

# 某酸法地浸铀矿山氡释放特征研究

王亚兰<sup>1</sup>, 徐乐昌<sup>1</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 周磊<sup>1</sup>

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中核资源发展有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 以某酸法地浸铀矿山为对象, 开展了酸法地浸采铀源项氡浓度、氡释放量, 以及环境氡迁移扩散趋势等释放特征研究。采用 E-Perm 驻极体探测器法、固体径迹探测器法、RAD7 静电收集测氡法, 对地浸铀矿山抽液孔、集液罐、水冶厂通风口、蒸发池源项及周边环境的氡浓度进行了监测。结果表明, 该地浸铀矿山氡释放量约为 1.75 TBq/a, 水冶厂通风口和集液罐是重要的氡释放源项, 其年氡释放量分别占地浸铀矿山年氡释放量的 58% 和 39%; 抽液孔和蒸发池的年氡释放量占地浸铀矿山年氡释放量的 3%; 集液罐开口处氡浓度水平最高, 其对环境的影响范围不超过 500 m; 抽液孔氡浓度水平最低。该酸法地浸铀矿山归一化氡释放量远小于地下矿山排风井的归一化氡释放量。

**关键词:** 地浸采铀; 氡释放; 氡浓度; 酸法; 驻极体探测器; 固体径迹探测器; RAD7 静电收集探测器

**中图分类号:** TL75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)03-0093-07

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.01.03

在漫长的地质年代中, 含铀地层中的<sup>226</sup>Ra 与<sup>238</sup>U 长期处于平衡状态。由于铀和镭的化学特性不同, 在铀镭平衡中可能出现偏铀或偏镭现象, 但波动范围较小。<sup>226</sup>Ra 衰变产生的<sup>222</sup>Rn 多存在于岩石矿物的空隙中或溶解在地下水中, 由于<sup>222</sup>Rn 半衰期仅为 3.825 d, 约 1 个月<sup>222</sup>Rn 即与铀矿岩层中的<sup>226</sup>Ra 达到平衡。

地浸采铀时,<sup>222</sup>Rn 随含铀地下水被抽至地表, 因压力释放、温度升高、动力搅动等而大量释放, 释放的<sup>222</sup>Rn 主要由岩石矿物中的<sup>226</sup>Ra 衰变产生。氡气一般随大气运动而迁移、扩散和沉降, 并伴随自身衰变, 其污染过程与污染物的浓度、排风高度、当地气象特征等相关。氡及其子体是主要的职业病危害因素, 对公众的集体剂量贡献最大<sup>[1-2]</sup>。因此氡是铀矿开采中最受关注的放射性核素之一, 需要对其进行监测和控制。

国内外针对铀矿采冶和铀矿通风井氡的释放特征进行了研究。李孝君掌握了新疆某地浸铀矿氡的析出特征; 并采用 UAIR-FINE 软件模拟, 得到了集液池、蒸发池 20 km 范围内各子区的氡浓度贡

献值分布、公众个人剂量分布、公众集体剂量<sup>[3]</sup>。龙慧佳等采用单点采样法和插值积分程序, 对某铀矿通风井排放口的氡浓度、风速分布进行测量<sup>[4]</sup>。张辉等采用理论模型推算了氡释放浓度特征, 并与现场实测数据进行比较, 得出地浸过程氡归一化释放量仅为地下开采过程氡释放量的 1/4 左右<sup>[5]</sup><sup>326</sup>。Mudd 对比分析了澳大利亚铀矿采冶过程的累积氡释放量的实测值和 UNSCEAR 法的计算值<sup>[6]</sup>。也有学者建立了矿井通风网络中氡、氡子体、风量及风压的联合计算模型, 实现了对矿井巷道、作业面的氡浓度及氡子体浓度的预测<sup>[7]</sup>。

为确定酸法地浸采铀源项氡浓度、释放量、变化趋势等特征, 假设地下水中的氡全部释放。按该源项确定方法估算辐射环境影响水平, 旨在为铀矿冶氡释放量标准的制定提供源项数据, 促进地浸采铀矿山的持续发展。

## 1 氡释放途径和源项分析

### 1.1 氡释放途径分析

在铀矿山地浸过程中, 氡污染物是随采铀工

收稿日期: 2024-01-10

第一作者简介: 王亚兰(1986—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 高级工程师, 主要从事铀矿冶辐射防护和环境保护工作。

