

# 硬岩铀矿山维持维护期间的环境管理

梁家玮<sup>1</sup>, 刘晓超<sup>2</sup>, 孙娟<sup>2</sup>, 张学礼<sup>3</sup>, 吴尚文<sup>2</sup>

(1. 中国铀业有限公司, 北京 100013;  
2. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021;  
3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

**摘要:** 硬岩铀矿山是中国天然铀产能的重要组成部分。由于政策调整, 当前硬岩铀矿多处于维持维护状态, 矿石开采和水冶工序等生产设施停止运行, 仅保留尾矿(渣)库、废水处理等设施维持运转。硬岩铀矿维持维护期放射性废物排放量与生产期放射性废物排放量有较大差异, 其源项数量和释放量总体减少, 对周围环境和公众的辐射影响明显降低, 某典型硬岩铀矿山停产后氡浓度和个人剂量贡献值降幅达 25.4%~44.5%。根据维持维护期间的源项特征, 提出了硬岩铀矿山在维持维护期间的环保措施优化建议, 以实现源项削减目标, 并给出了流出物和环境监测调整优化方案, 确保在人力减少、维持维护工作量增加的情况下, 及时发现问题, 保障停产矿山的辐射安全可控。

**关键词:** 硬岩铀矿; 维持维护期; 环境影响; 环境管理; 监测

**中图分类号:** TL943 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0106-06

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.02.01

天然铀是重要战略资源, 是国防安全的重要基石。中国铀矿采冶工作始于 20 世纪 50 年代, 早期以南方硬岩铀矿山的常规开采方式为主, 通过地表逐层开采或开挖巷道, 将矿石运送到地面后经过破碎、浸出、回收等工序, 最终获得天然铀产品<sup>[1]</sup>。进入 20 世纪 80 年代, 大规模推广地表堆浸技术, 使铀矿采冶技术得到提高和推进<sup>[2]</sup>。

铀矿采冶过程产生的放射性废水、废气和固体废物给周围环境带来一定的安全隐患。经过多年开发利用, 硬岩矿山已探明和易开采资源占比减少, 且硬岩矿山多处于生态较敏感区, 安全环保压力大。大部分硬岩矿山于 2016 年后陆续停产, 进入维持维护状态<sup>[3]</sup>。由于开采和水冶活动停止, 放射性废气、废水、废物的产生与排放也发生了很大的变化。因此, 研究硬岩铀矿山维持维护期废气、废水、废物排放特点, 优化环境管理措施, 具有重要意义。

## 1 硬岩铀矿废气、废水、废物排放特点

### 1.1 生产期废气、废水、废物排放

硬岩铀矿的生产工艺一般包括开采和水冶工艺过程。根据矿区地形条件、矿床赋存特点、岩性等不同, 开采方式主要分为露天开采、地下开采, 涉及采掘、通风、提升运输、供排水、供配电等生产系统<sup>[4]</sup>。水冶是将开采的铀矿石加工成铀化学浓缩物的工艺过程, 包括常规水冶、地表堆浸、原地爆破浸出等过程, 主要有原矿仓、粉矿仓、破碎厂、磨矿厂、浸出设施、废水处理设施和尾矿(渣)库设施等。硬岩铀矿废气、废水、废物主要来源包括氡气、铀尘、气溶胶等放射性废气、放射性废水和固体废物。

#### 1.1.1 放射性废气

生产期放射性废气主要包括回风井排出的氡及含铀粉尘, 矿石破碎产生的氡及含铀粉尘, 以及尾渣库、尾矿库、废石场表面析出的氡等。其中,

**收稿日期:** 2024-02-23

**第一作者简介:** 梁家玮(1984—), 男, 吉林长春人, 硕士, 高级工程师, 主要从事铀矿地质、矿冶退役治理项目管理  
工作。

**通信作者简介:** 刘晓超(1972—), 男, 河北衡水人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事环境评价和环境保护工程设计  
工作。

井下主要采取喷雾洒水湿式作业、通风排氡、密闭废弃巷道<sup>[5-7]</sup>和采空区等措施控制氡及含铀粉尘的产生,确保回风井排出地表的废气中<sup>222</sup>Rn浓度和铀尘浓度达标;破碎、磨矿和水冶厂房采用除尘通风系统对产生的<sup>222</sup>Rn、铀尘和气溶胶进行处理;尾矿(渣)库、堆浸场、废石场、矿仓及露天采场滩面废气,多以自然通风方式排放。

