

抽注互换对低渗夹层分布采区的铀浸出改进效果研究

王嗣晨,赵利信,贾 皓,王亚奴,郝树森,李沁慈,杜志明,谢廷婷,张 翀

(核工业北京化工冶金研究院,北京 101149)

摘要:巴音青格利铀矿采区内存在厚度不均且不连续分布的钙质砂岩和泥岩夹层,为探究低渗夹层对铀浸出效果的影响,基于试验采区钻孔数据构建了含矿含水层三维非结构化网格岩性模型,模拟了不同抽注方式的地浸采铀流场和溶质运移过程。通过引入基于群井实际抽注流量的矩阵化计算方法,量化对比分析了溶质质量比和天然地下水含量。结果表明:相较于原始抽注方式,将 SYC-1 和 SYZ-1 井的抽注方式互换后,地下水降落漏斗范围减小,抽液井对浸出液的捕获能力显著提升,抽出与注入的溶质质量比提升 1.7 倍,抽液量中的天然地下水含量降低 29.4%,抽注液井间的水力联系更强,浸出效果优于原始抽注方式;钙质砂岩和泥岩夹层显著阻碍了抽注液井间的水力联系,导致不同抽注方式产生显著差异化的浸出效果。

关键词:地浸采铀;非结构化网格;低渗夹层;抽注互换;数值模拟

中图分类号:TL212 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)03-0341-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.009

原地浸出采铀(地浸采铀)是一种在天然埋藏条件下,通过浸出剂与矿物产生反应,选择性地浸出铀矿物,而无需使矿石位移的集采、冶于一体的新型铀矿开采方法^[1-2]。在铀矿地浸开采过程中,抽注液井运行形成稳定的地下水流场,浸出剂在流场范围内与铀矿石发生水岩相互作用^[3-4]。已有学者借助数值模拟手段,从井网、过滤器位置和抽注液井流量等角度设计地浸采铀开采方案,通过分析流场的时空变化特征实现地浸采铀开采方案的优化^[5-8]。

由于含水层中低渗透性介质与含铀矿物的空间分布不均,使其呈现出显著的非均质性,进而影响地下水流动和溶质运移过程^[9]。针对这种情况,已有研究运用随机方法刻画非均匀渗透系数空间分布形式,并以此分析非均质性对浸出范围产生的影响^[10-11]。此外,还有学者构建了非均质地质模型,通过模拟地浸采铀过程中反应性溶质的运移情况,为浸出方案的设计提供指导^[12-13]。但上述研究均采用了传统“五点型”或“七点型”方式进行抽注,并未分析抽注方式对开采效果的影

响。另一方面,虽已有研究指出抽注反转技术能够增强水动力场、减少浸出死角并提升经济效益^[14],但这些相关结论大多仍是基于理想均质地质模型的假设得出的。

综上,现有研究关于抽注方式变化对流场与溶质运移的影响分析尚存在不足,且对抽注互换技术在实际非均质条件下的适用性也不够明确。因此,亟需在真实非均质地质模型条件下,综合考虑井间流量差异与抽注方式变化,定量评估其对地下水流动与铀浸出过程的影响。因此,研究了采用非结构化网格建模方法,建立巴音青格利铀矿床条件试验浸出单元非均质岩性模型,分别在原始“五点型”抽注和抽注互换方式下进行流场和溶质运移模拟,以获取地下水降深、抽液井捕获面积模拟结果,优化溶质质量比和天然地下水含量计算方法,在此基础上,对比了不同抽注方式的浸出效果差异;此外,从宏观岩性非均质结构的角度,深入剖析了抽注互换如何影响铀矿浸出效果的影响机制,以期在低渗夹层影响下的地浸采铀开采方案设计提供理论支撑。

收稿日期:2025-12-16;**修订日期:**2026-02-04

基金项目:中国核工业集团青年英才项目资助(CNNC-YC2024-65)。

第一作者简介:王嗣晨(1997—),男,硕士,工程师,主要研究方向为原地浸出采铀数值模拟。

通信作者简介:贾皓(1996—),男,硕士,工程师,主要研究方向为铀矿采冶。

1 研究区概况

巴音青格利铀矿床位于鄂尔多斯盆地北部,海拔标高在 1 300~1 500 m 之间,为典型高原丘陵区地貌。矿床自下而上可分为 2 个含水层,即直罗组下段下亚段含水层(第Ⅰ含水层)和直罗组下段上亚段含水层(第Ⅱ含水层)。第Ⅱ含水层中夹有厚度不等、但具有一定水平向连续性的泥岩和钙质砂岩隔水层,将其分为Ⅱ-1 和Ⅱ-2 含水层。其中,Ⅱ-1 含水层平均厚度 37.0 m,底板隔水性良好且连续、稳定分布,已发现的铀矿体主要产于该含水层。

