

某地浸采铀矿山钻孔过滤器长度与浸出参数的关系

赵生祥, 闫纪帆, 口文杰, 舒倪楚庭

(中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 聚焦钱家店铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺, 深入探究过滤器长度与浸采率、抽液量之间的关系。基于实际运行数据进行分析, 得出过滤器长度与抽液量呈强正相关, 在过滤器长度为 7~11 m 时, 随过滤器长度增加, 抽液量增长显著(平均增长率 5.2%/m); 在过滤器长度为 12~18 m 时, 随过滤器长度增加, 抽液量增长放缓(平均增长率 1.3%/m)。过滤器长度与浸采率呈强负相关, 在过滤器长度为 7~11 m 时, 随过滤器长度增加, 浸采率下降平缓(平均降幅 0.75%/m); 在过滤器长度为 12~14 m 时, 随过滤器长度增加, 浸采率降幅增大(平均降幅 2.0%/m); 在过滤器长度为 15~18 m 时, 随过滤器长度增加, 浸采率大幅下降(平均降幅 3.67%/m)。根据研究结果, 建议在钱家店铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺中, 过滤器长度宜优先采用 7~9 m 的最优区间; 对于矿体厚度较大的矿段, 可在 16 m 范围内适当调整, 但不应超过 16 m。

关键词: 钱家店铀矿床; “ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”; 地浸采铀; 过滤器长度; 浸采率; 抽液量

中图分类号: TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0076-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.08.09

钱家店铀矿床采用“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺进行开采^[1-4]。过滤器是该工艺的关键部件之一, 其长度对浸采过程中的抽液量和浸采率具有重要影响^[5-7]。研究者通过数值模拟方法建立地浸采铀过程的数学模型, 分析不同过滤器长度下浸出剂在矿体中的运移规律及其对浸采率的影响^[8-10]。研究发现, 随着过滤器长度的增加, 浸出剂的影响范围会扩大, 但浓度梯度降低; 过滤器长度的增加会改变浸出剂的分布范围和浓度梯度, 从而影响铀的浸出效果。但数值模拟结果可能与实际生产情况存在一定差异, 需要进一步结合现场试验数据进行验证。

部分矿山通过在不同井组设置不同长度的过滤器, 监测运行水量和浸采率的变化, 进而研究过滤器长度对浸出的影响^[11-12]。研究发现, 随着过滤器长度的增加, 运行水量增加; 但达到一定值时, 运行水量不再增加, 且浸采率并非随着过滤器长度的增加一直增加。由于不同矿山的地质条件和开采工艺存在差异, 目前尚未形成统一的关于过滤器长度与浸采率、运行水量关系的定量认识。

适宜的过滤器长度能够优化浸出剂的分布,

提高铀的浸出效率, 降低生产成本。然而, 现有研究多聚焦于单一因素影响分析, 缺乏结合具体矿床地质水文条件的系统研究, 且数值模拟结果与现场生产数据的匹配度有待提升。因此, 笔者深入探究特定矿床条件下过滤器长度与浸采率、运行水量的关系, 以期为优化地浸采铀工艺参数、提高资源利用率提供指导。

1 钱家店某地浸采铀矿山现状

钱家店某地浸采铀矿山为中国第一座“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀矿山, 采用填砾式结构钻孔^[13-15], 井型为七点型, 井距 30 m。抽出井采用 148 mm 大孔径钻孔, 注入井采用 100 mm 小孔径钻孔, 采用加压下注方式注入浸出剂, 注入井注液压力 1.6 MPa; 通过潜水泵提升浸出液, 潜水泵下放深度 150 m。

在设置生产井过滤器长度时, 需考虑矿层厚度及运行水量, 当矿体厚度大于 7 m 时, 过滤器长度与矿层厚度相同; 当矿层厚度小于 7 m 时, 为避免运行水量过低对浸出造成影响, 过滤器长度按 7 m 设置。该地浸采铀矿山一期项目建设采区已达到设计服务年限, 整体浸采率在 80% 以

上;目前已进入浸采末期,浸出液铀质量浓度小于5 mg/L。

1.1 地质概况

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的泥-砂-泥结构。矿体主要为四层含矿矿体,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,主矿体为Ⅱ号矿体,呈条带状、方块状分布,矿体厚度 1.80~18.80 m,平均厚度为 5.07 m^[16-17]。

