地浸采铀钻孔过滤器建造与过滤机理研究

姚益轩，王亚安，胥国龙，王 兴，张友澎，王立民

（核工业北京化工冶金研究院，北京 101149）

摘要：系统研究了多种型式过滤器的过滤机理和效果。在假定颗粒为等粒圆球体且呈斜方体排列的前提下，计算得到砾石过滤器和陶粒贴砾过滤器的最小孔隙直径初始值分别为 0.310、0.155 mm，因隔滤作用，孔隙直径随时间延长会逐步变小，过滤效果好；无砾料包网过滤器孔眼直径为 0.180～0.270 mm，装配后直径大体一致，只有隔挡作用，过滤效果差。过滤器部位没有充填砾石或充填不密实的钻孔，孔壁可能会垮塌或掉砂，浸出液中夹带的碎屑偏多。压汞试验测试砂岩铀矿层中的最大孔喉直径为 0.032 mm，所有过滤器对于失稳的粉砂黏土碎屑和化学沉淀物基本没有隔挡作用。

关键词：地浸采铀；钻孔过滤器；孔隙；过滤

中图分类号：TD868 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0017-07

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.02.05

钻孔是地浸采铀最基本、最重要的工程，它既是揭露矿体的生产探矿工程，又是地浸矿山的开拓采准工程。钻孔是浸出剂和浸出液进出矿体的唯一通道，过滤器是溶液进出矿体的过水部位。狭义的过滤器是指打眼或割缝后的过滤管和外包的尼龙网、外套的环形骨架或陶粒贴砾层，广义的过滤器还包括矿层部位孔壁和过滤器之间充填的砾石层。过滤器的主要作用是隔挡或隔滤在抽注浸出过程中因孔壁垮塌、掉砂和矿层中失稳产生的岩屑与化学沉淀物，减少浸出液中碎屑的夹带量，提高潜水泵使用寿命和树脂床的吸附能力。

在中国地浸采铀工程中施工了大量无砾料包网过滤器、石英砾石过滤器、有机砾石过滤器、陶粒贴砾过滤器等型式的钻孔，对各种过滤器型式的钻孔结构及其施工工艺也有报道[1-5]，开展了地浸采铀钻孔过滤器对溶液渗流影响的数值模拟[6]；但对被过滤物的物性、来源、迁移，以及过滤器的建造、结构、作用和效果等进行的系统研究较少。笔者针对中国地浸采铀钻孔常用的过滤器型式、建造技术、被过滤物来源和物性等进行了系统梳理，结合压汞试验、过滤器孔隙直径计算结果，评价了不同过滤器的过滤效果，揭示了过滤器的过滤机理。

1 砂岩铀矿石物性与孔隙特征

1.1 物性特征

砂岩铀矿石属于陆源水成沉积碎屑岩，物质组成包括碎屑、杂基和胶结物。碎屑分为岩石碎屑和矿物碎屑，岩石碎屑是母岩经过机械破碎形成的岩石碎块，常见花岗岩、火山岩、硅质岩碎屑等；矿物碎屑主要有石英、长石、少量云母和重矿物碎屑。杂基是粒度小于 0.031 5 mm 的非化学沉淀物，多数属同生沉积的粉砂和黏土矿物。胶结物是自生的化学沉淀物，常见的有碳酸盐、硅质，以及一部分铁质矿物等。

砂岩铀矿石通常由多种粒径(ds)的碎屑组成，按照自然粒级标准可以将碎屑分为砾石(ds＞2.0 mm)、粗砂(2.0 mm≥ds＞0.5 mm)、中砂(0.5 mm≥ds＞0.25 mm)、细砂(0.25 mm≥ds＞0.05 mm)、粉砂(0.05 mm≥ds＞0.005 mm)、黏土(ds≤0.005 mm)。按照优势粒级大小，其岩性可分为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥质岩 4 类，其中的砂岩类又分为粗砂岩、中砂岩、细砂岩。然而，在自然界中矿石的粒级组成极其复杂，有时优势粒

收稿日期：2023-02-07

基金项目：中核集团集中研发项目(〔2018〕A60-1)

第一作者简介：姚益轩(1963—)，男，湖南涟源人，硕士，正高级工程师，主要从事地浸采铀技术研究和工程设计工作。

级并不明显，因此常见砾岩、砂砾岩、粗砂岩、中粗砂岩、中砂岩、中细砂岩、细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和泥岩等。

