

地浸采铀割缝式钻孔施工关键技术参数优化

李喜龙, 闫纪帆, 刘晓奎, 口文杰

(中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 针对传统地浸采铀钻孔结构(如大孔径填砾式钻孔结构)在复杂砂岩型铀矿床中存在的施工工序繁琐、过滤器不可更换、抽注液功能不可转换等问题, 提出了一种新型的割缝式钻孔结构及其施工工艺。该结构采用“一径到底”方式, 在全孔下放套管并逆向注浆固井, 随后通过高压水力喷砂技术对工业矿层段进行割缝, 打通套管内外的水力联系通道。通过室内试验, 研究了割缝压力、喷嘴直径、割缝速度等关键技术参数对割缝深度和宽度的影响。研究表明, 在割缝施工压力 30 MPa、喷嘴直径 3.5 mm、割缝速度 90 mm/min 时, 割缝效果最佳。割缝式钻孔结构施工工艺简单、效率高、耗材少、钻孔质量高, 适用于复杂砂岩型铀矿床的开采, 可以提高铀资源回收率。

关键词: 地浸采铀; 钻孔结构; 割缝; 割缝式钻孔; 高压水力喷砂; 施工参数; 施工工艺

中图分类号: TL212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0029-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.11.08

随着地浸采铀技术向多层、低渗透性等复杂砂岩型矿床拓展, 传统大孔径填砾式钻孔结构因施工工序复杂, 成井效率低, 难以满足多层矿体协同开采的需求^[1-5]; 同时, 其在低渗透矿层中导流能力弱, 导致浸出剂注入困难、有效扩散范围受限^[6-10], 制约了资源回收率的进一步提升。

割缝式钻孔结构以高压水力喷砂成井技术为核心, 该技术已在石油开采领域广泛应用^[11-14]。其核心优势在于利用高压磨料砂液在套管及近井地层中切割出深约 1 m、缝长约 20 cm 的放射状孔道, 从而有效扩大油井泄流面积、增强地层渗流能力, 大幅提高油气井的产能^[15-19]。然而, 该技术在地浸采铀矿山中的应用研究尚不充分, 对部分关键参数的掌握仍存在不足^[20-21], 制约了其大规模推广应用。为此, 笔者针对砂岩型铀矿床的开采条件, 对割缝式钻孔施工关键技术参数开展系统性研究, 旨在优化其在该领域应用的工艺参数, 为后续工程化推广提供理论依据与技术支持。

1 割缝式钻孔结构及施工工艺

1.1 割缝式钻孔结构

割缝式钻孔采用“一径到底、后期割缝”的复

合结构。其工艺核心: 先全孔下放套管固井, 建成基础井筒; 再针对工业矿层, 用高压水力喷砂实施精准割缝, 以此建立目标层位的水力连通。钻孔结构见图 1。

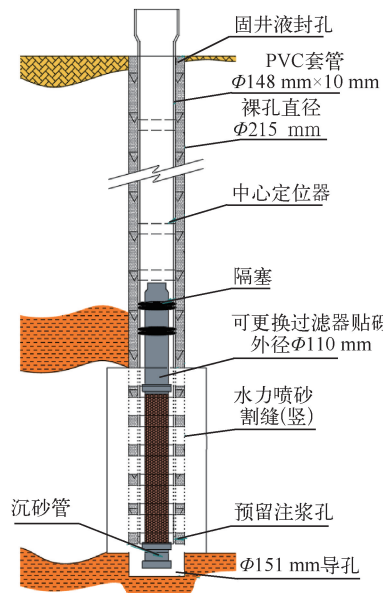


图 1 割缝式钻孔结构

Fig. 1 Slotted well configuration

1.2 割缝式钻孔结构施工工艺

割缝式钻孔结构的施工目标, 是建造可更换

井下过滤器的井筒。其施工工序依次为:裸孔钻进、扩孔、下套管、全孔逆向注浆固井、高压水力喷砂割缝、洗孔,最终安装井口及可更换过滤器组件。这一设计的核心是:过滤器功能并非来自预装部件,而是通过后期对固井套管的精准水力喷砂割缝来实现。具体工艺流程见图 2。

