北方某露天铀伴生矿辐射防护实践和剂量估算

初旭阳，胡鹏华，杨明理，陈 刚，刘啸晨

（核工业北京化工冶金研究院，北京 101149）

摘要：对北方某露天硼铁铀伴生矿进行了γ剂量率、氡浓度、放射性气溶胶辐射特征的检测和个人剂量估算，分析了该矿不同工艺的辐射特点。结果表明，该矿的γ辐射主要集中在重选摇床、带式过滤机、产品库以及受到污染的运输车辆和磨矿机附近，氡内照射危害主要存在于浸出厂房，不存在气溶胶危害。建议该企业对摇床、带式过滤机操作人员加强培训，减少自动作业时人员的驻留，对产品桶及时加盖，对受污染设备及时发现和清洗；对浸出厂房加强通风。

关键词：铀伴生矿；剂量估算；辐射防护

中图分类号：X591；TD868 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)01-0073-07

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.06.01

中国矿产资源多伴生有天然放射性。受地质背景和成矿条件等因素的影响，不同种类的矿产、同种类矿物在不同地质背景下，其伴生的天然放射性核素种类、含量不尽相同，有的甚至差异很大[1]。随着矿石的加工、冶炼、废弃物的排放，放射性核素转移和富集到产品、副产品和“三废”中，可能危害人体健康和对环境造成放射性污染[2]。

核工业建立了适用于核设施、铀矿冶和核技术利用的法规标准体系，但伴生矿尚未纳入该体系[3]。《放射性污染防治法》针对伴生矿的要求主要是关于建立尾矿库。整体上伴生矿放射性的管理和研究有所欠缺[4-7]。中国在《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 年远景目标》中明确提出要加强伴生放射性矿辐射环境管理；完成伴生放射性矿现状调查和辐射现状普查，推进伴生放射性矿产资源分类管理；开展锆及氧化锆、石煤、稀土等伴生放射性矿开发利用辐射安全监管和辐射环境标准研究。

前人进行了伴生放射性矿山的辐射影响研究。小型煤矿、代表性矿产企业、铅锌伴生放射性矿、金铀矿等不同类型的伴生放射性企业，平均受照射剂量差距很大[8-11]。稀土矿、钼伴生矿、独居石矿等不同类型的伴生矿对环境的污染也不同[12-14]。目前尚未有对硼铁伴生矿辐射特征进行调查的相关研究报道。夏子通在其针对钽铌冶炼企业的监测中使用的研究思路较为合理，具体步骤为工艺及源项分析、选择监测点、进行监测和分析[15]。

笔者针对北方某典型的硼铁铀伴生矿的开采与冶炼，开展工艺及源项分析，选择监测点、进行监测和分析，进行了辐射特征的监测和个人剂量的估算，并总结该硼铁铀伴生矿的工艺辐射特点，提出了辐射防护实践相关建议。

1 辐射源项分析

该露天硼铁铀伴生矿的产品包括硼铁和铀，生产工艺将采矿与选矿、硼化工工程和铀水冶作了划块区分，并安排在距离较远的 3 个位置分开管理。这样使得γ剂量率以及粉尘、气溶胶较多的采矿与选矿工艺、氡浓度较高的铀水冶工艺、以及工作量相对较少但γ照射最为集中的产品库相距较远，既防止了交叉污染，也明确了工作人员的工作区域，防止无关工作人员误入辐射较高的场所。

该矿点周边居民较少，居民点距矿区 1 km 以上，且伴生的铀品位较低，其产生的放射性气溶

收稿日期：2022-06-06

项目资助：国家重点研发计划项目重点专项(2019YFC1907701)

第一作者简介：初旭阳(1995—)，男，江苏南京人，硕士，助理工程师，主要从事辐射防护与工业安全相关工作。

通信作者简介：胡鹏华(1982—)，男，山西原平人，硕士，高级工程师，主要从事辐射防护与工业安全相关工作。

胶和氡排放量较少，对居民的放射性影响可以忽略。

1.1 采选工程

采选工程工艺流程如图 1 所示。在采矿过程中，采场人员可能会受到来自矿石的天然放射性 γ 照射，同时采矿人员易受到污染设备的外照射；在完全露天的采场中氡浓度和气溶胶不易聚集，采场人员不易受到内照射危害。

