

基于碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系

高 洁, 徐乐昌, 魏 鑫, 周 磊

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 铀矿采冶过程产生的铀尾渣中残留有放射性物质, 其持续释放的氡气对人体健康构成潜在危害, 覆盖治理是有效抑氡手段之一。为解决传统覆盖材料长期稳定性不足、成本较高等问题, 本研究提出一种基于碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系, 并在南方某尾矿库开展了现场试验。研究筛选硅酸钠(模数 2.0)为碱激发剂, 矿粉为活性材料, 河砂为细骨料, 确定最优配比为矿粉: 固体硅酸钠: 铀尾渣: 河砂: 水=0.8: 0.2: 1.4: 0.6: 0.5(质量比); 在该配比下, 固化体 28 d 抗压强度达 10.6 MPa。试验表明, 以铀尾渣碱激发固化体为降氡屏蔽层构建的多层覆盖体系, 由保护层、植被层、降氡屏蔽层、导排层和阻隔层构成, 各层通过协同作用实现抗侵蚀、防渗与高效降氡等功能, 5 cm 厚的碱激发固化体降氡效果达 97.85%, 覆盖后氡析出率稳定在 0.187~0.419 Bq/(m²·s), 满足国家标准。该体系抗风蚀、雨水冲蚀及差异性沉降能力优异, 长期稳定性良好。经济性分析结果显示, 该体系的材料成本仅为国内外同类体系的 75%。同时, 通过就地利用铀尾渣实现了资源循环, 兼具环境效益与经济优势, 为铀尾矿库退役治理提供了一种高效可行的技术方案。

关键词: 铀尾矿; 碱激发材料; 放射性废物固化; 氡析出率; 覆盖体系; 长期稳定性; 资源循环利用

中图分类号: TL75; TL942; X591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0134-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.12.17

铀矿采冶过程产生的放射性尾渣, 与大多数其他金属采冶产生的固体废物不同, 其含有较高水平的残留放射性物质^[1-2]。该放射性尾渣向大气环境释放的惰性气体氡, 增加了对人类的辐射危害风险。覆盖法是降低放射性固体废物(如铀尾矿)中氡析出率的最有效的工程措施之一, 覆盖层作为一道物理屏障, 能显著降低氡气的有效扩散系数, 并极大延长氡原子从废物本体迁移至大气的扩散路径和时间。大部分氡在穿过覆盖层之前, 便因停留时间超过其半衰期而发生衰变, 这一机制从源头上有效降低了氡的析出释放量。在对铀废石堆和尾矿(渣)进行治理时, 覆盖法具有屏蔽 γ 辐射以及防止降水入渗、维持退役措施长期稳定性等多重效果^[3-6]。

因环境条件和所采用的覆盖材料不同, 覆盖后达到的氡屏蔽效果也不同。常用覆盖材料有天然材料(如黏性黄土、高岭土、中砂土、废石等)和人工材料(如水泥、砂浆等)^[7-12]。天然覆盖材料强度低、易风化破损, 难以满足铀尾矿降氡覆盖“长期阻隔氡气、抗环境侵蚀、低成本资源化”的核

心需求^[13-14]。人工覆盖材料在尾矿库复杂酸碱盐环境下, 受物理化学因素、水分传输及液相浸溶过程的影响, 容易出现腐蚀劣化现象, 其在长期服役工况下的工程性质和固化修复效果明显下降, 长期稳定性难以保证^[15]。另外, 覆盖材料的选用应综合考虑降氡效果、经济成本、生态环境效应等因素^[16]。

碱激发材料通过碱液活化硅铝质原料形成三维网状结构, 兼具高强度、低渗透性、优良化学稳定性等优势, 且可就地利用铀尾渣作为细骨料, 契合“以废治废”的资源化理念, 同时碱激发材料在复杂环境下的长期稳定性优于传统水泥基材料^[17]。目前, 关于碱激发固化放射性核素的研究较多, 但针对铀尾渣碱激发固化材料组分、制备参数与氡阻隔效率的关联机制探讨不足。本研究聚焦铀尾矿库降氡核心需求, 优化铀尾渣碱激发固化配方, 探究其氡阻隔性能及长效稳定性, 提出一套基于铀尾渣碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系, 并在南方某尾矿库进行了小型试验。

收稿日期: 2025-12-29; **修回日期:** 2026-02-09

通信作者: 徐乐昌

1 试验部分

1.1 试验材料

碱激发固化材料由碱激发剂、活性材料和细

骨料加一定的水配比得到,本研究以硅酸钠为碱激发剂、矿粉为活性材料、河砂(掺杂一定量的铀尾渣)为细骨料制得碱激发固化体。相关试验材料见表 1。

表 1 试验材料
Table 1 Test materials

材料	主要参数	功能	来源
固体硅酸钠	分析纯,含量≥98%	碱激发剂	北京华威锐科化工科技有限公司
矿粉	CaO+SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +MgO>94%	活性材料	河南铂润新材料有限公司
河砂	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ >85%,粒径 1~2 mm	细骨料	拒马河砂厂
铀尾渣	铀质量分数 0.01%,粒径 1.25~1.60 mm		某铀采冶厂