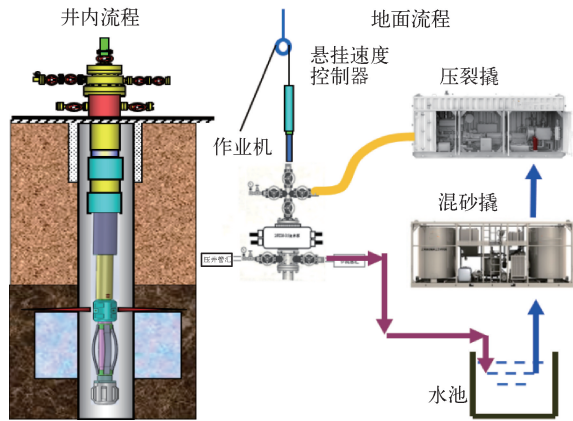


图 2 割缝式钻孔施工工艺流程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of slotted drilling construction process

高压携砂液沿套管内壁自下而上高速推进,以高速射流直接冲击目标岩体。在冲击力作用下,砂粒将套管及岩层沿轴向切开,从而打通套管与矿层的水力联系。具体割缝施工流程如下:在混砂撬中将割缝溶液与细砂充分混合;通过压裂撬增压,携砂液经过割缝管柱进入井内,由割缝器喷嘴喷出,割缝后的溶液经孔口的回收装置返回至混砂撬,实现溶液循环利用;最后,通过缓慢移动割缝装置,完成矿层段割缝施工。

2 水力喷砂割缝式钻孔施工关键参数

2.1 单因素室内试验研究

影响切割效果的主要性能参数有射流压力、喷嘴直径、移动速度等。为获得这些性能参数对割缝效果的影响,开展水力喷砂割缝室内试验。

2.1.1 试验设备和材料

为了模拟真实地层条件,本试验首先从目标矿层段钻取岩心,制备岩心标准试验件;并进行单轴抗压强度试验,测得岩心试验件的强度约为 20 MPa。在此基础上,以固井水泥与石英砂为原料,通过调整其体积比浇注系列靶件。经对比试验,筛选出与岩心单轴抗压强度最匹配的配比。

最后,依据该配比精确控制材料比例,经混合、浇筑与养护工序,制备出强度特性与真实矿层相近的模拟试验靶件。试验主要设备及材料见表 1。

表 1 试验主要设备及材料
Table 1 Main test equipments and materials

设备	规格参数
高压泵装置	功率 392 kW,最高转速 2 300 r/min,输入功率 391.5 kW;额定工作压力 115 MPa,最大排量 800 L/min,最小排量 45 L/min
混砂装置	最大排量 1 m ³ /min,最大输砂量 100 L/min;自动清水过滤器过滤精度 120 目(0.125 mm),总容量 14 m ³
喷嘴	喷嘴直径分别为 3.5、4.0、4.5、5.0 mm。喷嘴芯外径 16 mm,长 20 mm
电动葫芦	提升速度 90 mm/min
瓜胶	瓜胶浓度 0.7%
石英砂	石英砂粒度 70~140 目(0.106~0.212 mm)
试验件	由固井水泥和 40~70 目(0.212~0.425 mm)石英砂浇筑而成,试验件尺寸 300 mm×400 mm×200 mm

2.1.2 试验方法

本研究采用单参数试验法。基于技术原理与经济性综合考量,本项目磨料选定为石英砂,聚合物选定为瓜胶,悬浮液黏度为 60~100 mPa·s。

本室内试验的工艺核心为磨料浆液的制备与高压喷射成缝。首先,将瓜胶溶液与石英砂磨料分别从储液罐与储砂罐按比例泵入混砂装置,充分搅拌形成均匀的磨料浆液;随后,浆液经高压三柱塞泵增压,形成高压磨料两相流;最终,该两相流经管路输送至喷枪,经由喷枪前端的耐磨喷嘴加速,最终形成高速水力喷砂射流,冲击试验件表面并完成切割。单条割缝完成后,通过调整喷枪与试验件的相对位置,重复上述切割流程,可在目标区域形成一系列并行的割缝。试验流程见图 3。