1.2 水文地质条件

姚家组含水层区域内主要的含矿含水层地下水成分较简单,以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{·Cl-Na}$ 型水为主,矿化度一般为 3.1~4.3 g/L; $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 一般为 2 000~2 400 mg/L,最低为 1 118 mg/L,最高达 2 522 mg/L;水温为 15~16 °C;pH 为 7.20~8.41,属近中性和弱碱性; Eh 为 100~200 mV,属弱氧化还原环境。

岩性为浅灰色、灰白色细砂岩、粉细砂岩、中细粒砂岩,厚度一般为 18.6~38.0 m,个别地段厚度大于 40 m;含水层较稳定,隔水顶底板为泥岩,隔水顶板厚度为 4~12 m,隔水底板厚度为 0.5~2 m。地下水富水性为中-弱,涌水量为 27.20~108.86 m³/d,单位涌水量 0.01~0.036 L/(s·m),渗透系数为 0.025~0.223 m/d^[18-20]。

2 数据来源与研究方法

为精准探究过滤器长度与浸采率、抽液量的定量关系,以钱家店地浸采铀矿山姚家组Ⅱ号矿体为研究对象,选取已进入浸采末期(浸出液铀质量浓度<5 mg/L)的生产采区作为试验场地。选取过滤器长度分别为 7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18 m 的浸采单元作为研究样本,共 179 组(图 1、表 1)。该部分采区的地质条件、水文条件、矿体特征及钻孔结构参数高度一致,有效排除了其他因素对试验结果的干扰。每个浸采单元包含 1 个抽出井和 6 个注入井(七点型井网),井距均为 30 m。在运行过程中,保持注液压力、浸出剂浓度、抽液速率等工艺参数稳定,连续监测,每日记录各浸采单元的抽液量与浸采率数据,取设计服务年限(7.5 年)时的抽液量平均值及浸采率数据累计值用于进一步分析。

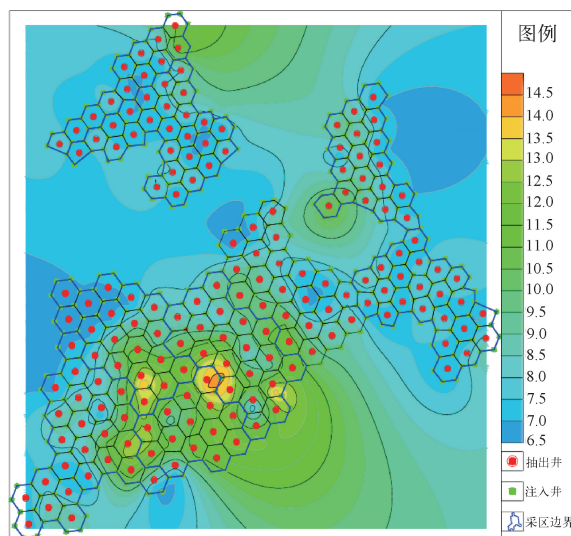


图 1 浸采单元与矿层厚度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the in-situ leaching unit and ore layer thickness

表 1 不同过滤器长度样本数量统计

Table 1 Statistics on samples for different filter lengths

过滤器长度/m	浸采单元数量/个	浸采率/%	抽液量/(m ³ /h)
7	58	94	4.26
8	43	93	4.50
9	30	93	4.77
10	11	92	4.96
11	14	91	5.23
12	14	89	5.36
13	5	85	5.41
14	4	83	5.45

3 过滤器长度与浸出参数的关系

3.1 过滤器长度相同时浸采率与抽液量关系

表 1 中的浸采率和抽液量为过滤器长度相同单元对应数据的平均值。在过滤器长度相同情况下,由于各单元地质条件、施工条件的差异性,浸采率、抽液量也存在一定差异性。以过滤器长度 7 m 为例,过滤器长度 7 m 的抽出井有 58 个,运行水量在 3~6 m³/h,浸采率在 70%~100%,整体表现为浸采率与抽液量呈正相关(图 2)。