1.2 试验仪器和方法

试验过程中用到的仪器见表 2。

1.2.1 碱激发固化体制备方法

1)预处理

在(105±5)℃下将矿粉、铀尾渣、河砂烘干至恒重,去除游离水。使用行星式球磨机研磨,过

筛,获得目标粒径,保证粉体细度均匀,避免粗颗粒影响试块密实度。

2)碱激发剂配制

按照计算得到的硅酸钠、氢氧化钠、硅溶胶配比,得到不同模数的碱激发剂。溶液配制完成后,静置 24 h 熟化,消除溶液内的气泡。

表 2 试验仪器
Table 2 Experimental instruments

名称	型号	公司
行星式水泥胶砂搅拌机	JJ-5 型	河北科析仪器设备有限公司
水泥胶砂试体成型振实台	ZT-95 型	河北科析仪器设备有限公司
混凝土试验用振动台	ZH·DG-80 型	无锡建仪仪器机械有限公司
电子天平	YP2001 型	上海光正医疗仪器有限公司
标准恒温恒湿养护箱	YH-40B 型	河北科析仪器设备有限公司
测氧仪	RAD7	美国 Durrige 公司
集氧罩		定制

3)试块制备

准备 40 mm×40 mm×160 mm 磨具或 φ50 mm×50 mm 圆柱试模,模具内壁均匀涂抹脱模剂。将预处理后的前驱体粉体倒入搅拌机,干拌 1~2 min,确保粉体混合均匀。接着缓慢加入熟化后的碱激发剂溶液,湿拌 3~5 min,拌合物应呈均匀糊状,无结块、无离析,坍落度控制在 10~20 mm。然后将拌合物装入模具,用捣棒(φ16 mm 圆钢)插捣 20~30 次,边缘部位需补捣,避免产生孔洞。振捣完成后,用刮刀将试块表面刮平,与模具边缘齐平。在进行铀尾渣固化试验时,依据《低、中水平放射性废物固化体性能要求》(GB 14569.1—2011),采用规格为 φ50 mm×

50 mm 的圆柱形试件进行制备与养护。制模后立即将模具固定在振动台上,振动 120 s 后从振动台上取下试模,用刮平尺刮去高出试模的胶砂并抹平、编号。继续将振动成型后的模具放到振实台上振实 60 s,振实完毕取下试模,用金属直边尺将超过试模部分的胶砂刮去。

4)试块养护与脱模

将模具置于室温(20±2)℃环境下,覆盖保鲜膜或湿布,防止水分蒸发开裂;静置 24~48 h 后,使用脱模器缓慢脱模,避免外力冲击导致试块破损。将试块放入养护箱,养护条件为温度 25℃,相对湿度 92%。7 d 后取出,对试块端面进行打磨,以满足后续试验所需的平整度,养护至

28 d,即可进行性能测试。

1.2.2 多层覆盖试验方法

在南方某尾矿库较平坦的区域,选取 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的试验场地,然后让其稳定一段时间(一般 7 d)。采用梅花布点法测量场地覆盖前氡析出率,连续测量 7 d,氡析出率测量时间选在上午 8~10 时,其测量结果可代表日平均值,此后对应的测量点和测量时间保持不变。然后在覆盖试验场地上逐层添加预设厚度的覆盖材料,将松散的覆盖材料压实,测量当前覆盖厚度(X_c)下的氡析出率(F_a)实测值,直至测量值稳定;稳定后再继续测量 5~7 d,得到不同覆盖材料、不同覆盖厚度下的氡析出率实测值。

2 碱激发固化材料的配制

2.1 硅酸钠碱激发剂模数确定

以硅酸钠(Na_2SiO_3)作为碱激发剂,分别选用不同模数(2.0、2.8、3.2)的固体硅酸钠进行固化试验,结果见图 1。可以看出,采用模数为 2.0 的硅酸钠时,所制成的固化体试样的抗压强度最高,达 20.1 MPa。因此,本研究选用模数为 2.0 的固体硅酸钠作为碱激发材料。

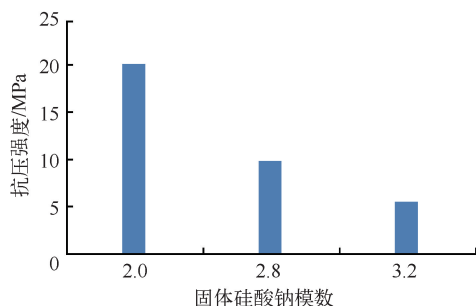


图 1 硅酸钠模数对固化体抗压强度的影响

Fig. 1 Influence of sodium silicate modulus on the compressive strength of solidified bodies