2.2 室内试验结果与讨论

2.2.1 割缝压力对割缝深度的影响

当割缝速度、喷距、高压泵装置的工作排量分别为 90 mm/min、20 mm、130 L/min 时,在改变割缝压力的情况下,采用不同直径的喷嘴自下而上对试验件进行切割,试验结果见图 4。

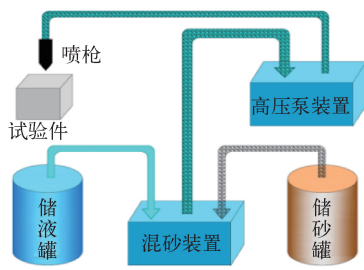


图3 割缝室内试验流程图

Fig. 3 Flowchart of slotted indoor test

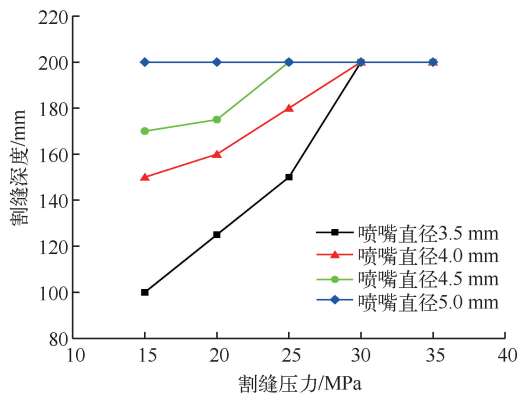


图4 不同喷射压力下割缝深度对比

Fig. 4 Comparison of slotted depth under different injection pressures

从图4可看出,割缝深度受割缝压力与喷嘴直径的共同影响。当喷射压力低于30 MPa时,在相同喷射压力下,喷嘴直径越大,割缝越深;当割缝压力超过30 MPa时,减小喷嘴直径并未导致割缝深度下降(均超过200 mm)。小直径喷嘴形成的射流更集中,能量密度更高,散射角的影响相对较小,能产生更窄、更精确的割缝。因此,在割缝速度、喷距、高压泵装置的工作排量分别为90 mm/min、20 mm、130 L/min时,为实现特定深度(200 mm)的割缝,采用小直径喷嘴射流可能是一种更经济(耗水、耗能更少)且高质量(割缝更窄)的选择。

2.2.2 割缝压力对割缝宽度的影响

当割缝速度、喷距、高压泵装置的工作排量分别为90 mm/min、20 mm、130 L/min时,在改变割缝压力的情况下,采用不同直径的喷嘴自下而上对试验件进行切割,割缝压力与喷嘴直径对割缝入口、割缝出口宽度的影响见图5~图6。

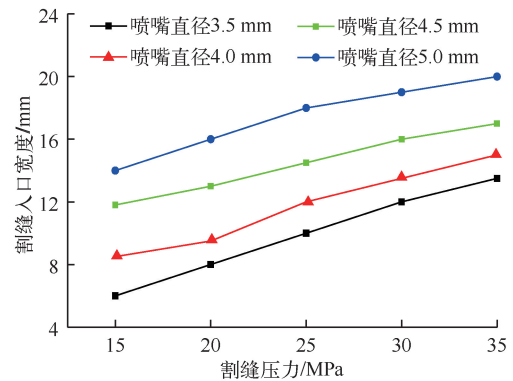


图5 割缝压力与喷嘴直径对割缝入口宽度的影响

Fig. 5 Influence of slotted pressure and nozzle diameter on slot entrance width

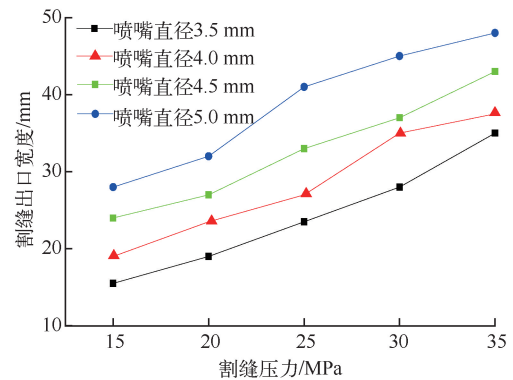


图6 割缝压力与喷嘴直径对割缝出口宽度的影响

Fig. 6 Influence of slotted pressure and nozzle diameter on slot exit width

从图5~图6可看出,随着割缝压力的增大,割缝的入口、出口宽度均增大;但割缝入口宽度的增幅远小于出口宽度的增幅。这归因子射流离开喷嘴后产生的散射效应。散射角主要由喷嘴的几何结构(如压缩段角度、直线段长度)决定,且不随割缝压力的变化而显著变化。在散射角一定的条件下,小直径喷嘴的初始射流直径更小,其射流束的绝对扩散宽度也更小。因此,在压力升高过程中,小直径喷嘴形成的割缝能更好地维持割缝尺寸的稳定性与精度。

