

# 地浸采铀“水平井注-直井抽”与“直井抽注” 数值模拟对比

李星浩, 李召坤, 张宇, 赵龙昊, 李沁慈

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

**摘要:** 为了明确水平井工艺对地浸采铀的溶浸效果, 采用数值模拟方法, 研究了不同参数对“水平井注-直井抽”与常规“直井抽注”的影响规律。结果表明, 与“直井抽注”相比, 水平井长度与溶浸范围成正比, “水平井注-直井抽”垂向溶浸范围小, 平面上波及率高, 溶浸死角小, 且浸出液有效利用率高, 在处理薄层铀矿上具有显著优势; 水平渗透率与垂向渗透率之比对“直井抽注”溶浸影响较大, 在垂向渗透率较低的情况下, “水平井注-直井抽”的矿段溶浸效果优于“直井抽注”的矿段溶浸效果; 抽注液量与溶浸范围正相关, 随着抽注液量的增大, “水平井注-直井抽”与“直井抽注”的溶浸死角均减少, 抽注液量增大对“水平井注-直井抽”的溶浸效果影响较大, 当流量达到  $210 \text{ m}^3/\text{d}$  时, “水平井注-直井抽”的矿层溶浸范围高于概化直井的矿层溶浸范围。

**关键词:** 地浸采铀; 水平井; 直井; 数值模拟; 渗透率; 抽注液量; 溶浸范围

**中图分类号:** TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)02-0018-11

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.07.02

中国北方某砂岩型铀矿受泥岩隔水层控制, 呈层状分布, 产状与泥岩隔水层相近, 是典型的“泥-砂岩”交互结构<sup>[1-2]</sup>。水平井技术特别适用于薄层油藏、天然裂隙油藏和低渗透油气藏等石油、页岩气的开采, 该技术具有穿透油层长、泄油面积大、采集成本低、经济效益显著等优点<sup>[3-6]</sup>。砂岩型铀矿层一般为与岩层走向近似的薄层状, 在含矿含水层中分布相对集中, 且含水层渗透性差, 非均质性强<sup>[7-8]</sup>, 与油藏赋存条件相似。理论上, 水平井地浸工艺可增大铀矿层贯穿长度和溶浸范围, 提高溶浸效率<sup>[9-12]</sup>。水平井技术在铀矿地浸开采中尚无应用先例, 有必要开展定向水平井/直井井网地浸渗流特性研究。

通过建立铀矿储层理想模型, 分析不同条件对水平井/直井开发效果的影响, 指导水平井/直井地浸井网的优化设计与调控, 旨在为地浸矿山水平井井场工艺设计和生产运行提供技术支撑。

## 1 数值模拟控制方程

基于经典达西定律进行地下水流在多孔介质

中的运动计算, 其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) \pm \omega = S_s(\frac{\partial h}{\partial t}), \quad (1)$$

式中:  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  为渗透主方向上沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数, 量纲  $L/T$ ;  $h$  为地下水水头, 量纲  $L$ ;  $\omega$  为源汇项, 量纲  $T^{-1}$ ;  $S_s$  为储水系数, 量纲  $L^{-1}$ ;  $t$  为时间, 量纲  $T$ 。

井储耦合模型总体上将整个模拟区划分为多孔介质和圆管 2 个部分(图 1)。其中多孔介质采用传统的地下水流模型 MODFLOW 模拟, 采用三维矩形网格进行剖分; 而圆管中的地下水流采用单独的圆管流公式进行计算模拟, 圆管概化为一维线状结构, 耦合于三维矩形网格中, 多孔介质网格所在节点与网格内圆管节点之间可进行水力交换。

根据每段圆管内的平均水位与顶板高程不同, 圆管可能处于承压或非承压状态。在承压圆管中, 当地下水呈层流时, 圆管中地下水流采用

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 中核集团集中研发项目(中核科发[2021]144号, 深部砂岩铀矿水平井钻成井与流场调控技术研究)。

第一作者简介: 李星浩(1995—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地浸采铀数值模拟研究。

通信作者简介: 李召坤(1990—), 男, 安徽六安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地浸采铀钻探技术与数值模拟研究。

Hagen-Poiseuille 公式计算:

$$Q = -A \frac{gd^2 \partial h}{32\nu \partial x} = -A \frac{\rho g d^2 \Delta h}{32\mu x \Delta l}, \quad (2)$$

式中:  $d$  为管道直径,量纲 L;  $A$  为管道横截面积,量纲  $L^2$ ;  $\rho$  为地下水密度,量纲  $ML^{-3}$ ;  $g$  为重力加速度,量纲  $LT^{-2}$ ;  $\nu$  为运动黏滞系数,量纲  $L^2 T^{-1}$ ,  $\nu = \mu/\rho$ ,其值可由公式根据地下水温度计算;  $\partial h/\partial x$  为管道的水力坡度,  $\tau$  为管道曲折率,无量纲。

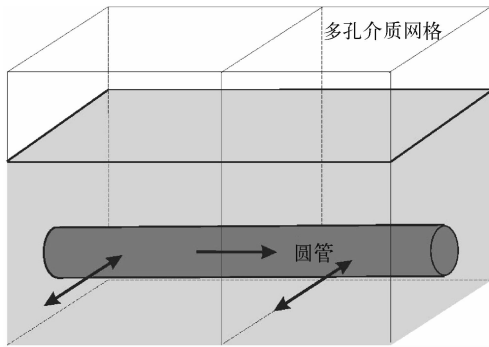


图 1 井储耦合模型空间结构

Fig. 1 Spatial structure of well storage coupling model

当地下水在圆管中呈紊流时,地下水运动采用 Darcy-Weisbach 公式计算:

$$Q = -A \sqrt{\frac{2gd\partial h}{f\partial x}}, \quad (3)$$

式中:  $f$  为摩擦因子,无量纲。

圆管紊流摩擦因子( $f$ )与雷诺系数( $R_e$ )之间的关系采用 Colebrook-White 经验公式计算:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left( \frac{k_c}{3.71d} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right), \quad (4)$$

式中:  $k_c$  为圆管壁平均的粗糙高度,量纲 L;  $R_e$  为雷诺系数,  $R_e = Vd/\nu$ ,  $V$  为圆管中地下水的平均流速,量纲  $LT^{-1}$ 。

每个圆管节点与对应的裂隙网格节点之间存在流量交换,交换量( $Q_{ex}$ )与两节点之间的水头差成一阶线性关系

$$Q_{ex} = \alpha_{j,i,k} (h_n - h_{j,i,k}), \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{j,i,k}$  为 MODFLOW 网格单元  $j, i, k$  处的交换系数,量纲  $L^2 T^{-1}$ ;  $h_{j,i,k}$  为 MODFLOW 网格单元  $j, i, k$  处的水头,量纲 L;  $h_n$  为对应的管道节点的水头,量纲 L。

