸流场数值模拟、流场特征研究、抽注流量精益化及地下水位优化调控为主的质量控制体系, 制定了科学的流场调控技术, 实现了浸出剂的合理分配, 减少了溶浸死角范围, 提升了采区流场的通畅性, 改善了单元抽注状况, 为采区智能化、精益化管理夯实了基础。

关键词: 地浸采铀; 地下水位; 动水位; 自动化监测; 流场模拟; 过程控制; 智能化; 精益化

中图分类号: TL212; TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0101-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.09.08

在地浸采铀过程中, 地下水流动是溶质组分运移的主要驱动力和载体。含水层系统发生的微小应变, 最终可导致井内水位的较大变化。由于无法及时自动监测抽液井动水位, 因此目前采用抽注液流量加权平均算法得到抽注平衡调控参数, 并定期手动调节单元流量。这种方式未能根据钻孔地质数据实现精益化调控, 导致试验采区各单元浸出率差异较大, 单元浸出率严重不均衡。

目前, 国内地浸采铀矿山主要通过监测抽液井内的动水位来推测溶浸液的空间范围^[1]。常用的动水位监测方法主要有电阻测量法、气压法、水位仪等^[2-4]。由于抽液井法兰盘、电缆等监测线缆易与抽液管、潜水泵电缆发生缠绕, 电阻测量法动水位测量误差大, 监测抽液井动水位的精确度不足。气压法工作效率较高, 但测量误差大、劳动强度高、监测动水位的连续性不足。水位仪作为一种本地测量设备, 其工作方式是将水位仪下放至抽液井动水位以下, 并按设定周期进行水位测量。然而, 在获取动水位数据时, 须暂停抽液井并取出水位仪进行读数。该操作方式不仅导致监测数据获取不及时、无法实现连续实时监测, 还会干扰抽液井的正常生产。

由于还没有一种方法能够实现对地下水位

空间分布的实时监测, 研究者一般采用以下 2 种方式重构地下水流场: 1) 根据空间上的已知点数据, 插值得出整个流场; 2) 利用数值模拟或深度学习方法, 模拟得到不同时刻、不同位置处的地下水位^[5-12]。在溶浸流场调控方面, 按照抽注平衡原则开展抽注液流量调节, 主要措施: 1) 根据抽液钻井流量, 调节采区边界钻井、内部注液量较大钻井的注液流量, 确保各区块抽注平衡; 2) 通过调节注液泵频率、注液井阀门开度, 提高井场单孔注液压力, 从而提升注液能力较差钻井的注液量, 便于抽注平衡; 3) 利用抽注平衡原理在整个采区抽液量与注液量基本相等的前提下, 控制每个抽注单元局部抽注平衡, 当单元抽注平衡难以控制时, 可根据运行情况人为划分区块, 控制区块内抽注平衡, 改善溶浸液分配不均现象, 减少溶液稀释, 有效控制溶浸范围, 提高浸出液铀浓度。

关于地浸采铀水位的监测与地下流场调控方面的研究仍不充分, 目前尚未建立有效的流场监测方法和技术手段^[13]。因此, 有必要开展采区地下水动态感知技术、地下水位调控与流场再造技术, 以及地浸化学场对流场调控再造的响应特征等方面的研究, 以期铀矿地浸采区精益化管理提供新的技术途径。

收稿日期: 2025-09-11; **修回日期:** 2025-12-12

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1700200)

1 现状分析

1.1 地下水动态监测与调控现状

1.1.1 动水位获取不及时

某铀矿床试验采区采用气压法和本地水位仪进行水位测量。气压法仅能获取当次的水位测量数据,水位数据不连续;本地水位仪虽可按设定周期进行水位测量,但在获取数据时,需取出水位仪,导致动水位获取不及时。

1.1.2 不同钻孔动水位差异性大

某铀矿床试验采区运行期间,分区块选择抽液井进行动水位监测。监测结果显示,抽液井动水位在 172~240 m,采区动水埋深最大相差达 68 m,动水位差异性较大(表 1)。

表 1 试验采区部分抽液井动水位

Table 1 Dynamic water levels of some extraction wells in experimental sampling area

井号	静水位/m	动水位埋深/m
1-8-9C	155	240
1-4-2C	140	180
1-7-14C	155	191
1-4-1C	150	207
SYC-4	135	172
1-3-6C	155	216

1.1.3 部分抽液井地下水补给不足

试验采区运行 29 个抽液井,其中 11 个抽液井孔径由 190 mm 变径至 152 mm,变径在 240 m 处;18 个抽液井孔径为 152 mm,一径到底。当前,潜水泵下放深度为 240、260、280 m,其中潜水泵下放深度为 240 m 的钻井有 11 个,下放深度为 260 m 的钻井有 6 个,下放深度为 280 m 的钻井有 12 个。在抽注运行期间,部分抽液井出现断流现象,表明抽液井地下水补给不足。