### 1.1.2 放射性废水

生产期放射性废水主要为各矿井产生的矿井水、水冶厂工艺废水,以及尾矿库流出水和尾渣库渗水等。其中,矿井废水主要采用离子交换吸附工艺进行处理,处理合格的矿井废水就近排入矿井周边地表水体;工艺废水和尾矿(渣)库渗水多合并处理,采用氯化钡除镭+石灰中和除铀方式,处理达标后槽式排放至附近水体<sup>[8]</sup>。

### 1.1.3 固体废物

矿石开采及水冶产生的放射性固体废物主要包括各矿井采出的废石、水冶尾矿(渣)、废水处理渣等。开采过程产生的部分废石作为井下回填材料利用,其他废石运至地表专用废石场堆放;水冶厂产生的尾矿(渣)经石灰中和后与废水处理渣一并送尾矿(渣)库堆置。

### 1.2 维持维护期源项变化

铀矿冶生产期产生的废石、废渣、采矿废墟、废液等具有放射性,对环境会造成影响<sup>[9-10]</sup>。矿山停产后,铀采冶生产活动全面停止<sup>[11]</sup>,源项和废气、废水、废物产生量均有明显变化,部分废气、废水和固体废物不再排放,各源项总体释放量降低。硬岩铀矿生产期和维持维护期放射性源项对照情况见表1。

表1 硬岩铀矿生产期和停产期放射性源项对照

Table 1 Comparison of radioactive source terms during the production and shutdown periods of hard rock uranium mines

设施	类别	来源	源项	生产期	停产期	释放量		
开采设施	气态源项	矿井废气	氡及其子体	√	√	↓		
			铀尘	√	×	↓		
	液态源项	矿井废水	—	√	√			
			固体废物	废石	—	√	×	↓
水冶设施	气态源项	破碎/磨矿厂房	氡及其子体	√	×	↓		
			铀尘	√	×	↓		
		常规水冶厂房	氡及其子体	√	×	↓		
			气溶胶	√	×	↓		
	露天采场、废石场、矿仓、堆浸池、尾矿(渣)库等	—	氡及其子体	√	√			
			液态源项	水冶工艺废水	—	√	×	↓
			尾矿流出水、尾渣渗水	—	√	√		
			固体废物	尾矿(渣)	—	√	×	↓
				废水处理沉渣	—	√	×	↓

由表1可看出,硬岩铀矿山进入维持维护阶段,放射性源项主要包括矿井、矿仓和堆浸池等暂未卸堆的物料和尾矿(渣)滩面等自然释放的氡气,以及矿井废水、尾矿库流出水和尾渣库渗水。其中,由于井下机械通风设施运行停止,矿井废气仅由风井等设施自然释放,释放量远小于生产期;露天采场、废石场、矿仓、堆浸池、尾矿(渣)库等滩

面,在裸露面积不变的情况下,氡气释放量基本无变化;井下不再进行机械抽排水,矿井废水排放量减少;尾矿库流出水和尾渣库渗水多为积水和自然降雨淋滤下的排水,排放量也基本不变。根据2012—2020年间全国14座铀矿冶设施的调查结果<sup>[12]</sup>,得出当前国内分别处于生产期和维持维护期的硬岩铀矿山主要流出物排放情况(表2)。

表 2 生产期和维持维护期硬岩铀矿山主要流出物释放量对照

Table 2 Comparison of main effluent releases during the production and shutdown periods of hard rock uranium mines

设施类型	排风(井)口氡浓度/(kBq/m <sup>3</sup> )		氡释放量/(Bq/a)	液态源项释放量/(Bq/L)	
	范围	均值		U	<sup>226</sup> Ra
生产矿山	0.68~127.80	25.59	$4.47 \times 10^{14}$	$7.18 \times 10^9$	$1.33 \times 10^9$
关停矿山	0.96~14.13	6.02	$2.61 \times 10^{14}$	$6.34 \times 10^9$	$1.56 \times 10^9$