对于每一个管道节点,根据质量守恒建立方程得

$$\sum_{i=1}^n Q_{ip} - Q_{ex} + Q_R \pm Q_s = 0, \quad (6)$$

式中:  $Q_{ip}$  为管道节点处各管道流进和流出量之差,量纲  $L^3 T^{-1}$ ;  $Q_{ex}$  为管道节点与裂隙网格节点间的交换量,量纲  $L^3 T^{-1}$ ;  $Q_R$  为管道节点处的降雨补给量,量纲  $L^3 T^{-1}$ ;  $Q_s$  为管道节点附近管道的储蓄量变化,量纲  $L^3 T^{-1}$ ,每个管道节点储蓄量变化为与其相连的管道储蓄量变化的一半之和。

## 2 数值模型建立

建立铀矿储层理想模型,长为 375 m,宽为 300 m,含水层厚度为 40 m。采用矩形网格对三维模型进行剖分,平面上剖分为  $60 \times 75$  个网格,单个网格平面尺寸为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ;在垂直方向上将含水层划分为 23 层,纵向模拟高度为 700~740 m,中间 719~721 m 剖分为 5 层(每层高 0.4 m);715~719 m 和 721~725 m 分别剖分为 4 层(每层高 1 m);下部 700~715 m 和上部 725~740 m 分别剖分为 5 层(每层高 3 m);水平井位于中间部分的第 12 层中部,垂直井进水段位于含水层的第 6 层至第 18 层。

模拟区域左右均设置为定水头,定水头均设置为 780 m;上下边界均设置为隔水边界,整个模拟区不接受降雨补给,含水层初始水头设置为 780 m。整个含水层设置为各向同性含水介质,水平渗透系数设置为 0.2 m/d,水平渗透系数与垂直渗透系数的比值设置为 10,含水层有效孔隙度设置为 0.2,模拟时间设置为 1 800 d。水平井在模型中的位置见图 2~图 3。

在模型中部设置长度分别为 100、150、200 m 的水平井,水平井井筒直径 150 mm,水平井在垂直方向上位于含水层中部,其左侧为浸出液注入点,注入量为  $240 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在水平井四周设置 8 口抽液直井,每口抽液井的抽液量为  $30 \text{ m}^3/\text{d}$ ,抽液直井的间距为 50 m,直井距水平井的水平距离为 25 m。分别采用 3 口注液直井和 5 口注液直井概化 100、200 m 水平井注液。不同井型布置见图 4,应用 GMS 地下水模拟软件中的 MODFLOW 模块进行流场模拟,MODPATH 模块进行粒子追踪模拟。

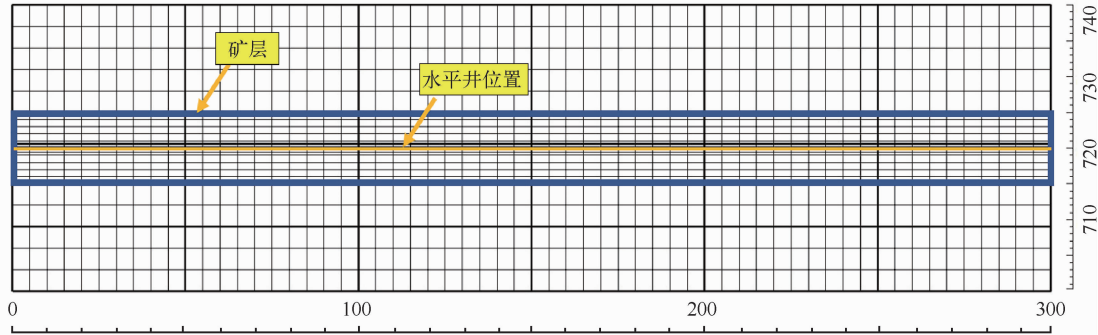


图 2 水平井所处模型位置剖面图

Fig. 2 Cross-sectional view of the horizontal well position

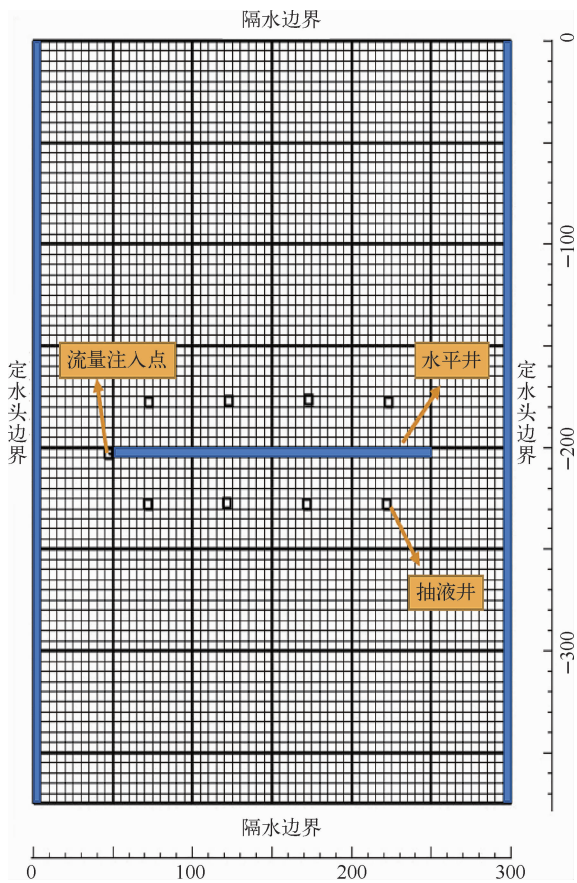


图 3 三维模型水平井平面结构

Fig. 3 Planar structure of the horizontal well in the 3D model

量化参数。以溶浸体积作为主要评价指标,采用流场模拟和粒子追踪方法,确定地浸直井、水平井在不同工艺及地层参数下的溶浸体积,对比溶浸效果。

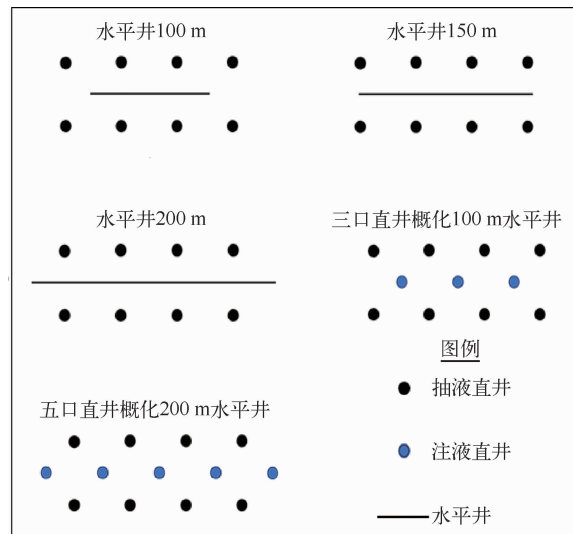


图 4 三维模型井型布置图

Fig. 4 Well layout diagram of 3D model

粒子追踪技术是基于局部速度场来预测粒子不同时刻在模拟区内位置的一种追踪算法,该技术可以用于追踪地浸采铀中注入液在储层中的运移轨迹,从而获取溶浸体积。采用基于 MODFLOW 开发的 MODPATH 程序开展粒子追踪计算,对于稳定地下水流动的描述公式为

$$\frac{\partial}{\partial x}(nv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(nv_y) + \frac{\partial}{\partial z}(nv_z) = W, \quad (7)$$

