

独居石选冶过程中钍-232 迁移规律与放射性影响特征

田思溶^{1,2,3}, 樊红波^{2,3}, 高翔^{2,3}, 高洁⁴

(1. 核工业二三〇研究所, 湖南长沙 410007;

2. 湖南中核环保科技有限公司, 湖南长沙 410007;

3. 湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410007;

4. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 以典型独居石选冶企业为研究对象, 通过分析不同企业原料和产品中钍-232 的比活度, 了解钍-232 在整个工艺流程中的分布迁移规律, 并对工作场所钍射气浓度进行监测, 揭示钍-232 在工艺过程中的分布迁移特性。研究表明, 国外进口独居石矿的矿物学组成, 特别是其中稀土氧化物(REO)的含量, 是影响钍-232 比活度水平的关键因素。分选过程仅涉及物理方法(如重选、磁选和电选), 未发生化学转化, 钍-232 的分布主要受其在原料中的赋存状态控制。电磁选分选过程中, 约 92.15% 的钍-232 富集于独居石精矿产品中; 冶炼阶段, 盐酸优溶工序是钍-232 的主要迁移富集工序, 约 96.56% 的钍-232 通过此工序被浓缩于产生的优溶渣中。选冶过程中, 生产场所内钍射气浓度较高的场所主要为储存独居石和尾渣的封闭场所。对其采取实体屏蔽后, 库外钍射气浓度显著降低。

关键词: 独居石; 钍-232; 分布规律; 迁移规律; 选矿; 冶炼

中图分类号: X591; TL75⁺1; TF84 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0131-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.12.19

独居石是一种磷酸盐稀土矿物, 学名磷铈镧矿, 其主要成分含镧、铈、钕、钇等轻稀土元素, 是提炼稀土的重要原料之一^[1]。全球独居石资源主要集中于印度、澳大利亚、巴西等国, 斯里兰卡、南非、马来西亚、中国、泰国、韩国、朝鲜等国家也拥有规模不等的含独居石重砂矿床^[2]。尽管中国在全球稀土供应链中占据主导地位^[3], 但其海滨砂矿型独居石矿床的规模普遍较小^[4], 资源供应仍很大程度上依赖进口。当前, 中国独居石来源主要通过进口海滨砂矿(包括钛毛矿、锆中矿、独居石中矿等砂矿), 通过分选加工得到独居石精矿。此过程不仅提升了砂矿资源的经济价值, 也实现了稀土资源的综合利用。

海滨砂矿中的独居石, 常与钛铁矿、锆英砂、金红石等矿物共生。原料钛毛矿和锆中矿中的独居石稀土氧化物(REO)的质量分数通常低于 5%; 而独居石中矿的 REO 质量分数为 3%~20%; 经分选后, 独居石产品的 REO 质量百分数一般为 50%~68%^[5]。普通独居石中 ThO₂ 质

量分数一般为 3%~12%, 某些富钍独居石中 ThO₂ 高达 30%^[6], 且钍-232 的放射性活度显著高于其他天然放射性核素。

在冶炼环节, 以海滨砂矿分选所得独居石精矿作为稀土冶炼原料, 可进一步提取氯化稀土和磷酸三钠等产品^[7-8]。独居石提炼稀土流程复杂, 还会产生放射性水平较高的残渣, 可能对环境造成影响。为此, 笔者围绕独居石分选与冶炼全过程, 研究钍-232 在工艺中的分布迁移规律。

1 独居石选冶工艺流程

中国独居石分选企业主要集中在海南、广东、广西、山东等地。分选企业的海滨砂原料一般从国外采购。在分选进口海滨砂矿(如钛毛矿、锆中矿等)时, 通常只能获得少量独居石; 而对独居石中矿进行分选时, 则可获得更多的独居石。原料分选的主要工艺流程包括重选、干燥、电磁选等物理选矿方法, 通过该流程将独居石产品与其他矿产品(如钛铁矿、锆英砂、金红石等)区分。工艺流

收稿日期: 2025-12-31; **修回日期:** 2026-01-30

基金项目: 中核铀业全国重点实验室青年基金项目(NKLUR-2024-QN-020, 钍射气分布特性模拟与辐射屏蔽模型研究)