2.2 碱激发固化材料配比研究

以矿粉作为活性材料、固体硅酸钠作为碱激发剂、河砂为细骨料,矿粉与固体硅酸钠的质量比分别设置为 1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1,并固定无机矿物胶、细骨料、水的配比为 1:2:0.5,制备相应的碱激发固化体试样,进行配比研究。试样在温度 $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 92% 的养护箱内养护 28 d 后进行抗压强度测试,探究矿粉与硅酸钠比对固化体试样强度的影响,结果见图 2。可以

看出,当矿粉与硅酸钠的配比为 3:1 时,试样的抗压强度明显高于其他配比的抗压强度,最高值达 83.6 MPa。

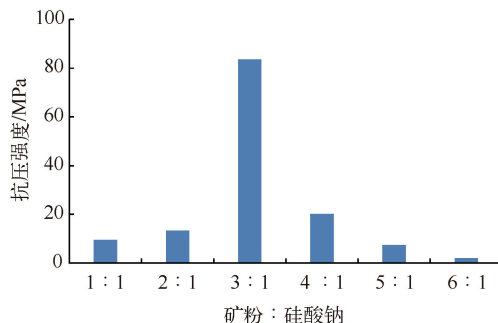


图 2 不同组分配比固化体力学性能

Fig. 2 Mechanical performance of solidified bodies under different component ratios

按照《低、中水平放射性废物固化体性能要求水泥固化体》(GB 14569.1—2011)^[18],水泥固化体试样的抗压强度不应小于 7 MPa。尽管矿粉与固体硅酸钠配比为 3:1 时,固化体抗压强度最高;但考虑到工程应用对材料稳定性和施工可行性的要求,本研究最终选择矿粉:固体硅酸钠=4:1 作为无机矿物胶材料,该配比下其抗压强度仍能满足设计要求。最终确定碱激发固化材料配比为矿粉:固体硅酸钠:河砂:水=0.8:0.2:2:0.5。

3 铀尾渣碱激发固化工序配比

由于铀矿采冶产生了大量的铀尾渣,因此在本研究中往河砂里掺加一定比例的铀尾渣,进行无机固化研究,以实现铀尾渣减容和资源综合利用。在前述研究的基础上(矿粉:固体硅酸钠:河砂:水=0.8:0.2:2:0.5),掺加铀尾渣时,细骨料(河砂+铀尾渣)总量保持 2 不变,通过调整无机固化材料配方,得到最优的铀尾渣碱激发固化配比。

3.1 不同铀尾渣掺加量下固化体的抗压强度

河砂中铀尾渣(粒径 $1.25 \sim 1.60\text{ mm}$)掺加比例为 20%、30%、40%、50%、70%、100% 时,得到的铀尾渣碱激发无机固化体的抗压强度见图 3。可以看出,当铀尾渣掺加量 20% 时,固化体抗压强度最高(63.5 MPa);但从资源循环利用和尾渣减容角度考虑,在确保抗压强度满足标准要求($\geq 7\text{ MPa}$)的前提下,本研究选择铀尾渣掺加

量70%作为最优配比。此配比下,固化体抗压强度为10.6 MPa,兼顾了性能与环保效益。

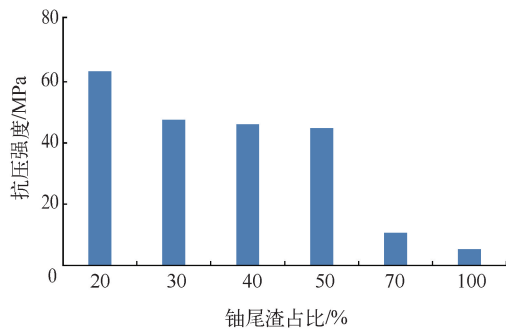


图3 不同铀尾渣掺加量下固化体的抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of solidified bodies under different uranium tailings addition

3.2 不同粒径铀尾渣固化体的抗压强度

控制铀尾渣粒径在0.10~1.25 mm、1.25~1.60 mm、1.60~2.00 mm,河砂中掺加70%的铀尾渣,得到不同粒径铀尾渣碱激发固化体的抗压强度(图4)。可以看出,铀尾渣粒径在1.25~1.60 mm时,抗压强度最大,为45.8 MPa。

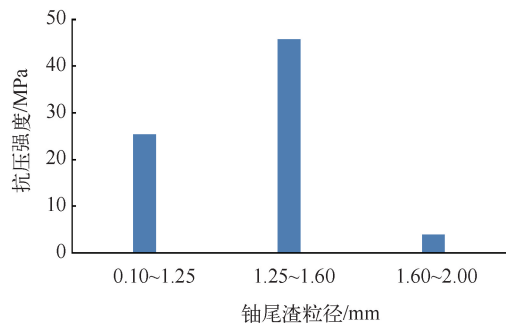


图4 不同粒径铀尾渣固化体的抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of solidified bodies with different particle sizes residues

