

# 某地浸采铀矿山多层矿开采方法研究

呼日乐, 刘晓奎, 张 渤, 曹俊鹏, 李 男, 田志宇

(中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000)

**摘要:** 针对内蒙古某多层砂岩型铀矿体, 设计了分层注-分层抽开采、分层注-混合抽开采、混合注-分层抽开采和混合注-混合抽开采4种试验方案, 对各组试验的抽注液量、浸出情况及优缺点等进行了分析, 探究了单井分层注液的可行性, 突破了单井分层抽注液的关键技术。结果表明, 分层注-分层抽开采方案的浸出液铀质量浓度上升速度最快, 浸出效果最好, 施工成本较低, 具有较好的推广应用前景。

**关键词:** 地浸采铀; 砂岩铀矿体; 多层矿; 开采方法; 分层开采

**中图分类号:** TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0042-07

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.05.05

中国砂岩型铀矿主要采用原地浸出工艺开采。在开采过程中, 经常遇到多层矿同时发育的情况, 对埋深较浅、呈单层发育矿体的地浸开采技术比较成熟<sup>[1-4]</sup>; 对埋藏较深、多层发育的复杂铀矿资源的开采技术还有待突破<sup>[5-8]</sup>。

目前, 对于多层矿床的开采方法主要有: 1) 在每层矿体均施工1组独立的钻孔, 该方法对埋藏较深的矿体而言, 可能开采不经济<sup>[9-11]</sup>; 2) 施工1组钻孔, 在多层矿体发育位置分别设置过滤器, 将多层矿视为1层矿进行开采, 该法易造成矿层与夹在矿层之间非矿层的水力连通, 使浸出液铀浓度变低, 浸出效果较差<sup>[12-13]</sup>。另外, 针对多层矿发育的铀矿开采技术多处于概念提出阶段, 缺乏一定的试验数据支撑<sup>[14]</sup>。

为提高多层矿开采的可行性和经济性, 设计了分层注-分层抽开采、分层注-混合抽开采、混合注-分层抽开采和混合注-混合抽开采试验方案, 并对各组试验的抽注液量、浸出情况及经济性进行评价, 旨在探寻一种有效的多层矿开采技术和工艺。

## 1 地质与水文概况

### 1.1 地质概况

试验矿床位于松辽盆地南部钱家店凹陷, 含矿地层为白垩系姚家组地层, 含矿地层具有可地浸砂岩型铀矿特征的泥-砂-泥结构。矿体主要为

四层含矿矿体, 砂体形态简单, 厚度及砂泥比相对稳定。各矿层之间以稳定泥岩隔水层为界, 含矿含水层岩性主要由河流相沉积的红色、灰色细砂岩及少量中粗、粗砂岩构成。

### 1.2 水文概况

姚家组含水层为施工区域内主要的含矿含水层, 该组地层在矿床内埋深一般为296~445 m, 厚度一般为210~240 m, 平均厚度为230 m。含矿含水层具有稳定的区域性隔水顶、底板; 含水层砂体以细碎屑岩为主, 地下水位埋深大, 具有较强承压性。含矿含水层与其他含水层无水力联系, 含水层厚度适中。

地下水类型主要有松散岩类孔隙水和碎屑岩类裂隙孔隙水, 水量丰富, 水质较好, 在矿床内稳定分布, 埋深大; 赋存的地下水为承压水, 水位埋深为2.18~5.87 m, 承压水头为285.82~313.82 m。涌水量为0.96~3.82 L/s, 水位降深为8.17~75.30 m, 单位涌水量为0.029~0.133 L/(s·m), 含矿含水层渗透系数为0.08~0.49 m/d。

## 2 试验方案

### 2.1 试验概况

内蒙古某地浸采铀矿山在开拓时, 部分钻孔同时揭露了YI和YII矿层, YI矿层埋深为400~420 m, YII矿层埋深为375~3900 m, 且部分单元2层矿

收稿日期: 2024-05-28

第一作者简介: 呼日乐(1989—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 学士, 工程师, 主要从事地浸采铀生产工作。