巴音青格利铀矿床条件试验设计 2 个抽注浸出单元,包含 6 个注液孔和 2 个抽液孔(图 1),循环抽注运行并考察钻孔抽注液量、铀浓度随时间的变化规律。在原始“五点型”抽注方式下运行半年后,因浸出铀浓度较低,将 SYC-1 和 SYZ-1 井的抽注方式互换,即调整 SYC-1 为注液井、SYZ-1 为抽液井。实测数据显示,在抽注互换前、后抽液孔的铀平均质量浓度分别为 0.71 mg/L 和 79.6 mg/L,表明抽注互换后浸出效果显著提升。试验以 SYC-1 浸出单元为研究区,采用数值模拟手段分析了抽注互换前、后的浸出效果差异,并探究了产生差异的原因。

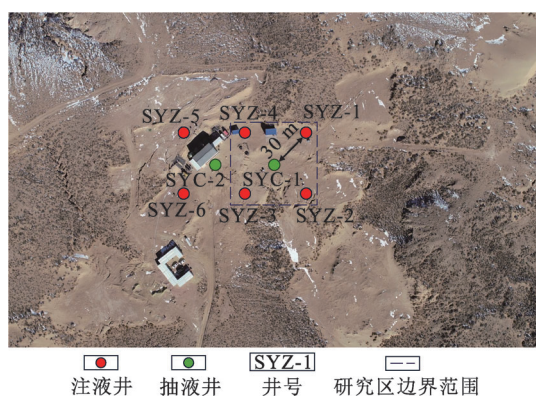


图 1 巴音青格利条件试验浸出单元分布
Fig. 1 Distribution map of leaching unit in Bayin Qingeli pilot test

2 建模原理与分析方法

2.1 非结构化网格建模

GMS(Groundwater Modeling System)是进行地下水流场及溶质迁移模拟的主流软件,同时

兼容基于体积有限差分法的非结构化网格剖分模块(MODFLOW-USG)。不同于传统结构化网格的层、行、列剖分方法,MODFLOW-USG 程序可将单元格在水平方向上定义为任意多边形,垂向上为对应的多边形棱柱体,每个单元格可与任意个数的单元格连接,建立非结构化网格(Ugrid)^[15]。Ugrid 模型的单层无需连续,可更好地表征非均质地体和不连续层,刻画含矿含水层和低渗夹层的尖灭现象^[16-17]。MODFLOW-USG 程序中体积有限差分方程的一般形式^[18]:

$$\sum_{m \in \eta_n} C_{nm} (h_m - h_n) + \text{HCOF}_n (h_n) = \text{RHS}_n \quad (1)$$

式中: C_{nm} —第 n 个和第 m 个单元格之间的水力传导系数; h_m 、 h_n —第 m 个、第 n 个单元格的水头,m; HCOF_n —平衡方程中,与单元格 n 的水头 h 有关的系数总和; RHS_n —平衡方程的右端项。

巴音青格利铀矿床地质条件复杂,存在厚度不均且不连续的钙质砂岩和泥岩层,适用 MODFLOW-USG 搭建含矿含水层模型。

2.2 流场与溶质迁移数学模型

根据矿床水文地质条件,将含矿含水层概化为三维承压非稳定流地下水系统^[19]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(KM \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KM \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(KM \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (3)$$

$$-n \cdot K \cdot \frac{dH(x, y, z, t)}{dl} = C(H - H_b) \quad x, y, z \in \Gamma_{GHB} \quad (4)$$

$$-n \cdot K \cdot \frac{dH(x, y, z, t)}{dl} = 0 \quad x, y, z \in \Gamma_{nf} \quad (5)$$

式中: H —含水层水头,m; M —含水层厚度,m; K —渗透系数,m/d; S_s —比储水系数, m^{-1} ; x, y, z —空间坐标; t —模拟时间,d; H_0 —含水层初始水位,m; $\frac{dH(x, y, z, t)}{dl}$ —水力梯度; H_b —边界外水头,m; Γ_{GHB} —通用水头边界; Γ_{nf} —隔水边界。

研究建立了溶质迁移模型,根据数值模拟结果进行天然地下水影响分析,所选择溶质为中性,不考虑吸附和化学反应过程,控制方程^[20]为:

$$-v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} +$$

$$D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (6)$$

$$\rho(x, y, z, t) |_{t=0} = \rho_0(x, y, z) \quad (7)$$

$$\rho(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = \rho_1(x, y, z, t) \quad (8)$$

式中: ρ —溶液质量浓度, g/L; D_x, D_y, D_z — x, y, z 方向上的弥散系数, m^2/d ; v_x, v_y, v_z — x, y, z 方向上的地下水流速, m/d ; ρ_0 —溶液初始质量浓度, g/L; Γ_1 —给定浓度边界; ρ_1 —给定浓度边界溶液质量浓度, g/L。

2.3 天然地下水对地浸采铀流场影响分析

浸出液与天然地下水的水量交换不仅会降低铀浸出效率,还可能对外部地下水环境产生不利影响^[21]。研究基于文献[22]提出的地下水稀释率计算理论,引入多井变流量场景,结合溶质运移模拟,通过在模拟中添加具有示踪作用的溶质,量化了天然地下水对浸出液流场的影响,为流场变化分析提供了科学依据。