1.2 地浸采铀流场控制现状

1.2.1 单元抽注不平衡

试验采区按照抽注液流量加权平均算法进行抽注液流量调节,整体抽注液流量基本保持平衡,但单元抽注平衡未能实现精益化调控,各抽液井浸出液流量差异大,最高流量达 9.23 m³/h,最低流量仅为 2.28 m³/h,单元抽注严重不平衡(表 2)。

表 2 试验采区抽液井流量分布

Table 2 Flow rate distribution of extraction wells in experimental sampling area

抽液量/(m ³ /h)	<4	4~5	>5~6	>6~7	>7
井数/个	8	7	5	5	4

1.2.2 铀浸出率差异大

某试验采区铀浸采率差异大,单元浸出率分布见图 1。可以看出,30 组浸采单元中,浸出率在 0~20% 的钻井有 4 个,浸出率在 20%~50% 的钻井有 11 个,浸出率在 50%~75% 的钻井有 8 个,浸出率在 75%~85% 的钻井有 4 个,浸出率在 85%~100% 的钻井有 1 个,浸出率在 100%~200% 的钻井有 2 个;铀浸出率最高达 142.7%,最低仅为 15.5%,浸出率低于 50% 的单元占比为 46.7%,浸出率低的单元在采区内部和边缘均有分布,分布极不均匀。

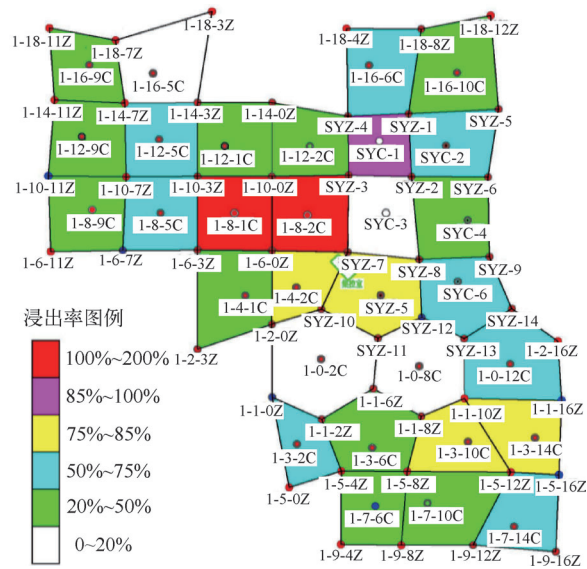


图 1 试验采区浸出率分布

Fig. 1 Distribution of the immersion extraction rate in experimental sampling area

2 运行控制体系建设与应用

2.1 采区地下水动态感知

2.1.1 地下水动态监测

根据采区生产井应用条件,结合地下水位测量仪器的大小、性能、价格及工作稳定性等因素,选取满足抽液井监测深度、设备耐压防水需求、现场应用条件的动水位监测装置。其主要参数:水

位量程 $\geq 200\text{ m}$;水位精度为 $\pm 0.5\% \text{FS}$;通讯模式为 RS485 或 RS232;外壳材质 316L 不锈钢;供电方式为锂电池 3.6V 或 DC5-30V。

在试验采区安装动水位监测装置,建立地表监控网络和相应终端的软硬件系统,并开发数据采集和处理系统。该系统具备以下功能:实时记录、显示 29 组试验单元抽液钻孔动水位数据,绘制实时水位监测曲线;异常数据报警,当水位低于下限设定值时,提醒停运相应潜水泵,防止泵体烧毁;根据设定时间可实时导出水位数据,生成 excel 表格,为采区运行分析提供数据支撑(图 2)。

已完成 28 井次的动水位监测装置安装工作,动水位监测装置绑扎在潜水泵上方,随潜水泵下入抽液井内,通过潜水泵的下放深度,换算出动水位标高,实现采区抽液孔动水位的动态监测。具

体井号、下放深度及水位标高见表 3、图 3。

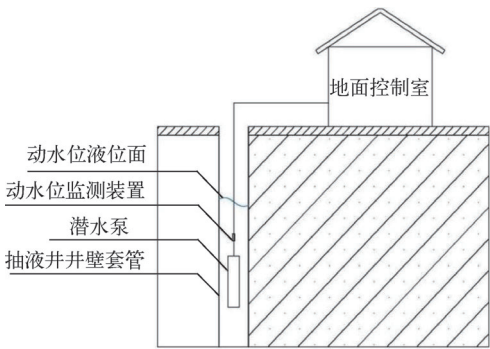


图 2 抽液井动水位实时动态监测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of real-time dynamic monitoring of water level in liquid extraction well

表 3 抽液井动水位监测装置安装情况

Table 3 Installation status of water level monitoring device in liquid extraction wells