3.3 铀尾渣碱激发固化工序配方及特性

综上,本研究确定的制备碱激发无机固化体的条件为:活性材料与碱激发剂配比4:1(矿粉:固体硅酸钠)、铀尾渣(1.25~1.60 mm)占细骨料70%,即矿粉:固体硅酸钠:铀尾渣:河砂:水=0.8:0.2:1.4:0.6:0.5。

基于以上配方制备的碱激发无机固化体,其抗压强度为10.6 MPa,浸泡和抗冻融后抗压强度损失≤25%,均满足《低、中水平放射性废物固化体性能要求 水泥固化体》(GB 14569.1—2011)中

关于抗压强度、抗浸泡性、抗冻融性的相关要求。

依据《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)^[19]开展铀尾渣碱激发固化体放射性核素浸出试验。具体步骤:称取100 g破碎后的铀尾渣碱激发固化体,按液固比10:1(L/kg)加入1 L浸出剂(浸出剂由浓硫酸与浓硝酸按质量比2:1混合后稀释配制,pH调节至3.20±0.05),在室温下以110次/min的振荡频率、40 mm的振幅振荡8 h,随后静置16 h。浸出液经过滤后测定其铀浓度,结果显示浸出液中铀质量浓度<1 μg/L,满足《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)^[20]排放口处0.3 mg/L的限值要求。

3.4 最优配方降氡性能研究

按照上述配方制备碱激发尾砂固化体,以其作为覆盖材料,覆盖降氡效果见表3。可以看出,碱激发固化材料的覆盖降氡性能良好,5 cm覆盖厚度的降氡效果高达97.85%;覆盖厚度8 cm时,降氡效率为98.05%,仅比5 cm厚度(97.85%)提高0.2个百分点。因此,从经济角度考虑,优选采用5 cm碱激发尾渣固化体作为覆盖材料。

表3 碱激发固化覆盖降氡效果
Table 3 Alkali-activated curing covering radon reduction effect

覆盖厚度/cm	覆盖前氡析出率/ [Bq/(m ² ·s)]	覆盖后氡析出率/ [Bq/(m ² ·s)]	降氡效率/%
5	3.89±0.02	0.084±0.007	97.85
8	3.89±0.02	0.076±0.010	98.05
12	3.89±0.02	0.062±0.013	98.41
15	3.89±0.02	0.058±0.002	98.51

3.5 材料覆盖厚度和氡析出率的关系

3.5.1 单层材料覆盖厚度与氡析出率的关系

以试验堆覆盖材料前后的氡析出率之比的对数值为自变量,以覆盖厚度(X_c)为因变量,经线性回归或作图法确定斜率(B)和截距(A),确定覆盖厚度与氡析出率的关系式^[21]。

$$X_c = B \ln \left(\frac{F_b}{F_a} \right) + A, \quad (1)$$

式中: X_c —覆盖材料的厚度,m; F_b —覆盖前的氡

析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; F_a —覆盖后的氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; B —氡在覆盖层中的扩散长度, 由线性回归确定, m ; A —与覆盖材料的扩散长度、覆盖材料扩散参数比值有关的系数, 由线性回归确定, m 。

由此计算得出铀尾渣碱激发固化体覆盖厚度与氡析出率的关系为

$$X_c = 0.1304 \ln\left(\frac{F_b}{F_a}\right) + 3.7052 \quad (2)$$

3.5.2 多层材料覆盖厚度与氡析出率的关系

多层覆盖系统的每一层(X_i)都具有各自的特征系数(A_i 、 B_i), 该系数值与覆盖材料本身及其湿度、密度有关。根据式(1), 可以确定多层覆盖材料每层的覆盖厚度。

$$X_i = B_i \ln\left(\frac{F_{b,i}}{F_{a,i}}\right) + A_i \quad (3)$$

式中: X_i —覆盖材料的厚度; $F_{b,i}$ —覆盖前的氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; $F_{a,i}$ —覆盖后的氡析出率,

$Bq/(m^2 \cdot s)$; B_i —氡在覆盖层中的扩散长度, 由线性回归确定, m ; A_i —与覆盖材料的扩散长度、覆盖材料扩散参数比值有关的系数, 由线性回归确定, m 。

以第 i 层覆盖后的氡析出率 $F_{a,i}$ 作为第 $i+1$ 层覆盖前的氡析出率 $F_{b,(i+1)}$, 可求出第 $i+1$ 覆盖层的厚度, 依次类推, 求得每层的覆盖厚度。