对于由 j 个抽液井和 k 个注液井组成的地浸采铀井场,在 t 个均匀时间段内抽液井流量和注液井流量分别用矩阵 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{I}$ 表示:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1t} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{j1} & q_{j2} & \cdots & q_{jt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1t} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{k1} & q_{k2} & \cdots & q_{kt} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在所有注液井中注入质量浓度为 ρ_0 的中性溶质 A,每个时间段的总时间为 T ,溶质 A 的总注入质量 m_i 为:

$$m_i = \sum_{k,t} \mathbf{I}_{kt} \cdot \rho_0 \cdot T \quad (11)$$

根据溶质迁移模拟结果,计算各抽液井在各时间段内抽取溶质 A 平均质量浓度,用矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 表示。采区累计抽取的溶质 A 质量为 m_p :

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1t} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{j1} & \rho_{j2} & \cdots & \rho_{jt} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$m_p = \sum_{j,t} (\mathbf{P}_{jt} \cdot \boldsymbol{\rho}_{jt}) \cdot T \quad (13)$$

定义 m_w 为抽出和注入的溶质 A 质量比,同

时定义 m_p/ρ_0 为所有抽液井在时间 T 内抽取的经注液井注入溶液流量,该值与总抽液量之差即为天然地下水进入采区的流量值,得到天然地下水含量 r_w :

$$m_w = \frac{m_p}{m_i} \quad (14)$$

$$r_w = \left(1 - \frac{m_p}{\rho_0 \cdot \sum_{j,t} P_{jt}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

此外,定义 S 为 m_w 和 r_w 的参数变化速率绝对值,可量化参数随时间的动态变化趋势, θ 为 m_w 或 r_w 参数。以上计算过程均基于 Python 语言的 numpy、pandas 等库进行实现。

$$S = \left| \frac{d\theta}{dT} \right| \quad (16)$$

3 地浸采铀数值模型

3.1 三维非均质岩性模型

含矿含水层物理参数的空间变异性对浸出效果有重要影响^[12]。基于抽注液孔的岩性数据和非结构化网格建模方法,构建了非均质岩性模型。II-1 含水层岩性主要为粗砂岩、中砂岩和细砂岩,间夹有钙质砂岩、泥岩等低渗夹层。将研究区内的钻孔岩性划分为 4 类:粗砂岩类、中砂岩类、细砂岩类和泥岩类(含钙质砂岩)。各岩性的水文地质参数见表 1。其中,渗透系数和孔隙度取值依据抽注单元现场水文试验和实验室孔渗气测结果设置,水平向渗透系数 K_h 和垂向渗透系数 K_v 之比为 10,比储水系数 S_s 则依据经验值进行赋值。

表 1 不同岩性的水文地质参数

岩性	$K_h/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_v/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	S_s/m^{-1}	孔隙度
粗砂岩类	1.37	0.137	4×10^{-4}	0.25
中砂岩类	0.70	0.070	2×10^{-4}	0.20
细砂岩类	0.11	0.011	1×10^{-4}	0.15
泥岩类	1×10^{-5}	1×10^{-6}	6.5×10^{-5}	0.05

将 SYC-1 浸出单元向外延伸 10 m 作为研究区平面范围(图 1),采用泰森多边形法进行平面网格剖分,建立二维非结构化网格(2D Ugrid)。基于岩性数据联立生成二维地质岩性剖面,与 2D Ugrid 结合,应用反距离权重法插值得到三维非结构化网格岩性模型(图 2)。

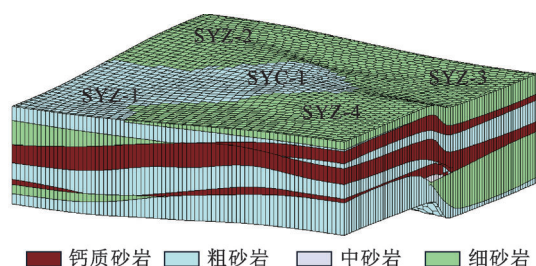


图 2 MODFLOW-USG 三维岩性模型

Fig. 2 MODFLOW-USG 3D lithological model

3.2 流场与溶质运移模型设置

在岩性模型的基础上建立地浸采铀流场和溶质运移模型。根据巴音青格利铀矿普查资料,研究区水力坡度仅为 1‰,可将平行于地下水流向的边界设置为通用水头边界,垂直于地下水流向的则设置为零通量边界。II-1 含水层存在稳定的隔水顶底板,故设置上、下边界为隔水边界。

依据日流量监测数据,设置各应力期内的单井流量。2023 年 7 月 1 日至 2024 年 4 月 1 日(约 270 d),采用原始“五点型”抽注方式(SYC-1 为抽液井,其他为注液井)进行地浸开采。保持模型其他条件不变,仅改变井的抽注液方式。自 2024 年 4 月 1 日起,将 SYC-1 和 SYZ-1 的抽注方式互换(图 3),井流量数据截至 2024 年 5 月 30 日。

为便于分析铀浸出效果及影响因素,将 2 种抽注方式的模拟总时长均设为 270 d。对于原始抽注方式,依据生产运行状况将模拟过程划分为 9 个应力期,井流量采用对应应力期内的实测月均值;抽注方式互换后,井场实际运行时间为 60 d,且抽注流量波动较小,因此可将模拟总时长简化为单一应力期,采用抽注液井 60 d 实测平均流量作为流量条件。