井号	下放深度/m	初始水位标高/m	运行水位标高/m	井号	下放深度/m	初始水位标高/m	运行水位标高/m
SYC-1	199	1 306.49	1 274.03	1-16-10C	266	1 309.85	1 215.75
SYC-2	235	1 308.49	1 258.07	1-12-9C	244	1 305.72	1 237.09
SYC-4	208	1 306.12	1 255.09	1-12-5C	263	1 305.08	1 281.62
SYC-5	285	1 308.13	1 256.07	1-8-9C	269	1 304.95	1 269.50
SYC-6	211	1 305.49	1 277.19	1-8-5C	268	1 302.64	1 263.67
1-12-1C	233	1 305.64	1 244.48	1-0-8C	260	1 307.10	1 281.89
1-12-2C	235	1 304.87	1 229.34	1-0-12C	274	1 306.23	1 235.06
1-8-2C	232	1 303.21	1 252.14	1-3-2C	264	1 307.91	1 240.25
1-4-1C	280	1 305.14	1 223.47	1-3-6C	262	1 307.93	1 237.59
1-4-2C	274	1 304.66	1 252.27	1-3-10C	265	1 310.43	1 238.05
1-0-2C	237	1 304.95	1 271.24	1-3-14C	242	1 306.23	1 235.53
1-16-9C	264	1 306.60	1 228.39	1-7-6C	234	1 307.46	1 245.34
1-16-5C	263	1 306.75	1 240.85	1-7-10C	260	1 304.58	1 245.16
1-16-6C	266	1 304.62	1 199.14	1-7-14C	272	1 308.32	1 207.80

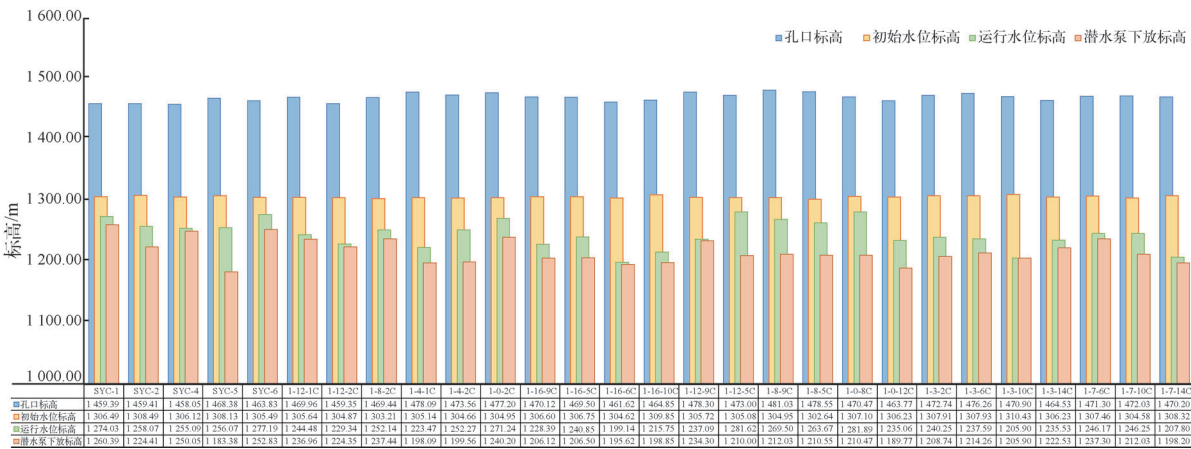


图 3 部分抽液井动水位标高变化情况

Fig. 3 Variations in dynamic water level elevation for selected extraction wells

2.1.2 地下水动态可视化

采区地下水位动态监测数据见图 4~图 5, 结合综合测井数据、钻孔岩性数据, 以及试验采区井型、井距、钻井运行情况, 选定试验单元, 研究地下水动态可视化技术, 开发可视化系统, 构建试验单元地下水位动态分布的三维可视化模型, 实现地下水位数据的动态可视化呈现与分析^[14]。