1.2 孔隙特征

孔隙是碎屑岩中未被碎屑、杂基及胶结物等固体物质占据的空间，是岩石中流体的储集空间和流体在岩石中渗流的通道；它可能是原生堆积保留下来的粒间孔隙，也可能是后生期矿物被淋滤而形成的次生孔隙。孔隙大小与碎屑组成和沉积物的压密、胶结作用有关。一般来说，大颗粒碎屑组成的沉积物的孔隙往往较大，分选性差的碎屑的孔隙较小；随着压密和胶结作用增强，孔隙也会变小。

钻孔抽注液量大小是地浸采铀最重要的技术经济指标之一，矿层的渗透性是决定钻孔抽注液量大小的最关键矿床因素；而渗透率是表征岩石渗透性的参数，与岩石的孔隙度（孔隙空间体积与岩石总体积的比）密切相关。当矿层特别是钻孔近井地带孔隙被碎屑、化学沉淀物、气体堵塞后，渗透性会降低，钻孔抽注液量会变小。

从云南 TC、内蒙古 SS 和 TL 铀矿床采取含矿层岩石圆柱状样通过压汞试验、孔隙度和渗透率测试，得到的孔喉及孔渗参数见表 1（孔喉半径只统计了对渗透率贡献值＞1%的孔喉），部分岩样孔隙分布见图 1。可以看出，岩石的孔喉半径分布范围广，最小的仅有 0.016 μm，最大的不超过 16 μm，其中微喉道（0.5～0.025 μm）和吸附喉道（＜0.025 μm）[7]对渗透率基本没有贡献。孔喉半径大，孔隙度和渗透率就高，相对较大的孔喉对渗透率的贡献大。

表 1 含矿层岩样孔喉及孔渗参数

Table 1 Pore throat and pore permeability parameters of ore bearing rock samples

样品编号	取样孔段/m	孔喉半径范围/μm	渗透率贡献值/%	孔隙半径中值/μm	孔隙度/%	渗透率/(10^{-3}μm^2)
SS25-06	161.74～161.77	4.00～16.00	98.58	0.05	29.60	340.0
SS25-17	166.90～166.93	1.00～4.00	98.56		20.60	29.30
SS25-22	167.37～167.40	1.60～6.30	98.92		22.30	42.90
SS25-31	168.79～168.82	4.00～16.00	98.95	0.04	28.70	327.0
SS25-32	169.32～169.35	2.50～10.00	99.08	0.03	23.40	132.0
SS25-36	171.67～171.70	0.63～2.50	99.03		19.40	9.740
SS25-42	171.98～172.01	0.40～1.60	98.48	0.06	11.70	2.510
SS25-51	173.18～173.21	2.50～10.00	99.02	0.09	22.30	101.0
TL04	250.13～250.16	4.00～10.00	98.84	0.59	32.00	186.0
TL07-1	257.61～257.64	2.50～10.00	99.19	1.35	34.20	210.0
TL15-1	249.04～249.07	6.30～16.00	98.53	2.16	30.80	833.0
TL19	257.18～257.21	6.30～16.00	98.61	3.66	36.30	1 326
TL22	259.99～260.02	6.30～16.00	99.21	7.88	39.20	3 813
TL25	260.99～261.02	4.00～16.00	99.50	3.85	32.20	893.0
TC02	17.65～17.68	2.50～10.00	99.00	0.06	30.10	167.0
TC03	22.55～22.58	0.40～2.50	98.83	0.12	27.50	13.00
TC10	31.55～31.58	0.40～2.50	98.62	0.11	24.20	9.060
TC12	33.07～33.10	0.63～4.00	99.27	0.08	27.60	42.30
TC17	35.03～35.06	2.50～16.00	99.24	0.03	36.30	295.0
TC25	39.07～39.10	0.63～16.00	98.77	0.06	28.20	15.20