艺过程而产生的。在较大地压条件下,铀矿伴生的氡溶解在浸出液中,部分氡随着浸出液从抽液井抽至地面并经由抽液井释放。当浸出液进入集液罐时,因压力降低,浸出液中的氡被迅速释放到集液罐,通过集液罐开口释放到周围的大气环境中。当浸出液随输液管进入水冶厂时,水冶工序析出的氡通过水冶厂房通风设备由屋顶排风口排放到大气环境。当部分吸附尾液排放到蒸发池,吸附尾液中的氡及其子体随尾液蒸发及干滩面残渣析出<sup>[8]</sup>。配液罐、注液井为封闭结构,氡释放量可忽略不计。综上所述,酸法地浸矿山主要氡释放源项为抽液井、集液罐、水冶厂和蒸发池。

## 1.2 氡释放源项概况

从酸法地浸采铀抽液井、集液罐、水冶厂和蒸发池等4个主要源项出发,调查酸法地浸矿山的氡释放浓度和释放量等释放特征。

### 1.2.1 抽液井

该矿山抽液井采用大口径填砾式结构,钻孔直径311 mm,套管规格 $\phi 148\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ ,采用半封闭结构。

### 1.2.2 集液罐

集液罐建在原混凝土集液池的池底上,罐体直径约7 m、高约3 m、容积约300 m<sup>3</sup>,集液罐顶部有直径50 cm的开口,配有法兰;浸出液液面位于开口处1 m以下。集液罐与集控室临近,用于收集和暂存浸出液,集液罐中的浸出液通过集液泵输送至水冶厂吸附塔。

### 1.2.3 水冶厂

水冶厂房包括吸附区、沉淀区、自控室及空压机房等,共有12个排风口。水冶厂房通风设施主要包括:过滤区风机3台,排风口风机流量为7 458 m<sup>3</sup>/h;产品沉淀区风机3台,排风口风机流量为10 200 m<sup>3</sup>/h;化验室风机1台,排风口风机流量为7 458 m<sup>3</sup>/h;吸附、饱和再吸附、淋洗、回收吸附等离子交换工序共用风机5台(其中2台风机的排风口风机流量为10 200 m<sup>3</sup>/h,3台风机的排风口风机流量为7 458 m<sup>3</sup>/h)。

### 1.2.4 蒸发池

该矿山蒸发池总面积约1.7万m<sup>2</sup>,蒸发池采用梯形断面,用于接收水冶工艺产生的吸附尾液。池底铺设复合土工膜作为防渗层,膜上铺夯实黏土作为保护层。

## 2 研究方法

### 2.1 监测仪器

E-Perm 驻极体测氡仪适用于多种湿度( $RH\% < 100\%$ )和温度( $T < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )环境,其灵敏度高,采样操作方便,采样周期短,采样现场不用电源,可成批布点和交替采样,广泛应用于环境和矿井氡浓度、建筑材料和尾矿堆氡析出率的测量<sup>[9]</sup>。其最大优势是驻极体探头与读数器可分离,可实现多点位同时测量、同步测量;在对不同距离的源项进行测量时,可排除测量时间不同步造成的影响。驻极体测氡为短期累积测量,一般需要累积照射5~8 h。

固体径迹探测器采用KF606B型氡和 $\gamma$ 个人剂量计,具有探测下限低、测量结果稳定、重现性好,操作简便、测量期间不需要电源等特点,探测器的体积小,便于布放和邮寄,避免了由于时间、气象因素变化带来的影响<sup>[10]</sup>。固体径迹探测器的应用率逐年增加,已成为环境氡测量的主要手段之一<sup>[11]</sup>。该方法可实现多点同时测定,可进行环境水平氡浓度的长期累积测量,直接得到被测场所氡的长期(季/年)平均浓度。其适用于大批样品的采集和集中处理与测读;但其测量周期较长,在低浓度下,结果波动较大。

RAD7 测氡仪稳定性好、抗干扰性好、精度高,可快速进行瞬时或连续氡浓度监测,能现场打印测量结果;但需要配备干燥剂,测量样品数量有限。当短时间(小于30 min)测量时,样品间测量结果有干扰,下一样品的测量结果偏高<sup>[12]</sup>。