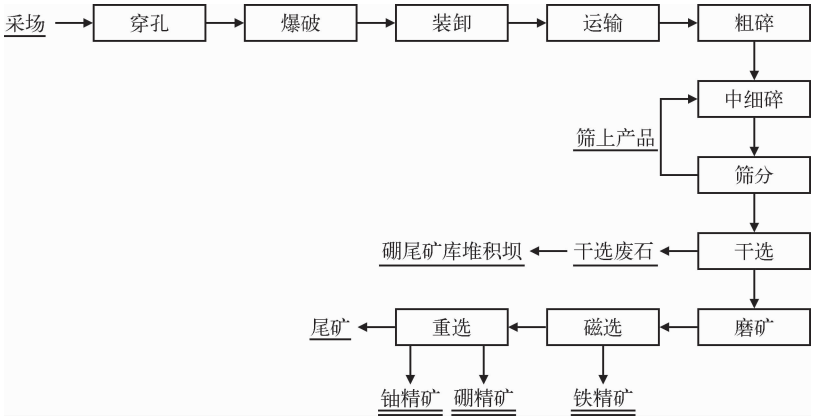


图 1 硼铁铀伴生矿采选工艺流程示意图

Fig. 1 Mining and beneficiation progress of boron-iron-uranium associated mine

选矿工程是生产流程中产生放射性粉尘和气溶胶的主要过程，粗碎、中细碎、筛分、磨矿均易产生放射性气溶胶和粉尘。厂房中通过摇床分离出的铀精矿富集了放射性矿物，γ 剂量率可能比采矿工程更高。

1.2 硼化工工程

硼化工工程是由选矿厂重选所得的硼精矿进入硼化工车间生产硼砂、硼酸产品的过程(图 2)。硼精矿由于经过选矿，矿物中的辐射部分被转移，放射性一般较低；在硼化工后续工艺中，也没有加入新的源项，因此在辐射特征调查时，选择原料进入端的厂房进行辐射特征调查。若经过选矿的原料进入时剂量率较低，则后续工艺剂量率也较低。

1.3 铀水冶工程

该硼铁矿采用常规水冶工艺提取铀精矿中的金属铀，主要工艺包括铀金属浸出、吸附、淋洗和淋洗合格液沉淀过滤等部分，最终得到“111”产品(图 3)。

铀水冶工艺流程中，浸出、过滤、淋洗、吸附、沉淀等过程，使得厂房中累积氡及其子体，可能给工作人员带来内照射影响；同时浸出、过滤过程中的 γ 辐射也不能忽视。铀水冶工艺产品中的铀相对集中，所以产品库 γ 剂量率一般较高。

2 辐射特征调查

对该硼铁铀伴生矿进行辐射特征调查，统计不同工作部门、不同岗位的 γ 剂量率、氡浓度和气溶胶情况，了解该矿的辐射特征。由于数据敏感性，对 γ 剂量率、氡浓度和气溶胶等调查数据都进行了归一化处理。以 γ 剂量率为例，采用某一测点 γ 剂量率与全矿所有测点 γ 剂量率平均值的比值展示调查结果。

$$\bar{\delta}_{\gamma}=\frac{\dot{D}_i}{\bar{D}},$$

式中：$\dot{D}_i$ 为 i 号测点的 γ 剂量率，mSv/h；$\bar{D}$ 为该矿所有测点 γ 剂量率的平均值，mSv/h；$\bar{\delta}_{\gamma}$ 为 i 号测点的归一化 γ 剂量率，无量纲。