3.2 过滤器长度与抽液量关系

过滤器长度与抽液量的关系见图 3。

3.2.1 数据趋势分析

根据表 1、图 3 可以看出,过滤器长度与抽液

量呈明显的正相关趋势,即随着过滤器长度的增加,抽液量总体呈现上升态势。通过计算相邻长度下的水量增长率,可将其划分为2个阶段。第Ⅰ阶段(7~11 m),抽液量的增长较为显著。过滤器长度从7 m增加到11 m,水量从4.26 m³/d增至5.23 m³/d,水量增长率在4.7%/m~5.8%/m;该阶段水量快速增长的主要原因是,过滤器长度的增加使得浸出剂与矿体的接触面积显著扩大,且过滤器长度仍小于过滤器的有效长度。第Ⅱ阶段(12~18 m),抽液量增长速度明显放缓。过滤器长度从12 m增至18 m,水量从5.36 m³/d增至5.83 m³/d,水量增长率降至0.7%/m~4.1%/m。这一现象的主要原因是随着过滤器长度的进一步增加,浸出剂在矿体中的流动路径延长,摩擦阻力增大;由于动水位稳定,新增过滤器长度对应的抽液量大幅减少,导致水量增长放缓。

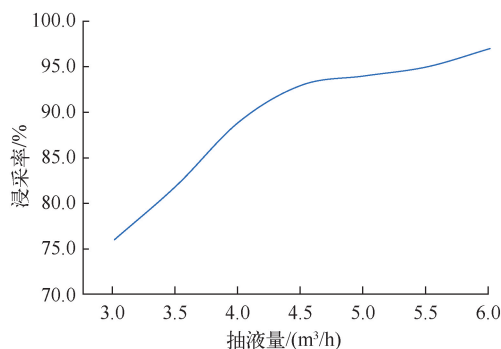


图2 浸采率与抽液量关系(过滤器长度7 m)

Fig. 2 Relationship between leaching rate and liquid extraction volume(Filtration length is 7 m)

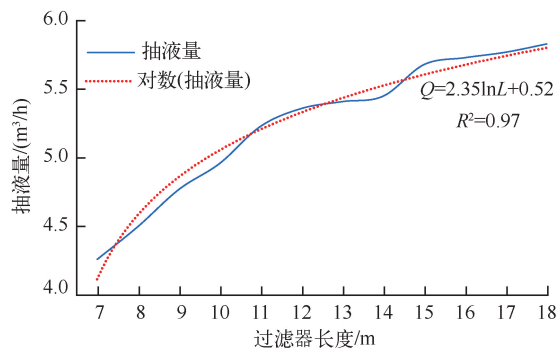


图3 过滤器长度与抽液量的关系

Fig. 3 Relationship between filter length and operating water volume

3.2.2 曲线特征分析

过滤器长度与抽液量的关系曲线呈现“先快后慢”的增长特征,整体近似于对数增长曲线。通过 Origin 曲线拟合,得到两者的关系方程

$$Q=2.35\ln L+0.52,$$

式中:Q为抽液量;L为过滤器长度。拟合优度 $R^2=0.97$,表明该方程能够较好地描述两者之间的关系。

从曲线斜率变化来看,第Ⅰ阶段(7~11 m)曲线斜率较大(0.22~0.25),说明抽液量对过滤器长度变化较为敏感;第Ⅱ阶段(12~18 m)曲线斜率较小(0.05~0.09),敏感性显著降低。这一特征为过滤器长度优化设计提供了关键依据:在第Ⅰ阶段增加过滤器长度可有效提升水量,而第Ⅱ阶段增加过滤器长度的性价比显著下降。

