

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.05.005

地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究

常云霞^{1,2}, 谭凯旋^{1,2*}, 张 翀^{1,3}, 姚益轩³, 何成垚¹, 刘 阳¹

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 稀有金属矿产开发与废物地质处置技术湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要:以内蒙某砂岩铀矿地浸井场中抽液孔和注液孔之间的天然地下水流场为研究对象,通过地下水动力学模拟研究地下水的流速场,根据井场边缘注液孔的地下水流速场特征来探讨溶浸范围的确定方法和影响机制。结果表明:单孔抽、注液量对井孔处水位升降、溶浸液运移速度及距离有决定性的影响,其次叠加了地下水流向对井场的影响;由井场边缘注液孔向外的地下水流速随距离增大呈指数下降,地下水的流速场变化控制了溶浸液向井场外的运移距离和井场的溶浸范围。井场溶浸范围在垂直于地下水流向的东、西两侧对称,下游溶浸范围略大于上游,在开采年限5~10年内溶浸范围为60 m左右,比较符合该矿山的浸出效益及环保要求。

关键词:地浸采铀;水动力场;溶浸范围;数值模拟

中图分类号:TD868;TL212 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2020)05-0029-08

Simulation Study on Groundwater Dynamics Control of Leaching Range of In-situ Uranium Well Field

CHANG Yunxia^{1,2}, TAN Kaixuan^{1,2*}, ZHANG Chong^{1,3},
YAO Yixuan³, HE Chengyao¹, LIU Yang¹

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Wastes, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China)

Abstract: Taking the natural groundwater flow field between the pumping hole and the injection hole in a sandstone uranium mine in-field in Inner Mongolia as the research object, the groundwater flow rate field was studied through groundwater dynamics simulation, ac-

收稿日期:2020-04-19

基金项目:核工业北京化工冶金研究院合作项目

作者简介:常云霞(1993-),女,硕士研究生,主要从事地球化学及溶浸采铀方面的研究。E-mail: yxc_chang@163.com。*通信作者:谭凯旋(1963-),男,教授,博士,主要从事地球化学与成矿动力学、溶浸采铀等方面的研究。E-mail: nhtkx@126.com

ording to the groundwater flow rate at the injection hole at the edge of the well field characteristics to explore the determination method and influence mechanism of the leaching range. The results show that the pumping and injection volume of a single hole has a decisive influence on the water level drop at the well bore, the migration speed and distance of the leaching solution, and the effect of the groundwater flow direction on the well site is superimposed; The groundwater flow rate decreases exponentially with increasing distance. The change of the groundwater flow rate field controls the migration distance of the leachate to the outside of the well site and the dissolution range of the well site. The leaching range of the well site is symmetrical on the east and west sides perpendicular to the groundwater flow direction. The leaching range of the downstream is slightly larger than the upstream. The leaching range is about 60m within 5-10 years of mining period, which is more in line with the leaching benefits and environmental protection requirements of the mine.

key words: in-situ leaching of uranium mining; hydrodynamical field; leaching range; numerical simulation

0 引言

原地溶浸采矿(in-situ leaching mining, 简称地浸采矿, ISL) 又称为原地回收(in situ recovery, ISR), 是通过人工钻孔将浸出液注入含矿层, 选择性地浸出有用矿物成分, 然后将浸出液通过抽液钻孔抽出到地表进行加工处理, 这是一种集采矿、选矿、冶金于一体的新的采矿理论和采矿方法^[1]。由于地浸采矿不需井巷工程、对地表生态环境破坏小、生产成本较低、几乎不会产生尾矿和废石、能适用于低品位矿产资源的开采, 目前在铀矿开采中得到快速发展和应用, 地浸生产的铀占全世界总铀产量的一半左右(2016年为49.7%), 地浸采铀已成为世界铀保障供应的重要来源^[2]。溶浸范围的控制和圈定是地浸采铀中的关键技术之一^[3-9], 一方面关系到地浸井场的生产效益和资源回收率, 另一方面关系到地下水的污染控制。地浸生产由一系列抽、注钻孔组成, 井场的地下水动力学一方面受到天然地下水流场的影响, 另一方面又受到人为抽、注水动力学流场的影响, 注液孔附近的水位会抬升而高于原始地下水水位, 抽液孔附近的水位会明显降低而低于原始地下水水位并形成降水漏斗。井场的溶浸范围主要受地下水流场的控制, 因此地下水的动力学模拟研究为井场溶浸范围的研究提供了一种新方法^[10-11]。但是, 到目前为止如何确定溶浸范围、采用什么标准或什么指标参数来确定溶浸范围还没有一致的认识。本文以内蒙某铀矿井场为例, 通过地下水流的动力学模拟, 根据井场边缘抽注钻孔的地下水流速场特征来探讨溶浸范围的确定方法和影响机制。