### 2.2 监测方案

#### 2.2.1 抽液井

在抽液井,氡通过钻井未封闭部分自由释放。采用RAD7 测氡仪进行抽液井瞬时氡浓度的短期累积监测,布设抽液井监测点位45个。

#### 2.2.2 集液罐

在集液罐,氡通过罐顶部的开口自由释放,属于无组织排放。采用E-Perm 驻极体测氡仪进行集液罐氡浓度调查,驻极体点位布设在罐顶部开口处4个方位、距离中心点3 m处,在布点处进行短期累积氡连续监测。

为确定集液罐氡释放对周边环境的影响,开展了集液罐周边环境氡迁移扩散规律调查,采用固体径迹蚀刻法以累积氡方式开展不同方位、不

同距离氡浓度分布规律研究,集液罐监测方案见表 1。监测范围包括集液罐周边较大风频(东风)、较小风频(西北风)及介于两者之间风频(北风)的上下风向 50、100、300、500、1 000 m 处,即 6

个方位、5 个距离,共 30 个测点(图 1)。监测时间间隔最短 40 d,最长 85 d,得到 30 组有效累积氡活度浓度数据。

表 1 集液罐监测方案

Table 1 Radon concentration monitoring scheme for leaching tank

监测对象	监测方法	监测仪器	监测期	点位数/个
集液罐开口处	驻极体法	E-Perm	短期累积监测	5
集液罐周围环境	固体径迹蚀刻法	KF606B	40~85 d 累积监测	30

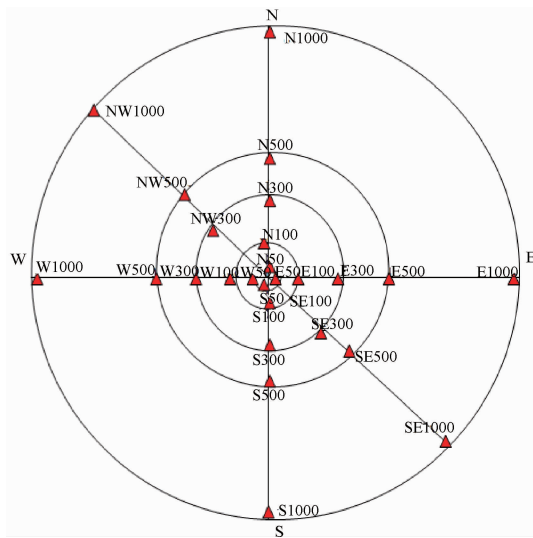


图 1 集液罐周边环境氡浓度布点示意图  
Fig. 1 Monitoring points distribution of radon concentration around the leaching tank

### 2.2.3 水冶厂

在水冶厂排风口,氡为 24 h 连续排放,采用固体径迹探测器法 24 h 不间断连续测量。在水冶厂排风口处布设累积氡浓度监测点,悬挂 KF606B 型氡和  $\gamma$  个人剂量计测量 30 d 以上,取平均值作为测量值。对 12 个排风口进行全年累积氡浓度监测,监测时间间隔最短 30 d,最长 80 d,得到 5 个批次(共 60 组)有效累积氡活度浓度数据。

### 2.2.4 蒸发池

蒸发池水面氡析出率采用被动扩散式驻极体测氡法测量。冬季结冰后,在蒸发池中心、蒸发池对角线分出的 4 个子区中心,共布设 5 个氡析出

率测点;夏季在距离蒸发池进水管处(位于南角)处及东侧分别布设 2 个水面氡释放率测点(图 2)。采用驻极体测氡仪测量,将测氡仪浮于蒸发池边缘 0.5 m 测量氡释放率。

在现场用氮气吹扫腔体内部后,将驻极体安装在集气罩顶部内侧并记录驻极体电位与放置时间,集气罩整体放置在所测介质表面,保证边缘气密性良好。H 腔累积时间 4~10 h 后,更换 1 个驻极体;20 h 完成测量,共获得 3~5 个不同时间段的有效氡浓度数据,采用有效衰变常数法<sup>[13]</sup>计算氡析出率。



图 2 蒸发池氡释放率布点示意图  
Fig. 2 Sketch diagram of monitoring points distribution of radon release rate on evaporation pond

## 3 结果与讨论

### 3.1 抽液井

对该地浸矿山抽液井开展了氡活度浓度监测,采用 RAD7 的 1 h grab 模式,选取了 7 个采区,每个采区调查 6~8 口抽液井。为了尽可能减少地表空气氡的影响,在距井口 0.3~1.0 m 处开展抽液