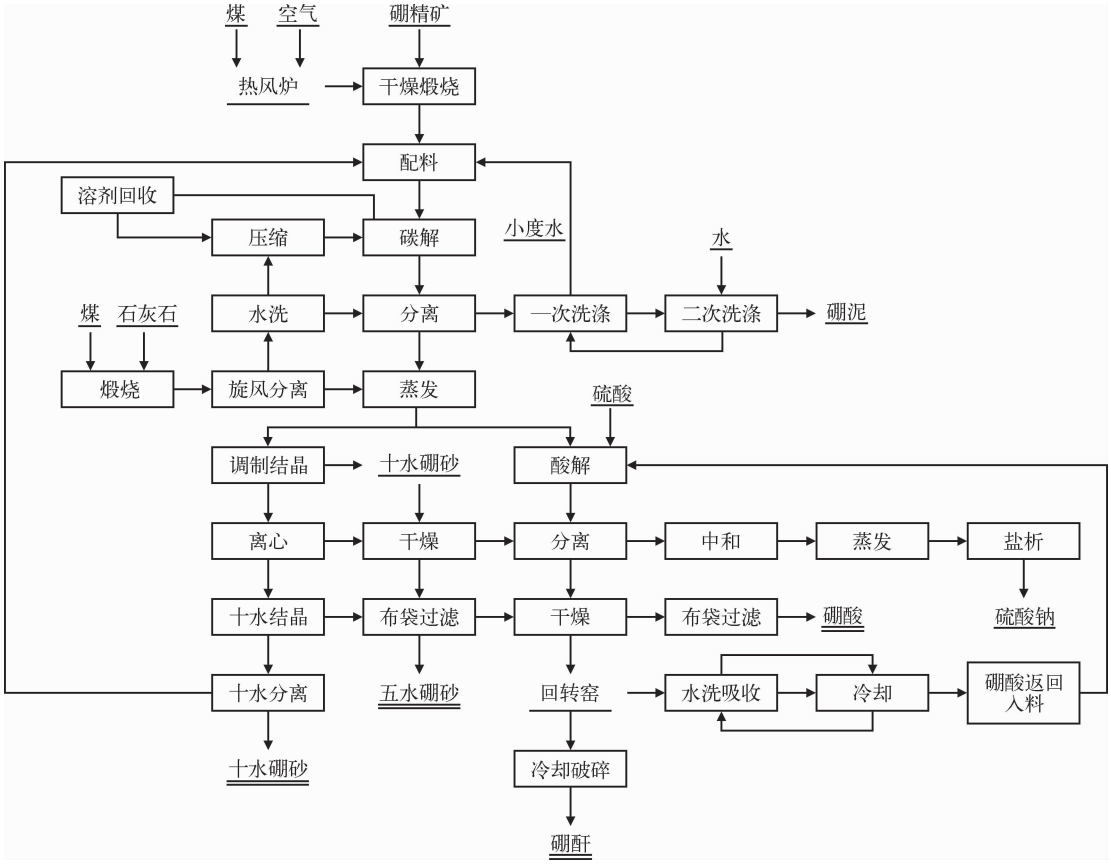


图 2　硼化工工艺流程示意图

Fig. 2　Progress flow of boron industry

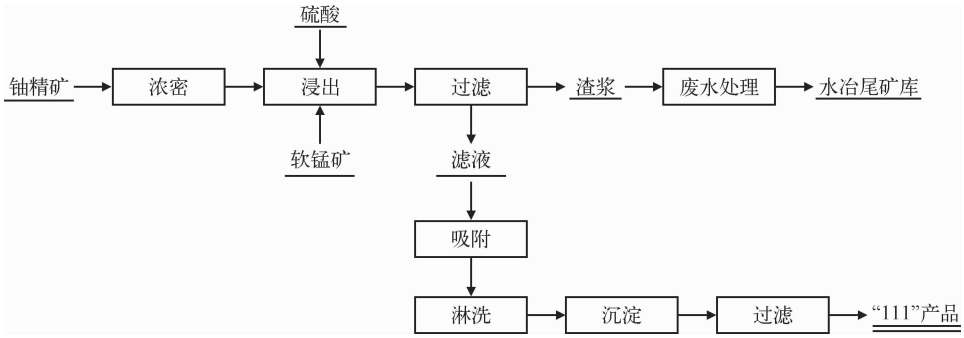


图 3　铀水冶工艺流程示意图

Fig. 3　Progress flow of uranium hydrometallurgy

2.1　γ 剂量率调查

使用多功能辐射测量仪（主机 FH40G、探测器 FHZ672 E-10 NBR）对各工艺进行了 γ 辐射剂量率监测。当地环境归一化 γ 剂量率为 0.15。

2.1.1　采区归一化 γ 剂量率

西采区为废石区，北采区为正在开采的区域。在北采区，从道路至采场每隔 5 m 取 1 点进行 γ 剂量率测量，随着与采场距离的缩小，γ 剂量率越来越大。在西采区，每 5 m 测量 1 点，γ 剂量率无明显变化。具体归一化 γ 剂量率见表 1。

对比西采区和北采区，主要堆放碎石的西采区的 γ 剂量率平均值更低，显示出该矿所采矿石的放射伴生性。在采区部分，一般工作人员实行 8 h 工作制，每年工作 2 000 h；大部分工作人员为