定方法和影响机制。

1 采区水文地质条件及钻孔布置

1.1 采区的水文地质条件

研究区为内蒙某砂岩铀矿, 该矿床位于二连盆地马尼特坳陷的西部某处, 苏尼特隆起和巴音宝力格隆起之间, 根据现场钻孔施工测井结果、岩心分析资料及矿床地质勘探报告有关水文地质资料综合分析(水文地质剖面示意图见图1), 该矿床自上而下垂向上分布有4个含水层。

第一含水层属承压含水层, 主要由古近系的砂质砾岩、灰绿色砂岩与上白垩统二连组(K_2e)的含砾砂岩、灰绿色泥质砂岩、砂质砾岩组成, 透水性较好, 渗透系数为 $8(m/d)$; 底部为灰绿色泥岩、黏土质砂岩、偶夹有浅灰色含砾砂岩组成的隔水层。该含水层厚度约80m, 隔水层底板厚度约65~75m, 含水层顶板标高约963m。

第二含水层属孔隙承压水, 位于赛汉组上段第三亚层(K_1S^{2-3}), 岩性为浅黄色、灰色含砾粗砂岩, 细砂岩, 厚度约30m, 含水层顶板标高约818m, 透水性良好; 隔水层为红色结构致密的泥岩厚度约40m, 该岩层连续性较好。

第三含水层为含矿含水层, 处于赛汉组上段第二亚层(K_1S^{2-2}), 该层砂体岩性主要为灰色砂质砾岩, 黄色粗砂岩, 局部夹灰绿、浅灰色细砂岩, 透水性好, 矿体埋藏深度约270m, 含矿含水层厚度为60m, 矿体平均厚度约4m, 储水系数为 1.0×10^{-5} , 含矿含水层水位标高约980m, 埋深约256m。含矿层底板由红色泥岩和粉砂岩组成, 厚度约10m, 隔水底板高程678m。含矿含水层地

下水的总体流向自南向北,地下水径流速度为0.064 m/d。

第四含水层属于孔隙承压水,为赛汉组上段第一亚层(K_1S^{2-1}),岩性主要为砂质砾岩,含水层

连续、分布均匀,厚度约50 m,其底部主要为泥质砾岩、泥质粉砂岩类,透水性较差。

该场址具体的水文地质参数见表1。

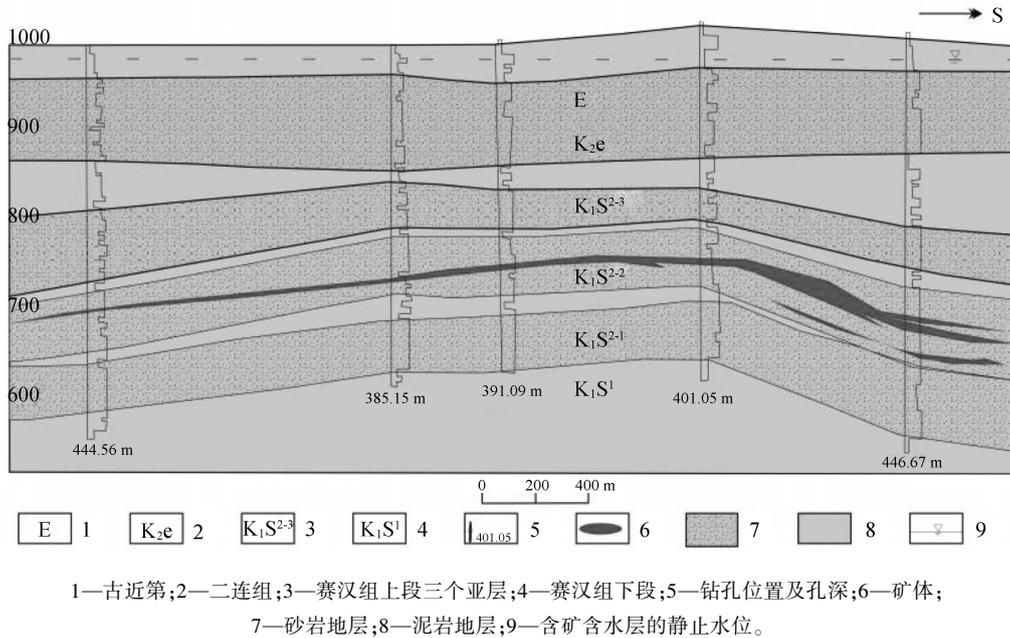


图1 水文地质剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogeological section

表1 采区各含水层水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of aquifers in the mining area

参数	渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)	埋深/m	含水层 厚度/m	含水层隔水 底板厚度/m	含水层 水位标高/m	给水度	孔隙度	有效 孔隙度
第一含水层	—	41	80	65	—	—	—	—
第二含水层	—	186	30	40	—	—	—	—
第三含水层 (含矿含水层)	7.7	256	60	10	980	0.1	0.28	0.15
第四含水层	—	326	50	60	—	—	—	—