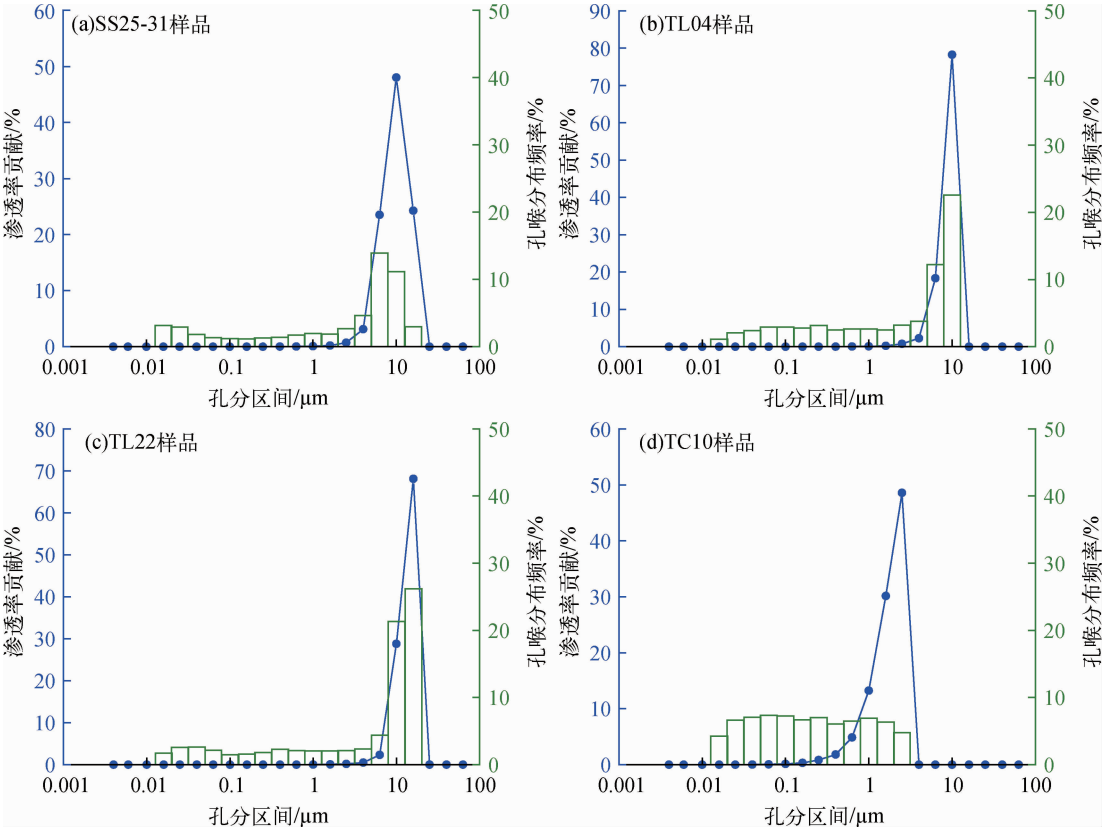


图 1　含矿层岩样孔隙分布图

Fig. 1　Pore distribution diagram of ore bearing rock samples

2　过滤器建造技术

按照过滤器与井管连接方式不同，可将地浸采铀钻孔过滤器分为一体式过滤器和分体式/内置过滤器 2 大类。

2.1　一体式过滤器建造技术

无砾料包网过滤器、石英砾石过滤器[8-10]属于一体式过滤器。过滤器与上部井管和下部沉砂管之间通过丝扣连接，随井管依次安装，形成紧密连接的整体，固井水泥浆通过注浆管从孔壁与井管之间的环空灌注，凝固后成井。

无砾料包网过滤器由 UPVC 过滤管外包 2 层优质尼龙过滤网构成(图 2)。安装到位后在孔壁与过滤器之间没有充填砾石；在与过滤器连接的上部井管外壁上安装有分隔装置，用于分隔水泥浆与过滤器及沉砂管外环空；在下部沉砂管外壁上安装有导中器，与分隔装置共同保护过滤器，避免在下管过程中因过滤器与孔壁之间的摩擦损坏过滤网。尼龙过滤网目数一般在 50～80 目，孔眼直径在 180～270 μm。早期的尼龙过滤网用尼龙绳人工捆扎固定，费时且固定强度有限；改进后的尼龙过滤网采用自锁式尼龙扎带固定，方便且固定强度大幅提高，每股尼龙扎带间隔 100～150 mm。