通信作者简介: 刘晓奎(1992—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 工程师, 主要从事地浸采铀生产工作。

体同时发育较好。为了探究多层矿开采的可行性、经济性及资源利用率,针对同时见矿较好的单元,进行开采方案研究。试验点选择见图 1。

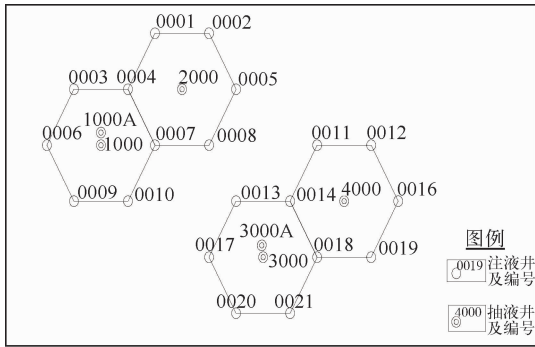


图 1 试验点选择分布图

Fig. 1 Distribution diagram of test point selection

### 2.2 试验方案设计

选择 Y I 和 Y II 矿层同时见矿较好的单元,开展分层注-分层抽开采、分层注-混合抽开采、混合注-分层抽开采和混合注-混合抽开采试验。

#### 2.2.1 分层注-分层抽开采

选择 1000 单元开展分层注-分层抽开采试验。该方案通过施工一组注液井,对上下 2 个矿层同时建造过滤器,利用封隔器将上部矿层和下部矿层隔离,下部矿层通过与封隔器连接的注液管道实现注液,上部矿体在距孔口 150 m 处直接进行注液;抽液系统通过施工 1000 和 1000 A 不在同一层位的 2 个抽液井进行抽液,1000 抽液井在 Y I 矿层建造过滤器,1000A 抽液井在 Y II 矿层建造过滤器。实施方案见图 2。

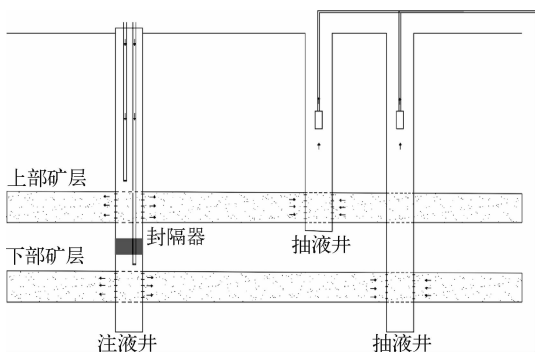


图 2 分层注-分层抽开采方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layered injection and layered extraction method

#### 2.2.2 分层注-混合抽开采

选择 2000 单元开展分层注-混合抽开采试验。该方案的注液井采用分层注-分层抽开采方案单组井分层注液方式,抽液井对 2 个矿层同时建造过滤器,采用潜水泵进行混抽。实施方案见图 3。

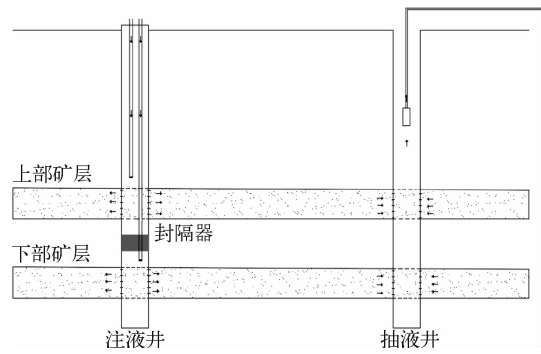


图 3 分层注-混合抽开采方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layered injection and mixed extraction method

#### 2.2.3 混合注-分层抽开采

选择 3000 单元开展混合注-分层抽开采试验。该方案的注液井对 2 个矿层同时建造过滤器,注液管下放至 2 个矿层中间,同时向 2 个矿层注液;施工 3000 和 3000A 抽液井,对不同矿层分别抽液,其中 3000 抽液井在 YI 矿层建造过滤器,3000A 抽液井在 YII 矿层建造过滤器。实施方案见图 4。