1.2 井场布局设计

研究区井场抽—注液钻孔布置如图2,采用五点井型布局,包括25个注液孔和16个抽液孔。每单元中心为抽液孔,外围对应4个注液孔,抽—注液孔间距30 m。为后续方便分析,对钻孔和钻孔剖面进行了编号。

1.3 各个钻孔抽注液量设置

按照总抽液量大于总注液量的0.30%的原则设置相应流量^[8,12]。单孔抽液量为10.03 m³/h,总抽液量160.48 m³/h;25个注液钻中,井场顶角4个孔(Z11、Z15、Z91、Z95)注液量为2.5 m³/h,其

余12个边缘钻孔(Z12、Z13、Z14、Z31、Z51、Z71、Z35、Z55、Z75、Z92、Z93、Z94)的注液量为5.0 m³/h,井场内部9个注液孔的注液量为10.0 m³/h,总注液量为160 m³/h。

2 地质和数学模型

2.1 地质概化模型

含矿含水层顶、底板为天然的致密隔水层,并且埋深较深,不考虑天然蒸发及含矿含水层与相邻含水层之间的越流补给,模拟计算仅仅考虑含矿含水层。认为含矿含水层为均质等厚,厚度为

60 m。矿体位于其中间部位,平均厚度约4 m,进水和注水部位过滤器平均长6 m,过滤器均位于模型剖分的第三层,对于矿体上下伸出1 m层位。由于抽、注作用的存在,把水流状态概化为非稳定流。研究区地下水由南向北流动,在离井场一定距离,将南部边界和北部边界刻画为定水头边界,南部边界定水头307 m,北部边界定水头297 m,与地下水流方向垂直的东西方向离井场一定距离(500 m),将其概化为隔水边界,以井场为中心平面上将模拟的地质模型概化为东西长1 200 m,南北宽1 200 m,10 m×10 m为一个网格单元,对井场周围的网格加密为2.5 m×2.5 m,垂向剖分4层(见图3)。