图 2　无砾料包网过滤器

Fig. 2　Filter of graval free mesh

石英砾石过滤器由 UPVC 过滤管外套环形骨架构成(图 3)。安装到位后使用投砾设施向孔壁与过滤器、沉砂管之间充填 2～5 mm 的石英砾石。砾石层上一般需要投入少量细粉砂，沉降后

形成自然分隔层，再注浆固井。早期的石英砾石过滤器由 UPVC 过滤管外包 2 层尼龙过滤网构成，材质及固定方法同无砾料包网过滤器；改进后的石英砾石过滤器由 UPVC 过滤管外套环形骨架构成，组装成型后骨架圆环间的横向缝隙宽度为 700 μm[11]。

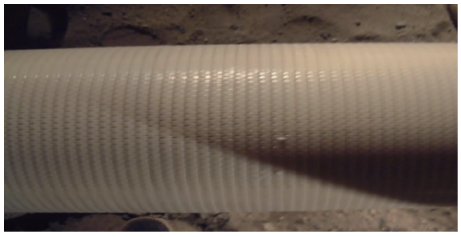


图 3 组装后的环形骨架

Fig. 3 Assembled annular framework

2.2 分体式/内置过滤器建造技术

有机砾石过滤器、陶粒贴砾过滤器属于分体式/内置过滤器，过滤器外径小于井管内径，需先安装井管并注浆固井，再从井管内下放过滤器和沉砂管组件，通过膨胀橡胶带或封隔坐封器将其固定在井管内壁的设计位置。

有机砾石过滤器由 UPVC 过滤管外套环形骨架构成。钻孔全段先安装井管并注浆固井，然后采用锻洗钻具整体切割矿层部位水泥环和 UPVC 井管，再安装过滤器、沉砂管与反向填砾装置组件[12]，并用封隔坐封器将其固定在井管内壁上；然后从井管内下入投砾管，使其连接到沉砂管底端的带单向阀的反向填砾装置上[13]，向过滤器和沉砂管外环空投入有机砾石。砾石材料为高密度聚乙烯（HDPE）塑料（图 4），颗粒直径 2～5 mm，密度 0.91～0.97 g/m^3。



图 4 聚乙烯砾料

Fig. 4 Polyethylene gravel

陶粒贴砾过滤器由 UPVC/钢质过滤骨架管外贴陶瓷砾石层构成（图 5）。目前的应用实例是在矿层之上先安装井管并注浆固井，矿层部位为裸眼钻孔[14]；或全孔先安装井管并注浆固井，采用水力喷砂割缝技术穿透矿层部位水泥环和 UPVC 井管，再从井管内下放过滤器和沉砂管组件到设计位置，将其用膨胀橡胶带固定在井管内壁上[15]。



图 5 陶粒贴砾过滤器

Fig. 5 Filter of porcelain granule pre-coated

3 钻孔内析出物分析

地浸采铀钻孔在成井后，会有抽水洗井和抽注浸出作业。通常采用压缩空气间歇式抽水洗井，从沉砂管、过滤器及其近井地带中抽出碎屑和化学沉淀物，疏通矿层，恢复钻孔抽注液能力；该过程钻孔内水位波动幅度大，水力作用强。抽注浸出作业是从抽液钻孔抽出浸出液，经离子交换树脂吸附铀，吸附尾液添加试剂后再从注液钻孔注入矿层中的循环浸出过程，也是浸出液中夹带的部分粉砂黏土细碎屑从抽液钻孔迁移到注液钻孔的过程。

3.1 成井后抽水洗井

钻孔施工中，会用水、膨润土和添加剂配制钻井泥浆，用于携沙、护壁、冷却和润滑钻头；钻头旋转会切削、研磨岩石，产生大量岩屑；岩屑由泥浆携带返出地面，经沉淀、过滤除渣的泥浆会被循环使用。由于泥浆密度大于地下水密度，且孔内泥浆水位一般高于地下水水位；因此在液柱压力作用下，泥浆和岩屑会附着在孔壁上形成滤饼（俗称“泥皮”），保护孔壁，滤液及其携带的粉砂黏土细碎屑会深入含矿层近井带[16]，污染矿层，降低渗透性。成井后必须进行抽水洗井，以破坏井壁泥皮，抽出深入矿层近井带中的细碎屑和泥浆。