## 2 维持维护期的环境影响

### 2.1 源项确定

某硬岩铀矿山于 2016 年 12 月停产,生产阶段放射性源项包括回风井、尾渣库、堆浸池、矿仓

和废石场;停产后回风井等设施仍有氡气释放,源项为回风井、尾渣库、堆浸池、矿仓和废石场。监测数据显示,堆浸池、尾渣库、矿仓和废石场在生产期和维持维护期源项强度不变,以回风井为中心,各阶段气态源项参数见表 3~表 4。

表 3 各阶段气态源项参数(回风井、点源)

Table 3 Gas source parameters during different stages (return air well, point source)

阶段	坐标/km		排放高度/m	出口半径/m	排放温度/℃	风量/(m <sup>3</sup> /s)	风速/(m/s)	氡浓度/(kBq/m <sup>3</sup> )	<sup>222</sup> Rn 释放量/(Bq/a)
	x	y							
运行期	0	0	0	1.6	20	60	7.46	13.126	$2.48 \times 10^{13}$
维持维护期	0	0	0	1.6	20	1.61	0.2	9.82	$4.99 \times 10^{11}$

表 4 气态源项参数(面源)

Table 4 Gas source term parameters (surface source)

源项	坐标/km		滩面面积/m <sup>2</sup>	等效半径/m	氡析出率/[Bq/(m <sup>2</sup> ·s)]	氡释放量/(Bq/a)
	x	y				
尾渣库	-0.567	0.041	$9.6 \times 10^3$	55.3	0.96	$2.63 \times 10^{11}$
堆浸池	-0.323	0.079	$1.2 \times 10^4$	61.8	0.96	$3.28 \times 10^{11}$
矿仓	-0.188	0.071	$1.0 \times 10^3$	17.8	0.69	$1.97 \times 10^{10}$
废石场	-0.375	0.031	$2.5 \times 10^3$	28.2	0.69	$4.92 \times 10^{10}$

### 2.2 辐射评价方法

各气态源项氡的释放导致周围环境的浓度增加,氡吸入导致公众照射剂量增加。采用 AER-MOD 模式评价氡气在大气中的扩散,在该模块中设置气象参数、地形参数、源项参数和受体参数等,运行得到各计算点的空气中核素浓度。氡吸入所致公众个人剂量计算公式为<sup>[13]</sup>

$$D_{Rn}^a = T \cdot C_{Rn} \cdot DF_{Rn}, \quad (1)$$

式中: $C_{Rn}$ —<sup>222</sup>Rn 活度浓度, Bq/m<sup>3</sup>;  $T$ —受照时间, h, 全年取 8 760 h;  $DF_{Rn}$ —<sup>222</sup>Rn 及其子体剂

量转换因子,取  $2.44 \times 10^{-6}$  mSv/(Bq·h·m<sup>-3</sup>)。

### 2.3 辐射环境影响

以评价中心回风井周围 2 km 内的居民点为计算点,该矿生产期和维持维护期所致计算点空气中氡浓度和公众个人剂量见表 5,各源项对最大个人剂量贡献情况见表 6。可以看出,停产后该矿山气态源项所致氡浓度和公众个人剂量降低幅度达 25.4%~44.5%,辐射环境影响明显降低,各源项贡献比例也有改变。

表5 不同阶段源项所致计算点空气氡浓度及公众个人剂量

Table 5 Air radon concentration and individual dose to the public at different stages caused by source terms

方位	距离/km	生产期		维持维护期		降幅/%
		氡浓度/(Bq/m <sup>3</sup> )	剂量/(mSv/a)	氡浓度/(Bq/m <sup>3</sup> )	剂量/(mSv/a)	
W	0.51	$1.01 \times 10^{-1}$	$2.16 \times 10^{-3}$	$7.09 \times 10^{-2}$	$1.52 \times 10^{-3}$	29.6
NE	1.00	$8.10 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-3}$	$4.89 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^{-3}$	39.3
SE	1.50	$4.20 \times 10^{-2}$	$8.98 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-2}$	$4.98 \times 10^{-4}$	44.5
ENE	1.91	$9.62 \times 10^{-3}$	$2.06 \times 10^{-4}$	$5.61 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-4}$	41.7
SSW	2.00	$4.69 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$3.49 \times 10^{-2}$	$7.46 \times 10^{-4}$	25.4