4 基于铀尾渣碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系

4.1 体系组成

铀尾矿覆盖降氡不仅要考虑覆盖降氡效果, 还要充分考虑降雨防渗、侵蚀、植物根系侵入、掘穴动物掘洞等对覆盖稳定的长期影响。因此, 在碱激发固化材料覆盖降氡的基础上, 设计包括降氡、抗侵蚀、防渗、隔氧、防侵扰、疏排水等功能的多层覆盖体系(表4)。在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 试验场地, 采用浇筑固化施工工艺, 覆盖碱激发固化体降氡屏蔽层。

表4 基于碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系

Table 4 Uranium tailings multilayer cover system based on alkali activated solidification material

层次及名称	材料	功能	厚度/cm	密实度	渗透系数/(cm/s)	备注
保护层	砖头、废石	保护下层植被层和降氡屏蔽层, 抵御外力冲击、风蚀和动物侵扰	10	0.70		上层
植被层	黄土	抗侵蚀, 防止覆盖层的水土流失和恢复露天采场景观	50	0.80	6.0×10^{-5}	
降氡屏蔽层	碱激发固化体	防渗、隔氧、降氡、防侵扰与破坏	5	0.90	4.5×10^{-6}	
导排层	砾石、粗砂	疏导渗入的地表渗水, 辅助复合防渗层发挥作用	20	0.65	1.2×10^{-3}	砾石比例 30%
阻隔层	黏土、黄土	防渗、隔氧、平整尾矿库表面	30	0.95	4.7×10^{-7}	加黄土量 30%

4.2 多层覆盖体系的降氡性能

在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 试验场地, 采用梅花布点法布设 5 个氡析出率监测点, 覆盖前铀尾矿氡析出率平均为 $(3.89 \pm 0.02) Bq/(m^2 \cdot s)$; 覆盖后每 5 d 测定 1 次该多层覆盖体系的氡析出率, 连续测量 50 d, 结果见图 5。可以看出, 在 50 d 的监测过程中, 氡析出率稳定在 $0.187 \sim 0.419 Bq/(m^2 \cdot s)$, 低于国家标准 $0.74 Bq/(m^2 \cdot s)$ 。结果表明, 该多层覆盖体系具有稳定的降氡效果, 并能满足《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)

的要求。

4.3 多层覆盖体系的长期安全稳定性评估

1) 抗差异性沉降能力

由于该南方某尾矿库堆存的尾矿为干尾矿, 覆盖层采用多层的分层夯实, 从而可将退役治理后的沉降降至最小, 且不会发生因沉降而出现的裂缝。

2) 抗风蚀能力

由 Bagnold 给出的临界起动摩阻风速计算公式^[22]计算抗风蚀能力。

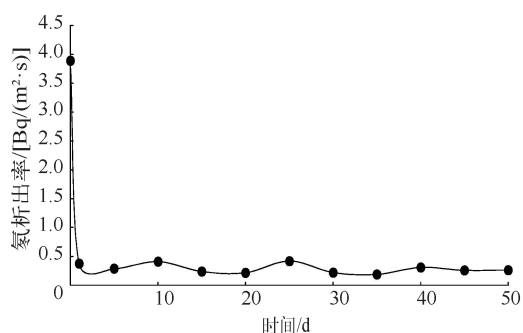


图5 多层覆盖体系氡析出率随时间的变化

Fig. 5 Change of radon exhalation rate in multilayer covering system with time

$$u_s = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d}, \quad (4)$$

式中: u_s —沙粒流体启动风速, m/s; A —常数, 取 0.1; ρ_s —沙粒的密度, 取 2 600 kg/m³; ρ —空气密度, 取 1.29 kg/m³; g —重力加速度, 取 9.8 m/s²; d —颗粒粒径, 取 0.45 mm。

由式(4)可知, 沙粒启动风速为 0.298 m/s。气象观测中通常采用 10 m 处的风速, 因此需要将起动摩擦风速转化为气象风速, 转换关系式为^[23]

$$U = \left| 5.75 \lg \left(\frac{\gamma}{\gamma_1} \right) \right| u_s, \quad (5)$$

式中: U —10 m 高处的气象风速, mm/s, $\gamma = 10\,000$ mm; γ_1 —静风条件下($U=0$)颗粒物能够升高的距离, mm, 其计算式为 $\gamma_1 = 0.0811 g(d/0.18)$ 。