式中:  $v_x$ 、 $v_y$  和  $v_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平均地下水流速,量纲 L/T;  $n$  为含水介质孔隙度,无量纲;

### 3 溶浸体积计算方法

溶浸体积是表征地浸采铀流场溶浸范围的定

$W$  为源汇项,量纲 L/T。式(7)实际为一个无限小单元格的质量守恒方程。对于一个无限小矩形单元格(图5),采用式(8)~式(10)估算每个网格面的平均流速。

$$v_{x1} = \frac{Q_{x1}}{(n\Delta y\Delta z)}, v_{x2} = \frac{Q_{x2}}{(n\Delta y\Delta z)}; \quad (8)$$

$$v_{y1} = \frac{Q_{y1}}{(n\Delta x\Delta z)}, v_{y2} = \frac{Q_{y2}}{(n\Delta x\Delta z)}; \quad (9)$$

$$v_{z1} = \frac{Q_{z1}}{(n\Delta x\Delta y)}, v_{z2} = \frac{Q_{z2}}{(n\Delta x\Delta y)}; \quad (10)$$

式中: $v_{x1}$ 、 $v_{x2}$ 、 $v_{y1}$ 、 $v_{y2}$ 、 $v_{z1}$ 和 $v_{z2}$ 分别为单元格6个不同面上的平均流速,量纲 T/L; $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 和 $\Delta z$ 分别为单元格的长度,量纲 L。式中流域可根据 MODFLOW 的模拟结果采用达西定律计算得出。

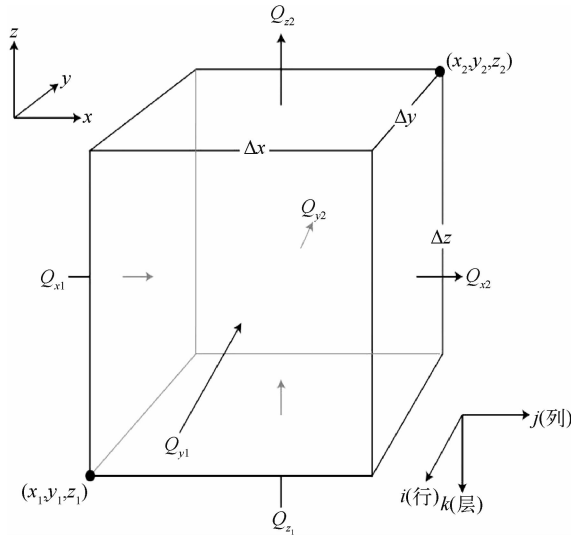


图5 单元格中不同坐标面的定义

Fig. 5 Definition of different coordinate planes in a cell

为计算出每个粒子的运动轨迹,还需要获取网格内任意点的地下水流速。MODPATH 采用简单的线型插值估算网格内任意点的流速:

$$v_x = A_x(x - x1) + v_{x1}, A_x = \frac{(v_{x2} - v_{x1})}{\Delta x}; \quad (11)$$

$$v_y = A_y(y - y1) + v_{y1}, A_y = \frac{(v_{y2} - v_{y1})}{\Delta y}; \quad (12)$$

$$v_z = A_z(z - z1) + v_{z1}, A_z = \frac{(v_{z2} - v_{z1})}{\Delta z}; \quad (13)$$

式中: $v_x$ 、 $v_y$ 和 $v_z$ 分别为网格内任意点( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )在3个坐标轴方向的流速,量纲 L/T。

对于考虑一个粒子  $p$  在三维网格中的运动,其在  $x$  轴上流速变化的描述公式为

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = \left(\frac{dv_x}{dx}\right)\left(\frac{dx}{dt}\right)_p. \quad (14)$$

结合式(11),可得

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = A_x v_{xp}. \quad (15)$$

将式(15)在  $t_1$  和  $t_2$  时刻积分,最终可得

$$(x_p)_{t2} = x_1 + \frac{1}{A_x}[(v_{xp})_{t1} e^{(A_x \Delta t - v_{x1})}]. \quad (16)$$

由式(16)可得  $t_2$  时刻粒子  $p$  的  $x$  坐标。同样,可以采用式(17)~式(18)计算粒子  $p$  在  $t_2$  时刻的  $y$  和  $z$  坐标:

$$(y_p)_{t2} = y_1 + \frac{1}{A_y}[(v_{yp})_{t1} e^{(A_y \Delta t - v_{y1})}]; \quad (17)$$

$$(z_p)_{t2} = z_1 + \frac{1}{A_z}[(v_{zp})_{t1} e^{(A_z \Delta t - v_{z1})}]. \quad (18)$$

当采用式(16)~式(18)3个公式估算粒子  $p$  在  $t_2$  时刻的位置时,首先需要判断该粒子是否在一个步长内离开所在单元格,若粒子离开单元格,需先估算粒子离开单元格所需时间,然后计算该时段内粒子  $p$  的位置,最后在另一个单元格计算剩余时间段粒子  $p$  最终的位置。以此循环,可以计算得到模拟区内每个粒子在每个时间节点的位置,追踪每个粒子的运动轨迹。最终,通过该手段可以获得地浸采铀中注入液的运动轨迹,进而获取溶浸体积。

#### 4 三维模型溶浸范围对比

溶浸范围作为评价地浸采铀开发效果的关键指标,受到多种因素的综合影响,包括抽注液钻孔的布置形式、矿体的实际厚度、矿层的渗透率特性,以及抽注液量的控制等。其中,井网的布局设计与抽注液量的调控,作为主要的工艺因素,对地浸采铀的效率与效果起着决定性作用。而矿层的厚度及其渗透率,则作为储层条件的重要组成部分,同样是影响地浸采铀开发效果的关键因素。针对以上四方面影响因素开展研究,对比水平井、直井在不同工艺及地层参数下的开发效果。

##### 4.1 井网设置的影响

以建井成本为概化标准,在近似成本下,以5口直井概化200 m水平井,3口直井概化100 m水平井。设计水平井长度100 m(方案1)、水平井长度150 m(方案2)、水平井长度200 m(方案3)、3口直井概化100 m水平井(方案4)、5口直井概化200 m水平井(方案5)共5种方案,设计矿层