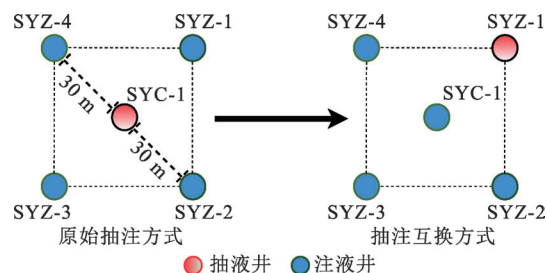


图 3 抽注液方式调整示意

Fig. 3 Schematic diagram of extraction-injection scheme adjustment

模型中抽、注液井在垂向上包含多层单元格,但不同层岩性的渗流能力存在差异,因此基于单井实测流量值 Q_w ,采用加权平均法分配不同岩性(泥岩类除外)单元格的流量 q_{wj} (共 n 层)。根据达西定律,将第 j 层单元格层厚 H_j 和该层岩性渗透系数 K_j 的乘积作为流量分配的权重值,根据式(17)计算得到模型中的单井流量分配方案:

$$q_{wj} = Q_w \times \frac{H_j \times K_j}{\sum_{i=1}^n (H_i \times K_i)} \quad (17)$$

天然地下水与地浸采铀流场的水量交换程度决定了浸出效率^[22]。在前述渗流模型的基础上,添加 USG-Transport 模块构建溶质运移模型,分析不同抽注方式下地浸采铀采区受天然地下水的影响程度。定义易溶于水的中性溶质 A 作为示踪剂,将 A 溶液在注井处以 10 g/L 的恒定质量浓度经注液井注入地层,其他区域初始质量浓度均为 0 g/L,建立 2 种不同抽注方式的溶质运移模型。

4 试验结果与讨论

4.1 地浸采铀流场分析

调用 MODFLOW-USG 专用求解器 SMS,求解不同抽注液方式的地下水渗流模型,分析各应力期内地浸采铀流场的变化情况。在不同抽注方式下抽液井(SYC-1 和 SYZ-1)的平均降深分别为 14.38 m 和 13.55 m。原始抽注方式中抽液井的水位降深更大,出现了以 SYC-1 为中心的地下水降落漏斗,影响半径达 20 m 以上(图 4(a))。进行抽注互换后,地下水降落漏斗半径显著减小,仅在 SYZ-1 位置出现地下水位局部下降现象(图 4(b))。

建立非结构化网格粒子追踪模型,在所有注液井内投放粒子,进行三维流线模拟。在原始抽注方式下,投放至注液井的部分粒子向远离抽液井的方向移动,抽注液井间的水力联系较差(图 5(a));而抽注互换后流线在抽液井附近密集分布,注液井投放的大部分粒子可被抽液井捕获(图 5(b))。

计算模拟 270 d 后抽液井的捕获面积 C_A ^[23],以表征抽注液过程所形成流场的影响范围。在原始抽注方式下,抽液井(SYC-1)的捕获面积仅为 1 079.14 m²。在抽注互换后抽液井(SYZ-1)对浸出液的捕获面积增大,达 2 839.79 m²,相较原始抽注方式增大 163.2%。

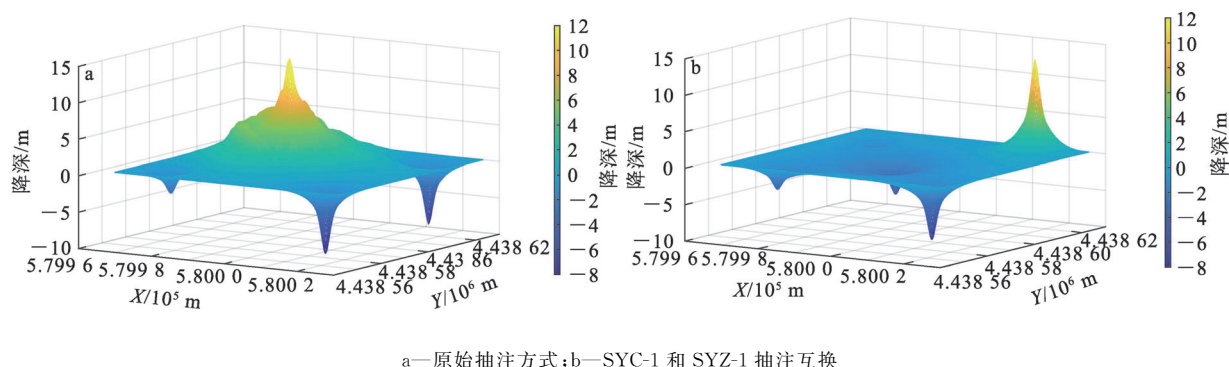


图 4 不同抽注方式下运行 270 d 后的地下水降深

Fig. 4 Groundwater drawdown after 270 days of operation under different extraction-injection schemes