井氡浓度调查。监测时段平均风速为 1.5 m/s,相对湿度为 25%,气压为 1 002 hPa,平均气温为 33 ℃。抽液井氡活度浓度监测结果见表 2。

表 2 抽液井氡活度浓度监测结果

Table 2 Statistical results of radon concentration on pumping wells

采区	$C_{Rn}$ 监测值/(Bq/m <sup>3</sup> )	抽液井数量/个	平均 $C_{Rn}$ /(Bq/m <sup>3</sup> )
A#	89~222	8	150
B#	158~328	8	256
C#	228~384	8	279
D#	182~332	6	294
E#	264~333	5	304
F#	195~374	5	324
G#	228~290	5	256

抽液井年氡释放量可通过开口处氡活度浓度监测、抽液井内外压差及有效开口面积,依据伯努利方程计算,计算公式为<sup>[5]323</sup>

$$Q = C_{Rn} A P_i \sum_{i=1}^n \sqrt{2g \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) + \rho_w v_i^2}, \quad (1)$$

式中: $Q$ 为年氡释放量,Bq/a; $C_{Rn}$ 为抽液井平均氡活度浓度,Bq/m<sup>3</sup>; $A$ 为抽液井有效开口面积,m<sup>2</sup>; $P_i$ 为地表有效风速*i*风速段频率; $g$ 为重力加速度,9.8 m/s<sup>2</sup>; $\rho_n$ 、 $\rho_w$ 为抽液井内以及环境空气密度,kg/m<sup>3</sup>; $v_i$ 为设施所在地  $P_i$  风速段风速,m/s。

从表 2 可知,选取的 7 个代表性采区抽液井氡活度浓度监测值变化较大,氡活度浓度范围为 89~384 Bq/m<sup>3</sup>,各采区氡活度浓度平均值为 150~324 Bq/m<sup>3</sup>,7 个采区抽液井氡活度浓度加

权平均值为 266 Bq/m<sup>3</sup>。按照一年 360 d 稳定状态(扣除维修、洗井等非正常工况),气象条件选择设施所在地连续一年逐日风速风向数据,根据式(1)估算该矿山抽液井年氡释放量为 22.65 GBq/a。

### 3.2 集液罐

#### 3.2.1 集液罐开口处

采用 E-Perm LT 驻极体,L 离子腔以短时累积氡方式,分别在集液罐顶部开口处东、西、南、北侧,以及距集液罐中心点 3 m 处共布设 5 个监测点。监测时段平均风速为 1.2 m/s,相对湿度为 23%,气压为 1 002 hPa,平均气温为 30 ℃,采样时间为 6 h,被动采样积分测量。监测结果见表 3。可以看出,集液罐开口处 4 个方位测得的氡活度浓度为 36.6~69.8 kBq/m<sup>3</sup>,平均氡活度浓度为 42.0~57.9 kBq/m<sup>3</sup>;距离集液罐中心 3 m 处氡活度浓度迅速下降,氡活度浓度监测值为 4.42~7.53 kBq/m<sup>3</sup>,平均氡活度浓度为 6.09 kBq/m<sup>3</sup>;集液罐开口处东侧与北侧点位的氡活度浓度相差较大,分析原因认为是夏季西北风风频较高,受到风速、风向的影响,东侧点位数值高于其他测点的数值。

通过监测罐顶部开口处氡浓度,并调查有效地表风速,对集液罐氡释放量开展调查。为计算方便,假设理想情况下在集液罐顶部开口处氡扩散速度足够快,则集液罐氡释放量估算公式为<sup>[14]</sup>

$$Q = 0.25 C_{Rn} v A T \sum_{x=1}^n P(x) ABS(\sin x), \quad (2)$$

式中: $Q$ 为年氡释放量,Bq/a; $C_{Rn}$ 为静风平均氡浓度,Bq/m<sup>3</sup>; $v$ 为年均长期风速,m/s; $A$ 为开口面积,m<sup>2</sup>; $T$ 为 1 年的时间;ABS 为取绝对值; $P$ 为风频; $x$ 为风向角度。经计算得出集液罐氡年释放量为 683 GBq/a。