厚度为6 m,对比不同长度的水平井的溶浸效果及相同成本下水平井与直井的溶浸效果。

#### 4.1.1 不同井网的地下水溶浸范围

5种方案的地下水溶浸范围变化规律见图6。

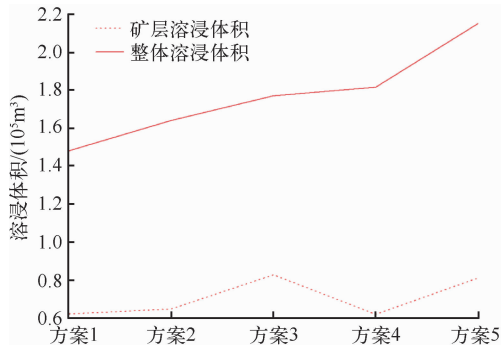


图6 5种方案地下水溶浸范围

Fig. 6 Underground leaching range in five schemes

由图6可看出,随着水平井长度的增加,水平井的整体溶浸体积和矿层溶浸体积均增加,方案

4、方案5的整体溶浸体积较大;而矿层溶浸体积由大到小分别为方案3、方案5、方案2、方案4、方案1,随着水平井长度的增大,矿层溶浸体积显著增加。

方案1、方案2、方案3、方案4、方案5的矿层溶浸体积分别占整体溶浸体积的42.18%、40.49%、46.26%、34.05%和40.01%。与“直井抽注”相比,“水平井注-直井抽”工艺的矿层溶浸范围占比较高,表明“水平井注-直井抽”工艺下的溶浸液无效对流范围小,溶浸液的有效利用程度高。

#### 4.1.2 不同井网的地下水流场

5种方案的地下水流场见图7。可以看出,水头在注液井处升高,在抽液井处降低。水平井越长,水头升高的越少,注液越均匀,表明增大水平井长度可减小注液压力;注液直井越多,水头升高的越少,浸出液越分散。方案4的抽液井附近水头下降较小,注液井和抽液井间水力梯度小,浸出液不易进入抽液井中;而方案5的抽液井水头下降最大,注液压力最小。

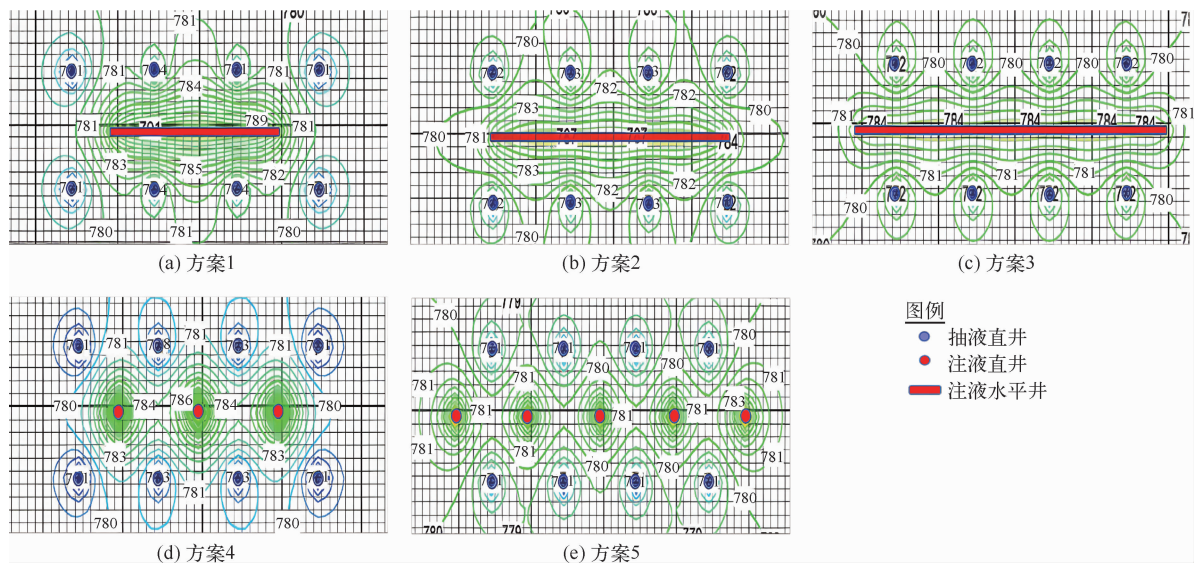


图7 5种方案的地下水流场

Fig. 7 Groundwater flow field for five schemes

#### 4.1.3 不同井网的粒子追踪结果

5种方案第十二层二维平面粒子追踪结果见图8。可以看出,随着水平井长度的增加,浸出液的波及范围变大;当注液直井的数量增加时,浸出液更分散,浸出液的波及范围更大。方案3、方案

4、方案5的三维整体溶浸范围见图9。可以看出,在平面上,水平井的溶浸死角较小;在垂直方向上,水平井的溶浸范围比注液直井的溶浸范围小,溶浸死角凹陷主要集中在抽液井间、水平井的上部及抽液井处。方案4、方案5的溶浸死角较

为明显,平面上主要分布在注液井间、抽液井间以及注液井与最近的抽液井间。

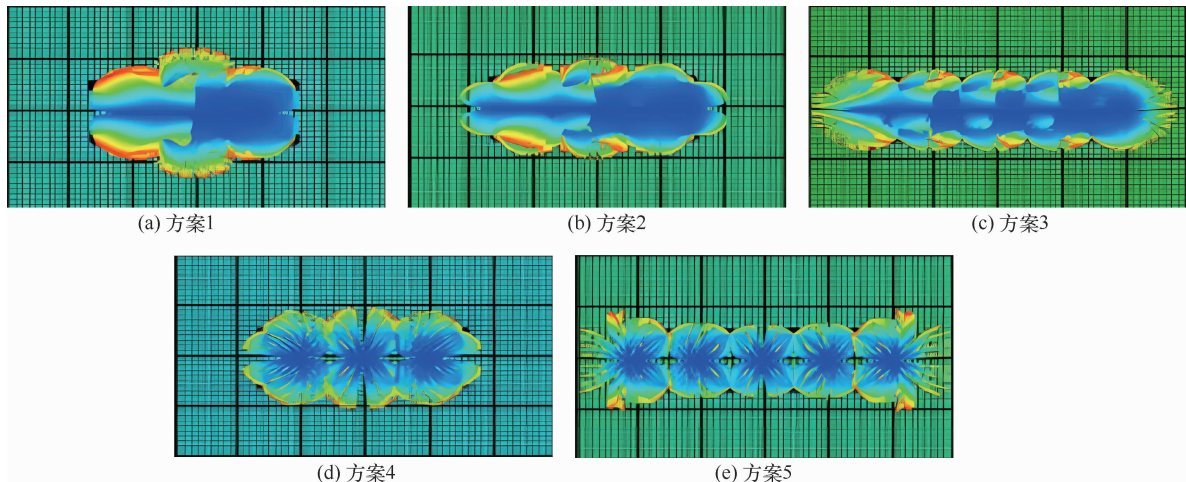
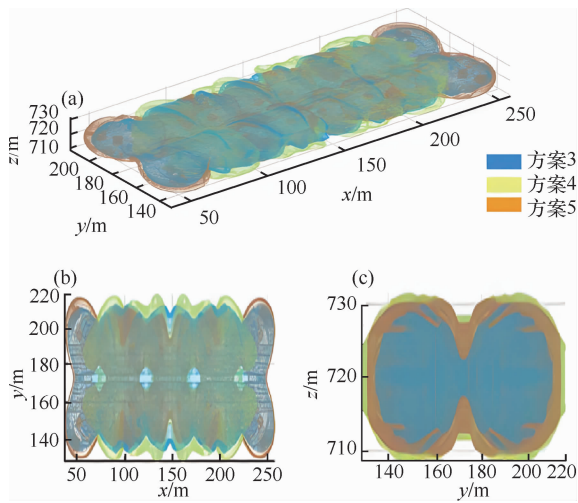