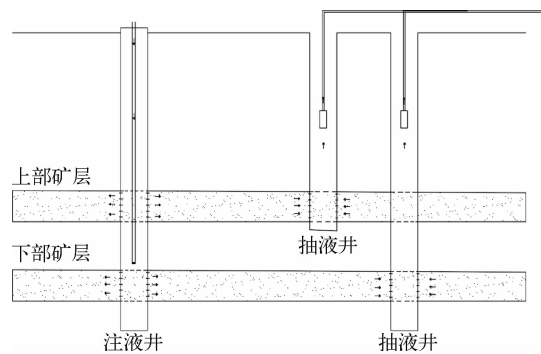


图 4 混合注-分层抽开采方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mixed injection and layered extraction method

#### 2.2.4 混合注-混合抽开采

选择 4000 单元开展混合注-混合抽开采试验。该方案施工一组抽注液系统,注液井同时为

2个矿层注液,注液管下放至2个矿层中间;抽液井采用混合抽液方式抽液,实施方案见图5。

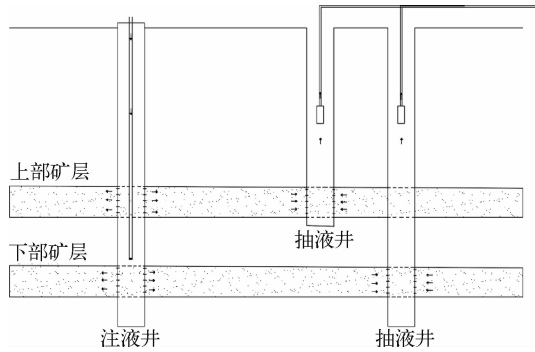


图5 混合注-混合开采方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mixed and injection mixed mining method

## 2.3 关键技术实施

### 2.3.1 多层矿过滤器建造

本试验采用水力喷砂割缝式钻孔结构(图6),其过滤器建造方式是将水力喷砂设备下放到套管设计位置,对矿层段套管进行切割施工,并打通套管内外部含矿含水层的联系;该技术为多层矿开采建造过滤器提供了方便。

### 2.3.2 注入井分层注水技术

制作了适用于地浸采铀矿山双层矿开采的专用封隔器(图7)。该专用封隔器由L型卡扣、封隔管件、中心管、膨胀橡胶、橡胶外套、单向阀等组成。封隔器上

端为提升管(设置了L型卡扣),中间为中心管,中心管外部有3段膨胀橡胶,用于将封隔器固定在目标位置,膨胀橡胶具有遇水膨胀的特性。封隔器下端为封隔管件,封隔管件由衬管、橡胶环和单向阀组成;注液管与内衬管密封连接,内衬管上加工3个直径6mm的圆孔,用于与橡胶外套之间的环形空间连通。液体进入内衬管,先充填环形空间使橡胶外套膨胀,起到固定作用;当液体压力达到0.8MPa时,底部单向阀打开,达到分层精准加注的目的。

