地浸开采井场抽注单元优化设计研究

段晓恒，孙永强

（中核第四研究设计工程有限公司，河北 石家庄 050021）

摘要：地浸开采井场抽注单元可能出现注液量大于抽液量的情况，造成部分浸出液扩散至溶浸范围之外。通过采区目标优化方法，对井场单孔抽注液量进行优化计算，能够实现采区每个抽注单元的抽注平衡，保持总抽液量大于总注液量 0.5%，使浸出液尽可能控制在井场范围内。根据优化结果调整各抽注单元的抽注液量，可实现采区同时投产、同时退役。

关键词：地浸；优化设计；井场设计；抽注平衡

中图分类号：TL212 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)01-0010-05

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.05.25

原地浸出采铀是集采选冶于一体的采矿方法，经注液井将浸出剂注入到矿层，使溶液在矿层中渗流迁移，经抽液井将浸出液提升至地表[1]。地浸开采可能存在浸出剂泄漏、井场管线跑冒滴漏、集配液池和蒸发池泄漏、浸出液扩散污染地下水等环境污染问题[2]。通过改进成井方式、选用抗腐蚀管材、强化工程质量管理、加强地下水监测等手段，可改善地浸开采对环境的影响[3]；但注入矿层的浸出剂会向含水层扩散，影响地浸边界线以外的地区，对地下水造成一定污染。

传统抽注平衡主要是实现井场的抽注平衡：一部分吸附尾液及全部转型尾液（总量约占总抽液量的 0.3%）排至蒸发池进行自然蒸发；其余溶液用于配制浸出剂，通过注液总管输送至井场。目前主要是通过控制各采区的抽注液总量实现各采区的抽注平衡，尚未实现各抽注单元的抽注平衡。

地浸开采通过保持抽液量大于注液量，控制地下水的运移路径，实现每个采区抽注平衡[4]；但很难实现每个抽注单元的抽注平衡。通过调整抽注比控制溶浸范围[5]，会造成局部抽注不平衡，使浸出液向周边扩散。对于位于自然流场下游的注液井，浸出液一旦扩散，很难通过抽注循环进行修复。针对这个问题，笔者对抽注单元进行优化设计，实现开采铀资源的同时减小对地下水环境的影响。

1 地浸开采地下水污染防治措施

为了降低地浸开采对地下水环境的影响，目前主要通过采取以下措施来降低污染。

1.1 井场抽注平衡

地浸开采过程中，抽液井抽液量越大，浸出液铀浓度越高，浸出金属量越大。地浸开采抽液量受水文地质条件、钻孔成井质量、抽注比等因素影响[6]，同一个采区不同抽液井的抽液量也可能有较大差异。为确保井场抽注平衡，实现经济、高效开采，并有效降低浸出液扩散对地下水的影响，主要是通过控制总抽液量大于总注液量，使得在井场溶浸范围内形成地下水漏斗，进而防止浸出液扩散到井场外。

1.2 减少浸出时间

采区服务年限越长，浸出液扩散范围越大，对于地下水污染防治越不利。采区的服务时间和采区各个抽注单元金属量、单孔抽液量、浸出液铀浓度、浸出率等参数有关。一般可参照开采条件比较接近的采区，将有关参数简化后进行采区服务年限估算[7]。

一般地浸过程的化学反应速度远大于扩散速度，铀浸出速度主要取决于浸出剂的扩散速度。钻孔抽液量对浸出液铀浓度无影响[8]，渗透速度对浸出液铀浓度无影响[9]，可通过增大流量提高

收稿日期：2022-05-23

第一作者简介：段晓恒（1978—），男，河北石家庄人，硕士，高级工程师，主要从事铀矿冶工程研究与设计工作。

井场浸出强度，实现缩短井场服务时间、控制井场溶浸范围、降低地浸对地下水影响的目的。

1.3　采用适宜的浸出剂

根据浸出剂的性质不同，地浸开采大致可分为酸法浸出、碱法浸出和 CO_2+O_2 浸出。酸法和碱法浸出对地下水环境的影响较大[10]，因此在条件适宜的情况下，应优先采用 CO_2+O_2 浸出工艺[11]。