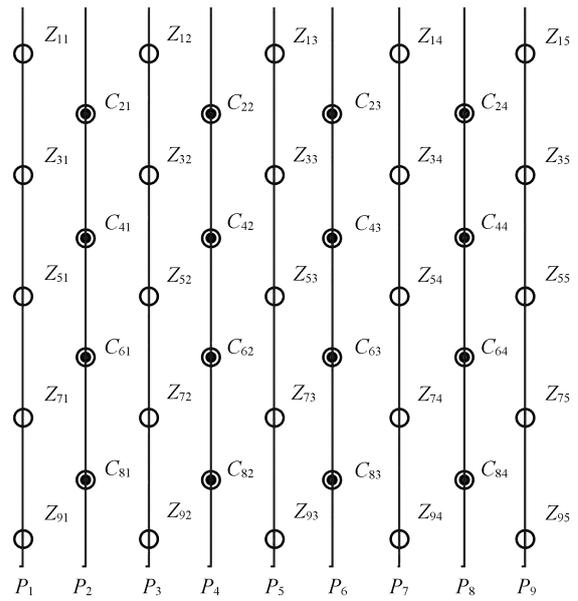


图2 井场钻孔布局示意图

Fig.2 Schematic diagram of well field drilling layout

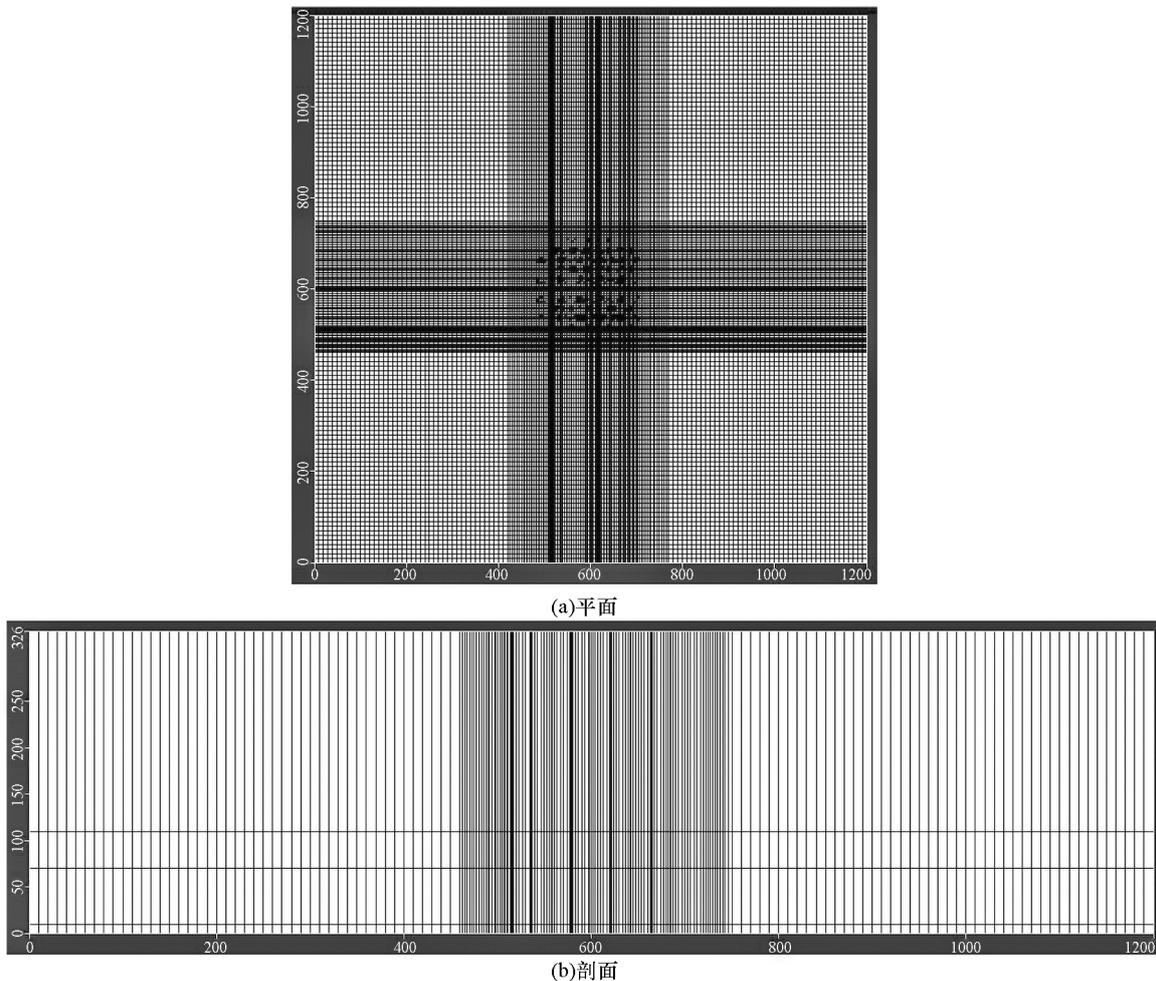


图3 井场地下水动力学模拟的平面和剖面网格剖分图

Fig.3 Plane and section grids of groundwater dynamics simulation in wellsite

2.2 数学模型

在地浸采铀过程中,含矿含水层中的地下水的运动属于承压三维非稳定流,建立了以下模型和边界条件:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + q = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (2)$$

$$H(x, y, z, t) |_{B_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{L_1} = 0 \quad (4)$$

式中, μ 为储水系数($1/L$); K_x, K_y, K_z 为各向异性主方向的渗透系数(L/T); H 为点(x, y, z)在 t 时刻的水头值(L); q 为源汇项($1/L$); H_0 为计算域初始水头值(L); H_1 为第一类边界的水头值(L); t 时间(T); B_1 为等水头边界; n 为隔水边界外法线方向; L_1 为隔水边界。

在模拟的地下水水位变化的基础上,进一步模拟计算井场内地下水的流速场,算法如下:

$$\Delta v_j = K \frac{I}{\Delta r_j}$$

$$\Delta t_j = \frac{\Delta r_j}{\Delta v_j} = \frac{\Delta r_j^2}{K \times I}$$

$$T_j = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_j$$

式中 Δr_j 表示一个计算单元中心到相邻计算单元中心的宽度 $\Delta v_j, \Delta t_j, I$ 分别为相邻两个单元之间的地下水流速、地下水需要运移的时间和水力梯度 K 为渗透系数 T_j 为从井孔到第 j 个单元格所需要的时间。

模拟采用基于三维有限差分法的 Visual MODFLOW 软件进行模拟,其基本原理是:在不考虑水的密度变化条件下,求解孔隙介质中地下水在三维空间流动的偏微分方程。该软件在地下水的模拟研究中具有较好的优势^[13-16]。

3 模拟结果和讨论

3.1 地下水水位降深的时空变化

图4为开始抽—注液过程中不同时间点井场及周围地下水水位降深变化的立体图,可见在抽注1 d后各抽注液孔的水位降深基本达到稳定状态,在每个抽液体孔位置形成一个降水漏斗,而在每个注液孔位置形成一个水位隆起,并且内部注液孔的水位抬升明显高于边缘注液孔。