2.2.3 水力喷砂割缝的楔形形态

使用喷嘴直径分别为3.5 mm和4.0 mm的喷嘴开展水力喷砂割缝试验,参数见表2,切口形态见图7。可以看出,割缝呈上窄下宽的楔形(图7a)。这是由喷嘴的压缩角与直线段

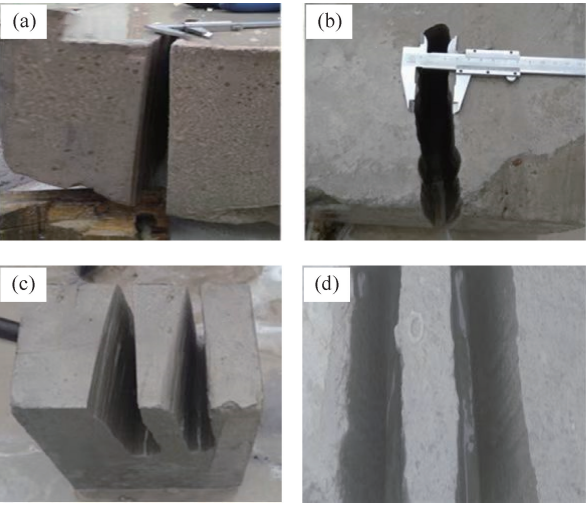
长度共同形成的扩散流所致,其射流扩散角约为 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$;切槽入口宽度均匀(图 7b),大约是喷嘴直径的 2~3 倍;切槽出口宽度较均匀(图 7c),大约是喷嘴直径的 7~8 倍;切槽表面(图

7d)形成了一个相对平稳、排列均匀的纵向条纹,条纹直线度较好,没有明显的弯曲。在 30 MPa条件下,石英砂冲蚀未出现轨迹偏转,说明射流能量充足。

表 2 不同直径喷嘴切割试验参数

Table 2 Test parameters for cutting with nozzles of different diameters

编号	喷嘴直径/ mm	泵压/ MPa	流量/ (L/min)	割缝速度/ (mm/min)	磨料(石英砂) 粒度/目	试验件 厚度/mm	切槽入口 宽度/mm	切槽出口 宽度/mm	切槽 深度/mm
1#	3.5	31.2	156.0	90	70~140	200.0	9.0	25.2	>200
2#	4.0	30.8	152.0	90	70~140	200.0	10.5	30.0	>200



(a)1#切槽侧面;(b)1#切槽正面;
(c)2#切槽后面;(d)2#切槽表面。

图 7 割缝切口形态图

Fig. 7 Morphology of slotted kerf

2.2.4 割缝速度对割缝效果的影响

当压力、喷距、高压泵装置的工作排量分别为 30 MPa、20 mm、130 L/min 时,使用直径 3.0、3.5 mm 的喷嘴在改变割缝速度的条件下开展割缝试验,结果见图 8。可以看出,随着割缝速度的增大,切割深度逐渐降低。在采用直径为 3.0 mm 和 3.5 mm 的喷嘴条件下,当割缝速度分别为 60、90 mm/min 时,割缝深度均大于 200 mm;当割缝速度分别为 120、150 mm/min 时,割缝深度减小。试验获得的割缝宽度约为 7~13 mm,相当于所用磨料喷嘴出口直径的 2~3 倍。综合现场设备控制能力与安全因素,为保证切割深度并维持高压管柱平稳运动,割缝速度以 90 mm/min (5.4 m/h)为宜。