1.4　回采完毕后立即退役治理

井场采区回采完毕后，地下水的自然流动会造成开采范围内浸出液中铀的迁移[12]；而且迁移范围越大，治理难度越大。因此，回采完毕后应尽快进行采区退役治理。

2　地浸采区基本情况

2.1　采区概况

矿块长 150 m，宽 150 m，井型采用七点型布置，共划分为 7 个抽注单元(图 1)，每个抽注单元的基本信息见表 1。

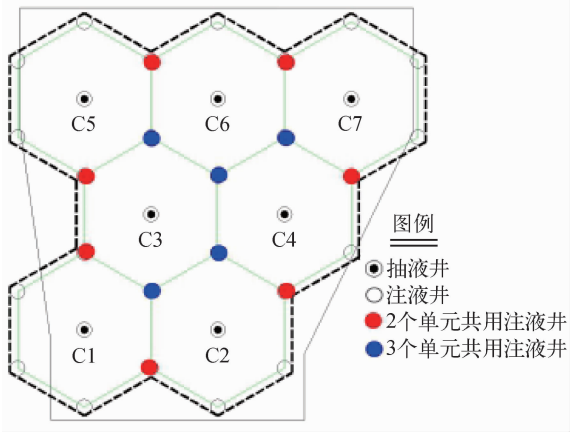


图 1　采区钻孔布置图

Fig. 1　Layout of boreholes in mining area

表 1　采区抽注单元基本信息

Table 1　Basic information of pumping and injection units in mining area

抽注单元	平米铀量/(kg·m^{-2})	面积/m^2	金属量/t
1	4.5	1 637	7.4
2	5.0	2 338	11.7
3	5.4	2 338	12.6
4	4.8	2 221	10.7
5	4.3	2 104	9.0
6	5.6	2 338	13.1
7	4.0	1 988	8.0

2.2　采区抽注控制

选择 7 个抽注单元作为研究对象，井距 30 m。采区共布置 7 口抽液井，25 口注液井，平均单井抽液量为 6.50 m^3/h，考虑采区抽液量大于注液量 0.5%[13]，计算得到单井平均注液量为 1.81 m^3/h。考虑整个采区的抽注平衡，按照抽液井平均抽液量 6.50 m^3/h、注液井平均注液量 1.81 m^3/h 计算，抽注单元 C1 共有独立的注液井 3 口、2 个抽注单元共用注液井 2 口、3 个抽注单元共用注液井 1 口。经计算抽注单元 C1 的注液量为 7.86 m^3/h，大于抽液量 6.50 m^3/h，多余的浸出剂可能会迁移至溶浸范围以外。

3　地浸开采井场抽注单元优化设计

3.1　参数标定

采区抽注系统中，每个抽注单元的单井抽液量均为未知量，用 x_i 表示，i 为抽注单元编号，$i=1,2,3,\cdots,7$。采区注液系统相对比较复杂，存在 1 口注液井服务 2～3 口抽液井的情况。为方便计算，每口注液井按照不同注液单元分别计算。注液井注液量用 x_{ij} 表示，i 为抽注单元编号，$i=1,2,3,\cdots,7$；j 为注液井编号，$j=1,2,3,\cdots,6$，按顺时针方向编号。

3.2　目标函数的确定

采区抽注液系统最主要的目标是实现每个抽注单元的抽注平衡，即每个抽注单元总抽液量大于总注液量 0.5%。

$$f_{\min\max}=\sum_{i=1}^{7}\left(\sum_{j=1}^{6}(x_{ij})\right),$$

式中，等式左边为最大最小值函数，等式右边表示分配到各个抽液井的各注液井注液量之和。为避免出现同一采区不同抽注单元服务年限不同的情况，建立了目标规划模型，模型目标为各抽注单元抽液量之和的最大值。实际中浸出液铀浓度是变化的参数，为简便计算，各抽注单元铀浓度均按固定值来计算。