图 8 5 种方案第 12 层二维平面粒子追踪结果

Fig. 8 2D plane particle tracking results of twelfth layer for five schemes



(a) 三维视图; (b) 平面视图; (c) 垂向视图。

图 9 方案 3、方案 4、方案 5 的三维整体溶浸范围

Fig. 9 Three dimensional overall leaching range of scheme 3, scheme 4 and scheme 5

#### 4.2 矿层厚度的影响

铀矿床矿层厚度一般在 10 m 以内,建立常规铀矿储层不同矿层厚度方案,通过圈定浸出液在矿层内的波及范围,对比常规矿层不同厚度(2、4、6、8、10 m)下直井与水平井的溶浸效果,分析直井与水平井在常规矿层下的适用性。根据 4.1.1 分析,方案 3 比方案 1 和方案 2 的溶浸效果好,所以采用方案 3、方案 4、方案 5 进行井网参数对比。

#### 4.2.1 不同矿层厚度的溶浸范围

溶浸范围随矿层的厚度变化见图 10。可以看出,3 种方案的溶浸范围从大到小依次为方案 5、方案 4、方案 3。溶浸范围均呈现出随矿层厚度增加而增大的趋势。在矿层厚度为 2~8 m 的矿层溶浸范围内,“水平井注-直井抽”方案的矿层溶浸效果明显优于“直井抽注”方案的矿层溶浸效果,过滤器越长,矿体内溶浸范围差距越小。

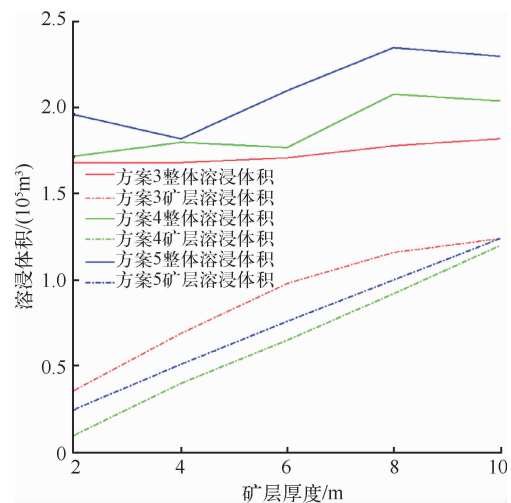


图 10 溶浸范围随矿层厚度的变化

Fig. 10 Variation of leaching range with the ore layer thickness

#### 4.2.2 3种平面粒子追踪结果及溶浸范围

矿层厚度为4、6、8 m时,方案3、方案4、方案5的三维整体溶浸范围和三维矿层溶浸范围见图11~图12。

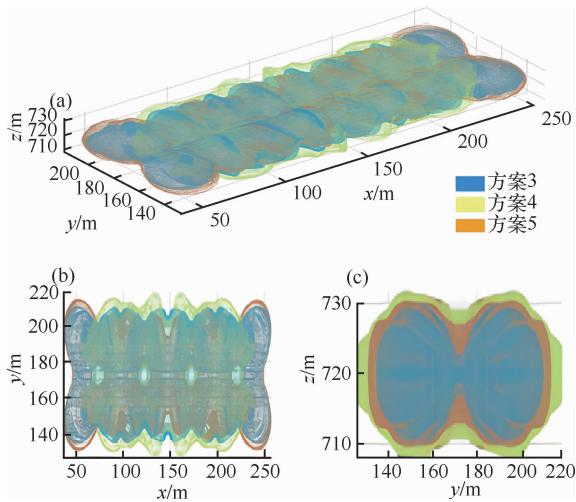


图11 方案3、方案4、方案5的三维整体溶浸范围

Fig. 11 3D overall leaching range for scheme 3, scheme 4 and scheme 5

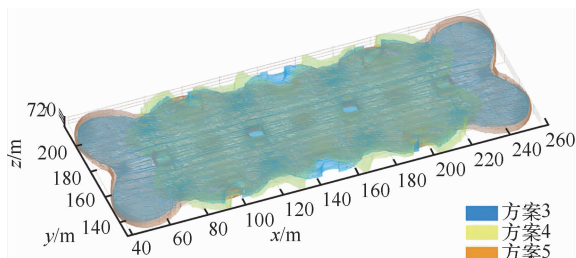


图12 方案3、方案4、方案5的三维矿层溶浸范围

Fig. 12 3D leaching range of ore layers for scheme 3, scheme 4 and scheme 5

由图11~图12可看出,在处理薄矿层资源时,“水平井注-直井抽”具有明显优势。水平井的设计允许浸出液在矿层内进行横向渗透,有效增加了浸出液与矿石的接触面积,从而形成较长的水平接触面,减少了溶浸死角,确保了浸出液均匀地分布于整个矿层,提升了资源的利用率。

“水平井注-直井抽”工艺在井筒上方的凹陷区域以及抽液井与水平井的连接处存在溶浸死角,但通过优化注液和抽液策略,这些死角可以得到有效管理。而“直井抽注”工艺的溶浸死角分布广,且受地层结构和溶浸液流动方向的影响大,在溶浸效果上难以优化。

#### 4.3 $K_x/K_z$ 的影响

铀矿垂向渗透系数( $K_z$ )在一定程度上会影响注入液垂直方向上的位移,进而影响有效溶浸范围<sup>[13-14]</sup>。设定水平渗透系数( $K_x$ )为0.2 m/d,该渗透系数取自新疆与内蒙古某铀矿床典型砂岩铀矿,在水平渗透系数和垂向渗透系数比为1、5、10、15时,对比方案3、方案4、方案5的水平井和直井概化的溶浸范围,分析水平和垂向渗透率对于溶浸范围的影响。