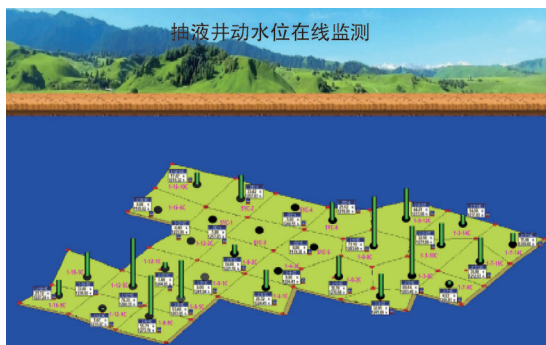


图 4 运行水头高度在线监测

Fig. 4 Online monitoring of operating head height

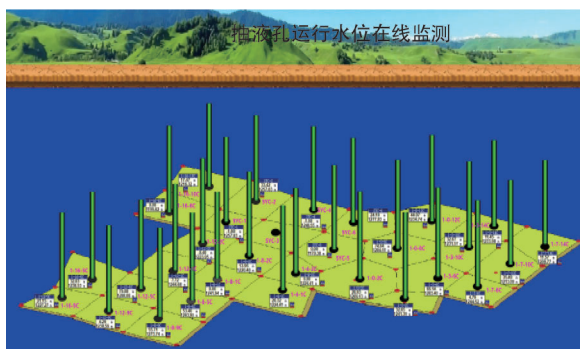


图 5 运行水位海拔标高在线监测

Fig. 5 Online monitoring of water level elevation

2.1.3 地浸流场数值模拟

根据采区内 80 个抽注井的位置和岩性统计, 建立地质模型(图 6)。采区钻井深度为 401.28~435.00 m, 平均井深为 412.25 m, 属于深钻井, 部分钻井并未揭穿含矿含水层底部, 未探测到底板埋深。因此, 在建模时, 以终井深度为含水层底板埋深。三维网格模型的网格化过程是空间网格的生成过程, 需根据生产井位置确定模型边界, 并调整网格精细程度。先建立该区域的 2D 网格化, 再构建 3D 骨架网格^[15-16]。在建立层面模型前, 首先要选定建模区域(建模边界), 并进行网格化。

模型精度由网格大小决定^[17-18]。该采区南北长约为 250 m, 东西宽约为 210 m。在满足模型构建精度的同时还需考虑计算机运行能力, 设定平面单个网格大小为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。

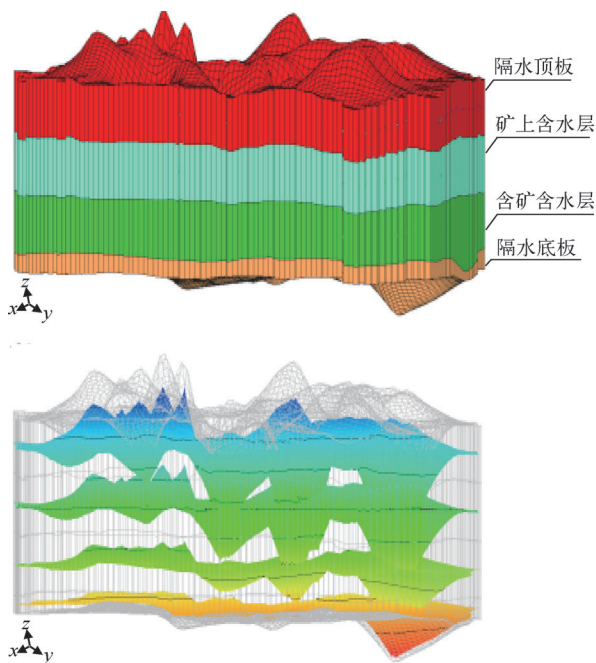


图 6 纳岭沟矿床三维地质模型

Fig. 6 Nalinggou mine 3D geological model

根据统计得到的钻孔岩性数据, 在埋深约 310 m 后, 岩性多为砂岩, 属于富矿岩石类型, 且矿层平均埋深为 390 m 左右。

基于地浸采区地下水动态感知可视化数据库, 采用相应可视化软件, 建立了纳岭沟矿床三维地质模型: 1) 模型空间范围。平面范围以采区为中心, 由采区边缘钻孔外扩 500 m 所形成的边界确定; 垂向范围基于所有地浸钻孔揭露的含矿含水层顶板和底板空间数据, 形成含水层顶、底板空间位置控制点的散点数据文件, 并导入地浸流场动态演算软件系统, 利用嵌入软件的克里金插值算法, 计算获得模型的上、下边界。2) 地层概化。为更好地刻画地层的非均质性, 将含矿含水层概化为四层, 分别为隔水顶板、矿上含水层、含矿含水层、隔水底板。3) 模型空间离散。将模拟区域离散为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的网格, 共包含 6 923 个有效网格的单元, 最终形成纳岭沟矿床三维地质模型。

在建立纳岭沟矿床三维地质模型的基础上, 以纳岭沟试验采区的水文地质参数、地浸钻孔空

间数据、地下水位监测数据、抽注流量数据等为依据,构建纳岭沟采区地下水渗流模拟、溶质运移模拟和粒子示踪模拟,实现地浸流场数值模拟。

2.2 地下水位调控与流场再造

2.2.1 地下水位优化调控

基于采区地下水动态感知可视化系统与地浸抽注液流量差异化均衡算法,建立地浸采区地下水位调控与流场再造方法,开展采区单元地下水位优化调控。

2.2.2 单元地下水位优化调控

1) 试验单元的选择

纳岭沟试验采区浸采率已达 62.11%。为确保采区试验单元流量精益化调节效果,先排除长期故障单元、浸采率过高单元、井型不规则单元等不适宜开展试验的单元。共排除试验单元 10 个,包括 SYC-3、1-8-1C、1-8-2C、1-6-5C、1-4-1C、1-3-2C、1-7-10C、1-7-14C、1-3-14C、1-3-10C。

2) 单元资源矿量

从单元保有储量、矿化质量等角度考虑单元资源矿量,在剩余的 20 个试验单元中排除不适宜试验的单元,包括 SYC-1、SYC-5、1-16-6C、1-7-6C、1-0-12C。