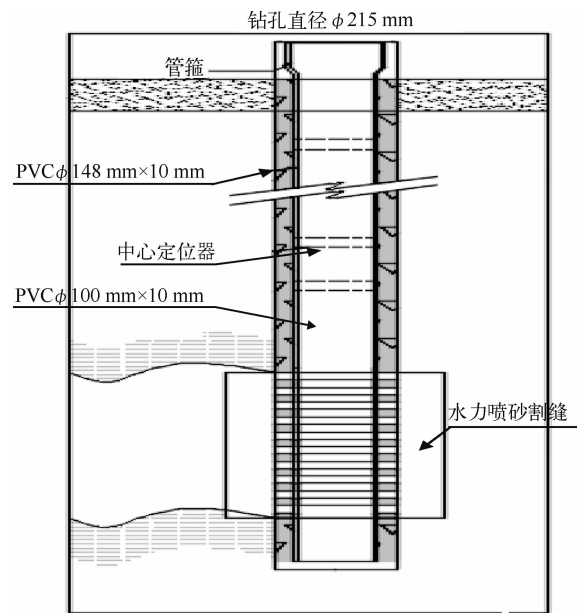


图6 水力喷砂割缝式钻孔结构

Fig. 6 Hydraulic sand blasting slotted drilling structure

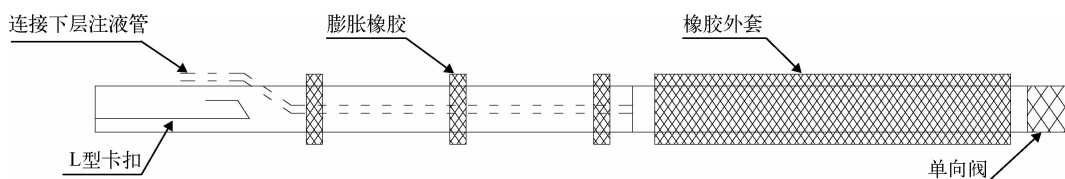


图7 封隔器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of packer

### 2.3.3 井口密封装置改造

在分层注-分层抽、分层注-混合抽开采时,注液合用井需要下2根注液管,分别连通上下层过滤器进行注液,故需要根据现场压力、水量需求,改造注液井口密封装置(图8)。而普通井口密封装置只容纳1根注液管内管,本研究在不改变软连

接和井内管直径的情况下,调整尼龙棒结构,使其可同时安装2根注液管内管。现场试验表明,改造后的密封装置可实现对上下矿层的同时注液。

## 2.4 试验单元见矿情况

开拓完成后,对单元的见矿参数进行了计算,结果见表1。

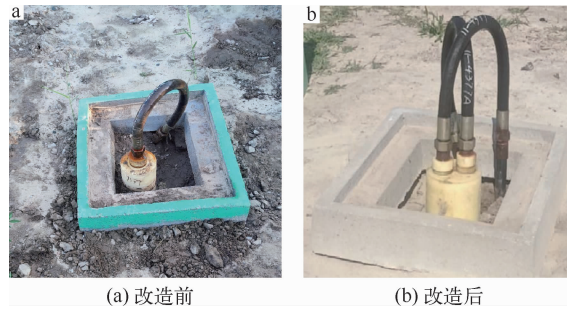


图 8 井口密封装置改造前后实物图

Fig. 8 Physical picture of wellhead sealing device before and after renovation

表 1 试验单元见矿参数

Table 1 Experimental unit mining parameters

单元	Y I 矿层			Y II 矿层		
	品位/%	厚度/m	平均平米铀量/(kg/m <sup>2</sup> )	品位/%	厚度/m	平均平米铀量/(kg/m <sup>2</sup> )
1000	0.030 0	3.0	1.92	0.030 6	4.2	2.74
2000	0.017 2	3.5	1.28	0.038 2	3.6	2.93
3000	0.020 2	2.6	1.12	0.039 9	4.8	4.08
4000	0.031 6	2.3	1.55	0.026 5	2.6	1.47

### 3 试验效果分析

#### 3.1 抽注液情况

在地浸采铀矿山中,钻孔抽注液量直接影响金属浸出速度,是评价运行效果的重要指标。对 4 种开采方法的平均瞬时抽注液量的统计(表 2)表明,分层注-混合抽开采方法的瞬时抽液量最大,混合

注-混合抽开采方法的瞬时抽液量最小,混合注-分层抽开采方法的瞬时注液量最大,分层注-混合抽开采方法的瞬时注液量最低;单孔分层注液方法累计瞬时注液量高于混合注液方法累计瞬时注液量。可见,分层注液效果优于混合注液;不同矿层的瞬时注液量相差不大,浸出剂可被均匀地注入矿层。试验表明,单孔分层注液方式的可行性好。