由式(5)可知, 粒径 0.45 mm 颗粒物起尘风速为 9.41 m/s。南方某尾矿库所在地区多年平均风速为 1.3 m/s, 瞬时最大风速为 15 m/s。据 2023 年气象资料统计, 区域内风速 ≥ 6 m/s 的天气占比仅 0.7%, 远低于颗粒物起尘风速, 大风天气发生概率极低。同时, 本研究设计的多层覆盖体系中, 保护层废石与导排层砾石粒径 ≥ 0.45 mm 的占比达 81.4%, 粗粒级配的物料本身抗风蚀能力较强; 加之尾矿库退役后, 黄土覆盖层会自然萌生植被, 形成天然的植被防护层, 进一步强化防风蚀效果。综合气象条件、覆盖层物料级配及自然植被防护的多重作用, 本工程所设覆盖层可有效抵御风力侵蚀, 不会因风蚀出现厚度衰减问题。

3) 抗雨水冲蚀能力

试验地块坡度按 5% 考虑, 地块宽度 10 m。当发生百年一遇降水时, 将地表径流设想为宽 10 m, 径流深度 0.05 m。按明渠均匀流, 近似估算覆盖层表面可能产生的径流流速^[24]。

$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} \sqrt{i}, \quad (6)$$

式中: v —水流速度, m/s; R —水力半径; n —糙率, 取 0.15; i —坡度, 取 5%。

水力半径计算公式为

$$R = \frac{b \times h}{b + 2h}, \quad (7)$$

式中: R —水力半径; b —水面宽度, 取 10 m; h —水深, 取 0.05 m。由式(6)~式(7)计算可知, 当发生百年一遇降水时, $v_{100} = 0.20$ m/s。同理计算, 当发生千年一遇降水时, $v_{1\,000} = 0.46$ m/s。

当覆盖层上的实际径流速度(v)小于允许流速(v_o)时, 覆盖层不会产生雨水冲蚀现象。根据《公路设计手册—路基》^[25], 当铺置草皮时, v_o 为 1.8 m/s; 当植树时, v_o 为 3.0 m/s。退役治理后, 覆盖层上将种植植被。由上述计算可知, 覆盖层在 100 年一遇甚至 1 000 年一遇洪水的冲蚀作用下仍然保持稳定。

植被完好生长期一般为 1 年, 在植被达到正常生长前, 可能会出现边坡的局部冲刷现象。出现的问题可在观察维修期内进行修填, 观察维修期至少为 2 年。综上所述, 该尾矿库多层覆盖体系是稳定的。

4.4 多层覆盖体系的经济性分析

核算了本多层覆盖体系的材料成本, 并与国外同等类型的多层覆盖体系的成本进行对比, 结果见表 5。可以看出, 本项目设计的多层覆盖体系的成本较低, 为国外同等类型覆盖体系成本的 50% 左右。其成本优势主要源于两方面: 一是减少了阻隔层黏土的用量(较传统体系减少 50% 左右); 二是优化了降氡层材料。传统覆盖体系通常采用高压实度黏土实现降氡; 而本项目采用碱激发固化材料与黏土层联合降氡, 且碱激发固化材料以就地铀尾渣为主要原料, 大幅降低了材料成本, 具有较好的经济优势和良好的环境效益。

表 5 多层覆盖体系成本分析
Table 5 Cost analysis of multi-layer overlay system

滩面覆盖	本覆盖 体系		美国科罗拉多州		犹他州		斯洛文尼亚		西班牙	
			Estes Gulch		Monticello		铀尾矿库		铀尾矿库	
	覆盖层 厚度/cm	成本/ 元	覆盖层 厚度/cm	成本/ 元	覆盖层 厚度/cm	成本/ 元	覆盖层 厚度/cm	成本/ 元	覆盖层 厚度/cm	成本/ 元
黏土(氡屏障层)	30	2 880	42	4 032	60	5 760	60	5 760	60	5 760
粗砂(排水/毛细管屏障层)	14	1 582	15	1 695	38	4 294	15	1 695	15	1 695
砾石(侵蚀防护/垫层)	6	630	20	2 100	20	2 100	15	1 575	25	2 625
普通黄土(表土/防冻缓冲层)	50	1 650	90	2 970	130	4 290	110	3 630	95	3 135
废石(基底找平/生物防护层)	10	180	30	540	30	540	25	450	15	270
碱激发固化体(可选化学屏障)	5	125	0	0	0	0	0	0	0	0
土工布(隔离层)	0	0	0	0	0.5	550	0.5	550	0.5	550
膨润土(改性黏土屏障)	0	0	3	1 350	0	0	0	0	0	0
合计	7 047		12 687		17 534		13 660		14 035	
均值 14 479										

5 结论与展望

1)采用碱激发固化体作为覆盖材料,细骨料中铀尾渣掺加比为 70%时,降氡性能很好,5 cm 厚碱激发固化体覆盖层的降氡效果达 97.85%。

2)设计的基于碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系,由保护层、植被层、降氡屏蔽层(碱激发固化体)、导排层和阻隔层组成,可实现抗侵蚀、防渗、降氡、隔氧、防侵扰与破坏、疏排水等功能,有助于实现铀尾矿库覆盖体系的长期稳定有效。