3) 铀浓度对流量变化响应性筛选

为避免流量增加稀释铀浓度,进而导致铀浓度与流量响应失真,本研究通过分析浸出金属量对流量波动的响应,来确定各单元流量与铀产出效率之间的相关性。当铀浓度或铀日产出金属量对流量变化有较好响应时,可作为试验单元。对剩余 16 个单元的铀浓度对流量变化响应情况进行分析,排除响应性不显著的单元。综合分析各单元的浸出金属量时间曲线、铀浓度时间曲线、抽水流量时间曲线,对比研究流量变化对铀浓度的影响,最终确定了 8 个响应较好的单元,分别为 1-0-2C、1-4-2C、1-8-9C、1-12-2C、1-12-9C、1-16-10C、SYC-2、SYC-4。

4) 流量调控必要性筛选

根据目标单元抽注比和周围部分单元抽注比情况,对余下 8 个单元的流量变化及抽注比情况进行综合分析,结合实际情况,最终确定开展流量和水位调控的试验单元为 1-0-2C、1-8-9C、1-12-9C、1-16-10C 和 SYC-2。

2.2.3 单元地下水位调控与流场再造调控方案

抽注单元流量分布越均衡,井型井距越规则

和统一,采区渗流场分布也越均衡,溶浸死角覆盖的范围也相对更小,从而更有利于浸出和资源回收^[19-22]。若井场中各井抽液量或注液量差异大,易形成溶浸死角;井距设置不合理,也会增大溶浸死角的范围。

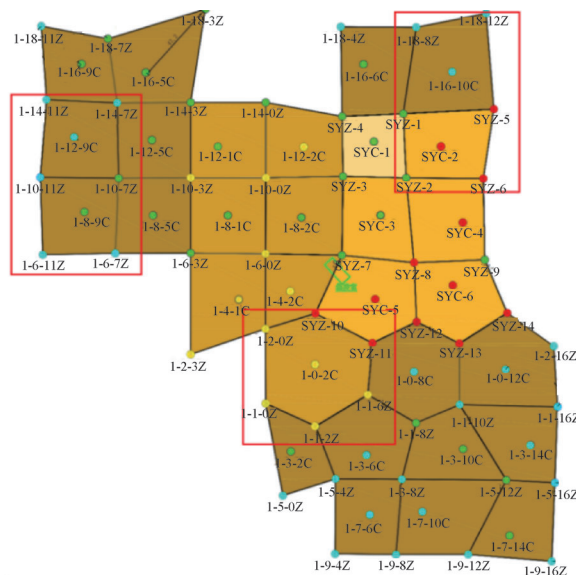


图 7 选定试验单元位置图

Fig. 7 Location map of selected test units

调控的具体思路如下:对于抽注流量稳定均衡、铀浓度较高的单元,尽量维持原有的抽注比,使流量维持稳定;对于浸采率较低的单元,分析铀浓度较低的原因,结合抽注流量调控算法,进行更加科学合理的调控;对于边缘单元增大其边缘注孔的流量,保证流经矿区的浸出液均匀,减少外来地下水稀释浸出液,减少溶浸死角,有效保证铀浸出效率;从全采区来看,对浸采率达到 90% 的单元、畸形单元可适当降低流量水平,以维持整个采区的抽注平衡。

通过采区地下水动态感知可视化系统,采用数值模拟的方法对采区运行情况进行预分析,以近一年的流量数据对纳岭沟矿床试验采区流场进行模拟计算,采用粒子追踪模拟技术,每个注液孔设置粒子数为 50,模拟浸出剂运移的迹线,分析浸出剂运移的时空分布特征。再根据前述流量分配算法初步拟定的 5 个单元,计算调控目标流量进行流场模拟计算,对比模型计算流场呈现出来的调控效果,进一步优化调整,以确定现场调控试验的流量分配方案。