电铲司机、推土机司机和运输车辆司机，长期工作受到的γ辐照可参照北采区挖掘采掘车的$\bar{\delta}_\gamma$值，即$\bar{\delta}_\gamma \approx 1$，此时的γ剂量率＜0.8 μSv/h。因此，γ所致年剂量＜1.6 mSv，远小于该单位5 mSv的控制目标。

表 1 采区归一化 γ 剂量率

Table 1 Normalized γ dose rate of mining area

测点	$\bar{\delta}_\gamma$
西采区(废石场道路)	0.20
西采区(废石场履带式破碎机附近)	0.24
北采区(采场道路)	0.46
北采区(挖掘采掘车附近)	1.02

2.1.2 铀水冶归一化 γ 剂量率

$\bar{\delta}_\gamma \approx 1$ 时，γ 剂量率＜0.8 μSv/h，即认为$\bar{\delta}_\gamma < 1$时γ辐照剂量率较低。针对铀水冶厂区开展的γ剂量率调查结果见表2。

表 2 铀水冶厂区归一化 γ 剂量率

Table 2 Normalized γ dose rate of uranium hydrometallurgy

测点	$\bar{\delta}_\gamma$
浓缩厂房	0.54
浸出厂房	0.79
浸出厂房(带式过滤机处)	1.31
吸附沉淀厂房(吸附塔2层附近)	0.23
吸附沉淀厂房(电葫芦附近)	0.30
吸附沉淀厂房(复合拉板小车)	0.38
吸附沉淀厂房(油气分离器)	0.29
吸附沉淀厂房(吸附塔1层附近)	0.42
吸附沉淀厂房(地面)	0.38
吸附沉淀厂房(板框过滤)	0.80
滤饼产品间(产品间门口)	1.55
滤饼产品间(开封产品桶附近)	6.37
滤饼产品间(封闭产品桶附近)	0.68
滤饼产品间(开口的空桶附近)	1.49

由表2可看出，铀水冶厂区的浸出厂房滤布处和滤饼产品间的γ剂量率较高。浸出厂房整体平均$\bar{\delta}_\gamma = 0.79$，而浸出厂房带式过滤机处$\bar{\delta}_\gamma$为1.31。可推测浸出厂房的γ辐射主要来源于带式过滤工艺。滤饼产品间门口的$\bar{\delta}_\gamma$为1.55，封闭产品桶附近$\bar{\delta}_\gamma$为0.68，开封产品桶附近$\bar{\delta}_\gamma$为6.37，开封产品桶的γ剂量率是密封产品桶的9倍多，可见γ辐射源主要为开封产品桶。

2.1.3 选矿工程归一化 γ 剂量率

选矿厂区开展的γ剂量率调查结果见表3。可以看出，选矿工程$\bar{\delta}_\gamma > 1$的测点包括磨选厂房的二级磨矿机以及重选车间。磨选厂房中，除了二级磨矿测点，其余测点(包括球磨机、磁选机)剂量率均很低；辊磨车间由于设备较新，γ辐射剂量率为全工艺中最低，由此可推测设备清洁对于抑制辐射剂量率有较大意义。

表 3 选矿工程厂区归一化 γ 剂量率

Table 3 Normalized γ dose rate of mineral beneficiation

测点	$\bar{\delta}_\gamma$
磨选厂房(门口)	0.31
磨选厂房(盘式过滤)	0.31
磨选厂房(球磨机和磁选机)	0.22
磨选厂房(二级磨矿)	3.52
破运车间(皮带运输)	0.24
中细碎车间	0.25
破运系统(无人破运)	0.24
辊磨车间	0.10
重选车间(门口)	2.73
重选车间(开启的摇床)	1.86
重选车间(未启动的摇床)	1.02
重选车间(地面)	0.80
重选车间(油漆运输卡车)	3.52

磨选厂房的1台二级磨矿机的$\bar{\delta}_\gamma$达到3.52，为全矿平均值的3.5倍。该磨矿机主要为自动运转，平时无人在机器附近操作；但维检人员在进行维修时可能近距离、长时间与机器接触，会受到较大影响。重选车间中，主要的运行设备为摇床，且开启的摇床比未开启的摇床的辐射剂量率高，显示摇床的运作会带来额外的辐射剂量率。重选车间内部地面的$\bar{\delta}_\gamma$约为0.80，重选车间门口$\bar{\delta}_\gamma$达到3.52，比摇床设备附近高。经过调查，γ剂量率来源为门口停放的1辆运输油漆的车辆，该车辆受到了放射性污染。