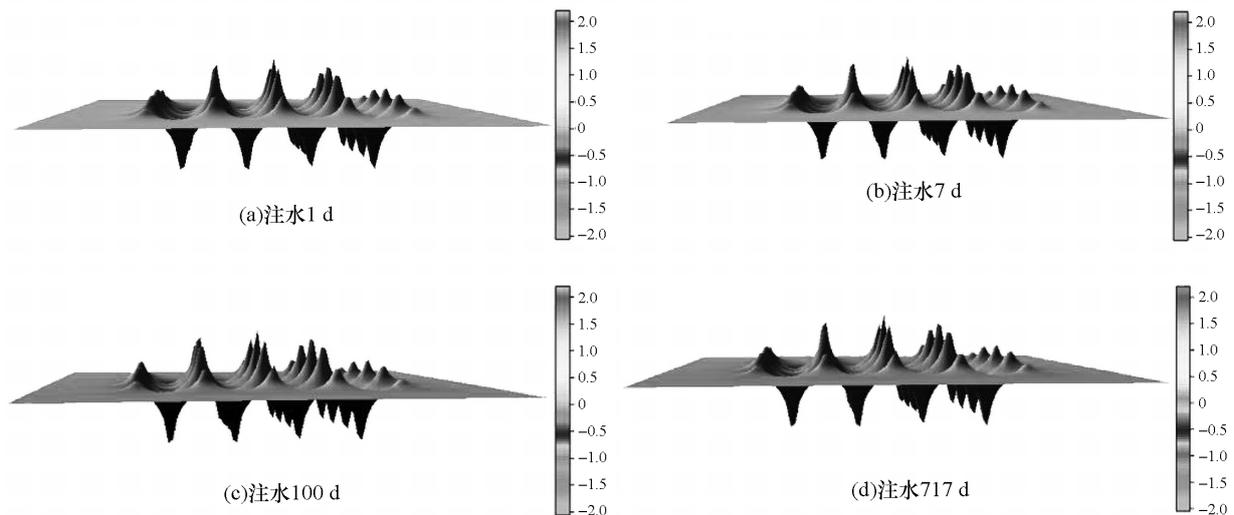


图4 井场不同抽注时间地下水水位降深模拟三维图

Fig. 4 Three-dimensional simulation of ground water drawdown in wellsite at different pumping times

为了分析抽液和注液对地下水水位的协同影响,对抽液孔进行了3 d单纯的抽水模拟(即此期间注液孔不进行注水),然后再开始进行同时抽、注。在图5中列出了3个剖面的地下水水位降深随时间的变化曲线(0值线表示原始水位),其中

P1代表边缘注液孔,P2代表抽液孔,P5代表内部注液孔。在3天纯抽水期间,在每个抽液孔处形成一个窄而深的降水漏斗,单孔水位降深达7.7 m(图5中P2剖面);并且注液孔剖面在周围抽液孔的影响下也形成了降水漏斗(图5中P1