采区实际流量粒子示踪模拟见图 8;采区模拟流

量粒子示踪模拟见图 9。

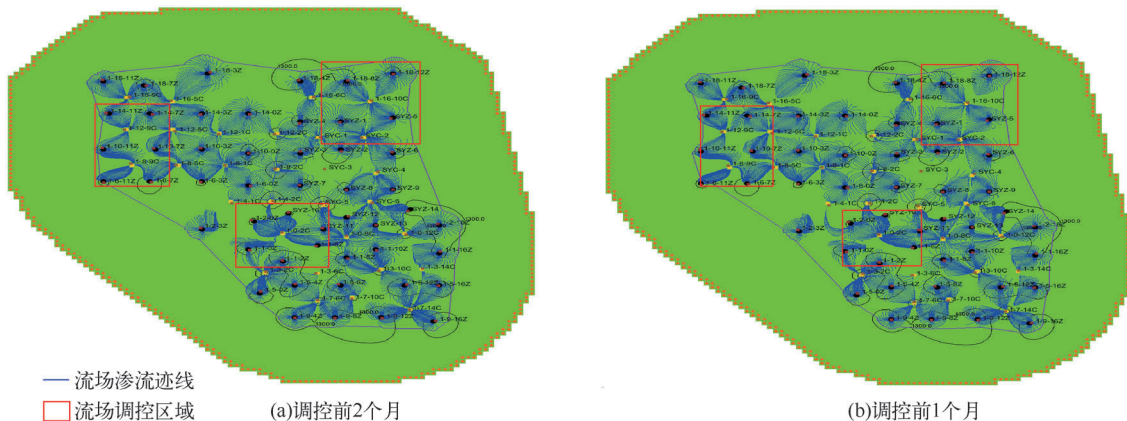


图 8 采区实际流量粒子示踪模拟图

Fig. 8 Particle tracing simulation of actual flow in the mining area

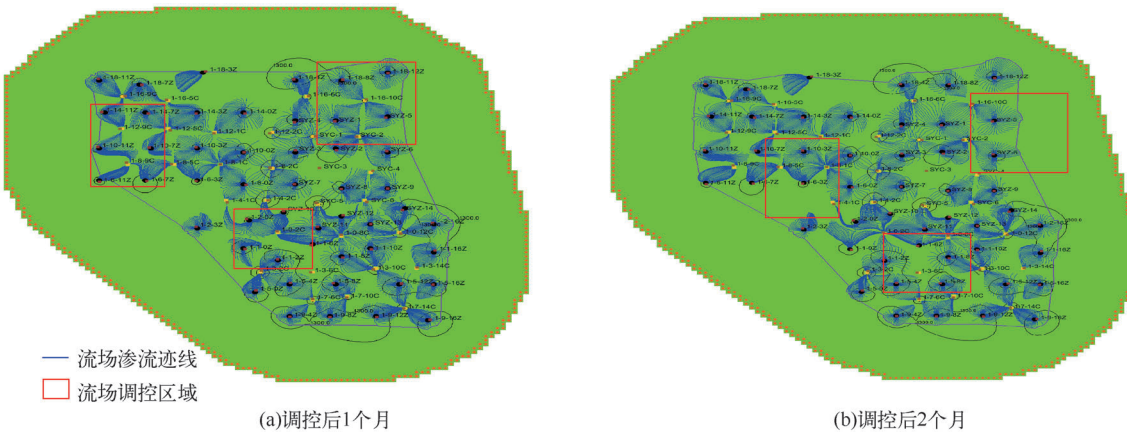


图 9 采区模拟流量粒子示踪模拟图

Fig. 9 Simulation of particle tracing in mining area flow

从图 9 可得出,采用调控后的流量运行,总体上,与调控前(图 8)相比,浸出液分布范围有所增加;但个别钻井所在区域的浸出液渗流范围有缩减趋势,如位于采区东北角的 1-18-12Z 钻井。因此,有必要在计算分配的流量调控方案基础上进一步优化。

具体优化措施:1)适当增大 1-14-11Z 井注液流量,以限制外围地下水进入单元,改善 1-12-9C 单元流场;2)适当增大 1-6-11Z、1-6-7Z 井注液流量,以限制采区外围来水,改善 1-8-9C 单元流场;3)适当增大 1-1-2Z、1-1-0Z 井注液流量,改善 1-0-2C 单元流场;4)适当增大 1-16-10C 单元中 1-18-12Z 井注液流量,以及 SYC-2 单元中 SYZ-5 井的注液流量。

2.2.4 流场再造调控实施

基于地浸采区单元地下水位调控与流场再造调控钻孔流量调控表,开展了现场试验。调控前,先通过洗井改善钻井 1-10-11Z、1-6-11Z、1-18-8Z、1-18-12Z、SYZ-1、SYZ-5 的流量可调控能力,通过更换潜水泵改善钻井 1-16-10C 的流量可调控能力,但 1-10-7Z 钻井因故障无法调控。

通过对单元开展地下水位调控与流场再造,对调控前后的流场数据通过采区地下水动态感知可视化系统进行模拟(图 10)。可以发现,调控前采区单元抽液井水力梯度过大,单元浸出液分布不均匀,存在明显的溶浸死角;通过调控,抽液井到注液井之间的迹线分布更均匀,浸出液分布更均衡,单元之间溶浸死角明显减少。