3.3 过滤器长度与浸采率的关系

通过监测获取的过滤器长度与浸采率数据见图4。

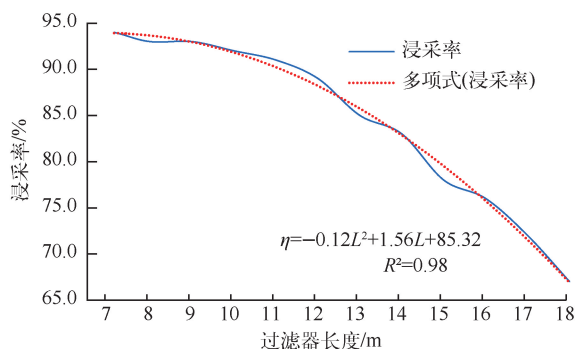


图4 过滤器长度与浸采率关系

Fig. 4 Relationship between filter length and leaching rate

3.3.1 数据趋势分析

从图4可看出,随过滤器长度增加,浸采率呈现明显下降趋势。结合数据变化速率,可将其划分为3个阶段。第Ⅰ阶段为7~11 m,浸采率下降较平缓。过滤器长度从7 m增至11 m,浸采率从94%降至91%,平均降幅0.75%/m。该阶段浸采率下降平缓的原因是:过滤器长度仍处于合理区间,浸出剂注入点相对集中,能在矿体核心区域形成较高浓度,与铀矿物反应充分,因此浸采率保持在较高水平且下降幅度较小。第Ⅱ阶段为12~14 m,浸采率下降速度加快。长度从12 m增至14 m,浸采率从89%降至83%,平均降幅2%/m。

这一现象的主要原因在于,过滤器长度增加导致沿长度方向的进水量分布不均,对比过滤器长度7 m与14 m,长度增加一倍,进水量增加 $1.19 \text{ m}^3/\text{h}$,过滤器上端进水量占比约78%,下端进水仅占22%,上下端矿体区域浸出剂供应不足,铀矿物溶解不完全,进而导致浸采率加速下降。第Ⅲ阶段为15~18 m,浸采率呈现快速下降趋势。长度从15 m增至18 m,浸采率从78%降至67%,平均降幅3.67%/m。这一阶段,随着过滤器长度增加,过滤器下端进水量进一步减少并逐步趋近于零,造成该部分铀矿物无法有效浸出。

3.3.2 曲线特征分析

图4中过滤器长度与浸采率的关系曲线呈现“阶梯式下降”特征,整体符合二次函数下降趋势。通过曲线拟合,得到关系方程为

$$\eta = -0.12L^2 + 1.56L + 85.32,$$

式中: η 为浸采率; L 为过滤器长度;拟合优度 $R^2 = 0.98$,拟合效果较好。

从曲线斜率变化来看,7~11 m段曲线斜率绝对值较小(0.75~1.0),浸采率对过滤器长度变化不敏感;12~14 m段斜率绝对值增大(2.0~4.0),敏感性显著提升;15~18 m段斜率绝对值进一步增大(3.0~5.0),敏感性达到最高。这一特征表明:过长的过滤器长度会显著破坏浸出剂的均匀分布,导致浸采效果大幅下降,因此需严格控制过滤器长度的上限。

3.3.3 影响机制分析

浸采率随过滤器长度增加而下降的主要机制包括:1)浸出剂分布分散。过滤器长度较短时,浸出剂注入点相对集中,能够在矿体核心区域形成较高浓度,与铀矿物充分反应。随着长度增加,浸出剂在矿体中扩散范围扩大,浓度梯度降低,部分区域浸出剂浓度不足,导致铀矿物溶解不完全。2)压力损失增大。过滤器长度增加使浸出剂在矿体中的流动路径延长,摩擦阻力增大,注入压力损失增加。当压力损失超过设备额定压力后,浸出剂注入量不足,抽液效率下降,进而影响浸采率。

3.4 过滤器长度与浸采率、水量的综合关系

抽液量与过滤器长度呈正相关(图3),而浸采率与过滤器长度呈负相关(图4),三者之间存在明显的关联性。过滤器长度与抽液量的相关系数为0.97,呈强正相关;过滤器长度与浸采率的相关系数为-0.96,呈强负相关。即:抽液量增长

与浸采率下降存在“此消彼长”效应。在7~11 m区间水量快速增长的同时,浸采率仅平缓下降;12~14 m区间水量增长放缓,浸采率加速下降,效益平衡点出现偏移;15~18 m区间水量增长趋近饱和,浸采率急剧下降。这一特征表明:在优化过滤器长度时,需兼顾水量与浸采率提升,实现水量-浸采率协同最优。