表6 不同阶段各源项对公众最大个人剂量的贡献情况

Table 6 Contribution of each source term to the maximum individual dose of the public at different stages

	源项	回风井	尾渣库	堆浸场	矿仓	废石场	合计
		生产期	贡献值/(mSv/a)	$6.48 \times 10^{-4}$	$7.17 \times 10^{-4}$	$6.93 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-5}$
	贡献份额/%	30.0	33.2	32.1	1.0	3.7	100
维持维护期	贡献值/(mSv/a)	$3.19 \times 10^{-5}$	$7.00 \times 10^{-4}$	$6.77 \times 10^{-4}$	$2.19 \times 10^{-5}$	$7.87 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-3}$
	贡献份额/%	2.1	46.4	44.8	1.5	5.2	100

### 3 维持维护期的环保措施优化

根据《铀矿冶辐射防护与辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)<sup>[14]</sup>,铀矿冶企业关停前应制定相关的环境保护工作方案,保证运行维护放射性污染防治设施所需的人员和资金,确保铀矿冶设施处于受控状态;在铀矿冶企业关停期间,应加强铀尾矿(渣)库和废石场的管理,防止铀尾矿、废石和堆浸渣的流失。

关停后的硬岩铀矿山生产设施停止运行,维持运转的主要包括放射性废水处理系统、尾矿(渣)库、废石场等处理设施,虽源项减少、辐射环境影响有所降低;但部分环保措施仍有优化空间,包括:1)及时清空转运和集中堆存矿石仓、堆浸池、破碎/水冶车间等生产设施的遗留物料,减少无组织排放;2)采取临时覆盖或表面硬化措施,减少堆浸池、尾渣库等滩面裸露,避免氢气析出和向空气中自然释放;3)封堵井下已采空巷道,减少矿井水外溢;及时封堵排风井口,减少氢气排放;4)做好对尾矿(渣)库、废石场等的日常监护,确保设施安全和辐射安全;各类设施及时摸排隐患,减少应急风险;5)及时整治与修复设施周边已污染的工业场地、土壤(农田)、水体等,避免污染范围进一步扩大。

采取上述措施后,可进一步实现源项削减,部分措施在维持维护矿山已有良好实践。

### 4 流出物与环境监测优化

在铀矿冶企业维持维护期,应继续开展流出物和环境监测;但由于矿山开采和水冶活动停止,应对流出物和环境监测进行优化。

#### 4.1 流出物监测

鉴于水冶生产停止,因此对于废水仅监测矿井排水、尾矿库流出水和尾矿库渗水。矿井水不涉及铀矿浸出活动,应重点监测  $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  浓度,考虑到丰水期与枯水期地下水的水量变化,每季度监测 1 次; $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Po}$  作为关注性指标,可每年监测 1 次,掌握基本情况。尾矿库流出水和尾矿库渗水应进行  $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和重金属的监测, $U_{\text{天然}}$  应坚持每槽一测;由于没有新的尾矿(渣)进入库区, $^{226}\text{Ra}$  作为尾矿(渣)中重要放射性核素,考虑丰水期与枯水期的变化,每季度监测 1 次;而 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和重金属可根据旱季与雨季,半年监测 1 次。

废气主要来自物料和固体废物暂存场所氡的释放。鉴于物料和固体废物不再周转或新增,因此其排放特性也不再发生变化,因此每年在冬季等最不利气象条件下,进行 1 次氡浓度和氡析出