和 P5 剖面)。

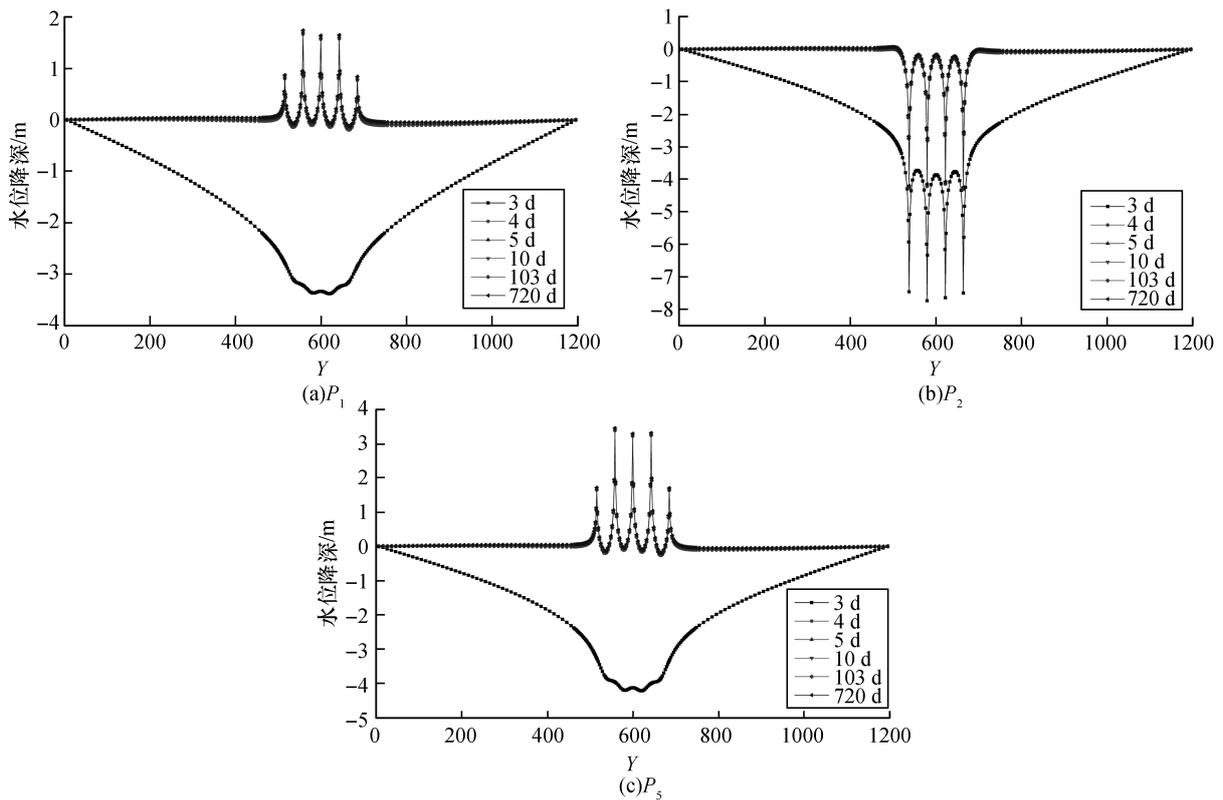


图5 地浸井场水位升降剖面图

Fig.5 Profile of well water level rise and fall of in-situ leaching wellsite

开始同时抽和注后,受到注水孔的影响,随时间地下水水位总体逐渐抬升、水位降深逐渐减小并趋于稳定(1 d后地下水曲线基本重合),在每个抽液孔形成一个降水漏斗,每个注液孔形成一个水位隆升。抽注稳定后每个抽液孔的水位降深为4~4.25 m左右,比单纯的抽水时的降深(7.7 m)减小了约一半,说明受到了注液孔水动力学的强烈影响。每个注液孔的水位抬升不同,稳定后井场顶角4个注液孔水位抬升约为0.8 m,其余边缘注液孔水位抬升约为1.7 m,内部注液孔水位抬升约为3.3 m,这主要是受注液孔注水量的影响。模拟结果还可看出,在抽液孔剖面中(图5),中部抽液孔总体水位降深线在原始水位线(0线)之下,形成一个凹陷,这样井场外围的地下水无疑向井场内流动;在注液孔剖面中虽然在注液孔处水位抬升较高,但注液孔之间的水位降深在原始地下水水位线之下,说明受到了邻近抽液孔的明显的影响,边缘注液孔外井场外水位降深线也很快降到0线之下,同样说明受到抽液孔的影响。

3.2 溶浸范围

井场的溶浸范围是注入的溶浸剂能够通过地下水流动而到达的范围,因此溶浸范围受到井场地下水动力学的控制。

由于井场设计的所有抽液孔的抽液量都一样,井场外围注液孔的顶角、边缘的注液量不一致,几个典型的边缘钻孔往井场外的地下水流速变化的模拟结果列于图6中。图6可见从边缘注液孔往井场外,其水流速率随距孔的距离增大而呈指数降低,采用最小二乘法拟合,可见流速随距离的变化符合指数函数 $y = y_0 + Ae^{R_0x}$,其中常数 y_0 、 A 、 R_0 随拟合曲线的不同而改变,拟合度 R^2 因子均高于0.99,拟合性较好。由井场向外的地下水流速在距离注液孔约3 m,抽液孔约4.5 m时骤降,随后流速趋于零,注液孔在距井57.7 m时流速约为0.001 7 m/d,抽液孔在距井36.1 m时,流速约为0.005 7 m/d;顶角注液孔的流速小于边缘注液孔的流速,抽液孔的流速变化大致相同;注液孔处最高流速为4.5 m/d,抽液孔处最高流速为10.5 m/d。