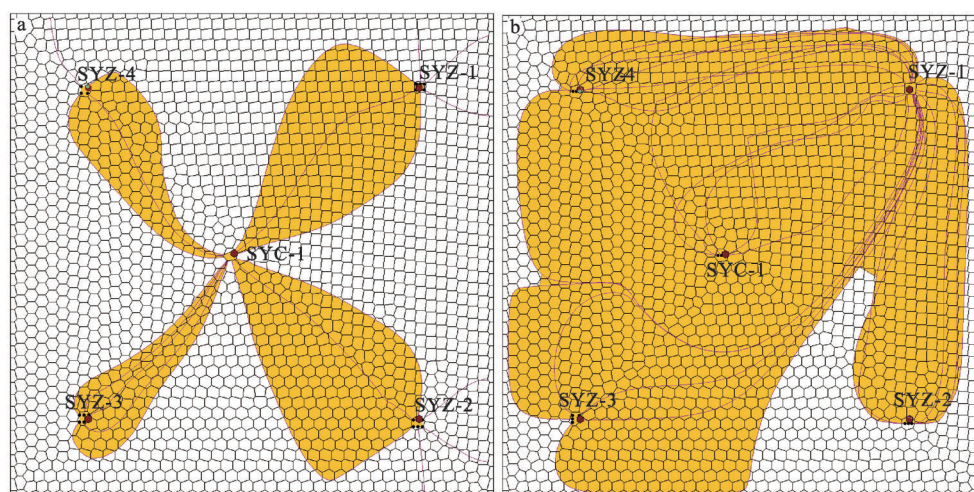


图 5 不同抽注方式下运行 270 d 后的抽液井捕获面积

Fig. 5 Capture area of extraction wells after 270 days of operation under different extraction-injection schemes

4.2 天然地下水影响程度

铀浸出过程主要发生于抽注液井形成的流场范围内^[6,22],故本研究忽略化学反应和密度变化的影响,仅考虑地下水对流-弥散作用,在 2 种抽注方式下,分别求解浸出单元溶质运移模型。依据抽、注液量和抽液井位置 A 溶液浓度的模拟结果,结合式(9)~(15)计算 m_w 和 r_w ,以评估地浸采铀流场与天然地下水在不同时间的水量交换情况,结果如图 6 所示。由图 6(a)看出:在不同抽注方式下, m_w 均随时间延长而增大;原始抽注方式的 m_w 最大值仅为 0.163,而抽注方式互换后的 m_w 最大值可达 0.441,是原始抽注方式最大值的 2.7 倍。 r_w 越小,说明抽注流场受天然地下水流场的影响越小。由图 6(b)看出:2 类抽注方式的 r_w 与时间呈反比,原始抽注方式

的 r_w 保持在 80% 以上,始终高于抽注互换方式且差值逐渐增大,在模拟结束时二者相差 29.4%。

参数变化速率 S 也可有效表征渗透性能对浸出过程的影响(图 7)。受低渗夹层制约,SYC-1 附近区域的渗流通道狭窄,原始抽注条件下对流作用难以捕获远离主渗流通道的溶质(图 5(a)),单位时间内新增抽出溶质主要依赖弥散过程补给,导致 S 整体较小且快速趋于准稳态后逐渐下降。抽注互换后,SYC-1 由抽液井转变为注液井,但注入溶质难以迅速进入主渗流通道,会在井周形成高浓度滞留区。随着抽注过程进行,滞留溶质在浓度梯度和弥散作用驱动下向高渗透渗流通道缓慢释放,使抽出溶液浓度随时间延长而逐步升高,表现为

S 逐步增大并趋于稳定,随后因浓度梯度衰减而下降。

将 SYC-1 和 SYZ-1 的抽注方式互换后,抽液

并能捕获更多来自注液井的溶液,抽液量中天然地下水含量降低,浸出效果优于原始抽注方式,这与流场模拟所得结论一致。

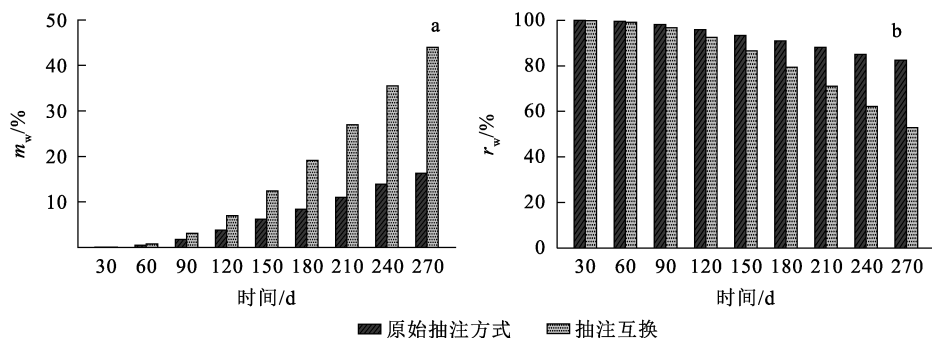


图 6 不同抽注方式的 m_w (a) 和 r_w (b) 计算结果

Fig. 6 calculation results of m_w (a) and r_w (b) for different extraction-injection schemes