3.3　约束函数的确定

3.3.1　抽注单元抽注平衡约束

对于每个抽注单元，都要满足抽注平衡，尤其是周边抽注单元，一定要满足抽液量大于注液量 0.5%的要求。

$$\frac{x_i}{1+0.5\%}-\sum_{j=1}^{6}(x_{ij})\geqslant 0,$$

3.3.2　抽液井的最大抽液能力约束

抽液井的抽液能力受到含矿含水层渗透系

数、含矿含水层厚度等条件影响，初步确定整个采区最大单井抽液量为 6.50 m^3/h，最大单井注液量为 2.50 m^3/h。相关约束如下：

$$0 \leqslant x_i \leqslant 6.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{ij} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{11} + x_{35} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{12} + x_{26} + x_{34} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{13} + x_{25} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{33} + x_{45} + x_{21} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{44} + x_{22} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{54} + x_{36} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{53} + x_{65} + x_{31} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{64} + x_{46} + x_{32} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{63} + x_{75} + x_{41} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{74} + x_{42} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{52} + x_{66} \leqslant 2.5\ ,$$

$$0 \leqslant x_{62} + x_{76} \leqslant 2.5\ 。$$

3.4 优化计算

3.4.1 注液量计算

根据采区抽注平衡、注液量约束条件，采用 Matlab 软件中 Minimax 函数[14]，计算各注液井注液量，结果见表 2 和图 2。

表 2 采区抽注单元注液量

Table 2 Injection volume of pumping and injection units in mining area m^3/h

注液井编号	抽注单元编号							
	1	2	3	4	5	6	7	合计
1	1.13	0.75	0.94	0.89	1.16	1.31	1.15	
2	0.72	1.21	0.89	1.32	1.16	1.31	1.15	
3	1.15	1.24	0.92	1.32	0.70	0.88	1.15	
4	1.15	1.24	0.97	1.29	1.13	0.80	1.15	
5	1.15	1.24	1.37	0.83	1.16	0.85	0.72	
6	1.15	0.80	1.37	0.81	1.16	1.31	1.15	
小计	6.45	6.48	6.46	6.46	6.47	6.46	6.47	45.25

根据计算得到的各注液井注液量，能够满足在抽液井抽液量为 6.5 m^3/h 时，抽注单元抽液量大于注液量 0.5% 的要求。由表 2 和图 2 可看出，单井注液量仅为 2.50 m^3/h，对于服务于 3 个单元的注液井来说，平均每口注液井注液量约为 0.83 m^3/h；而平均单井抽液量为 6.5 m^3/h，对应的每口注液井的注液量大约为 1.08 m^3/h，大于 0.83 m^3/h。每口抽液井的抽液量，以及服务于多口抽液井的注液井的注液量是制约井场生产能力的主要因素，直接影响每个抽注单元的服务年限。在现有抽注平衡条件下，难以实现抽注单元同时停采。

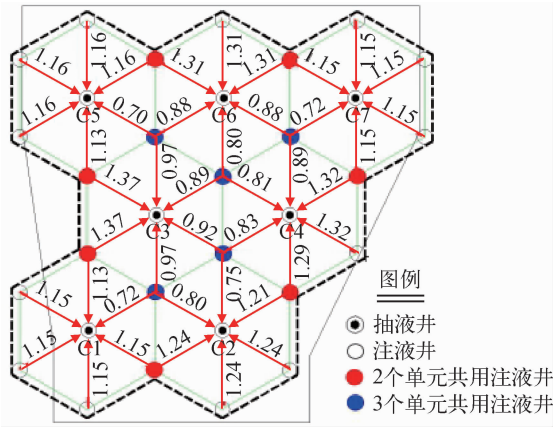


图 2 采区注液量分布

Fig. 2 Layout of injection volume in mining area

因此，在满足抽注平衡的前提下，尽量提高抽注单元的抽注液量对于提高井场生产能力、缩短井场服务年限，以及实现各个抽注单元同时停采具有积极意义。考虑到每个钻孔的抽注液量变化都会对抽注平衡产生影响，因此需建立数字模型，加强对井场抽注液量控制。