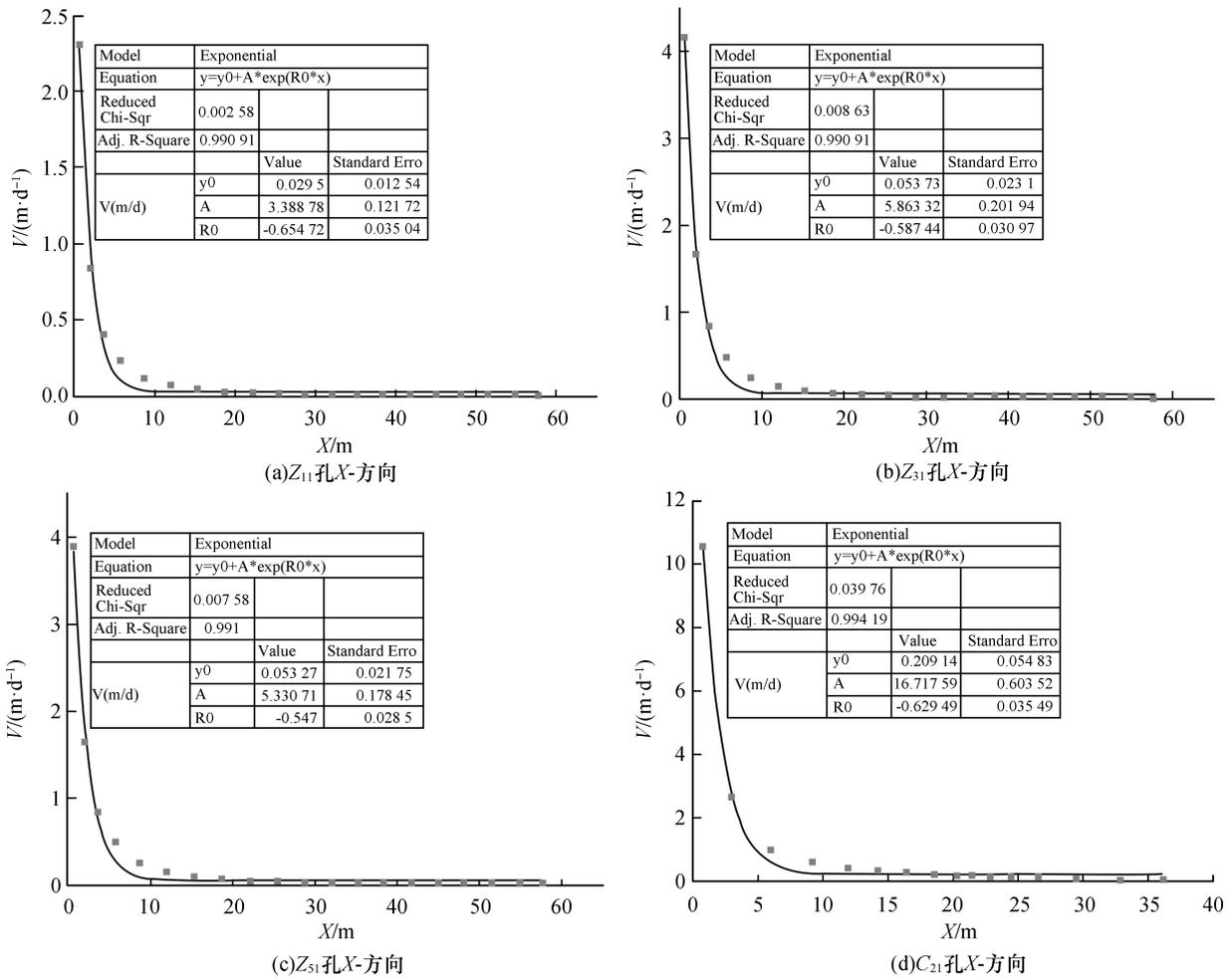


图 6 代表性钻孔处地下水流速随距离的变化

Fig. 6 Change of groundwater flow rate with distance at representative borehole

由于地浸井场的开采周期(服务年限)一般为 5 到 10 年,利用上述数学模型,在模拟地下水水位变化的基础上,进一步模拟计算井场内地下水的流速场,来探讨溶浸范围的确定方法和影响机制,因此模拟计算了 10 年间,井场所有边缘注孔注入的溶浸液向井场外运移距离的变化。表 2 列出了全部边缘注孔分布在 1、5、10 年其溶浸液往井场外运移的距离。根据原始地下水流向和相对于井场的位置,可以把边缘注孔划分为 4 个区域,分别是井场的西部、东部、上游和下游。可见在相同的地浸时间,边缘的注液孔处溶浸液运移距离大于顶角钻孔,如西部井场 Z₅₁ 孔在第 5 年和第 10 年分别运移了 48 m 和 59 m, Z₁₁ 孔在第 5 年和第 10 年分别运移了 38.4 m 和 44.5 m;并且相同时间内,在边缘钻孔处平行于地下水流的下游,溶浸液的运移距离略大于上游地区,垂直于地下水流向的井场东部和西部则大致相同,如下游

注孔 Z₁₄ 孔第 5 年和第 10 年分别运移了 47.8 m 和 58.1 m,上游注孔 Z₉₄ 孔第 5 年和第 10 年分别运移了 46.2 m 和 53.9 m。说明单孔注液量对溶浸液运移距离有决定性的影响,其次叠加了地下水流向对井场的影响。总的来说,地浸采铀井场的溶浸范围随生产时间会逐渐增大,生产 5 年时溶浸范围在边缘注液孔距离 50 m 左右,10 年时为 60 m 左右,形态上溶浸范围关于井场东西对称,下游溶浸范围略大于上游。

在地浸井场运行初期溶浸液向井场外扩散速度较快,随着时间的推移扩散速度减慢,如井场西部的 Z₇₁ 孔,1 到 5 年间溶浸范围从 28.8 m 升高到 46.6 m,增长了 17.8 m,5 到 10 年溶浸范围从 46.6 m 升高到 56.5 m,增长了 9.9 m,这主要是由于距离井场越远受井场抽注作用影响减弱,地下水运移的水力梯度越小,流速越慢,且时间越长地下水向前运移距离的增幅越小。

表2 注液孔处地下水向井场外运移距离随时间的变化

Table 2 The variation of the distance of groundwater moving out of the well site at the injection hole with time