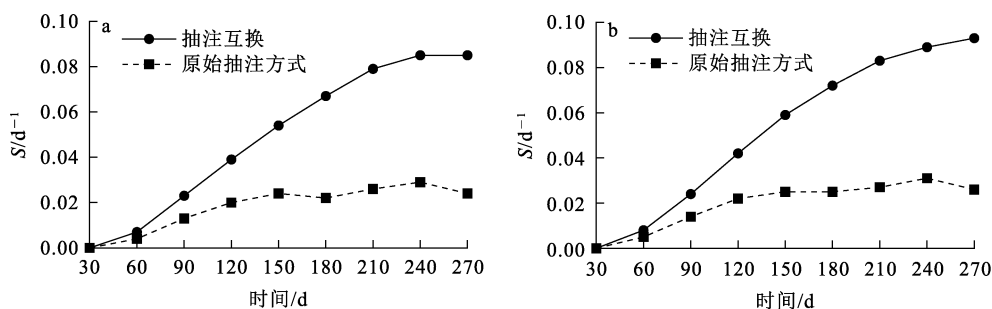


图 7 不同抽注方式的 m_w (a) 和 r_w (b) 的变化速率 S

Fig. 7 Change rate S of parameters m_w (a) and r_w (b) for different extraction-injection methods

4.3 低渗夹层对浸出效果的影响

模拟和计算结果表明:与原始抽注方式相比,将 SYC-1 和 SYZ-1 的抽注方式互换后,浸出单元内降落漏斗半径减小,抽液井的有效捕获范围扩大,抽液量中的天然地下水比例降低。SYC-1 与周围注液井的水力联系较弱,导致在原始抽注方式下,注入的浸出液难以流动至抽液井;相比之下,SYZ-1 与除 SYC-1 外的其他注井具有良好的水力联系,对浸出液的捕获能力显著提升。

结合非均质岩性模型,进一步探讨低渗夹层对不同抽注方式的铀浸出效果的影响。SYC-1 钻孔附近发育多层水平连续性较差的钙质砂岩和泥岩夹层,形成显著的水平层状非均质性(图 8),这将削弱 SYC-1 与周边注井间的水力连通性,限制局部地下水的层间流动^[24],导致在原始抽注条

件下抽液量主要由地层水组成,对应的天然地下水含量较高,铀浸出效果差。

相比之下,SYZ-1 与 SYZ-2 之间均存在水平延伸长度较大的粗砂岩和细砂岩层;SYZ-1 与 SYZ-4 间上部虽存在一个贯穿井间的钙质砂岩和泥岩层,但中下部的粗砂岩和细砂岩连续性较好(图 9)。因此,在 SYC-1 和 SYZ-1 的抽注方式互换后,抽液井和注液井间的水力联系显著增强,抽液量中天然地下水含量降低。

结合 4.2 节计算结果可知,低渗夹层导致抽注互换后 m_w 和 r_w 的变化速率绝对值 S 显著大于原始抽注方式。在原始抽注方式下,注入的浸出液受到低渗夹层的阻滞,抑制了浓度差和水头差的影响,导致 S 始终较小;而进行抽注互换后,溶液通过高渗透性岩层的优势通道加速向抽液井流动, S 持续增大,直至稳定。

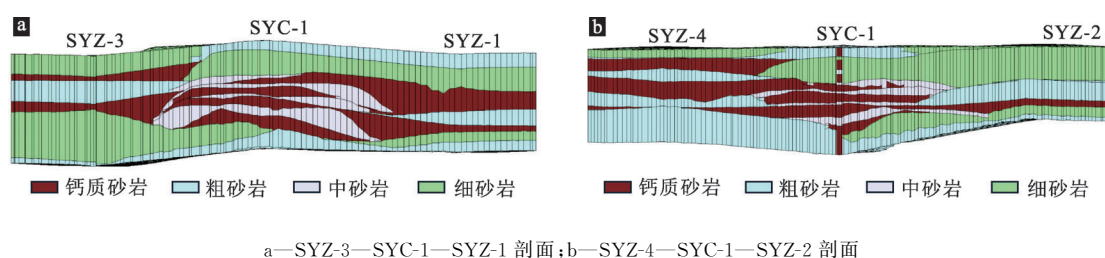


图 8 SYC-1 附近区域地层岩性 Ugrid 模型剖面示意

Fig. 8 Cross-section schematic diagram of Ugrid lithological model in vicinity near SYC-1

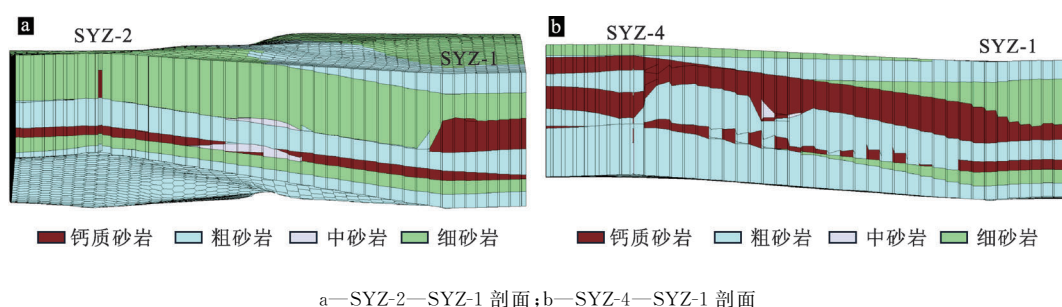


图 9 SYZ-1 附近区域地层岩性 Ugrid 模型剖面

Fig. 9 Cross-section schematic diagram of Ugrid lithological model in vicinity near SYZ-1