程图(图1)涵盖了钛毛矿、锆中矿与独居石中矿3种原料的分选流程,在实际生产中,受企业资源结构、工艺布局与产品定位等因素影响,部分企业可能仅处理其中一类或两类原料。

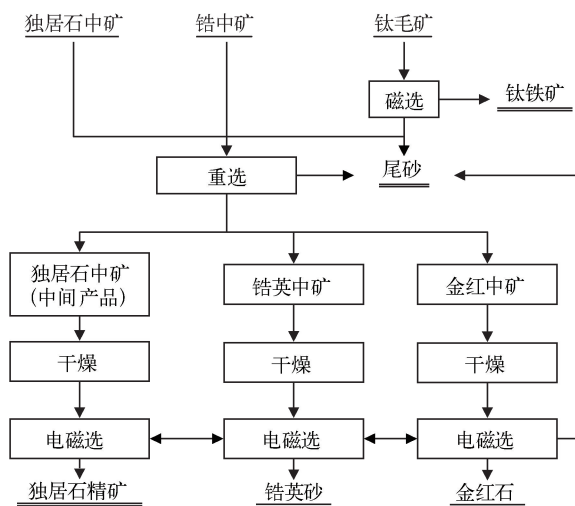


图1 分选工艺流程图

Fig. 1 Beneficiation process

以从海滨砂矿中分选得到的独居石精矿产品,作为冶炼流程的原料,通过湿法破碎和磁选除铁、碱分解转型、磷酸三钠产品制备、碱饼加盐酸优溶、氯化稀土混合物产品制备等步骤^{[9]2-3},最终得到氯化稀土产品。独居石冶炼工艺流程见图2。

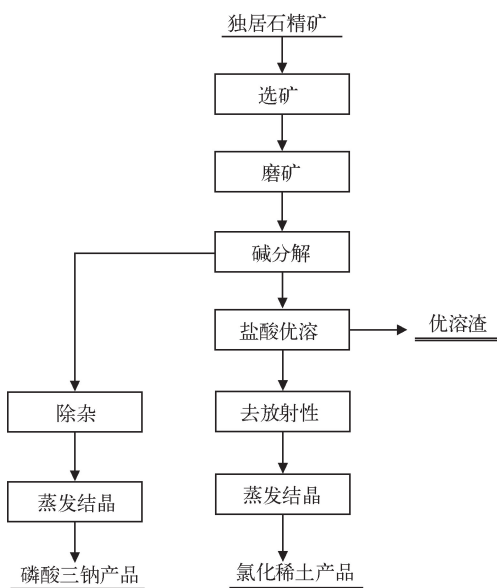


图2 独居石冶炼工艺流程图

Fig. 2 Monazite smelting process

2 独居石分选工艺钍-232 分布规律

2.1 原料与产品中钍-232 的比活度分布

对不同企业进口的3种海滨砂原料(钛毛矿、锆中矿、独居石中矿)及5种产品(钛铁矿、锆英砂、金红石、独居石、尾砂)的放射性活度进行分析,研究钍-232在分选工艺中的分布迁移规律。

不同来源地的原料化学成分也存在差异。钛毛矿的主要成分为 TiO_2 与 Fe_2O_3 ;锆中矿主要成分为 ZrO_2 ;独居石中矿的化学成分分布相对均匀,但其REO含量波动显著。REO含量的差异,将影响分选工序中独居石产品的选矿回收率。

对多家企业的原料和产品进行钍-232放射性核素比活度测定,结果见表1。可以看出,不同企业的同类原料,钍-232比活度波动范围较大,其中钛毛矿、锆中矿、独居石中矿的钍-232比活度分别为 $1.260\sim 3.272$ 、 $1.260\sim 3.393$ 、 $4.156\sim 93.389$ Bq/g。钛毛矿与锆中矿中钍-232的比活度处于同一数量级,而独居石中矿的钍-232比活度明显偏高,部分REO含量高的独居石中矿的钍-232比活度比钛毛矿与锆中矿的比活度高出一个数量级。

进一步分析A、G、H、I独居石中矿钍-232的比活度发现,进口的独居石中矿的钍-232比活度与其REO品位存在相关性。不同企业独居石中矿的REO品位存在较大差异(约 $0.5\%\sim 20\%$),REO品位越高,钍-232比活度相应越高。由此可见,独居石中矿的矿物学组成,尤其是REO含量,是影响钍-232比活度的关键因素。