3.4.2 抽注单元服务年限计算

采区各抽注单元的服务年限计算公式为

$$A = \frac{p_i \times \eta_i}{x_i \times \rho_i \times 24 \times 350} \times 10^6\ ,$$

式中：A—抽注单元服务年限，a；p_i—第 i 个抽注单元的金属量，t；η_i—第 i 个抽注单元的浸出率，无量纲；x_i—第 i 个抽注单元抽液量，m^3/h；ρ_i—第 i 个抽注单元的浸出液平均铀质量浓度，mg/L。

3.4.2.1 优化前抽注单元服务年限

为了简便计算，各抽注单元浸出率、浸出液平均铀质量浓度分别取 75% 和 35 mg/L，优化前采区基本情况见表 3，各抽注单元计算服务年限如图 3 所示。

表 3　优化前采区基本情况

Table 3　Basic situation of mining area before optimization

抽注单元	金属量/t	平均抽液量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	浸出液平均铀质量浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	浸出率/%	年工作天数/d	服务时间/a
1	7.4					2.9
2	11.7					4.6
3	12.6					5.0
4	10.7	6.5	35	75	350	4.2
5	9.0					3.6
6	13.1					5.1
7	8.0					3.1

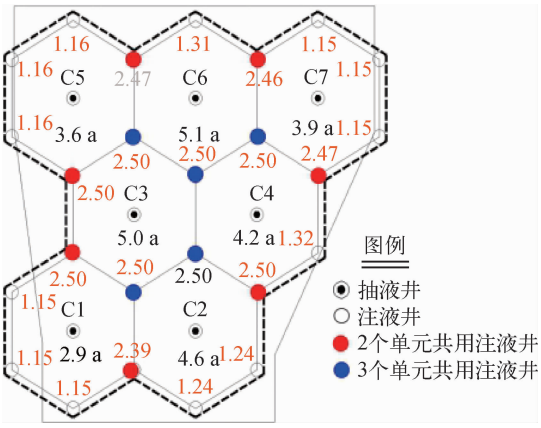


图 3　抽注单元计算服务年限

Fig. 3　Calculated service life of pumping and injection unit

按照平均抽液量 6.50 m^3/h、浸出液平均铀质量浓度 35 mg/L、年工作 350 d 计算，C1 抽注单元 2.9 a 可浸出 75%的铀资源，而 C2 抽注单元则需 4.6 a。采区正常生产 2.9 a 后，C1 抽出井停止抽液，为保证 C2 抽注单元的正常生产，C1 和 C2 抽注单元之间的注液井仍要继续注液。由于整个采区仍有抽液井继续生产，因此部分抽注单元停采后无法及时进行地下水修复，有可能造成浸出液向采区外部迁移。因此采区各抽注单元应同时投产、同时退役，为采区地下水恢复打下良好的基础[15]。

3.4.2.2　优化后抽注单元服务年限

由于各个抽注单元金属量、平米铀量、地质水文条件均存在差异，开采初期难以确定最大抽注液量、浸出液平均铀浓度等参数，因此在开采过程中需要对相关参数进行动态调整，以便达到更好的开采效果。

当抽注单元最大抽液量为 8.0 m^3/h、最大注液量为 3.5 m^3/h 时，调整 1～7 号抽液井抽液量分别为 5.00、7.98、7.98、6.48、6.48、7.98、5.00 m^3/h，重新计算采区各个抽注单元的服务年限，得出各个抽注单元的服务年限分别为 3.76、3.73、4.02、4.20、3.53、4.18、4.07 a，井场各抽注单元的服务年限约为 4 a。