2.1.4　硼化工归一化 γ 剂量率

原料进入端的硼过滤车间的 $\bar{\delta}_\gamma$ 为 0.21，硼化工车间的 $\bar{\delta}_\gamma$ 为 0.26。可推测硼化工工程中的工艺原料经过选矿工程处理后，放射性较低。

2.2　氡浓度调查

利用 AlphaGUARD DF2000 电子测氡仪在硼铁矿现场进行氡浓度监测，对于环境水平下的测点，每个点采样 0.5 h；对于氡剂量较高的测点，每个点采样 3 h 以上，监测结果见表 4。

表 4　工作区归一化氡浓度

Table 4　Normalized radon concentration of work area

测点	$\bar{\delta}_{Rn}$
北采区（采矿区）	0.38
西采区（废石区）	0.43
浸出厂房	4.62
磨矿车间	0.21
浓缩间	0.84
硼化工（板框压滤）	0.56
破磨车间（磁选机）	0.28
破运车间（平垌口）	0.49
吸附淋洗厂房（淋洗塔）	1.24
吸附淋洗厂房（压滤滤饼）	0.95

因采区为露天情况，采区氡浓度与环境浓度相近，即环境的归一化氡浓度 $\bar{\delta}_{Rn}\approx 0.4$；仅有浸出厂房和吸附淋洗塔附近需关注氡的内照射。浸出厂房的平均氡浓度最高，且与时间有明显相关性，归一化氡浓度随时间的变化如图 4 所示。

该厂房在中午 12:20 至下午 13:00 氡浓度有显著提升，最高处 $\bar{\delta}_{Rn}>10$。分析认为是由于中午工作人员休息，厂房的大门紧闭，造成了通风不良，氡气在厂房中累积。

2.3　气溶胶监测结果

利用 DWARF 100×9 大流量气溶胶采样器对硼铁矿现场进行气溶胶测量，共取 2 个办公环境样品和 2 个磨矿选矿样品，测量 ^{238}U、^{226}Ra、^{210}Po、^{232}Th、^{210}Pb 核素的浓度情况，5 个核素的活度浓度均<1 mBq/m³。

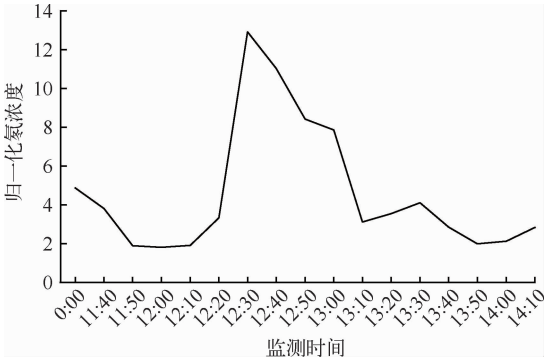


图 4　浸出厂房归一化氡浓度随时间的变化

Fig. 4　Change of normalized radon concentration with time in leaching plant

根据《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》（GB 23727—2020），铀系长寿命 α 核素气溶胶限值为 1.2 Bq/m³，约束值为 0.9 Bq/m³；纯天然铀 α 气溶胶剂量限值为 1 Bq/m³ 或 0.04 mg/m³，剂量约束值为 0.8 Bq/m³ 或 0.03 mg/m³。该矿工艺不存在气溶胶放射性危害。

3　有效剂量估算

根据《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》（GB 23727—2009），作业时长按每天 8 h、每年 250 d，即每年 2 000 h 进行计算。对于巡检作业，进行预警阈值分析前对其每天可进行的巡检时间进行分析。γ 辐射、氡及其子体、气溶胶分别按照相关模型进行计算。