表 3 集液罐氡活度浓度监测结果

Table 3 Results of radon concentration of leaching tank

监测点位	$C_{Rn}$ 监测值/(Bq/m <sup>3</sup> )					平均 $C_{Rn}$ /(Bq/m <sup>3</sup> )
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	
东侧	64 790	53 187	63 557	48 178	59 958	57 934
西侧	58 974	52 291	44 481	69 762	47 233	54 548
北侧	49 649	37 471	47 611	36 615	38 532	41 976
南侧	52 790	58 381	59 528	46 911	61 919	55 906
3 m 处	6 380	4 421	7 531	6 277	5 857	6 093
开口处平均值	56 551	50 333	53 794	50 367	51 911	

### 3.2.2 集液罐周围环境

集液罐周边环境不同方位 1 000 m 内氡活度浓度分布见表 4。可以看出,集液罐周边环境 1 000 m 内氡活度浓度为 26~238 Bq/m<sup>3</sup>,最大氡活度浓度出现在 W 方向 50 m 处,为 238 Bq/m<sup>3</sup>;这与监测时段处于秋季,扩散主要受到主导风向影响,而 W 风向处于主导风向(E 风向)的下风向有关。集液罐周边环境 S 方向和 N 方向的氡活度浓度水平相对较低,分别为 28~85 Bq/m<sup>3</sup>、31~115 Bq/m<sup>3</sup>,与这 2 个风向风频较小有关。周边环境各方向氡活度浓度随着与集液罐距离的增大而递减,距离集液罐 500 m 处氡活度浓度为 35~52 Bq/m<sup>3</sup>,与室外对照点本底值(9.76~41.48 Bq/m<sup>3</sup>)相差不大,说明集液罐氡释放对环境的影响范围不超过 500 m。

表 4 集液罐不同方位 1 000 m 内氡活度浓度

Table 4 Radon concentration from different directions within 1 000 m of leachate tank

方位	不同距离处 C <sub>Rn</sub> /(Bq/m <sup>3</sup> )				
	50 m	100 m	300 m	500 m	1 000 m
N	115	85	54	38	31
S	85	70	60	40	28
E	194	98	67	35	30
W	238	129	75	42	33
NW	156	87	53	43	26
SE	124	91	59	52	32

### 3.3 水冶厂

对水冶厂 12 个通风口进行了全年累积氡浓度监测,监测时间间隔最短 30 d,最长 80 d,得到 5 个批次的有效累积氡浓度(表 5)。

表 5 水冶厂排风口累积氡活度浓度

Table 5 Cumulative radon concentration in the exhaust vents of milling plant

排风口点位	各批次 C <sub>Rn</sub> 监测值/(Bq/m <sup>3</sup> )						氡释放量/(GBq/a)	排风口氡释放量所占比例/%
	1	2	3	4	5	均值		
产品沉淀 1 号	1 017	968	1 245	1 197	1 156	1 117	99.8	9.74
产品沉淀 2 号	802	721	987	823	868	840	75.1	7.33
产品沉淀 3 号	832	923	1 158	872	724	902	80.6	7.87
离子交换 4 号	400	457	498	505	423	457	40.8	3.98
离子交换 5 号	1 321	1 357	1 512	1 386	1 468	1 409	126.0	12.30
过滤区 1 号	968	1 256	1 359	911	1 189	1 137	74.3	7.25
过滤区 2 号	1 857	2 011	2 267	1 987	2 160	2 056	134.0	13.10
过滤区 3 号	1 901	1 987	2 457	2 260	2 423	2 206	144.0	14.10
离子交换 9 号	1 957	1 894	2 027	2 126	2 006	2 002	131.0	12.80
离子交换 10 号	956	858	1 117	917	830	936	61.1	5.97
离子交换 11 号	398	423	567	468	511	473	30.9	3.02
化验室	327	356	487	466	396	406	26.6	2.59
总释放量/(TBq/a)	1.02							100

由表 5 可知,水冶厂各排风口氡活度浓度监测值为 327~2 457 Bq/m<sup>3</sup>,其中过滤区排风口的氡活度浓度水平最高,监测值为 911~2 457 Bq/m<sup>3</sup>,分析原因可能是过滤区存在过滤溶液的扰动使氡活度浓度偏高。沉淀区排风口氡活度浓度水平次之,监测值为 721~1 245 Bq/m<sup>3</sup>,分析原因可能是沉淀溶液中氡活度浓度较高,释

放到空气中,导致沉淀区 1 号、2 号、3 号排风口氡活度浓度偏高。

由水冶厂各排风口氡活度浓度监测值与风机风量计算得出,全年监测期间该矿山水冶厂氡活度浓度排放总量(水冶厂各排风口氡浓度×年排风量)为 1.02 TBq/a,其中过滤区排风口氡释放量最高,占整个水冶工序的 34.5%;其次为沉淀