##### 4.3.1 不同 $K_x/K_z$ 的溶浸范围

溶浸范围随  $K_x/K_z$  变化规律见图13。

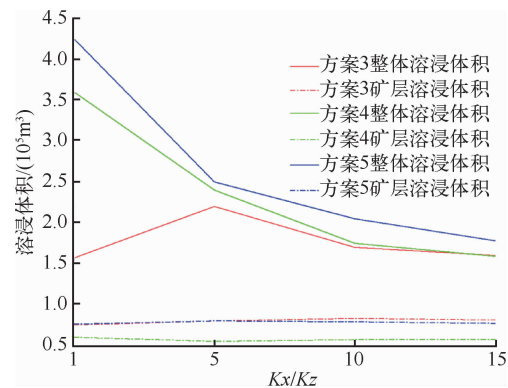


图13 溶浸范围随  $K_x/K_z$  的变化

Fig. 13 Variation of leaching range with  $K_x/K_z$

由图13可看出,随着  $K_x/K_z$  增大,“水平井注-直井抽”与“直井抽注”所呈现的溶浸体积变化规律不同,“直井抽注”下的溶浸体积随着  $K_x/K_z$  增大而减小;“水平井注-直井抽”在  $K_x/K_z$  为1~5的情况下,  $K_x/K_z$  增大、降低垂向渗透率会增大溶浸体积,  $K_x/K_z$  继续增大,整体溶浸体积会随之降低。相较于“直井抽注”,在  $K_x/K_z$  较高的情况下,“水平井注-直井抽”的溶浸体积受  $K_x/K_z$  的影响较弱。

##### 4.3.2 不同 $K_x/K_z$ 的地下水流场

$K_x/K_z=1, K_x/K_z=5$  的地下水流场见图14。可以看出,随着  $K_x/K_z$  的增大,地下水流场的影响区域呈明显的扩张趋势。与“直井抽注”相比,“水平井注-直井抽”的水头随  $K_x/K_z$  的增大而升高,抽液井的水头呈下降趋势。“水平井注-直井抽”水头的升高表明在水平井周围,浸出液承受的压力增大,这种增大的压力驱动力促使浸出液更易于沿水平方向大面积渗透和传播。

在“直井抽注”的注液和抽液操作中,注液直井的水头变化幅度并不明显,而抽液直井的水头则有一定程度的增长。这一现象表明注液直井较

易将浸出液送入地下,而抽液直井在面临较大阻力的情况下,抽取浸出液的过程变得更难,制约了抽液作业的效果和效率。

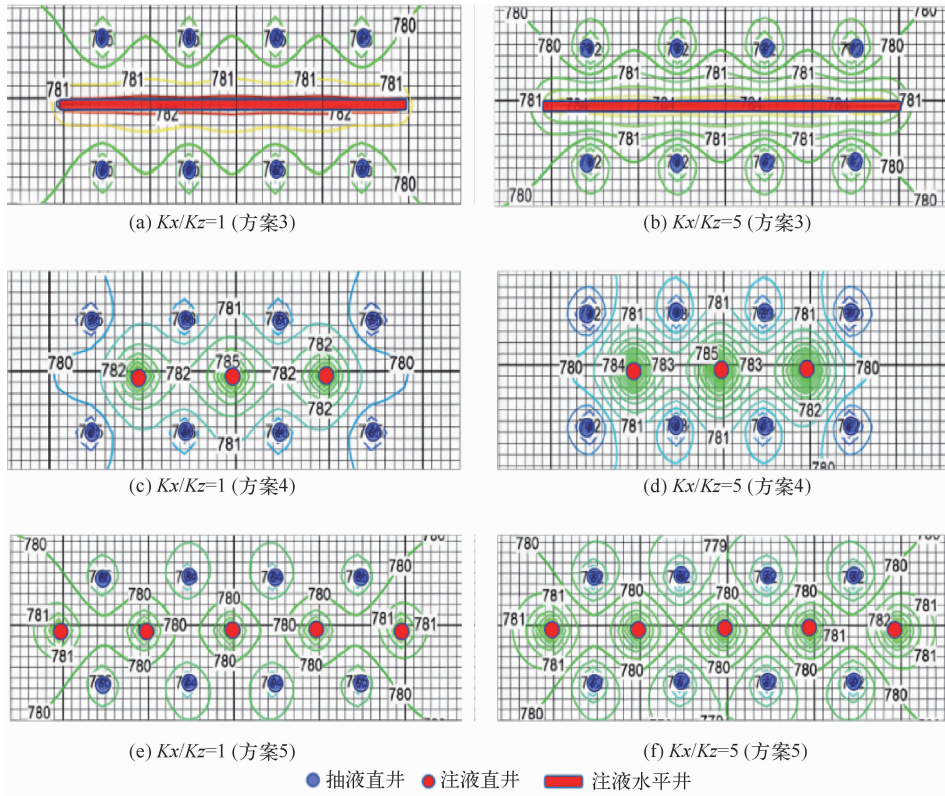
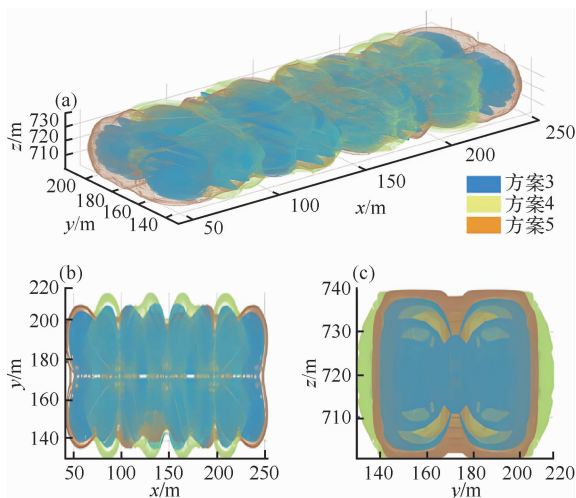


图 14  $K_x/K_z=1, K_x/K_z=5$  的地下水流场

Fig. 14 Groundwater flow field with  $K_x/K_z=1$  and  $K_x/K_z=5$

### 4.3.3 不同 $K_x/K_z$ 的整体溶浸范围

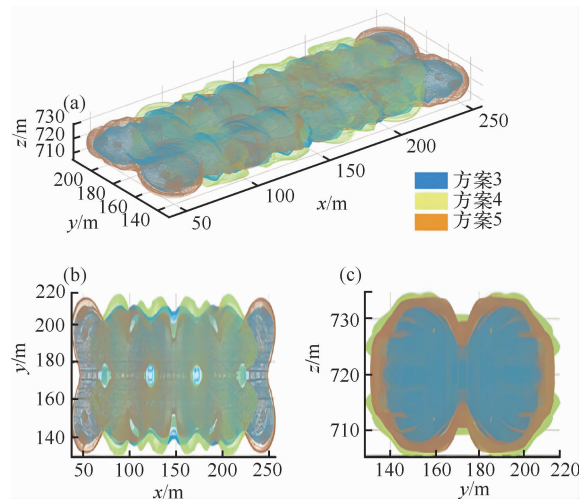
$K_x/K_z=1$  整体溶浸范围见图 15。  $K_x/K_z=5$  整体溶浸范围见图 16。