因此，基于采区的资源模型和优化计算模型的计算结果，实时调整抽注液量来实现抽注平衡和井场优化管理，实现采区的同时生产、同时停采，可为采区的平稳运行提供可靠的理论和数据基础。

4　结论

1）基于采区抽注单元抽注平衡理论建立了井场优化计算模型，可根据对采区抽注单元的抽注平衡优化计算结果调整抽注液量，来改变各抽注单元的服务年限，实现采区同时投产、同时退役。

2）地浸开采井场抽注单元优化设计，根据各抽注液井间的关系建立了约束方程，可实现自动建模和计算，降低了生产管理的难度。本次优化设计采用平均铀浓度，生产过程中可根据生产经验或者类比相似采区将各个抽注单元浸出液作为变量来进行计算，计算结果将更加准确、可信。

参考文献：

[1]　李春光，谭凯旋. 地浸采铀地下水中放射性污染物迁移的模拟[J]. 南华大学学报(自然科学版)，2011，25(3)：25-30.

[2]　苑俊廷，孙占学. 地浸采铀中的污染及防护[J]. 科技情报开发与经济，2009，19(3)：154-155.

[3]　田新军，刁春娜. 新疆地浸铀矿山环境影响分析与污染防治措施[J]. 铀矿冶，2010，29(1)：29-32.

[4]　龙红福，沈宏伟. 新酸法地浸采铀过程中地下水控制的实践[J]. 铀矿冶，2017，36(S1)：58-65.

[5]　孙博，孙占学. 地浸采铀中的环境污染及保护[J]. 铀矿冶，2008，27(3)：142-145.

[6]　陈振，刘金辉，殷蓬勃. 十红滩砂岩型铀矿床地浸采铀水文地质条件分析及评价[J]. 世界核地质科学，2008，25(3)：157-160.

[7] 张渤,季扬威,李喜龙,等.地浸铀矿山浸出速度的影响因素[J].铀矿冶,2020,39(1):17-20.
[8] 王海峰.钻孔抽液量与浸出液铀浓度的关系[J].铀矿冶,2008,27(4):169-172.
[9] 邢拥国,汤庆四,姚光怀.地浸采铀影响铀浓度的因素研究和对部分工艺的探讨[J].铀矿冶,2015,34(4):255-260.
[10] 汤庆四,杨俊泉,田超,等.松辽盆地砂岩型铀矿地浸采冶与生态保护——以钱家店铀矿为例[J].地质调查与研究,2016,39(2):136-139.
[11] 何成垚,谭凯旋,李咏梅,等.新疆某铀矿酸法和 CO_2 地浸采区地下水的污染特征及机理[J].有色金属(冶炼部分),2021(6):53-59.
[12] 左维,谭凯旋.新疆某地浸采铀矿山退役井场地下水污染特征[J].南华大学学报(自然科学版),2014,28(4):28-34.
[13] 生态环境部,国家市场监督管理总局.铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定:GB 23727—2020[S].北京:中国环境出版集团,2020.
[14] 崔东文.基于 MATLAB 的文山州区域水资源线性多目标优化配置研究[J].华北水利水电学院学报,2011,32(3):4-7.
[15] 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.

Optimization Design of Pumping and Injection Units in an In-situ Leaching Mining

DUAN Xiaoheng, SUN Yongqiang

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The pumping and injection units in the well site of in-situ leaching production may have the situation that the injection volume is greater than the pumping volume, resulting in the diffusion of part of the leachate pollution beyond the leaching range. Through the target optimization method of the mining area, the single hole pumping and injection volume of the well site is optimized, and the pumping and injection volume of each pumping and injection unit in the mining area is effectively controlled to keep the total pumping volume greater than the total injection volume by 0.5%, so that the leaching solution is controlled within the well site as far as possible. According to the optimization results, the pumping and injection volume of each unit can be changed to realize the production and decommissioning of the mining area at the same time.

Key words: in-situ leaching; optimization design; design of well site; pumping and injection balance