2.2 分选工艺中钍-232 分布与迁移特征

2.2.1 分选工艺中钍-232 分布

为定量评估钍-232在分选工艺流程中的分布迁移特征,以海南某典型独居石分选企业为对象,对其工艺流程中钍-232的分布迁移行为进行分析。该企业年处理钛毛矿约60万吨、独居石中矿6万吨,具体分选工艺中钍-232放射性核素分布见图3。

结果表明,钍-232放射性核素在各产品中的分布存在显著差异。独居石精矿中钍-232核素量占总产出核素量的 92.15% ,由于整个分选过程仅涉及物理方法(如重选、磁选和电

选),钍-232 的分布主要受其在原料中赋存状态控制。独居石精矿作为钍的主要载体矿物,其钍-232 含量较高,是原料放射性水平的主要贡献者。尽管钛铁矿中钍-232 的比活度较低,

但由于其产率在所有产品中占比相对较高,其中的钍-232 核素量仍达到总产出核素量的 5.60%。然而,其对放射性水平的贡献远低于独居石精矿。

表 1 分选工序原料和产品中钍-232 比活度
Table 1 Thorium-232 activity concentration in ore sample and products of dressing process Bq/g

企业	原料			产品				副产品
	钛毛矿	锆中矿	独居石中矿	钛铁矿	锆英砂	金红石	独居石	尾砂
A	3.272	3.393	93.389 ^①	0.218	0.643	1.840	201.634	0.027
B	1.562			0.725	1.601	1.515	163.020	0.101
C	1.280	1.577		0.567	0.618	0.747	168.732	0.279
D	1.262			0.137	1.032	0.519	102.766	0.066
E	2.385	1.260		0.384	0.527	0.102	50.583	0.024
F	1.260			0.34	1.033~1.183	0.530~0.862	80.137	0.030~0.204
G			4.156 ^②					
H			12.829 ^③					
I			47.718 ^④					

注:①A 企业独居石中矿 REO 质量分数约为 20%;②G 企业独居石中矿 REO 质量分数约为 0.5%,原料进口,不进行分选;③H 企业独居石中矿 REO 质量分数约为 3%,原料进口,不进行分选;④I 企业独居石中矿 REO 质量分数约为 10%,原料进口,不进行分选。