3.2　抽注浸出过程及抽水洗井

在抽注浸出过程中，溶液与矿石发生化学反应，会产生 $CaSO_4$、$CaCO_3$、$Al(OH)_3$、$Fe(OH)_3$ 等沉淀，引起化学堵塞。由于抽液钻孔动水位低于含矿层中的水位，抽液是含矿层地下水压力的释放过程，在水力作用下矿层中失稳的粉砂黏土细碎屑被浸出液夹带，迁移到注液钻孔，形成机械堵塞。在中性地浸中，非溶解态的 O_2 也可能产生气堵。含矿层及抽注液钻孔堵塞，会导致抽注液能力下降，这是地浸采铀过程难以避免的问题，通过抽水洗井可在一定程度上恢复钻孔产能。

注液钻孔一般先于抽液钻孔堵塞，初期抽水洗井析出物主要包括源自抽液钻孔的粉砂黏土细碎屑，在中性地浸中也可能包括非溶解态 O_2；中后期抽水洗井析出物主要是化学沉淀物。抽液钻孔洗井析出物主要是化学沉淀物。

在岩石疏松、固结程度低、过滤器部位没有砾石支撑的裸眼孔壁和井管破损部位，孔壁容易垮塌掉砂，垮塌掉砂多出现在抽水洗井，特别是成井后的抽水洗井以及频繁启停抽注浸出作业阶段。孔壁垮塌虽然会产生大量岩屑，短时间内涌砂量大、洗井难度增加；但可以彻底破坏孔壁泥皮，快速解除近井地带堵塞，恢复矿层渗透性。在岩石次疏松、固结程度较高，或过滤器部位充填砾石支撑且充填密实的钻孔，孔壁不易垮塌掉砂。在正常的抽注浸出过程中，由于溶液流向固定，流量基本稳定，水力作用较弱，较少发生抽液钻孔孔壁垮塌掉砂现象；注液钻孔则不会出现垮塌现象。

4　过滤器孔隙与过滤效果比较

4.1　砾石滤层孔隙与过滤能力

石英砾石和有机砾石过滤器的过滤能力取决于砾石滤层的孔隙直径。假定砾石为等粒圆球体，直径为 D_l，砾石层孔隙的内切球体直径为 d_l，当砾石呈正方体排列时最不稳定，形成的孔隙最大，其直径 $d_l=0.414D_l$；当砾石呈斜方体排列时最稳定，形成的孔隙最小，其直径 $d_l=0.155D_l$[17]。过滤器部位充填的砾石粒径通常为 2～5 mm，按照等粒圆球体粒径中值且呈斜方体排列，孔隙直径为 0.543 mm；最大粒径且呈正方体排列时，最大孔隙直径为 2.070 mm；最小粒径且呈斜方体排列时，最小孔隙直径为 0.310 mm。

在自然界中，颗粒的排列方式常介于正方体排列和斜方体排列之间，砾石层孔隙大小兼而有之，厚度一般＞35 mm。因此，砾石层具有隔滤作用，即粒径大的碎屑被隔挡在砾石层之外，不能进入砾石层；而粒径中等的碎屑，虽然能够进入砾石层，嵌入砾料孔隙中，但不能通过砾石层；理论上只有粒径＜0.310 mm 的中砂、细砂、粉砂和黏土碎屑能够通过砾石层和尼龙网或环形骨架，从钻孔内析出。

石英砾石由采掘的岩块破碎而成，磨圆度差，充填初期砾石层不太稳定，大孔隙稍多；经过抽水洗井和抽注浸出作业后，砾石层趋于稳定，小孔隙更多，过滤效果更好。有机砾石是用高密度聚乙烯原料人工合成的，分选性和磨圆度好；相比石英砾石层，孔隙偏大且密度小，难以充填密实，在抽水洗井和抽注浸出作业过程中砾石层和孔壁可能不太稳定，过滤效果稍差。