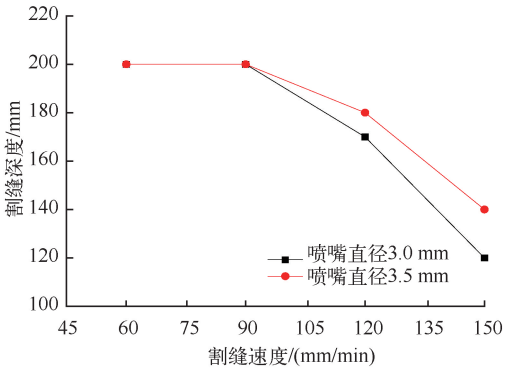


图 8 割缝速度对割缝深度的影响

Fig. 8 Influence of cutting speed on slotted depth

2.2.5 喷嘴直径对割缝深度的影响

当压力、喷距、高压泵装置的工作排量、割缝速度分别为 30 MPa、20 mm、130 L/min、90 mm/min 时,研究不同喷嘴直径对割缝深度的影响,结果见图 9。可以发现,当喷嘴直径为 3.0 mm 时,割缝深度为 155 mm;当喷嘴直径增大至 3.5 mm 时,割缝深度已超过 200 mm;在相同试验条件下,继续增大喷嘴直径至 4.0 mm 及以上,割缝深度均大于 200 mm。根据试验结果,在系统压力稳定维持在 30 MPa 下,增大喷嘴直径可有效增加射流排量(表 3),从而有助于获得更大的割缝深度。表 3 表明,在相同压力下,喷嘴直径越大,射流排量越高。喷嘴直径直接影响射流出口直径及核心段长度。喷嘴直径增大使射流总能量提高,一方面减缓了射流的速度衰减;另一方面增加了单位时间内冲击岩石的磨料颗粒数量,从而增强了切割能力。尽管喷嘴直径越大,排量与切割潜力越高,但综合设备实际工作排量(130 L/min)与本试验的切割深度目标(>200 mm),直径 3.5 mm 的喷嘴在满足切割深度要求的同时,其排量(140.90 L/min)最接近设备额定工作点,可保

证系统高效稳定运行。因此,在该试验条件下,采用直径为 3.5 mm 的喷嘴是兼顾切割性能与设备匹配性的最佳选择。

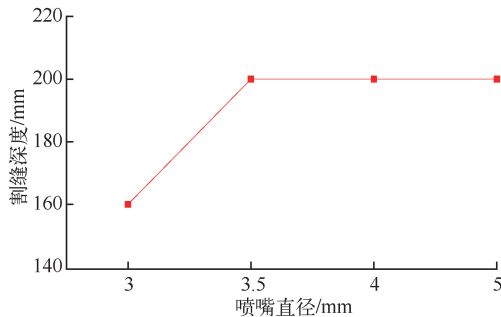


图9 不同直径喷嘴对割缝深度影响

Fig. 9 Influence of nozzles with different diameters on slotted depth

表3 不同直径喷嘴切割试验参数

Table 3 Test parameters for cutting with nozzles of different diameters

割缝压力/MPa	不同喷嘴直径下的排量/(L/min)					
	3.5 mm	4.0 mm	4.5 mm	5.0 mm	5.5 mm	6.0 mm
25	128.63	168.00	212.63	262.50	317.63	378.00
30	140.90	184.03	232.92	287.55	347.94	414.08

2.3 现场试验

为获得最佳的地浸采铀钻孔施工水力喷砂割缝关键参数,在内蒙古某地浸铀矿山开展现场试验。在割缝压力 30 MPa、喷嘴直径 3.5 mm、割缝速度 90 mm/min 条件下进行割缝,实现了井内与矿层之间的水力联系。现场试验钻孔在注液压力 1.65 MPa 下,运行 90 d 后,其平均注液量仍保持在 3.20 m³/h 以上,高于该铀矿山同一采区内扩孔式结构钻孔的平均注液量(2.50 m³/h),完全满足正常生产运行水量需求。钻孔平均注液量变化见图 10。