4 结论和建议

4.1 结论

1)在钱家店铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺中,过滤器长度与抽液量呈强正相关(相关系数0.97)。随过滤器长度增加,水量呈现“先快速增长后缓慢上升”的特征,7~11 m区间增长显著(平均增长率5.2%/m),12~18 m区间增长放缓(平均增长率1.3%/m)。随着过滤器长度增加,过滤器在长度方向上进水量由上往下逐渐减少。

2)过滤器长度与浸采率呈强负相关(相关系数-0.96),随过滤器长度增加浸采率呈“阶梯式下降”。7~11 m区间下降平缓(平均降幅0.75%/m),12~14 m区间降幅加快(平均降幅2%/m),15~18 m区间大幅下降(平均降幅3.67%/m)。随着过滤器长度增加,底部矿体浸出效果逐渐下降。

3)基于研究结果,钱家店铀矿床“ $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ”地浸采铀工艺中过滤器长度优先采用7~9 m的最优区间。对于矿体厚度较大的矿段,可在16 m范围内适当调整,但不应超过16 m,以避免浸采率大幅下降。对于矿层厚度超过16 m的区域,建议分层开采,保证资源的有效利用。

4.2 建议

1)针对已有生产井,建议强化生产过程管控,根据不同过滤器长度区间优化运行参数,对12~18 m区间现有井组,可采取分段注液、优化浸出剂浓度、增加提高注液压力等措施弥补浸采率相对较低的问题。

2)进一步开展不同长度过滤器与矿体厚度匹配性试验,结合数值模拟与现场试验,建立更精准的过滤器长度优化模型,为类似砂岩型铀矿床地浸工艺设计提供参考。

参考文献:

[1] 苏学斌,王海峰.钱家店矿床原地浸出采铀工程与

- 实践[M].北京:中国原子能出版社,2017:4-10.
- [2] 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 leaching uranium techniques in China[J]. 2005, 24(3): 113-117.
- [3] 王海峰,谭亚辉,杜运斌,等.原地浸出采铀井场工艺[M].北京:冶金工业出版社,2002:67-80.
- [4] 苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].中国矿业,2012,21(9):79-83.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83.
- [5] 周义朋,黎广荣,徐玲玲,等.地浸采铀钻孔过滤器对溶液渗流影响的数值模拟[J].东华理工大学学报(自然科学版),2018,41(4):301-306.
ZHOU Yipeng, LI Guangrong, XU Lingling, et al. Numerical simulation of influence of drilling filter on solution seepage during in-situ leaching of uranium [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(4): 301-306.
- [6] 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:铀矿地质.西安:[出版者不详],2023:210-218.
- [7] 刘江.地浸采铀中有效厚度的计算[J].怀化学院学报,2006,25(5):190-192.
LIU Jiang. A calculating method of effective thickness in in-situ leaching of uranium [J]. Journal of Huaihua University. 2006, 25(5): 190-192.
- [8] 王艺,杨敬,王如意,等.纳岭沟矿床地浸采铀钻孔过滤器优化设计探究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2022,45(2):147-153.
WANG Yi, YANG Jin, WANG Ruyi. Optimization design of borehole filter for in-situ leaching uranium in Nalinggou deposit[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2022, 45(2): 147-153.
- [9] 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.
XIE Tingting, YAO Yixuan, GAN Nan, et al. Analysis and application of seepage-dispersion field characteristics in-situ leaching uranium (To be continued)[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(3): 149-158.
- [10] 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(续完)[J].铀矿冶,2016,35(4):229-239.
XIE Tingting, YAO Yixuan, GAN Nan, et al. Analysis and application of seepage-dispersion field characteristics in-situ leaching uranium (Completed)[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(4): 229-239.
- [11] 周先智,王双春,杨绍勇.过滤器有效长度的研究[J].四川建筑,2012,32(4):161-164.
- [12] 刘海冲.关于过滤器有效长度问题的讨论[J].水文地质工程地质,1983,(01):35-41.
- [13] 姚益轩,王亚安,胥国龙,等.地浸采铀钻孔过滤器建造与过滤机理研究[J].铀矿冶,2023,42(3):17-23.
YAO Yixuan; WANG Yaan; XU Guolong, et al. Study on construction and filtration mechanism of borehole filter for in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3): 17-23.
- [14] 王海峰,李建东,刘正邦,等.中国地浸采铀钻孔施工与成井技术研究进展[J].铀矿冶,2022,41(3):195-201.
WANG Haifeng; LI Jiandong; LIU Zhengbang, et al. Research progress of borehole drilling and well completion technology for in-situ leaching uranium in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3): 195-201.
- [15] 王晓斌,崔裕禄,王旨儒,等.不同结构地浸钻孔在新疆铀矿山的应用及运行效果评价[J].铀矿冶,2024,43(3):9-16.
WANG Xiaobin; CUI Yulu; WANG Zhiru, et al. Application and operation effect of in-situ leaching boreholes with different structure in Xinjiang uranium mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 9-16.
- [16] 张明瑜,郑纪伟,田时丰,等.开鲁拗陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究[J].铀矿地质,2005,21(4):213-218.
ZHANG Mingyu, ZHENG Jiwei, TIAN Shifeng, et al. Research on existing state of uranium and uranium ore-formation age at Qianjiadian uranium deposit in Kailu Depression [J]. Uranium Geology, 2005, 21(4): 213-218.
- [17] 庞雅庆,陈晓林,方锡珩,等.松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化与铀成矿作用[J].铀矿地质,2010,26