单位:m

时间/a	井场西部					井场东部				
	Z11	Z31	Z51	Z71	Z91	Z15	Z35	Z55	Z75	Z95
1	22.2	28.8	28.8	28.8	23.9	21.7	28.3	28.3	28.3	23.4
5	38.4	45.1	48.0	46.6	40.0	37.5	46.0	47.8	46.2	40.5
10	44.5	53.4	59.0	56.5	49.6	45.2	53.0	57.0	57.3	49.3

时间/a	井场上游					井场下游				
	Z91	Z92	Z93	Z94	Z95	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15
1	22.3	28.6	28.6	28.6	22.3	23.3	28.5	30.0	30.0	23.3
5	37.8	45.2	46.3	46.3	37.8	39.8	47.8	49.0	47.8	39.8
10	45.1	53.9	56.8	53.9	44.1	49.1	55.3	58.2	58.1	49.1

4 结 论

对内蒙某铀矿床地浸采铀井场的地下水动力学及其溶浸范围进行数值模拟研究,得到如下结论:

1) 在天然地下水流动场、抽液孔和注液孔三者的水动力学的联合作用下,地浸井场在抽液孔剖面上以抽液孔为中心,水位降深线形成一个凹陷,井场外围的地下水向井场内流动;在注液孔剖面中在注液孔处水位抬升较高,受到邻近抽液孔的影响,绝大部分溶浸剂回流进井场,在边缘注液孔小部分的溶浸剂以渗流弥散或分子扩散的方式向井场外运移。

2) 井场边缘注液孔往外,地下水流速随着距离的增加呈指数降低,井场向外的地下水流速在距离注液孔约 3 m,抽液孔约 4.5 m 时,流速骤降,即溶浸液离注孔越远流速越慢,离抽孔越远流进井场的速度越慢;根据地下水流速场可以进一步圈定井场的溶浸范围。

3) 在相同的地浸时间,边缘的注液孔处溶浸液运移距离大于顶角钻孔,平行于地下水流的下游,溶浸液的运移距离略大于上游地区,垂直于地下水流向的井场东部和西部则大致相同,说明单孔注液量对溶浸液运移距离有决定性的影响,其次叠加了天然的地下水流动对井场的影响。

4) 在抽注孔距离一定条件下,通过模拟计算得出该矿山的井场设计,在开采年限内溶浸液能够运移的最远距离即溶浸范围为边缘注液孔外 60 m 左右,比较符合该矿山的浸出效益及环保要求。

参考文献:

[1] SEREDKIN M, ZABOLOTSKY A, JEFFRESS G, et al. In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: Exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics[J]. Ore geology

reviews, 2016, 79:500-514.

- [2] NEA/IAEA. Uranium 2018: Resources, production and demand[M]. Paris: OECD publishing, 2019:60-65.
- [3] 姚益轩, 阙为民, 苏学斌, 等. 地浸采铀中几个重要因素的技术经济分析[J]. 铀矿开采, 1999, 23(3):1-8.
- [4] 张建华, 朱新铨, 史骥, 等. 某原地浸出铀矿井型及井距优化数值模拟[J]. 金属矿山, 2017(3):25-30.
- [5] 甘泉. CO₂+O₂ 中性原地浸出采铀矿山井场抽注液平衡与地下水环境的影响关系[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊1):87-92.
- [6] 阙为民, 谭亚辉, 曾毅君. 原地浸出采铀反应动力学和物质运移[M]. 北京:原子能出版社, 2002:80-95.
- [7] 李德, 段柏山. 微观平衡优化地浸采场溶浸范围[J]. 铀矿冶, 2017, 36(4):279-283.
- [8] 徐强. 地浸矿山抽注比对溶浸范围影响研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊1):93-97.
- [9] 吕俊文, 周星火, 蔡萍莉, 等. 某铀矿地浸采区的水动力场三维模拟[J]. 铀矿冶, 2003, 21(4):188-192.
- [10] IAEA. Manual of acid in situ leach uranium mining technology[M]. Austria: IAEA, 2001:60-63.
- [11] 周义朋, 沈照理, 孙占学, 等. 应用粒子示踪模拟技术确定地浸采铀溶浸范围[J]. 中国矿业, 2015, 24(2):117-120.
- [12] 刘正邦, 王海峰, 闻振乾, 等. 地浸采铀井场溶液运移特征与抽注液量控制研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(1):23-26;33.
- [13] 谢廷婷, 姚益轩, 甘楠, 等. 地浸采铀渗流弥散场特征分析及应用(待续)[J]. 铀矿冶, 2016, 35(3):149-158.
- [14] 桑学锋. 敦煌盆地地下水数值模拟及可视化与管理[D]. 甘肃:兰州大学, 2006:33-35.
- [15] 王金婷. 基于 Visual Modflow 的地下水污染物运移模拟[J]. 华北国土资源, 2018(6):64-66;69.
- [16] 杨彪, 罗周全, 王益伟, 等. 基于 Visual Modflow 的矿山地下水流场分析及预测[J]. 矿冶工程, 2013, 33(4):11-15;21.