3)基于碱激发固化材料的铀尾矿多层覆盖体系,其材料成本仅为国外同等类型的多层覆盖体系成本的 75%左右。碱激发固化材料就地采用铀矿尾渣,减少了黏土的用量,具有良好的经济效益和环境效益。

4)本研究的监测时间(50 d)较短,后续需开展长期(5 年以上)稳定性跟踪监测。有待进一步深入研究极端暴雨、强风等气候条件下覆盖体系的响应机制和稳定性,以及固化体中放射性核素的长期迁移风险等。

参考文献:

[1] 徐乐昌,戴兴业,唐天征,等.覆盖材料降氡效果的野外确定[J].铀矿冶,1999,18(3):179-184.
XU Lechang,DAI Xingye,TANG Tianzheng,et al.

Determining radon attenuation of covers using field experimentation[J].Uranium Mining and Metallurgy,1999,18(3):179-184.
[2] 刘晓超,曹凤波,徐乐昌,等.中国铀矿冶放射性废物管理战略研究[J].铀矿冶,2024,43(4):72-75.
LIU Xiaochao,CAO Fengbo,XU Lechang,et al. Strategy research on radioactive waste management of uranium mining&metallurgy in China[J].Uranium Mining and Metallurgy,2024,43(4):72-75.
[3] 张辉,徐乐昌,李先杰.铀矿山废石堆与尾矿库覆盖抑氡实验效果对比研究[J].辐射防护,2017,37(5):387-392.
ZHANG Hui,XU Lechang,LI Xianjie. Comparison on radon suppression effects of covering tests between waste rock heap and tailing ponds[J]. Radiation Protection,2017,37(5):387-392.
[4] 张学礼,徐乐昌,邓文辉,等.某铀矿山废石场退役治理[J].核安全,2008,7(2):35-39.
ZHANG Xueli,XU Lechang,DENG Wenhui,et al. Analysis on disposal effects of waste rock piles of an uranium mine after its decommissioning[J]. Nuclear Safety,2008,7(2):35-39.
[5] 吴桂惠,刘陶安.含硫化物铀废石场治理方法研究[J].铀矿冶,2000,19(3):190-193.
WU Guihui,LIU Taoan. Research on treatment methods for sulfide-bearing uranium waste rock sites[J].Uranium Mining and Metallurgy,2000,19

- (3):190-193.
- [6] 多彤欣,牛洁,王扬,等.铀尾矿(渣)的回填及安全处置技术[J].铀矿冶,2025,44(3):136-146.
DUO Tongxin, NIU Jie, WANG Yang, et al. Back-filling and safe disposal technology of uranium tailings (slag) [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(3):136-146.
- [7] 汪弘,何润程,刘永,等.预制裂隙下铀尾矿库土质覆盖层氡析出实验研究[J].辐射防护,2022,42(6):603-610.
WANG Hong, HE Runcheng, LIU Yong, et al. Experimental study on the radon exhalation from the soil overburden of uranium tailing pond under pre-fabricated fractures [J]. Radiation Protection, 2022, 42(6):603-610.
- [8] 胡良才,郭大平,李哲辉,等.某铀尾渣库退役治理覆盖系统设计[J].铀矿冶,2021,40(1):70-75.
HU Liangcai, GUO Daping, LI Zhehui, et al. Design of cover system for decommissioning of uranium mill tailings pond [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(1):70-75.
- [9] 洪昌寿,辛佳怡,李邵,等.低掺量木质素磺酸钙改良红黏土氡气阻滞效果[J].有色金属(冶炼部分),2022(10):109-114.
HONG Changshou, XIN Jiayi, LI Shao, et al. Effect of low content calcium lignosulfonate stabilized red clay on radon retardation [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(10):109-114.
- [10] 袁山琳,邓芝汶,谭文发,等.铀尾矿库滩面覆盖技术国内外现状[J].铀矿冶,2023,42(4):24-31.
YUAN Shanlin, DENG Zhiwen, TAN Wenfa, et al. Research status of uranium tailings pond covering technology at home and abroad [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(4):24-31.
- [11] 邓年彪,丁德馨.基于非支配多目标优化方法的铀尾矿砂覆盖材料优选[J].铀矿冶,2023,42(4):47-52.
DENG Nianbiao, DING Dexin. Preferential selection of uranium tailing sand cover material based on non-dominated multi-objective optimization method [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(4):47-52.
- [12] 邓慧娟,肖德涛,丘寿康,等.膨润土/石灰粉改良土壤的降氡效果[J].辐射防护,2017,37(4):280-286.
DENG Huijuan, XIAO Detao, QIU Shoukang, et al. Reduction of radon exhalation rate through soil modified with bentonite/lime powder [J]. Radiation Protection, 2017, 37(4):280-286.
- [13] MICHAUD A. Long-term performance of radon barriers in limiting radon flux from four uranium mill tailings containment facilities [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2018.
- [14] 刘艳,刘永,徐正华,等.长期高温下铀尾矿库覆土层控氡性能研究[J].中国安全科学学报,2020,30(3):171-177.
LIU Yan, LIU Yong, XU Zhenghua, et al. Research on radon control performance of covering soil in uranium tailings reservoir under long time high temperature [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(3):171-177.
- [15] Solidification/Stabilization Team. Technical/regulatory guidance: Development of performance specifications for solidification/stabilization [M]. Washington D C: The Interstate Technology & Regulatory Council, 2011.
- [16] 谭凯旋,胡寒桥,刘泽华,等.不同覆盖物抑制铀尾矿氡析出的效果[J].矿物学报,2012,32(2):233-237.
TAN Kaixuan, HU Hanqiao, LIU Zehua, et al. An exploration on the effectiveness of suppression of radon exhalation from uranium tailings by using different cover materials [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(2):233-237.
- [17] MOLLA S, JHA S K, ASWAL D K. Utilization of uranium mill tailings in geopolymer production: Feasibility, strength and radiological safety assessment [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2025, 334(10):2757-2765.
- [18] 低、中水平放射性废物固化体性能要求 水泥固化体:GB 14569.1—2011[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [19] 固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法:HJ/T 299—2007[S].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [20] 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.
- [21] 铀矿冶废石、尾矿土质覆盖厚度及降低氡析出率的计算方法:EJ/T 1128—2001[S].北京:中国核工业总公司,2001.
- [22] 冯大军.风沙流中不同粒径沙粒的运动特征和输移规律研究[D].北京:北京大学,2009.
- [23] 张利文,白志鹏,郭光患,等.开放源对环境空气质量影响的评估技术与实例[J].环境科学研究,2006,19(3):18-23.
ZHANG Liwen, BAI Zhipeng, GUO Guanghuan, et