表 2 4 种开采方法的抽注液情况对比

Table 2 Comparison of pumping flow rate of 4 mining methods

开采方法	单元	泵频率/Hz	瞬时抽液量/(m <sup>3</sup> /h)	瞬时注液量/(m <sup>3</sup> /h)	矿层
分层注-分层抽	1000	30	5.45	4.96	Y I
	1000A	30	5.75	5.20	Y II
分层注-混合抽	2000	30	7.92	4.68	Y I
				4.50	Y II
混合注-分层抽	3000	30	5.22	6.89	Y I
	3000A	30	5.32		Y II
混合注-混合抽	4000	30	5.03	4.89	Y I 和 Y II

注:瞬时注液量为单元注液井累计瞬时流量,注液压力均为 1.7 MPa。

### 3.2 金属浸出情况

为了分析对比不同开采方式的金属浸出情况,对投入运行前6个月的浸出液铀浓度变化情况和浸出率进行了统计,结果见图9~图10。可以看出,采用分层注-分层抽开采方法的浸出效果最好,其中1000A抽液井的浸出液铀浓度上升最快,运行15天浸出液铀质量浓度已达峰值(48.5 mg/L),然后逐渐稳定在20 mg/L左右,半年铀浸出率达12.5%;1000抽液井在运行3个月后浸出液铀质量浓度达到峰值(30.1 mg/L),然后逐渐稳定在18 mg/L,半年铀浸出率达9.6%。采用混合注-混合抽的开采方式的浸出效果最差,投入运行前6个月浸出液铀质量浓度一直维持在3 mg/L以下,累计浸出率只有1.2%。

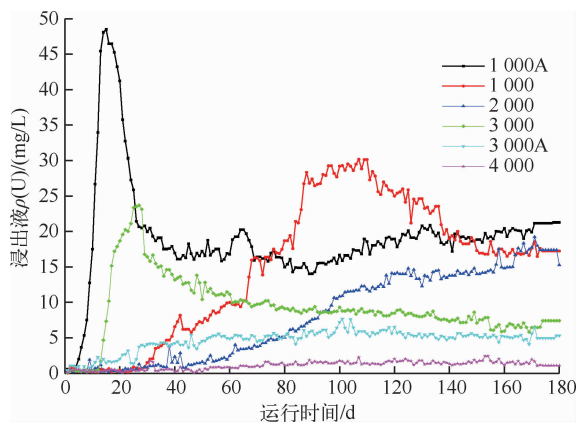


图9 投入运行前6个月的浸出液铀浓度变化情况  
Fig. 9 Uranium concentration in leachate during the first 6 months of operation

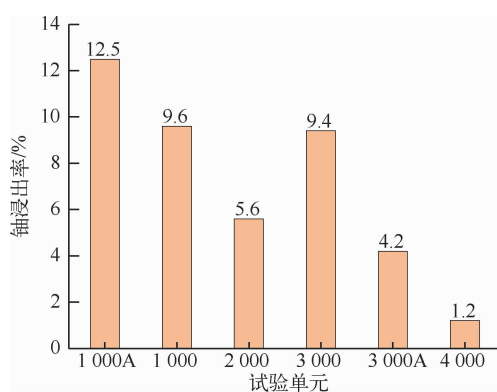


图10 投入运行前6个月的铀浸出率  
Fig. 10 Uranium leaching rate for the first 6 months of operation

综上所述,分层注-分层抽开采方法的浸出效果最好,分层注-混合抽和混合注-分层抽开采方法的浸出效果次之,而采用混合注-混合抽的开采方法的浸出效果最差。

### 3.3 不同开采方法优缺点

分层注-分层抽开采方法需施工1组注液井,2组独立的抽液井;与常规单层开采方式相比,可节约一半的注液井施工成本。但由于需对注液井使用封隔器将2层矿体封隔,分层注-分层抽开采方法存在需要特制封隔器和井口装置改造等问题。

分层注-混合抽开采方法适合于所有的井型井距排列方式,可以节约50%的抽、注液井施工成本,且达到分层注液的目的;对不同渗透性的矿层可以采用不同或相同的浸出工艺进行浸出。但如果矿层渗透性相差很大,则会产生“优势流”现象,即渗透性好的矿层抽液量大,渗透性差的矿层抽液量少;当2层矿体之间间隔超过6m时,即便渗透性一致,也会产生“优势流”现象<sup>[15]</sup>。此外,在浸出后期,存在单层矿体的浸出液铀浓度难以区分等问题。