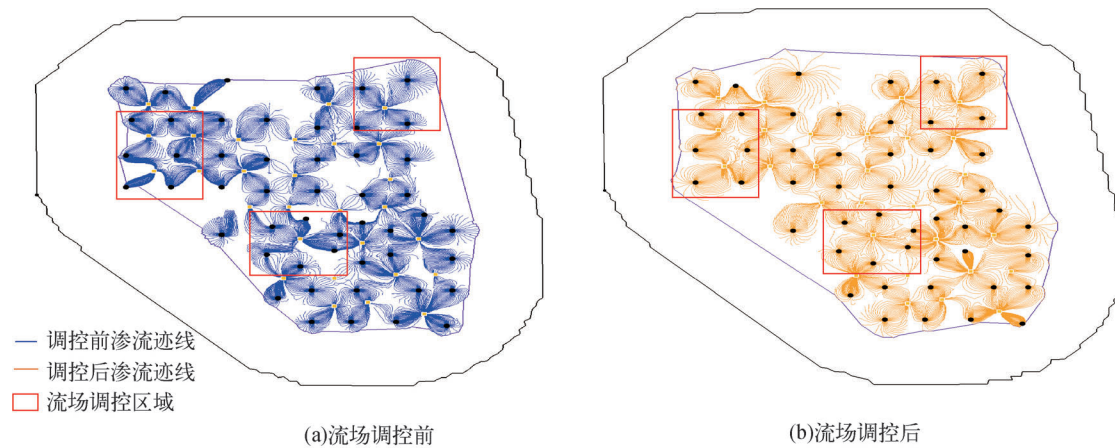


图10 单元调控前后流量粒子示踪模拟图

Fig. 10 Particle tracking simulation of flow before and after unit regulation

3 总结

1) 基于某矿床试验采区动水位数据获取不及时、不同钻孔动水位差异大、地下水补给不足、单元抽注不平衡、浸采率差异大等问题,通过抽液井动水位实时在线监测技术对井下水位进行监测,实时了解抽液井水位变化情况。

2) 通过流场调控和再造技术措施,根据各单元特点对浸出剂进行合理分配,调节各单元抽注平衡,减少了溶浸死角范围,改善了单元抽注状况,促进了采区均衡浸出,改善了溶浸液流场,使得浸出液铀浓度呈现上升趋势。

3) 动水位自动监测技术的应用,对建立地浸采铀智慧决策可视化系统,完善数字建井体系具有重要的现实意义,对鄂尔多斯千吨级铀矿山建设及流场精益化调控具有指导意义。

参考文献:

- [1] 霍晨琛,肖诗伟,陈帅,等.某地浸铀矿山开采条件下地下水流场特征分析[J].铀矿冶,2022,41(4):359-367.
HUO Chenchun, XIAO Shiwei, CHEN Shuai, et al. Analysis of groundwater flow field characteristics under mining conditions of an in-situ leaching uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4): 359-367.
- [2] 章树安,卢洪建,孙龙.对国标《地下水监测工程技术标准》认识与研究[J].水文,2023,43(1):1-5.
ZHANG Shu'an, LU Hongjian, SUN Long. Understanding and research on the national standard "Technical Standard for Groundwater Monitoring" [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(1): 1-5.
- [3] 姚永熙.地下水监测方法和仪器概述[J].水利水文自动化,2010(1):6-13.
YAO Yongxi. Summarization on monitoring methods & instrument for underground water [J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2010 (1): 6-13.
- [4] 杨建青,章树安,陈喜,等.国内外地下水监测技术与管理比较研究[J].水文,2013,33(3):18-24.
YANG Jianqing, ZHANG Shu'an, CHEN Xi, et al. Comparison between China and other countries on groundwater monitoring and management practices [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(3): 18-24.
- [5] 卢洪健,王卓然.地下水模拟方法与应用软件研究进展[J].地下水,2022,44(6):49-52.
LU Hongjian, WANG Zhuoran. Research progress in groundwater simulation methods and application softwares [J]. Groundwater, 2022, 44(6): 49-52.
- [6] 成建梅,罗一鸣.岩溶多重介质地下水模拟技术及应用进展[J].地质科技通报,2022,41(5):220-229.
CHENG Jianmei, LUO Yiming. Overview of groundwater modeling technology and its application in karst areas with multiple-void media [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 220-229.
- [7] 郑余修,罗跃,阳奕汉,等.鄂尔多斯某砂岩铀矿试验开采过程中地下水流场时空特征[J].有色金属(冶炼部分),2024(8):94-104.
ZHENG Yuxiu, LUO Yue, YANG Yihan, et al. Spatial and temporal characteristics of groundwater