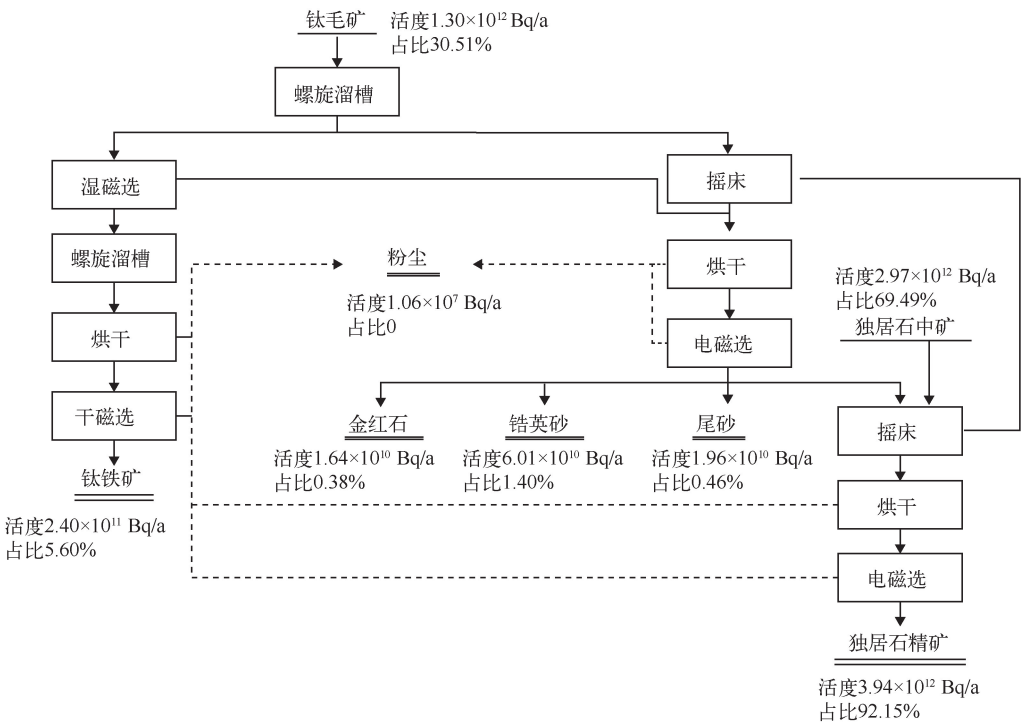


图 3 分选工艺钍-232 分布
Fig. 3 Thorium-232 distribution of dressing process

2.2.2 分选工艺中钍-232 迁移特征

为进一步研究钍-232 在不同工艺流程中的分布规律,本研究结合不同分选阶段的核素分布,

对比了重选(摇床和螺旋)、磁选、电选等环节中钍-232 分布迁移情况。

在钛毛矿和独居石中矿的重选工序中,大部

分钍-232 随矿物固相进入后续处理环节,而仅有少量钍-232 转移至选矿废水中。鉴于废水中钍-232 含量普遍较低,且废水通常循环使用,故在本研究中未将选矿废水作为独立的钍-232 产出项进行核算。

在干燥(烘干)工序中,采用直接或间接加热方式对物料进行烘干,少量颗粒态钍-232 随水蒸气以气溶胶形态,经排气筒扩散至大气环境。在干式电磁选过程中,进料仓、出料口等位置产生的含放射性核素的粉尘,可能以气溶胶形态无组织排入大气。根据《稀土工业污染物排放标准》(GB 26451—2011)及其修改单要求,排放铀、钍粉尘的排气筒浓度限值为 0.1 mg/m³,企业边界任意 1 h 铀、钍总平均浓度限值为 0.002 5 mg/m³。实际监测表明,以废气形式排放的钍-232 总量较低,以海南某企业为例,其烘干及电磁选工序粉尘年排放量约为 1.06×10⁷ Bq/a,相对于全流程的钍-232 总量而言,可忽略不计。

海滨砂原料中的钍-232 主要随主体矿物流程迁移并保留于固相矿料中。在电磁选阶段,通过独居石与其他不同矿物的导电性与导磁性差异,实现有效分离。由于独居石精矿内伴生大量钍-232,该物理分选过程使约 92.15% 的钍-232

随独居石精矿富集,并进入独居石精矿产品中。

2.3 分选工作场所γ辐射剂量率和钍射气浓度

人体所受天然放射源内照射剂量主要来源于氡和钍射气及其子体,在高钍本底地区或稀土厂房,钍射气对内照射剂量的贡献甚至高于氡^[10-13]。根据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000 年报告书,钍射气及其子体的照射剂量占氡及其子体照射剂量的比例从原来的小于 6% 调整为 9%^[14]。这表明在相关工艺流程中需重点关注核素富集的工艺点^[15]。因此,对重点场所应开展钍射气浓度监测。

对海南省某独居石分选企业工作场所的γ辐射剂量率和钍射气浓度进行监测(表 2),发现不同工作场所的γ辐射剂量率和钍射气浓度水平存在显著差异。独居石仓库中γ辐射剂量率和钍射气浓度最高,而其他分选区域γ辐射剂量率和钍射气浓度普遍较低。造成该差异的主要原因在于分选车间通常采用半敞开式厂房结构(混凝土或钢架墙体配合气窗或通风墙),通风条件良好,有效促进了放射性气体的扩散。相比之下,独居石仓库内放射性物料集中且钍-232 比活度高,归因于仓库容积较小且多为相对封闭空间,易造成钍射气积累。

表 2 海南省某企业分选工艺工作场所γ辐射剂量率和钍射气浓度

Table 2 Gamma radiation dose rate and thoron concentration in dressing process workplace of an enterprise in Hainan

监测区域	γ 辐射剂量率/(μSv/h)			钍射气浓度/(Bq/m ³)		
	范围值	平均值	标准差	范围值	平均值	标准差
原料堆存区	0.12~0.13	0.12	0.002	6~10	8	1.6
钍矿选矿区	0.47~0.57	0.50	0.030	14~17	16	1.4
重选区	0.13~0.14	0.13	0.002	8~15	13	3.4
电磁选区	0.63~0.66	0.64	0.010	28~34	31	2.5
独居仓库(有独居石)	22.4~23.9	23.1	0.400	84~103	94	7.9