混合注-分层抽开采方法与分层注-分层抽开采方法相比,不存在需要特制封隔器和井口装置改造等问题,施工方便;但由于采用混合注液方式,存在从不同矿层注入浸出剂困难问题。

混合注-混合抽开采方法的施工成本最低,但由于采用单井同时注液和抽液开采方式,难以对不同矿层精准控制抽注液,存在资源浪费问题。

## 4 结论

1)单井分层注液方式累计注液瞬时流量高于混合注液方式,并且不同矿层的瞬时注液量相差不大,单井分层注液方式的可行性好。

2)分层注-分层抽开采方法的浸出效果最好。该法提高了资源利用率,其成本又低于传统分层开采施工成本,可应用于地浸采铀矿山多层矿的开采中,具有较好的推广应用前景。

### 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):113-117.  
QUE Weimin, WANG Haifeng, TIAN Shifeng, et al. Research status and development of in-situ leac-

- hing uranium techniques in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3): 113-117 (in Chinese).
- [2] 陶峰,张传飞,冯国平,等. 某砂岩型铀矿 CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> 地浸采铀试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(6): 56-61.  
TAO Feng, ZHANG Chuanfei, FENG Guoping, et al. CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> in-situ leaching of uranium from a sandstone type uranium deposit [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2022(6): 56-61 (in Chinese).
- [3] 李立尧,夏菲,惠浩浩,等. 砂岩型铀矿地浸开发的地质保障:含矿含水层微观非均质性研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(5): 121-128.  
LI Liyao, XIA Fei, HUI Haohao, et al. Geological guarantee for in-situ leaching development of sandstone-type uranium: Study on microscopic heterogeneity of ore-bearing aquifer [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(5): 121-128 (in Chinese).
- [4] 孙占学, FIAZ ASGHAR, 赵凯, 等. 中国铀矿采冶回顾与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 1-8.  
SUN Zhanxue, ASGHAR Fiaz, ZHAO Kai, et al. Review and prospect of uranium mining and metallurgy in China [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 1-8 (in Chinese).
- [5] 荣辉,焦养泉,吴立群,等. 松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2016, 41(1): 153-166.  
RONG Hui, JIAO Yangquan, WU Liqun, et al. Epigenetic alteration and its constraints on uranium mineralization from the Qianjiadian uranium deposit, Southern Songliao Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2016, 41(1): 153-166 (in Chinese).
- [6] 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 (in Chinese).
- [7] 封志兵,聂逢君,夏菲,等. 砂岩型铀矿的矿体形态特征及其成因探讨[J]. 铀矿地质, 2021, 37(6): 981-990.  
FENG Zhibing, NIE Fengjun, XIA Fei, et al. Discussion on the shapes and their genesis of ore body in sandstone type uranium deposits [J]. Uranium Geology, 2021, 37(6): 981-990 (in Chinese).
- [8] 武伟,蒋小辉. 松软砂岩型铀矿床的地浸开采技术[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 324-327+361.  
WU Wei, JIANG Xiaohui. The technology of in-situ leaching uranium mining in soft sandstone-type deposit [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 324-327+361 (in Chinese).
- [9] 程光华,孙刚友,王合祥. 缓薄多层铀矿体开采协同度分析[J]. 铀矿冶, 2020, 39(1): 1-5.  
CHENG Guanghua, SUN Gangyou, WANG Hexiang. Analysis of synergy degree for mining of the flat and thinner multi-layer uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(1): 1-5 (in Chinese).
- [10] 闫纪帆,任锦荣,原渊,等. 某多层砂岩型铀矿床地浸开采工艺研究[J]. 铀矿冶, 2019, 38(4): 254-258.  
YAN Jifan, REN Jinrong, YUAN Yuan, et al. Research on the technology of in-situ leaching of a sandstone uranium ore body with multilayer deposits [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(4): 254-258 (in Chinese).
- [11] 姜岩,胡柏石,谭亚辉,等. 地浸开采多层矿体的钻孔过滤器建造工艺[J]. 铀矿冶, 2014, 33(4): 185-191.  
JIANG Yan, HU Boshi, TAN Yahui, et al. Filter construction technology in mining drilling hole for in-situ leaching of multilayer deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(4): 185-191 (in Chinese).
- [12] 王海峰,张斌,利广杰. 重叠矿体地浸开采方法探索[J]. 铀矿冶, 2011, 30(4): 169-174.  
WANG Haifeng, ZHANG Bin, LI Guangjie, et al. Discussion on in-situ leach mining of multi-layer deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2011, 30(4): 169-174 (in Chinese).
- [13] 陈军利,孙刚友,倪玉辉. 某特大型铀矿床三维立体分区方案研究[J]. 铀矿冶, 2021, 40(1): 1-5.  
CHEN Junli, SUN Gangyou, NI Yuhui. Three dimensional partition scheme of a super large uranium deposit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(1): 1-5 (in Chinese).
- [14] 黎广荣,周义朋,赵凯,等. 砂岩型铀矿浸出矿物工艺学研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 9-19.  
LI Guangrong, ZHOU Yipeng, ZHAO Kai, et al. Research progress on mineral leaching technology of sandstone type uranium deposits [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(8): 9-19 (in Chinese).