(a) 三维视图; (b) 平面视图; (c) 垂向视图。

图 15  $K_x/K_z=1$  整体溶浸范围

Fig. 15 Overall leaching range at  $K_x/K_z=1$



(a) 三维视图; (b) 平面视图; (c) 垂向视图。

图 16  $K_x/K_z=5$  整体溶浸范围

Fig. 16 Overall leaching range at  $K_x/K_z=5$

由图 15~图 16 可看出,当  $K_x/K_z=1$  时,粒子沿着横向和垂向的流动范围均较大,随着  $K_x/K_z$  的增大,粒子更易沿着横向流动,水平方向上粒子

的溶浸范围变大;同时  $K_z$  相对变小,使得粒子在垂向上的运移受到阻碍,运移范围变小。而在矿层溶浸范围中,已经限定了具体的厚度,更改  $K_x/K_z$  会增加横向溶浸范围,使得矿层溶浸范围增加,所以在薄地层中水平井效果更好。

从溶浸死角分析,当  $K_x/K_z$  较小时,各方案垂向溶浸范围大,溶浸死角较小;当  $K_x/K_z$  增大时,垂向上溶浸死角增加。“水平井注-直井抽”在平面上基本无溶浸死角,垂向上溶浸死角集中在水平井上下位置的凹陷处;“直井抽注”的溶浸死角主要分布在注液井间、抽液井间以及注液井与最近的抽液井间的平面上。

#### 4.4 抽注液量的影响

抽注液量会在一定程度上影响地浸采铀溶浸范围<sup>[15-16]</sup>。在保持抽注液量 1:1 平衡的情况下,在抽注液量为 180、210、240、270、300  $\text{m}^3/\text{d}$  时,分析抽注液量对方案 3、方案 4、方案 5 地下水流场和溶浸范围的影响。

##### 4.4.1 不同抽注液量的溶浸范围

溶浸范围随抽注液量变换规律见图 17。

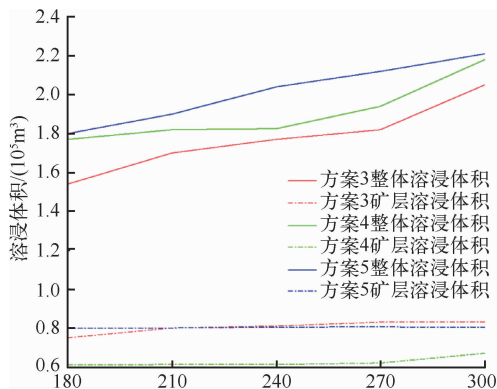


图 17 溶浸范围随抽注液量变换规律

Fig. 17 Variation of leaching range with the injected liquid amount

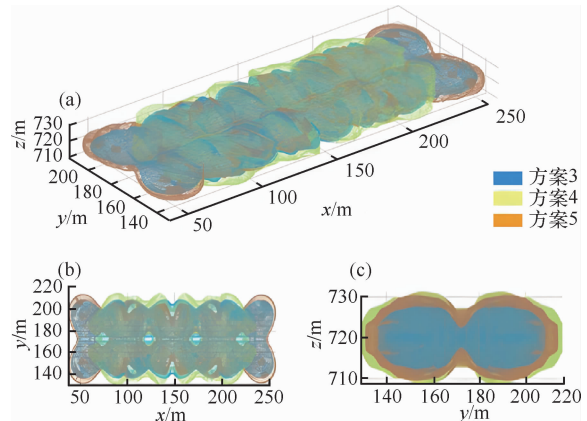
由图 17 可看出,随着抽注液量的升高,其整体溶浸范围呈线性增长,整体溶浸范围由大到小依次为方案 5、方案 4、方案 3;而各井型方案的矿层溶浸范围变化呈现相对稳定的状态。对矿层溶浸范围,在抽注液量增加过程中,方案 4、方案 3 的溶浸范围都有增长趋势,而方案 5 在初始增长后进入了稳定状态;方案 3 的溶浸范围始终高于方案 4,在抽注液量为 210  $\text{m}^3/\text{d}$  时,方案 3 和方

案 5 的溶浸范围基本持平。

##### 4.4.2 不同抽注液量的整体溶浸范围

抽注液量为 180  $\text{m}^3/\text{d}$  的整体溶浸范围见图 18。

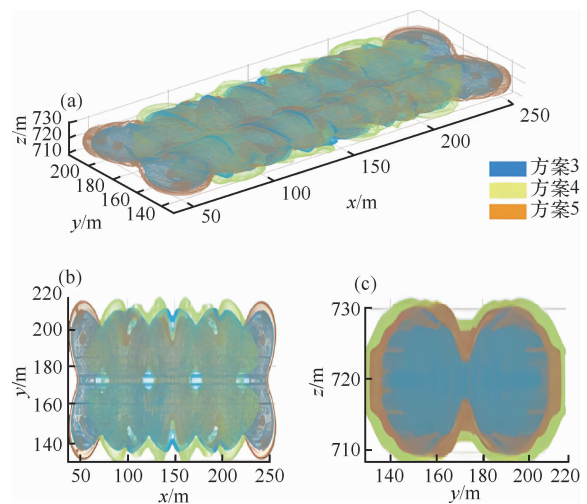
抽注液量为 210  $\text{m}^3/\text{d}$  的整体溶浸范围见图 19。



(a) 三维视图; (b) 平面视图; (c) 垂向视图。

图 18 抽注液量为 180  $\text{m}^3/\text{d}$  的整体溶浸范围

Fig. 18 Overall leaching range with a pumping volume of 180  $\text{m}^3/\text{d}$



(a) 三维视图; (b) 平面视图; (c) 垂向视图。

图 19 抽注液量为 210  $\text{m}^3/\text{d}$  的整体溶浸范围

Fig. 19 Overall leaching range with a pumping volume of 210  $\text{m}^3/\text{d}$

从图 18~图 19 可看出,抽注液量增大,溶浸范围主要沿垂直方向增长,在横向的扩展相对较小。因此,相较于“水平井注-直井抽”,采用直井概化设计的水平井在溶浸范围上表现出更大的优势。

对于“水平井注-直井抽”而言,其溶浸效果受限的主要区域在于纵向上相邻抽液直井的中间部位;而“直井抽注”的情况有所不同,其溶浸死角主要集中在注液直井的中部区域、抽液直井之间的外围空间,以及两端注液直井与相邻抽液井之间形成的交界区间。

随着抽注液量的增大,无论是“直井抽注”方案还是“水平井注-直井抽”方案,其溶浸死角的面积均会减小,这意味着提高抽注液量可有效改善并优化各类井型的溶浸效率。

## 5 结论

1)水平井越长,溶浸范围越大。相较于“直井抽注”,“水平井注-直井抽”垂向溶浸范围小,但平面上溶浸波及率更高,溶浸死角小。水平井200 m方案的矿层溶浸体积占整体溶浸体积的46.26%,对比5口注液直井概化方案,其浸出液有效利用率更高。