- (1):9-16.
PANG Yaqing, CHEN Xiaolin, FANG Xiheng, et al, Discussion on the interlayer oxidation and uranium metallogenesis in Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin[J]. Uranium Geology. 2010, 26(1):9-16.
- [18] 黄少华, 秦明宽, 刘章月, 等. 松辽盆地西南部钱家店矿田板状铀矿体成矿条件、特征及模式[J]. 铀矿地质, 2022, 38(3):409-424.
HUANG Shaohua, QIN Mingkuan, LIU Zhan-gyue, et al. Metallogenic conditions, characteristics and model of tabular uranium orebody in Qianjiadian ore field, southwest Songliao Basin[J]. Uranium Geology, 2022, 38(3):409-424.
- [19] 禹宝利, 张振强. 松辽盆地南部钱家店凹陷姚家组含水层水成铀矿作用分析[J]. 铀矿冶, 2022, 41(4):346-351.
YU Baoli, ZHANG Zhenqiang. Analysis on hydro-genic uranium mineralization of Yaojia Formation aquifer in Qianjiadian Depression of south Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):346-351.
- [20] 夏毓亮, 郑纪伟, 李子颖, 等. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1):154-155.
XIA Yuliang, ZHENG Jiwei, LI Ziyang, et al. Metallogenic characteristics and metallogenic models of the Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1):154-155.

Relationship between Borehole Filter Length and Leaching Parameters in an In-situ Leaching Uranium Mine

ZHAO Shengxiang, YAN Jifan, KOU Wenjie, SHUNI Chuting

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

Abstract: This paper focuses on the " $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ " in-situ leaching uranium process of the Qianjiadian uranium deposit, and conducts an in-depth investigation into the relationship between filter length, leaching recovery rate, and operating water volume. Actual field data are used for analysis, and the results show that there is a strong positive correlation between filter length and operating water volume: the operating water volume increases significantly in the filter length of 7-11 m, with an average growth rate of 5.2% per meter; while the growth slows down in the filter length of 12-18 m, with an average growth rate of 1.3% per meter. In contrast, a strong negative correlation is observed between filter length and leaching recovery rate: the leaching recovery rate decreases gently in the filter length of 7-11 m, with an average decline rate of 0.75% per meter; the decline accelerates in the filter length of 12-14 m, with an average decline rate of 2.0% per meter; and it drops sharply in the filter length of 15-18 m, with an average decline rate of 3.67% per meter. Based on the above analysis, it is determined that the optimal filter length range for the " $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ " in-situ leaching uranium process of the Qianjiadian uranium deposit is preferably 7-9 m. For ore segments with larger ore body thickness, the filter length can be appropriately adjusted within the range of 16 m, but shall not exceed 16 m.

Key words: Qianjiadian uranium deposit; " $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ "; in-situ leaching uranium; filter length; leaching rate; operating water volume