- al. Evaluation method of effect of open sources to urban ambient air quality and a case study[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(3): 18-23.
- [24] 李伟. 水力计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 34.
- [25] 吴万平, 廖朝华. 公路路基设计手册[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2006: 462-465.
- [26] GREGORY M. SMITH. Evolution of disposal cell cover design used for uranium mill tailings long-term containment [C] // WM'99 Conference. Department of Energy Grand Junction Office, Grand Junction, Colorado, 1999.
- [27] WAUGH W J, KASTENS M K, SHEADER L R L et al. Monitoring the performance of an alternative landfill cover at the Monticello, Utah, uranium mill tailings disposal site [C] // WM2008 Conference. Phoenix, AZ, 2008.
- [28] ŽAGAR T, KOGEJ T. Long-term performance assessment of the Jazbec uranium tailings repository cover system in Slovenia [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 304(3): 1245-1252.

Uranium Tailings Multi-layer Covering System Based on Alkali-activated Solidification Materials

GAO Jie, XU Lechang, WEI Xin, ZHOU Lei

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Uranium tailings produced by mining and smelting contain residual radioactivity, and the released radon gas is harmful to human. Covering control is an effective means to inhibit radon. In order to solve the problems of insufficient long-term stability and high cost of traditional covering materials, this study proposed multi-layer covering system based on alkali-activated solidification materials for uranium tailings, and carried out the trial in a tailings pond in the south of China. The selected sodium silicate (with a modulus of 2.0) as the alkali activator, mineral powder as the active material, and river sand as the fine aggregate, determined the optimal mix proportion as mineral powder : solid sodium silicate : uranium tailings (1.25—1.60 mm) : river sand : water = 0.8 : 0.2 : 1.4 : 0.6 : 0.5 (mass ratio), with a compressive strength of 10.6 MPa for the solidified body at 28 days. With the alkali-activated solidified body of uranium tailings as the radon shielding layer, the test shows that the radon reduction efficiency of the 5 cm thick alkali-activated solidified body reaches 97.85%. The multi-layer covering system constructed with the alkali-activated solidified body of tailings as the radon shielding layer consists of a protective layer, a vegetation layer, a radon shielding layer, a drainage layer and a barrier layer, which has functions such as corrosion resistance, seepage prevention, radon reduction, etc., and the radon excretion rate after covering is stable within 0.187—0.419 Bq/(m³·s), which meets the national standard. This system has excellent resistance to wind erosion, rainwater scouring and differential settlement and has good long-term stability. Economic analysis shows that the material cost of this system is only 75% of the same system at home and abroad, and the local of uranium tailings to achieve resource recycling has both environmental benefits and economic advantages, providing an efficient and feasible technical scheme for the decommissioning and treatment of uranium tailings pond.

Key words: uranium tailings; alkali activated materials (AAMs); solidification of radioactive waste; radon exhalation rate; cover system; long-term stability; resource recycling utilization