4.2　陶粒贴砾层孔隙与过滤能力

陶粒贴砾过滤器以 UPVC 塑料管或钢管作衬管，以陶粒作滤料，经粘合剂粘结而成。陶粒是以优质黏土为基料，经粉碎、团粒、高温烧制而成的球形颗粒，它的主要成分是 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等[18]。陶粒粒径可以与含水层碎屑粒径匹配，砂岩铀矿石岩性主要以中细砂岩、中粗砂岩为主；因此陶粒粒径应以 2～4 mm 为主体，按比例混合 1～2 mm 的陶粒，按照粒径中值且呈斜方体排列计算，其孔隙直径 $d_l=0.388$ mm，最大孔隙直径为 1.656 mm，最小孔隙直径为 0.155 mm。陶粒贴砾层厚度在 15 mm 左右，具有与砾石层类似的隔滤作用，理论上只有粒径＜0.155 mm 的细砂、粉砂和黏土碎屑能够通过贴砾层，从钻孔内析出。

陶粒贴砾层性脆，在装卸、运输和安装过程中，可产生微裂隙和碎裂；膨胀橡胶带固定强度也有限，滑脱、受损或老化后，过滤器可能会失去封隔和隔滤作用。

4.3　尼龙包网孔隙与过滤能力

尼龙包网孔眼直径 0.180～0.270 mm。装配好的无砾料包网过滤器的尼龙包网孔眼分布基本均匀，孔眼直径大致相同，只具有隔挡作用，即大于孔眼直径的碎屑不能通过尼龙网；而小于孔眼直径的细砂、粉砂和黏土碎屑能够直接通过尼龙网，从钻孔内析出。

4.4　过滤效果比较

综合以上分析可知，陶粒贴砾过滤器、充填密

实的石英砾石和有机砾石过滤器具有隔滤作用,其孔隙直径随时间延长会逐渐变小,总体过滤效果好;无砾料包网过滤器只具有隔挡作用,过滤效果差。

矿层部位为裸眼的陶粒贴砾过滤器、充填不密实的石英砾石和有机砾石过滤器以及无砾料包网过滤器钻孔,在成井后和产能恢复性抽水洗井过程中,或者在钻孔抽注频繁启停的情况下,孔壁可能会垮塌掉砂,浸出液中夹带的岩屑较多;但割缝开窗的贴砾过滤器钻孔孔壁裸露面积小,跨塌掉砂现象不明显。

砂岩铀矿层岩石最大孔喉直径 0.032 mm(表 1、图 1),只有粉砂和黏土细碎屑能够在水力作用下迁移。在正常的抽注浸出过程中,孔壁相对稳定,矿层中失稳的粉砂和黏土细碎屑以及化学沉淀物的直径远小于过滤器最小孔隙直径,理论上这些物质都能通过过滤器从钻孔中析出。因此,各种型式过滤器对这些物质基本没有隔挡作用。过滤器结构与效果比较见表 2。

表 2 钻孔过滤器结构与效果比较

Table 2 Comparison of structure and effect of borehole filter

项目	无砾料包网过滤器	石英砾石过滤器	有机砾石过滤器	陶粒贴砾过滤器
过滤器建造	随井管依次安装到位	随井管依次安装到位	先下井管并注浆固井,后安装过滤器	先下井管并注浆固井,后安装过滤器
过滤器固定	与井管丝扣连接成整体	与井管丝扣连接成整体	用封隔坐封器固定在井管内壁上	用膨胀橡胶带固定在井管内壁上
过滤层材质	尼龙网	石英砾石	聚乙烯塑料颗粒	陶粒贴砾
滤层孔隙直径	0.180～0.270 mm	0.310～2.070 mm	0.310～2.070 mm	0.155～1.656 mm
孔壁跨塌掉砂	可能垮塌掉砂	不易跨塌掉砂	充填不密实时,可能垮塌掉砂	裸眼孔壁可能垮塌掉砂,割缝开窗钻孔垮塌掉砂量少
对粉砂黏土碎屑	基本无隔挡作用	基本无隔挡作用	基本无隔挡作用	基本无隔挡作用

5 结论

过滤器的选用与矿床条件、钻孔结构及其施工工艺有关。单从被过滤物、过滤机理和效果分析,主要结论如下:

1)砂岩铀矿石胶结疏松、次疏松,最大孔喉直径 0.032 mm,在水力作用下只有粉砂和黏土碎屑能够在岩石孔隙中迁移。

2)砾石层和贴砾层具有隔滤作用,在运行过程中孔隙直径会进一步变小,过滤作用增强,但渗透性会减弱。环形骨架和尼龙包网只有隔挡作用,可隔挡较大直径碎屑进入钻孔内的过滤层。