3.1　γ 辐射的贡献剂量

γ 辐射的贡献剂量按照工作时间与工艺场所测得的 γ 剂量率的乘积进行估算。

$$H_\gamma = D_\gamma \cdot t\ ,$$

式中：H_γ—γ 辐射的贡献有效剂量当量，mSv；D_γ—工艺场所中的 γ 剂量率，mSv/h；t—每年在工艺场所的停留时间，h。

3.2　氡及其子体的贡献剂量

对于氡及其子体的贡献剂量，按照《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》（GB 23727—2009）附录 B2 中的方法计算。氡子体/氡照射量转换系数取 2.22×10^{-6}（mJ·h·m^{-3}）/（Bq·h·m^{-3}），平衡因子取 0.4，单位氡子体照射量至剂量转换系数取 1.4 mSv/（mJ·h·m^{-3}）。

$$H_{Rn} = kC_{Rn} \cdot t\ ,$$

式中：H_{Rn}—氡及其子体贡献剂量，mSv；C_{Rn}—工艺场所中的氡浓度，Bq/m³；k—综合转换系数，为

氡浓度至照射量转换系数、平衡因子以及照射量至剂量转换系数的乘积，1.24×10^{-6}（mSv·m^3）/（Bq·h）；t—每年在场所中的停留时间，h。

3.3 放射性气溶胶贡献剂量

按照《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》（GB 23727—2009）计算铀系长寿命核素 α 气溶胶的贡献剂量。平衡状态下，^{238}U、^{234}U、^{230}Th、^{226}Ra、^{210}Po 核素的吸入剂量转换因子分别取 7.30×10^{-6}、8.50×10^{-6}、1.30×10^{-5}、3.20×10^{-6}、3.00×10^{-6} Sv/Bq。在辐射监测中气溶胶测量的核素为^{210}Pb、^{238}U、^{226}Ra、^{232}Th，其中^{210}Pb、^{238}U、^{226}Ra 为铀系核素，当监测结果中^{210}Pb、^{238}U、^{226}Ra 核素平衡时，按^{210}Pb、^{238}U、^{230}Th、^{226}Ra、^{210}Po 均平衡进行计算；当^{210}Pb、^{238}U、^{226}Ra 核素存在不平衡时，按^{234}U、^{230}Th 与^{238}U、^{226}Ra 中较大值平衡，^{210}Pb 与^{210}Po平衡，进行保守估计计算。

$$H_a = \sum k_i C_i r t ,$$

式中：H_a—α 气溶胶贡献剂量，mSv；t—在工艺场所的停留时间，h；k_i—特定核素的吸入剂量转换因子，Sv/Bq；C_i—仪器测出的气溶胶浓度，mBq/m^3；r—呼吸率，1.2 m^3/h。

考虑所有辐射类型的综合剂量，当仅有 1 项辐射特征高于环境值时，综合剂量按当项估算（不计算环境剂量）；当存在 2 项及以上辐射特征高于环境值时，有效剂量按下式计算：

$$E_T = H_\gamma + H_{Rn} + H_a ,$$

式中：E_T—总有效剂量，mSv；H_γ—γ 辐射贡献有效剂量当量，mSv；H_{Rn}—氡及其子体贡献剂量，mSv；H_a—α 气溶胶贡献剂量，mSv。该矿山监测的放射性气溶胶浓度较低，<1 mBq/m^3。

考虑到数据敏感性，有效剂量估算也按平均值进行归一化处理。归一化有效剂量及不同辐射特征的贡献率见表 5。可以看出，综合 γ 辐射、氡及其子体浓度、气溶胶 3 项辐射特征，归一化有效剂量最高的工艺点为产品间，归一化有效剂量>1 的工艺位置有磨矿车间（二级磨矿）和运输车辆；0.5<归一化有效剂量<1 的工艺位置包括浸出厂房、重选车间。在这些位置的辐射防护措施上，具有一定的改进空间。其余工艺点包括采区、浓缩厂房、吸附沉淀厂房等，辐射防护较为完善，工艺本身辐射危害也较小，无需进行额外的改进。

该硼铁伴生矿中仅铀水冶工程中浸出厂房、浓缩厂房、吸附沉淀厂房存在氡污染问题，其余工艺点均只需考虑 γ 辐射的防护。该矿应根据辐射防护最优化原则，根据不同的工艺选择辐射防护侧重点。

表 5 硼铁铀伴生矿归一化有效剂量

Table 5 Normalized effective dose of boron-iron-uranium associated mine

工艺测点	归一化有效剂量	贡献率/%		
		γ 剂量	氡剂量	气溶胶剂量
北采区	0.50	100	0	
西采区	0.12	100	0	
浸出厂房	0.74	52.5	47.5	
磨矿车间（二级磨矿）	1.72	100	0	
浓缩厂房	0.32	80.4	19.6	0
吸附沉淀	0.48	80.7	19.3	
产品间	3.11	100	0	
重选车间	0.91	100	0	
运输车辆	1.72	100	0	