区排风口氡释放量,占整个水冶工序的 24.9%;离子交换 9 号排风口为淋洗和转型工序共用风机,排风口氡释放量占整个水冶工序的 12.8%;化验室排风口氡释放量最低,仅占整个水冶工序的 2.59%。

### 3.4 蒸发池

蒸发池氡释放率监测结果见表 6。可以看出,蒸发池水面氡释放率为 57.55~59.59 mBq/(m<sup>2</sup>·s),均值为 58.57 mBq/(m<sup>2</sup>·s);蒸发池冰面氡释放率为 32.70~38.45 mBq/(m<sup>2</sup>·s),均值为 35.84 mBq/(m<sup>2</sup>·s)。按照蒸发池面积 16 997 m<sup>2</sup>、蒸发池结冰期 5 个月计算,该蒸发池年氡释放量约为 16 997 m<sup>2</sup>×8 760 h/a×3 600 s/h×[0.059 Bq/(m<sup>2</sup>·s)×7/12+0.036 Bq/(m<sup>2</sup>·s)×5/12]=26.84 GBq/a。

表 6 蒸发池氡释放率监测结果

Table 6 Radon release rate of evaporation pond

监测点位	氡释放率/[mBq/(m <sup>2</sup> ·s)]	累积时长/h
水面	59.59	18
	57.55	20
冰面	35.39	24
	38.45	24
	34.69	24
	32.70	24
	37.97	24

### 3.5 矿山氡释放总量

通过对该酸法地浸矿山抽液井、集液罐、水冶厂排风口、蒸发池等源项开展的调查及各源项氡释放量的计算可知,该矿山氡总释放量约为 1.75 TBq/a,水冶厂和集液罐是重要的氡释放源项,分别约占地浸矿山氡总释放量的 58% 和 39%;抽液孔和蒸发池氡释放量贡献很小,约占整个氡总释放量的 3%。

为了比较不同铀采冶类型矿山的年氡释放量,氡释放量归一化方法采用吨金属铀流出物释放量计算方法<sup>[15]</sup>,计算公式为

$$Q_N = R/U, \quad (3)$$

式中: $Q_N$  为归一化吨金属铀氡释放量,GBq/tU; $R$  为对应金属产量全部设施年氡释放量,GBq/a; $U$  为设施年金属产量,t/a。

经计算该酸法地浸矿山归一化氡释放量约为 14.6 GBq/tU。地下开采铀矿山每生产 1 t 铀的氡释放量为 327~1 184 GBq,尾矿(渣)库归一化氡释放量为 12.94~86.73 GBq/tU<sup>[16]</sup>,可见该酸法地浸矿山归一化氡释放量远小于常规地下开采铀矿山氡释放量,与尾矿(渣)库归一化氡释放量水平相当。

美国各类铀矿山归一化氡释放量为 200~12 700 GBq/tU<sup>[17]</sup>。澳大利亚 Beverley 地浸矿山归一化氡释放量为 43.4 GBq/tU(仅计算水冶过程)<sup>[18]</sup>。可见,中国地浸采铀归一化氡释放量不仅明显低于地下开采铀矿山,与国外同类铀矿山相比也具有明显的辐射环境优势。

## 4 结论

1) 该酸法地浸铀矿山主要氡释放途径分别为抽液井口、集液罐开口处、水冶厂排风口和蒸发池。集液罐开口处氡活度浓度水平最高,为 42.0~57.9 kBq/m<sup>3</sup>,集液罐氡释放对环境影响空间范围有限,不超过 500 m;水冶厂排风口氡活度浓度为 327~2 457 Bq/m<sup>3</sup>,过滤区排风口氡释放量对水冶厂氡释放量贡献最大,占整个水冶工序的 34.5%;产品沉淀区排风口氡释放量次之,占整个水冶工序的 24.9%;抽液井氡浓度相对较低,为 89~384 Bq/m<sup>3</sup>;蒸发池水面氡释放率高于冰面氡释放率。

2) 该酸法地浸铀矿山氡释放量约为 1.75 TBq/a。水冶厂和集液罐是重要的氡释放源项,抽液井和蒸发池氡释放量贡献较小。该酸法地浸矿山归一化氡释放量为 14.6 GBq/tU,远小于常规地下开采铀矿山氡释放量,与尾矿(渣)库归一化氡释放量水平相当;与国外同类铀矿山相比,具有明显的辐射环境优势。