3)过滤器部位没有充填砾石或充填不密实的钻孔,孔壁可能会垮塌掉砂。垮塌虽然增大了涌砂量和洗井的难度;但可以彻底破坏孔壁泥皮,快速解除近井地带堵塞,有利于恢复地层渗透性。

4)在正常的抽注浸出过程中,溶液流向固定,抽注液量和孔内水位基本稳定,实践中少见孔壁垮塌现象。所有过滤器对矿层中失稳的粉砂黏土碎屑和化学沉淀基本没有隔挡作用。

参考文献:

[1] 王海峰,阙为民,钟平汝,等. 原地浸出采铀技术与实践[M]. 北京:中国原子能出版社,1998:62-78.

[2] STOVER D E. Smith Ranch ISL uranium facility: the wellfield management programme[R]// Recent Developments in Uranium Resources and Production With Emphasis on In Situ Leach Mining. Vienna: IAEA,2004:189-203.

[3] ACKLAND M C, HUNTER T C. Australias Honeymoon Project—from acquisition to approval—1997 to 2002[R]// Recent Developments in Uranium Resources and Production With Emphasis on In Situ Leach Mining. Vienna:IAEA,2004:115-137.

[4] Uranium Energy Corporation. Palangana&Hobson operation tour[R]. Vancouver: Uranium Energy Corporation,2010.

[5] 马亮,张子敏,张建,等. 哈萨克斯坦楚-萨雷苏盆地砂岩型铀矿床地质-水文地质条件及地浸工艺[J].

地质论评，2017，63(4)：1012-1020.
[6] 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.
[7] 廖文胜，王立民，姚益轩，等. 某低渗透砂岩铀矿层渗透性能损害因素分析[J]. 金属矿山，2009(S1)：305-310.
[8] 程宗芳. 地浸工艺钻孔中的施工技术[J]. 铀矿冶，2003，22(2)：61-64.
[9] 汤庆四，邢拥国，沈红伟. 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.
[10] 张勇，黄群英，肖作学. 填砾工艺在地浸钻孔施工中的应用[J]. 铀矿冶，2009，28(3)：113-116.
[11] 胡柏石，肖为军. 一种地浸过滤器外骨架圆环：CN200991609[P]. 2007-12-19.
[12] 杨立志，张勇，胡柏石，等. 钻孔割铣工具在地浸采铀中的应用[J]. 铀矿冶，2015，34(3)：153-156.
[13] 秦昊，胡柏石，李召坤，等. 地浸采铀钻孔内置过滤器反向填砾方法研究[J]. 铀矿冶，2019，38(1)：14-18.
[14] 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.
[15] 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.
[16] 胡柏石，谭亚辉，姜岩. 低承压水头条件下地浸钻孔施工与成孔工艺特征探讨[J]. 铀矿冶，2005，24(3)：118-123.
[17] 柳晨鸣. 贴砾过滤器改进初步实验研究[D]. 成都：成都理工大学，2009.
[18] 李炳平，解伟，李小杰，等. 陶粒贴砾过滤器的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，2009，36(8)：7-10.

Study on Construction and Filtration Mechanism of Borehole Filter for In-situ Leaching Uranium

YAO Yixuan, WANG Yaan, XU Guolong, WANG Xing, ZHANG Youpeng, WANG Limin
(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Filtering mechanism and effect of many kinds of filters have been systematically studied. Assuming that the particles are spheroid of equal size and arranged in an inclined cube, the initial minimum pore diameters of gravel filter and porcelain granule pre-coated filter are calculated to be 0.310 and 0.155 mm, respectively. Because of the filtration effect, the pore diameter of gravel filter and porcelain granule pre-coated filter gradually decreases with the extension of time, and the filtration effect is good. The diameter of the hole of the filter without gravel and wrapped with mesh is 0.180～0.270 mm, and the diameter is basically the same after assembly, this filter only has the effect of blocking, and the filtering effect is poor. The hole wall of the filter without gravel or with uncompacted filling may collapse or fall out of sand, and there are too many debris in the leaching solution. Mercury injection test shows the maximum pore throat diameter in sandstone uranium deposit is 0.032 mm, and all filters have no barrier effect on unstable silty clay debris and chemical precipitation.

Key words: in-situ leaching uranium; borehole filter; pore; filtration