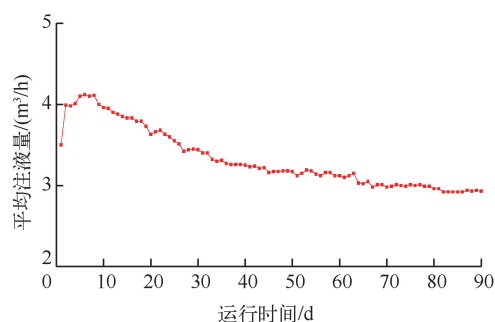


图10 钻孔平均注液量变化

Fig. 10 Variation in average injection volume per borehole

3 结论

本研究通过系统的室内单因素试验,揭示了喷嘴直径、喷射压力与割缝速度对割缝效果的影响规律。初步确定了较优的施工参数组合。在喷射压力 30 MPa、喷嘴直径 3.5 mm、割缝速度 90 mm/min 条件下,可实现高效、稳定的割缝效果。该结果可为地浸采铀钻孔现场的工艺设计与施工控制提供理论依据,为工程应用夯实技术支撑。后续研究可进一步开展多因素耦合试验,深入验证该参数组合的鲁棒性并建立工艺优化模型。

参考文献:

- [1] Zhang C, Xie T T, Tan K X, et al. Hydrodynamic simulation of the influence of injection flowrate regulation on in-situ leaching range[J]. Minerals, 2022, 12(7):787.
- [2] 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.
- [3] 汤庆四,邢拥国,沈红伟,等.填砾式钻孔结构在地浸采铀现场试验中的应用[J].铀矿冶, 2004, 23(3): 125-129.
- [4] 李喜龙,张勇,张渤,等.扩孔式钻孔在内蒙古地浸铀矿的应用[J].中国矿业, 2019, 28(9):111-115.
- [5] 张万亮,张勇,闫纪帆,等.可更换过滤器式地浸采铀钻孔施工技术[J].铀矿冶, 2022, 41(1):36-42.
- [6] 成弘.地浸矿山二次开发:井场溶浸死角问题研究[C]//中国核科学技术进展报告(第五卷):中国核

- 学会 2017 年学术年会论文集:第 2 册:铀矿冶分卷. 北京:中国原子能出版社,2017:337-342.
- [7] 王海峰,苏学斌,刘乃忠,等.美国地浸铀矿山钻孔成井工艺及井场运行[J].铀矿冶,2010,29(3):113-118.
- Wang Haifeng, Su Xuebin, Liu Naizhong, et al. Well completion and wellfield operation at American in-situ leaching uranium mines [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010, 29(3):113-118.
- [8] 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.
- [9] 王亚安,李星浩,姚益轩,等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀含矿层防堵技术研究[J].铀矿冶,2024,43(3):17-24.
- Wang Ya'an, Li Xinghao, Yao Yixuan, et al. Preventing blocking technology of ore-bearing layers in " $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ " in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):17-24.
- [10] 王海峰,谭亚辉,杜运斌,等.原地浸出井场工艺[M].北京:原子能出版社,2002:84-98.
- [11] 杨兵,王福旺,边亮,等.水力割缝技术在油田开发中的应用[J].油气井测试,2002,11(4):63-65.
- Yang Bing, Wang Fuwang, Bian Liang, et al. Application of hydraulic slotted liner technique in oilfield development[J]. Well Testing, 2002, 11(4):63-65.
- [12] 赵磊.水力喷砂割缝技术的研究与应用[J].油气地质与采收率,2008,15(4):94-96.
- Zhao Lei. Research and application of hydraulic sandblasting slotting technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4):94-96.
- [13] 杨永利,王来贵,吴恩成.水力喷砂割缝增产增注技术的作用原理及展望[J].钻采工艺,1998,21(2):19-21.
- Yang Yongli, Wang Laigui, Wu Encheng. Principle of hydraulic sandblasting slotting technology for stimulation of production and injection well and its prospects[J]. Drilling & Production Technology, 1998, 21(2):19-21.
- [14] 施连海,孙文涛.水力喷砂割缝工具改进研究与应用[J].石油机械,2002,30(6):41-42.
- Shi Lianhai, Sun Wentao. Improvement of hydraulic sand blast slotting tools[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(6):41-42.
- [15] 王德喜.水力喷砂割缝射孔工艺参数优化研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.
- [16] 张永将,陆占金.超高压水力割缝煤层增透成套装置研制及应用[J].煤炭科学技术,2020,48(10):97-104.
- Zhang Yongjiang, Lu Zhanjin. Development and application of complete set of anti-reflection equipment for ultra-high pressure hydraulic seam cutting [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10):97-104.
- [17] 丰安祥,史文豹.穿层钻孔水力重复压裂增透技术研究及应用[J].煤炭工程,2019,51(9):87-90.
- Feng Anxiang, Shi Wenbao. Permeability increasing mechanism of hydraulic repeated fracturing in crossing-hole drilling [J]. Coal Engineering, 2019, 51(9):87-90.
- [18] 乔伟.顺层长钻孔中压水力割缝增透技术及应用[J].矿业安全与环保,2022,49(2):122-126.
- Qiao Wei. Application on anti-reflection technology of long borehole along coal seam with medium pressure hydraulic slotting [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2):122-126.
- [19] 郑春山,林柏泉,杨威,等.水力割缝钻孔喷孔机制及割缝方式的影响[J].煤矿安全,2014,45(1):5-8.
- Zheng Chunshan, Lin Baiquan, Yang Wei, et al. Hole-spraying mechanism of hydraulic slotting drilling and the influence of slotting mode [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1):5-8.
- [20] 张渤,闫纪帆,季扬威,等.水力喷砂割缝工艺在地浸钻孔施工中的应用[J].铀矿冶,2019,38(4):259-262.
- Zhang Bo, Yan Jifan, Ji Yangwei, et al. Application of hydraulic sand blasting joint cutting technology for drilling construction at in-situ leaching[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(4):259-262.
- [21] 程宗芳.地浸工艺钻孔中的施工技术[J].铀矿冶,2003,22(2):61-63.
- Cheng Zongfang. The construction technique of borehole for in-situ leaching process [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2003, 22(2):61-63.