- flow field during experimental mining of a sandstone uranium deposit in Ordos [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(8):94-104.
- [8] 常云霞,谭凯旋,张翀,等.地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究[J].*南华大学学报(自然科学版)*,2020,34(5):29-36.
- CHANG Yunxia,TAN Kaixuan,ZHANG Chong,et al. Simulation study on groundwater dynamics control in the leaching uranium wellfield leaching range [J]. *Journal of University of South China (Natural Science Edition)*, 2020, 34(5): 29-36.
- [9] 黄群英,周义朋,刘科,等.某砂铀矿地浸单元酸浸初期溶质运移与溶液渗流关系[J].*有色金属(冶炼部分)*,2017(6):24-27.
- HUANG Qunying, ZHOU Yipeng, LIU Ke, et al. Relationship between solute transportation and leaching solution flow during early period of acid in-situ leaching at one sandstone-type uranium deposit [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2017 (6): 24-27.
- [10] 吴慧,罗跃,李寻,等.利用数值模拟确定地浸采铀过程中溶浸范围[J].*有色金属(冶炼部分)*,2023(4):28-37.
- WU Hui, LUO Yue, LI Xun, et al. Determining the leaching range of in-situ uranium mining by numerical simulation [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023(4): 28-37.
- [11] 刘志锋,唐俊贤,林芝宁,等.基于深度可分离卷积混合网络模型的地浸采铀注液量预测研究[J].*铀矿冶*,2025,44(1):9-17.
- LIU Zhifeng, TANG Junxian, LIN Zhining, et al. Injection volume prediction for in-situ leaching of uranium based on depthwise separable convolution mixer network mode [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2025, 44(1): 9-17.
- [12] 张喆安,彭智婷,白云龙,等.物理信息神经网络在地下水铀迁移对流-弥散方程中的应用[J].*铀矿冶*,2025,44(2):29-37.
- ZHANG Zhe'an, PENG Zhiting, BAI Yunlong, et al. Application of physics-informed neural networks insolving the advection-diffusion equation of uranium migration in groundwater [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2025, 44(2): 29-37.
- [13] 于咏梅.远程分布式地下水位监测系统研究[J].*治淮*,2021(7):18-19.
- YU Yongmei. Research on remote distributed groundwater level monitoring system [J]. *Water Conservation in Huaihe River*, 2021(7): 18-19.
- [14] 高涵.基于SWAT与Visual Modflow模型的博斯腾湖流域绿洲地下水模拟研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [15] 魏亚强,陈坚,张铎,等.基于Python的地下水模拟研究进展与应用[J].*计算机技术与发展*,2021,31(5):150-156.
- WEI Yaqiang, CHEN Jian, ZHANG Duo, et al. Application and research progress of Python in groundwater numerical simulation [J]. *Computer Technology and Development*, 2021, 31(5): 150-156.
- [16] 宋亚丹,吴丛杨慧,林雪峰,等.地下水模拟软件GMS在场地环境调查中的应用[J].*河南科技*,2021,40(7):18-21.
- SONG Yadan, WU Congyanghui, LIN Xuefeng, et al. Application of groundwater simulation software GMS in site environmental investigation [J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(7): 18-21.
- [17] 吴鹏,杨江,王敏.远程分布式地下水位监测系统[J].*长江科学院院报*,2019,36(9):161-166.
- WU Peng, YANG Jiang, WANG Min. A remote distributed groundwater level monitoring system [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2019, 36(9): 161-166.
- [18] 王军进,张洪伟,张国珍,等.地下水数值模拟方法的研究与应用进展[J].*环境与发展*,2018,30(6):103-104.
- WANG Junjin, ZHANG Hongwei, ZHANG Guozhen, et al. Development and application of groundwater numerical simulation methods [J]. *Environmental & Development*, 2018, 30(6): 103-104.
- [19] 李凡,李家科,马越,等.地下水数值模拟研究与应用进展[J].*水资源与水工程学报*,2018,29(1):99-104.
- LI Fan, LI Jiake, MA Yue, et al. The research and application progress of numerical simulation on groundwater [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 99-104.
- [20] 严晋.GSM自动监测系统在地下水位监测中的应用分析[J].*信息通信*,2015(10):125-126.
- YAN Jin. Analysis of the application of the GSM automatic monitoring system in groundwater level monitoring [J]. *Information Communication*, 2015 (10): 125-126.
- [21] 钟佳迅,庾先国,王洪辉,等.高精度地下水位监测仪[J].*仪表技术与传感器*,2012(9):15-17.
- ZHONG Jiaxun, TUO Xianguo, WANG Honghui, et

al, High precision groundwater level monitor[J]. Instrument Technology and Sensor, 2012(9):15-17.

[22] 徐尧铮. 基于嵌入式技术的地下水位监测智能终端设计与实现[D]. 北京:北方工业大学, 2012.

Application of Dynamic Water Level Automatic Monitoring Technology in In-situ Leaching Uranium Mine

XU Qi, LI Peng, LU Yao, CUI Bo, LI Guanghui, REN Baoan

(China National Nuclear Corporation Inner Mongolia Mining Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: In response to the issues such as significant differences in dynamic water levels among different drilling wells in a test mining area, insufficient groundwater recharge, unbalanced unit extraction, and varying leaching rates, this study employs automated monitoring of dynamic water levels as a focal point. By carrying out dynamic groundwater level monitoring, we aimed to achieve a visualized system for groundwater dynamics. Utilizing computer digital processing and simulation technology for the analysis of monitoring data, we established a quality control system centered on numerical simulation of the leach flow field, study of flow field characteristics, optimization of extraction flow rates, and regulation of groundwater levels. We developed scientific techniques for flow field regulation, enabling reasonable distribution of leaching agents, reducing areas of dead zones in leaching, enhancing the smoothness of the flow field in the mining area, and improving unit extraction conditions, thereby laying a solid foundation for intelligent and refined analysis of the mining area.

Key words: in-situ leaching uranium; groundwater level; dynamic water level; automated monitoring; flow field simulation; process monitoring; smartization; lean management