2)在固定矿层厚度下,“水平井注-直井抽”的矿层内容浸范围高于“直井抽注”,在2~8 m矿层厚度内,其矿层内容浸范围优势显著,在处理薄层资源时水平井更适用。“水平井注-直井抽”在水平方向上覆盖溶浸范围更广,溶浸死角控制更优。

3) $K_x/K_z$ 对“直井抽注”的溶浸范围影响较大,垂向渗透率低时“水平井注-直井抽”在矿层段的溶浸效果更优,平面溶浸死角小,浸出液利用效率高。

4)抽注液量与溶浸范围成正比,增大抽注液量可显著提升“水平井注-直井抽”的溶浸效果。在210 m<sup>3</sup>/d及以上抽注液量下,“水平井注-直井抽”溶浸效果优于“直井抽注”溶浸效果;流量对溶浸范围的影响主要体现在垂向上,随着抽注液量的增大,溶浸死角均减小。

## 参考文献:

- [1] 谭雨蕾. 砂岩型铀矿空间垂向分带方法与含铀层识别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [2] 范伊琳. 松辽盆地北部新肇地区四方台组、明水组沉积相及砂岩型铀矿成矿条件分析[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [3] 何正. 煤层气水平井钻井技术应用研究[J]. 中国石油和化工, 2024(6): 77-79.  
HE Zheng. Research on application of coalbed methane horizontal well drilling technology[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2024(6): 77-79 (in Chinese).
- [4] 许宁, 谷团, 孙岗, 等. 致密油藏水平井合理补能与提高采收率技术[C]//中国地质大学(武汉), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2023 油气田勘探与开发国际会议论文集 I: 地质学. 武汉[出版社不祥], 2023.
- [5] 胡泽根, 马宇奔, 李明峰, 等. 致密油提高采收率技术研究进展[J]. 石油化工应用, 2023, 42(3): 5-11.  
HU Zegen, MA Yuben, LI Mingfeng, et al. Research progress on enhanced oil recovery technology of tight oil [J]. Petrochemical Industry Application, 2023, 42(3): 5-11 (in Chinese).
- [6] 聂海宽, 党伟, 张珂, 等. 中国页岩气研究与发展 20 年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 20-52.  
NIE Haikuan, DANG Wei, ZHANG Ke, et al. Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 20-52 (in Chinese).
- [7] 田家鹏, 彭胜龙, 郝静, 等. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿成矿条件及其找矿意义[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(2): 60-65.  
TIAN Jiapeng, PENG Shenglong, HAO Jing, et al. Metallogenic conditions and prospecting significance of sandstone type uranium deposits in the northern margin of the Ordos Basin[J]. Energy Research and Management, 2023, 15(2): 60-65 (in Chinese).
- [8] 闫德志, 刘卫红, 刘人和, 等. 中国砂岩型铀矿分布规律及成矿特征[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 第33届全国天然气学术年会(2023)论文集: 06 综合: 石油天然气工业: 工程技术 I. 南宁[出版社不祥], 2023.
- [9] 李召坤, 周根茂, 李坡, 等. 地浸“水平井注-直井抽”井场流场数值模拟与井网优化[J]. 铀矿冶, 2021, 40(1): 18-24.  
LI Zhaokun, ZHOU Genmao, LI Po, et al. Numerical simulation and well pattern optimization of horizontal well injection-vertical well pumping in ISL flow field[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(1): 18-24 (in Chinese).
- [10] 李坡, 周根茂, 李召坤, 等. 地浸采铀水平井过滤器建造技术研究[J]. 铀矿冶, 2022, 41(3): 215-223.  
LI Po, ZHOU Genmao, LI Zhaokun, et al. Filter construction technology of horizontal well for in-situ leaching of uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3): 215-223 (in Chinese).

- [11] 刘晓辉,罗敏,李研. 松辽盆地拜泉区上白垩统姚家组沉积相特征[J]. 铀矿冶, 2024, 43(2):13-23.  
LIU Xiaohui, LUO Min, LI Yan, Sedimentary facies characteristics of Yaojia Formation in Baiquan area of Songliao Basin [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):13-23(in Chinese).
- [12] 张宇,马亮,李召坤,等. 基于多目标优化算法的“水平井-直井”系统流量决策方法[J]. 铀矿冶, 2025, 44(1):30-37.  
ZHANG Yu, MA Liang, LI Zhaokun, et al. Flow decision-making method for the "horizontal well-vertical well" system based on multi-objective optimization algorithm[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1):30-37(in Chinese).
- [13] 刘双民,刘正邦,李宏星,等. 纳岭沟铀矿床洞穴增渗数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(7):156-162.  
LIU Shuangmin, LIU Zhengbang, LI Hongxing, et al. Numerical simulation of cave permeability enhancement in Nalinggou uranium deposit [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(7):156-162(in Chinese).
- [14] 廖文胜,王立民. 地浸采铀过程中抽注液量影响因素分析[J]. 铀矿冶, 2022, 41(2):104-110.  
LIAO Wensheng, WANG Limin. Impact factors of production capacity during in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(2):104-110(in Chinese).
- [15] 张翀,贾皓,谢廷婷,等. 地浸采铀溶浸范围确定理论与影响因素研究进展[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:中国原子能出版社, 2023.
- [16] 常云霞. 地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究[D]. 衡阳:南华大学, 2020.

## Numerical Simulation Comparison on “Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping” and “Vertical Well Injection and Pumping” in In-situ Leaching of Uranium

LI Xinghao, LI Zhaokun, ZHANG Yu, ZHAO Longhao, LI Qinci

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

**Abstract:** In order to clarify the leaching effect of horizontal well technology on in-situ leaching of uranium, a numerical simulation method was used to study the influence of different parameters on "Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping" and conventional "Vertical Well Injection and Pumping". The results show that compared with "Vertical Well Injection and Pumping", the length of horizontal wells is proportional to the leaching range, the vertical leaching range of "Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping" is small, the plane sweep efficiency is high, the dead corner of leaching is small, and the effective utilization rate of leaching solution is high; it has a wide coverage in the horizontal direction and have significant advantages in the treatment of thin uranium ore deposits. The ratio of horizontal permeability to vertical permeability has a greater impact on the leaching of "Vertical Well Injection and Pumping". When the vertical permeability is low, the leaching effect of horizontal well sections is better than that of vertical well sections; the amount of pumping and injection fluid is positively correlated with the leaching range. As the amount of pumping and injection fluid increases, the dead corners of leaching of both "Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping" and "Vertical Well Injection and Pumping" decrease. The increase in the amount of pumping and injection fluid has a greater impact on the leaching effect of "Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping". When the flow rate reaches 210 m<sup>3</sup>/d, the leaching range of the ore layer of "Horizontal Well Injection-Vertical Well Pumping" is higher than that of generalized "Vertical Well Injection and Pumping".

**Key words:** in-situ leaching of uranium; horizontal well; vertical well; numerical simulation; permeability; pumping and injection fluid volume; leaching range