从地层结构和定量指标的角度进行分析,钙质砂岩和泥岩夹层显著阻碍了抽注液井间的水力联系,这也是原始抽注方式与抽注互换方式在浸出效果上存在差异的主要原因。

5 结论

针对巴音青格利地浸采铀试验单元,建立了含矿含水层三维非结构化网格岩性模型,并在此基础上,结合实测流量数据,分别针对原始抽注方式和抽注互换方式,进行了地浸采铀流程和溶质运移模拟,通过分析得到如下结论:

1)与原始抽注方式相比,将 SYC-1 和 SYZ-1 的抽注方式互换后,浸采单元内的地下水降落漏斗范围减小,抽液井对浸出液的捕获效果显著提升,与注液井间的水力联系增强。

2)抽注方式互换后,地浸采铀流程受天然地下水的影响更小,溶质质量比 m_w 和抽液量中天然地下水含量 r_w 指标均优于原始抽注方式,其变化速率 S 呈先增大后稳定的趋势。

3)低渗夹层对抽注液井间的水力联系产生阻滞作用,这种阻滞作用会直接造成原始抽注方式和抽注互换方式在铀浸出效果上出现差异。因此,在后续地浸采铀钻孔位置和过滤器开窗位置的选择上,应充分考虑低渗夹层的分布特征及其

对流场的影响。

参考文献:

- [1] 阙为民,王海峰,田时丰,等.我国地浸采铀研究现状与发展[J].铀矿冶,2005,24(3):113-118.
QUE Weimin, WANG Haifeng, TIAN Shifeng, et al. Research status and development of in-situ leaching uranium mining in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3):113-118.
- [2] 赵凯,黎广荣,周义朋,等.砂岩型铀矿浸出研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2019(6):40-48.
ZHAO Kai, LI Guangrong, ZHOU Yipeng, et al. Research progress of leaching of sandstone-type uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(6):40-48.
- [3] 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 Chenchen, XIAO Shiwei, CHEN Shuai, et al. Analysis of groundwater flow field characteristics under the mining conditions of an irradiated uranium mine in a certain area [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):359-367.
- [4] 周义朋,黎广荣,徐玲玲,等.砂岩铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸初期流场模拟及水化学验证[J].有色金属(冶炼部分),2019(1):42-47.
ZHOU Yipeng, LI Guangrong, XU Lingling, et al. Simulation of flow field and hydrochemical verification in early stage of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching for sandstone uranium deposit[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),