(下转第 120 页)

Statistical Method for Background Values of Groundwater in an In-situ Leaching Uranium Mine

LI Mengjiao¹, CAO Fengbo¹, LIU Xiaochao¹, CHEN Shuaiyao¹, GE Jialiang¹,
TANG Qingsi², LI Xilong², XIA Xu²

(1. The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, China;

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

Abstract: Background values of groundwater are the core basis for groundwater environmental management in in-situ leaching uranium mine. Aiming at the characteristics of large sample size, strong discreteness and high spatial heterogeneity in background values monitoring of groundwater during the construction period of an in-situ leaching uranium mine, this paper established a background values determination method consisting of Grubbs outlier test, manual review, data distribution type judgment, and values range & mean calculation. A case study was carried out in mining area 1# to obtain the background values and spatial distribution characteristics of groundwater characteristic factors. This method can effectively distinguish natural high concentration values from man-made abnormal values with objective and representative results. It can provide technical support for groundwater environmental management of in-situ leaching uranium mines and also serve as a technical reference for background values determination of similar uranium mines.

Key words: in-situ leaching of uranium; uranium mine; background values of groundwater; statistical analysis; outlier identification; Grubbs test; data distribution

~~~~~  
(Continued from page 34)

## Key Parameters for Casing Slotted Well in In-situ Leaching of Uranium

LI Xilong, YAN Jifan, LIU Xiaokui, KOU Wenjie  
(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of cumbersome construction process, irreplaceable filter and non-convertible function of extractable liquid in complex sandstone type uranium deposits in the traditional in-situ leaching uranium well configuration (such as large-diameter gravel filling well configuration), a new type of slotted well configuration and its construction technology were proposed. The configuration adopts a one-diameter to the end method, the casing is lowered through the whole hole and the reverse grouting is cemented, and then the industrial ore section is slapped by high-pressure hydraulic sandblasting technology to open up the hydraulic connection channel inside and outside the casing. Through laboratory tests, the key technical parameters of hydraulic sandblasting joints were studied, including the effects of spray pressure, nozzle diameter and moving speed on the depth and width of the joints. The results indicate the optimal slotted performance is achieved when the injection pressure is maintained 30 MPa, the nozzle diameter is set at 3.5 mm, and the moving speed is controlled at 90 mm/min. The slotted well configuration has the advantages of simple construction process, high efficiency, less consumables and high well quality, and is suitable for the mining of complex sandstone type uranium deposits to improve the recovery rate of uranium resources.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; well configuration; slotted; slotted well; high-pressure hydraulic sandblasting; construction parameters; construction technology