## 参考文献:

- [1] 薛振伟,周小林,饶丰,等.原地浸出矿中氡污染及其控制效果研究[J].国际放射医学核医学杂志,2013,37(1):20-23.
- [2] 常桂兰.氡与氡的危害[J].铀矿地质,2002,18(2):122-128.
- [3] 李孝君.新疆某地浸铀矿山氡的析出特征及辐射剂量分析[D].衡阳:南华大学,2016.
- [4] 龙慧佳,冯旭.铀矿井排风井氡排放量连续测量[J].中国资源综合利用,2020,38(4):1-4.

- [5] 张辉,牛洁,邓君,等. 某  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  地浸采铀场抽液钻孔氡浓度与释放量的估算[J]. 同位素, 2023, 36(3):320-328.
- [6] MUDD GAVIN M. Radon releases from australian uranium mining and milling projects; assessing the unsear approach[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(2):288-315.
- [7] EI-FAWAL M M. Mathematical modelling for radon prediction and ventilation air cleaning system requirements in underground mine[J]. The Journal of American Science, 2011, 7(2):389-402.
- [8] 张学礼,徐乐昌. 地浸采铀设施氡的辐射照射及其控制措施[J]. 核安全, 2016, 15(1):17-22.
- [9] 田志恒,左富琪,肖德涛. 驻极体测氡法及其应用[J]. 原子能科学技术, 1993, 27(1):57-61.
- [10] 韩芹芹. 固体径迹探测器与 RAD-7 测氡仪测定民用建筑工程室内氡浓度的比较[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(3):122-126.
- [11] 徐东群. 居住环境空气污染与健康[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:198-243.
- [12] 李先杰,薛建新,陈仲秋. 我国铀矿冶测氡仪现状分析[J]. 铀矿冶, 2009, 28(2):87-91.
- [13] 袁红志,谭延亮. 一种开环式测量介质表面氡析出率及有效衰变常数的方法:201811272839. 5[P]. 2019-03-08.
- [14] 徐乐昌,张伟,牛洁,等. 中国铀矿冶归一化氡释放量[C]//中国环境科学学会,中国辐射防护学会. 21世纪初辐射防护论坛第十三次会议——核设施环境影响评价研讨会论文集. 北京:人民卫生出版社, 2015:33-39.
- [15] 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:中国标准出版社, 2020.
- [16] 潘自强. 中国辐射水平[C]//中国核学辐射防护分会,中国环境科学学会核安全与辐射环境安全专业委员会,中华医学会放射医学与防护学分会,等. 二十一世纪初辐射防护论坛第八次会议——辐射防护科学进展研讨会资料汇编. 北京:原子能出版社, 2010:50-55.
- [17] JACKSON P O, GLISSMEYER J A, ENDERLIN W I, et al. Investigation of radon-222 emissions from underground uranium mines [R]. Progress Report No. 2. United States:[s. n.], 1980.
- [18] HORST MÄRTEN, PHILIPS R, WOODS P. New uranium ISR satellites at Beverley North, South Australia [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2011:23-30.

## Investigation on Radon Release Characteristics of an Acid In-situ Leaching Uranium Mine

WANG Yalan<sup>1</sup>, XU Lechang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, ZHOU Lei<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;

2. CNNC Resources Development Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Investigation on release characteristics of radon concentration, radon release amount, migration and diffusion trend of radon of an acid in-situ leaching uranium mine was carried out on the basis of data collection and field investigation. This study monitored radon concentration of source items and surrounding environment on uranium milling plant vents, leaching tanks, evaporation ponds and recovery wells with adoption of E-Perm electret detector, solid track detector and RAD7 radon detector. The results show radon concentration level is highest at top opening of leaching tanks, nevertheless affected area is no more than 500 m. Lowest radon concentration appears at point of recovery wells. The annual total radon release of the acid in-situ leaching uranium mine is about 1.75 TBq/a, milling plant and leaching tanks are important radon release source items, which account for 58% and 39% of the total radon release respectively, additionally radon release of recovery wells and evaporation ponds account for 3% of the total radon release. In summary, the normalized annual radon release amount of the acid leaching uranium mine is much smaller than that of underground mine exhaust shaft.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; radon release; radon concentration; acid process; E-Perm electret detector; solid track detector; RAD7 radon detector