- 2019(1):42-47.
- [5] 罗跃,白细民,吴慧,等.基于数值模拟的加压酸法浸铀井网合理间距研究[J].有色金属(冶炼部分),2024(10):165-171.
LUO Yue,BAI Ximin,WU Hui,et al. Study on reasonable well spacing of pressurized acid leaching uranium well network based on numerical simulation[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2024(10):165-171.
- [6] 赵龙昊,李召坤,阙为民,等.过滤器布置方案对地浸采铀浸出效果的影响分析[J].中国矿业,2024,33(2):217-227.
ZHAO Longhao,LI Zhaokun,QUE Weimin,et al. Analysis of the influence of filter layout scheme on leaching effect of in-situ leaching uranium[J]. China Mining Magazine,2024,33(2):217-227.
- [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. Temporal and spatial characteristics of groundwater flow field during test mining of a sandstone uranium deposit in Ordos[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2024(8):94-104.
- [8] 吉宏斌,黄群英,周义朋,等.抽注流量分配及抽注比对地浸溶液扩散的影响[J].铀矿冶,2017,36(3):172-181.
JI Hongbin,HUANG Qunying,ZHOU Yipeng,et al. Effects of pumping-injection flow distribution and ratio on solution diffusion in in-situ leaching[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2017,36(3):172-181.
- [9] 王嗣晨,杜志明,刘正邦,等.含矿含水层非均质结构对浸出液运移影响的模拟研究[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第八卷)中国核学会 2023 年学术年会论文集:第 1 册.北京:科学技术文献出版社,2023:138-145.
- [10] 陈梦迪,姜振蛟,霍晨琛.考虑矿层渗透系数非均质性和不确定性的砂岩型铀矿地浸采铀过程随机模拟与分析[J].水文地质工程地质,2023,50(2):63-72.
CHEN Mengdi,JIANG Zhenjiao,HUO Chenchen. Stochastic simulation and analysis of the in-situ leaching process of sandstone-type uranium deposits considering heterogeneity and uncertainty of ore-bearing layer permeability coefficient [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2023,50(2):63-72.
- [11] 纪文贵,罗跃,刘金辉,等.考虑渗透系数不确定性的地浸过程浸出范围随机模拟[J].原子能科学技术,2023,57(6):1099-1110.
JI Wengui,LUO Yue,LIU Jinhui,et al. Stochastic simulation of leaching range in in-situ leaching process considering uncertainty of permeability coefficient [J]. Atomic Energy Science and Technology,2023,57(6):1099-1110.
- [12] 杨蕴,南文贵,邱文杰,等.非均质矿层 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀浸出过程数值模拟与调控[J].水动力学研究与进展(A 辑),2022,37(5):639-649.
YANG Yun,NAN Wengui,QU Wenjie,et al. Numerical simulation and regulation of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching process in heterogeneous sandstone-type uranium ore[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2022,37(5):639-649.
- [13] COLLET A,REGNAULT O,OZHOGIN A,et al. Three-dimensional reactive transport simulation of uranium in situ recovery: large-scale well field applications in Shu Saryssu Basin, Tortkuduk deposit (Kazakhstan) [J]. Hydrometallurgy,2022,211:105873.
- [14] SHAYAKHMETOV N M,ALIBAYEVA K A,KALTAYEV A,et al. Enhancing uranium in-situ leaching efficiency through the well reverse technique: a study of the effects of reversal time on production efficiency and cost[J]. Hydrometallurgy,2023,219:106086.
- [15] EZZELDIN M M,EL-ALFY K S,ABDEL-GAWAD H A,et al. Comparison between structured and unstructured MODFLOW for simulating groundwater flow in three-dimensional multilayer Quaternary aquifer of East Nile Delta, Egypt[J]. Hydrol Current Res,2018,9(1):1000297.
- [16] ANTELM I M,ALBERTI L,BARBIERI S,PANDAY S. Simulation of thermal perturbation in groundwater caused by Borehole Heat Exchangers using an adapted CLN package of MODFLOW-USG[J]. Journal of Hydrology,2021,596:126106.
- [17] 李志强,王亚娟,温子希,等.潮白河春季生态补水及地下水响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):375-384.
LI Zhiqiang,WANG Yajuan,WEN Zixi,et al. Spring ecological water replenishment of Chaobai River and its groundwater response[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):375-384.
- [18] 童少青,董艳辉,王礼恒.非结构化网格 MODFLOW 模拟方法与应用[J].水文地质工程地质,2016(2):9-16.
TONG Shaoqing,DONG Yanhui,WANG Liheng. Unstructured-grid MODFLOW simulation method and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2016(2):9-16.
- [19] 薛禹群,吴吉春.地下水动力学[M].2 版.北京:地质出版社,1997:31-32.
- [20] ZHENG C M.MT3D: a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems [M]. Washington, D C: U. S. Environmental Protection Agency,1992.
- [21] 王海峰,郭宁,谢廷婷,等.地浸采铀地下水稀释对浸出液铀质量浓度的影响[J].铀矿冶,2012,31(1):9-13.
WANG Haifeng,GUO Ning,XIE Tingting,et al. Effect of groundwater dilution on uranium concentration in pregnant solution during in-situ leaching[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2012,31(1):9-13.
- [22] LI Q C,LI Z K,XIE T T,et al. Analysis of natural groundwater flowing into the flow field of in situ leaching mining[J]. Processes,2023,11(2):11020471.

[23] OKKONEN J, NEUPAUER R M. Capture zone delineation methodology based on the maximum concentration; preventative groundwater well protection areas for heat exchange fluid mixtures[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(5):4043-4060.

[24] 张俊,刘天罡,董佳秋,等. 含水层层状非均质对地下水流系统的影响[J]. *中国地质*, 2020, 47(6):1715-1725.
ZHANG Jun, LIU Tiangang, DONG Jiaqiu, et al. Effects of layered heterogeneity in aquifers on groundwater flow systems[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6):1715-1725.

Improvement of Uranium Leaching Performance by Extraction-Injection Well Conversion in Ore Fields with Low-Permeability Interlayers

WANG Sichen, ZHAO Lixin, JIA Hao, WANG Yanu, HAO Shusen, LI Qinci, DU Zhiming,
XIE Tingting, ZHANG Chong

(*Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China*)

Abstract: Uneven and discontinuous calcareous sandstone and mudstone interlayers are distributed in the mining area of Bayin Qinggeli uranium mine. In order to explore the influence of low-permeability interlayers on uranium leaching effect, a three-dimensional unstructured grid lithology model of ore-bearing aquifer was constructed based on borehole data in the test mining area, and the flow field and solute transport process of in-situ leaching uranium under different extraction-injection methods were simulated. By introducing a matrix calculation method based on the actual extraction-injection flow of group wells, the solute mass ratio and natural groundwater content were quantitatively compared and analyzed. The results show that compared with the original extraction-injection method, after the extraction-injection methods of SYC-1 and SYZ-1 wells are interchanged, the range of groundwater drawdown funnel is reduced, the capture ability of pumping wells to leaching solution is significantly improved, the mass ratio of extracted and injected solute is increased by 1.7 times, the natural groundwater content in pumping volume is reduced by 29.4%, the hydraulic connection between extraction-injection wells is stronger, and the leaching effect is better than that of the original extraction-injection method. Calcareous sandstone and mudstone interlayers significantly hinder the hydraulic connection between extraction-injection wells, resulting in significantly different leaching effects of different extraction-injection methods.

Key words: in-situ leaching uranium mining; unstructured grid; low-permeability interlayers; extraction-injection well conversion; numerical simulation