率的监测。由于地下开采停止,排风井氡的监测可每年进行2次,其中1次选择冬季等不利气象下监测。对于 $\gamma$ 辐射剂量率,每年监测1次即可。

#### 4.2 环境监测

地表受纳水体受外部环境影响较大,因此对地表水体每年监测2次,其中1次应选择在冬季或旱季等不利条件下进行;监测因子应考虑 $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 等长寿命放射性核素和重金属。地下水、土壤或底泥、生物等受外部条件影响小,变化缓慢,因此监测周期可放宽到每年1次,地下水的监测因子可与地表水保持一致,而土壤或底泥、生物应重点监测 $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 。大气环境主要监测居民点的氡及其子体,每年选择在冬季等不利条件下监测1次。对于居民点与周围土壤的 $\gamma$ 辐射剂量率,每年监测1次即可。

由于矿山维持维护工作量较大,为进一步减少辐射影响,降低环境安全隐患,可参照铀矿冶退役设施长期监护方法<sup>[15-16]</sup>,加快建立此类设施的环境监管制度体系,提高环境管理意识,强化环境管理手段,确保停产矿山的辐射安全可控。

## 5 结论

1)硬岩铀矿山维持维护状态下,废气、废水、废物排放量明显减少,辐射环境影响有一定程度的降低,各矿山辐射环境质量总体向好。以某典型硬岩铀矿山为例,其气态源项氡释放量降低,所致公众个人剂量降幅达25.4%~44.5%。

2)虽然维持维护期的硬岩铀矿山辐射环境影响减少,但回风井、工业场地、尾矿(渣)库等设施仍多露天释放,放射性源项仍会持续向环境释放,未降低至辐射影响最小化水平。

3)为进一步减少辐射影响,可参照铀矿冶退役设施长期监护方法,加快建立此类设施的环境监管制度体系,提高环境管理意识,强化环境管理手段,确保停产矿山的辐射安全可控。

#### 参考文献:

[1] 王海峰,邢拥国,汤庆四.世界地浸采铀矿山生产动态[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第

三卷)——中国核学会2013年学术年会论文集:第2册.北京:中国原子能出版社,2013.

- [2] 潘英杰,徐乐昌,刘晓超,等.铀矿冶放射性废物最小化[M].北京:中国原子能出版社,2014.
- [3] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1848.
- [4] 薛希龙,戴勇,范永亮,等.硬岩铀矿无废协同开采模式及技术研究[J].金属矿山,2020(5):95-100.
- [5] 陈刚,胡鹏华,李先杰,等.某典型火山岩型铀矿井通风降氡及降温综合措施分析[J].铀矿冶,2019,38(1):80-84.
- [6] 李先杰,张哲,胡鹏华.论中国铀矿通风降氡技术研究[J].铀矿冶,2022,41(2):191-193.
- [7] 李先杰,张哲,胡鹏华,等.我国铀矿通风降氡的发展历程[J].辐射防护,2021,41(1):9-15.
- [8] 张黎辉.中国铀矿冶放射性污染防治“十三五”规划思路研究[J].环境科学与管理,2017,42(12):183-186.
- [9] 赵其文,王国全.新疆伊犁铀矿冶退役场所辐射环境影响现状调查[J].辐射防护,2015,35(4):253-256.
- [10] 覃国秀,刘庆成,刘毅,等.某铀矿山退役分矿环境放射性现状调查[J].铀矿地质,2009,25(1):60-64.
- [11] 岑旭,彭崇,郭凯行,等.广西某铀矿流出物和周围水体放射性水平现状监测及评价[J].广东化工,2022,49(7):162-164.
- [12] 徐乐昌,张学礼,孙娟,等.铀矿冶辐射环境现状调查与评价[R].北京:核工业北京化工冶金研究院,2020.
- [13] BRENNER D J. Publication 65: Protection against radon-222 at home and at work. ICRP publication 65[J]. International of Radiation Biology, 2009,66(4):413-413.
- [14] 生态环境部,国家市场监督管理总局.铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定:GB 23727—2020[S].北京:中国环境出版集团公司,2020.
- [15] 刘晓超,谢占军,詹乐音,等.铀矿冶退役设施长期监护现状与建议[J].铀矿冶,2023,42(2):83-88.
- [16] 刘晓超,杜娟.铀矿冶退役设施的长期监护管理[J].铀矿冶,2012,31(3):162-163.