4 结论与建议

通过对硼铁伴生矿调查研究，明确了辐射防护侧重点。对于核素富集的工艺点及易被污染的设备需重点关注，对于核素已被转移的工艺线应关注原料端。该伴生矿采矿工程和硼化工工程的工艺点 γ 剂量率均不高，气溶胶浓度小于国家标准值的 0.1%，可认为该矿工艺不存在气溶胶放射性危害。该矿存在污染的设备有磨矿机和运输车辆，对于磨矿机建议企业定期清洗和测量；对于运输车辆，应划分好运输铀矿石的车辆和无关车辆，对运输矿石和废石的车辆要做好监测和清洁。

铀水冶浸出厂房的带式过滤机以及重选厂房的摇床的 γ 剂量率较高，建议加强人员培训，强化工作流程，防止工作人员在剂量率较高的设备周围长时间停留。建议矿山将产品桶及时密封，对在附近作业的人员做好 γ 剂量日常监测。建议对浸出厂房等加强通风，并设置智能通风系统，在员工上班前 0.5 h 自动开启通风设备，保证员工在上班期间氡浓度一直维持在较低水平。

参考文献：

[1] 郑国峰，廖运璇，柏学凯，等. 全国伴生放射性矿普查结果分析及监管建议[J]. 环境保护，2020，48(18)：38-41.

[2] 徐玲. 伴生放射性测量与环境影响评价[D]. 成都：成都理工大学，2011.

[3] 吕彩霞，谢树军，廖运璇，等. 伴生放射性矿开发利用辐射环境安全监管法规体系的现状[J]. 中国矿业，2021(8)：36-40.

[4] 詹国清. 伴生放射性矿山辐射安全管理现状与对策[J]. 世界有色金属，2019(18)：248-251.

[5] 冯晓. 伴生放射性矿分类管控指标的研究[J]. 能源与环保，2017，39(10)：58-61.

[6] 何荣天，符兰. 伴生矿辐射安全管理及防护策略探析[J]. 电子测试，2019(8)：111-113.

[7] 张海洋，赵帅维. 伴生矿辐射安全监管现状及建议[J]. 中国矿业，2019，28(5)：24-28.

[8] 陈凌. 中国煤矿地下工作人员职业照射研究[D]. 北京：中国原子能科学研究院，2006.

[9] 刁春娜. 新疆阿泰勒地区矿产企业工作人员及公众辐射剂量估算[J]. 环境与发展，2020(11)：234-235.

[10] 廖黔川，董冲. 湖北当阳铅锌伴生放射性矿污染调查与评估[J]. 东华理工大学学报(自然科学版)，2013，36(3)：274-277.

[11] 李福林，李万熙，鞠翠香，等. 金(铀)伴生矿环境放射性水平[J]. 中国辐射卫生，1994(1)：31-32.

[12] 帅震清，温维辉，赵亚民. 伴生放射性矿物资源开发利用中放射性污染现状与对策研究[J]. 辐射防护通讯，2001，21(2)：3-9.

[13] 林强，徐彬. 钼及伴生矿开采洗选项目环境辐射污染防治分析[J]. 资源与环保，2014(10)：174-175.

[14] 孙功明，林健，李冠超. 广东省某伴生放射性矿开发利用企业辐射环境监测[J]. 辐射防护通讯，2021，41(1)：4-9.

[15] 夏子通. 钽铌冶炼辐射环境影响评价研究[D]. 北京：核工业北京地质研究院，2012.

Radiation Protection and Dose Estimation of an Open-pit Uranium Associated Mine in North China

CHU Xuyang, HU Penghua, YANG Mingli, CHEN Gang, LIU Xiaochen

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

Abstract: An open-pit boron-iron-uranium associated mine in north China was investigated. The gamma dose rate, radon concentration and radioactive aerosol radiation characteristics of the mine were detected and the individual dose estimation was carried out. The results show that the gamma external irradiation of the mine is mainly concentrated in the vicinity of gravity separation rocker, belt filter, product warehouse and contaminated vehicles and grinding machines. The hazards of radon internal irradiation mainly exist in the leaching plant, and there is no aerosol hazard. The enterprise should strengthen the training of operators of rocking table and belt filter to reduce the residence of personnel in automatic operation, the product barrels should be covered in time, the contaminated equipment should be detected and cleaned in time, ventilation should be strengthened for leaching plant.

Key words: uranium associated mine; personal dose estimation; radiation protection