- [15] 杨立志,常京涛,李晓剑,等. 分层填砾钻孔结构在多层砂岩铀矿床地浸采铀中的应用[J]. 铀矿冶, 2014, 33(3):121-125+129.  
 YANG Lizhi, CHANG Jingtao, LI Xiaojian, et al. Application of layered gravel-filling hole structure for in-situ leaching of multilayer sandstone uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(3):121-125+129(in Chinese).

### Study on the Mining Method of Multi-layer Ore for an In-situ Leaching Uranium Mine

HU Rile, LIU Xiaokui, ZHANG Bo, CAO Junpeng, LI Nan, TIAN Zhiyu

(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** For a multi-layer sandstone-type uranium ore in an in-situ leaching uranium mine in Inner Mongolia, four experimental methods of layered injection and layered extraction, layered injection and mixed extraction, mixed injection and layered extraction, mixed injection and mixed extraction were designed. The amount of injected liquid, leaching situation, advantages and disadvantages of each schemes were analyzed. The feasibility of single well layered injection was explored, and the key technology of single well layered extraction was solved. The results show that the layered injection and layered extraction method has the fastest increase in uranium concentration of the leachate, the best leaching effect, and lower construction cost, which has good application and promotion prospects.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; sandstone-type uranium deposit; multi-layer ore; mining method; layered mining

(Continued from page 41)

### Leaching Method for Difficultly Leaching Resources in a Acid Leaching Uranium Mine

WANG Ruyi, GUI Zengjie, YANG Yihan, REN Xiaoyu, HAN Junning

(Inner Mongolia Mining Co., Ltd., CNNC, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** The in-situ leaching of uranium is influenced by deposit conditions, leaching environments, and various other factors, resulting in a low utilization rate for certain resources. To facilitate the rational development of these resources, a device for preparing leaching agents was designed to enhance the leaching process by increasing the concentration of sulfuric acid in areas where the resources is difficult to leach. The results show that the relative deviation in concentration remains below 1.5%, allowing for precise and stable preparation of acid either regionally or at individual boreholes. By using a 15~20 g/L sulfuric acid solution as a leaching agent, the unit uranium leaching rate of the refractory leaching uranium resources can be increased from 24.8% to 53.7%. The amount of sulfuric acid used and the increase in residual acid are only 11.1% of those used for strengthening leaching results in the entire mining area. This device achieves the leaching of the refractory leaching uranium resources with low consumption of sulfuric acid and has little impact on subsequent hydrometallurgical processes.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; local intensification; preparation of leaching agent; enhancing the leaching