3 冶炼分离工艺钍-232 分布及迁移规律

3.1 原料与产品中钍-232 的比活度分布

将经分选获得的独居石精矿作为独居石冶炼的原料,对原料(独居石精矿)、冶炼产品(磷酸三钠、氯化稀土)和固体废物进行放射性活度测试,研究钍-232 在独居石冶炼工艺中的分布富集规律。

为比较国内不同来源的独居石,本研究选择 2 个代表性独居石样品分析其主要化学成分(表 3)。

由于有产品质量标准的限定^[16],故独居石中主要化学成分差异较小,REO 质量分数均在 55% 以上,ThO₂ 质量分数分别为 5.47% 和 3.76%。

表 3 独居石中的主要化学成分

Table 3 Main elemental composition of monazite %

独居石来源	REO	P ₂ O ₅	ThO ₂
A	55.86	22.45	5.47
B	59.34	26.18	3.76

对不同来源的独居石精矿原料中的钍-232 比活度进行了测定,结果见表 4。可以看出,独居石精矿中,钍-232 比活度均高于 150 Bq/g。在冶炼

过程中,钍-232 主要迁移并富集于尾渣中,各类产品中的钍-232 比活度相对较低。

表 4 独居石冶炼工艺中原料和产品中钍-232 放射性核素比活度

企业	原料	产品		固废(尾渣)			
	独居石精矿	氯化稀土	磷酸三钠	除杂渣	除放渣	泥状渣	优溶渣(酸溶渣)
J	169.528~194.112	0.374	0.005	155.439~160.935	95.637~97.016	3.583~3.862	516.419

3.2 冶炼分离工艺中钍-232 的分布与迁移特征

3.2.1 冶炼分离工艺中钍-232 分布

在冶炼工艺中,绝大部分钍-232 从独居石精矿迁移至尾渣中,产品中钍-232 的比活度均显著低于原料。为定量评估钍-232 在冶炼工艺流程中的分布特征,以湖南某典型独居石冶炼企业为对象,对其工艺流程中钍-232 的分布迁移行为进行追踪分析。冶炼工艺钍-232 放射性核素分布见图 4。可以看出,冶炼过程中钍-232 进入产品中的量较少,其在氯化稀土和磷酸三钠中的占比仅为 0.28%;其余均进入废渣中,在优溶渣(酸溶渣)中的占比为 96.56%。表明独居石冶炼工艺过程中的优溶渣是钍-232 的主要载体。

优溶渣主要由锆石、钍化合物和石英等矿物组成^[17]。因此,为实现钍资源的高效回收与放射性废物的减容化,中国已有部分企业开展对优溶渣的综合利用实践,旨在提取其中的铀钍元素。巴西也有从独居石硫酸浸出液中提取钍的研究报道^[18],该工艺可有效实现钍、铀的混合物和稀土的回收,回收率可达 90%^[19]。中国利用酸性含磷类萃取提取钍及粗制钍产品,包括氢氧化钍(半成品)和硝酸钍,如湖南中核金原,可使得钍等有价资源回收率大于 95%^{[9]10}。

3.2.2 冶炼分离工艺中钍-232 迁移特征

为进一步研究钍-232 在冶炼工艺流程中的分布规律,结合不同冶炼阶段核素分布,本研究对比了碱分解、盐酸优溶等环节中钍-232 分布迁移情况(图 4)。

在独居石精矿磨矿和碱分解过程中,大部分钍-232 在矿料中进入下一工序,有少部分钍-232 因磨矿拆包、投料操作随粉尘排入大气环境中。

经碱分解后,利用母液生产磷酸三钠的过程中会产生磷除杂渣,磷除杂渣的钍-232 活度较高,但产生的量相对较少,其占比仅为 2.09%。在盐酸优溶环节,优溶渣赋存了独居石精矿中 96.56% 的钍-232 含量。盐酸优溶反应后,经固液分离得到优溶渣和滤液,滤液主要为氯化稀土溶液。在该溶液中加入氯化钡和硫酸铵等去放射性溶剂,将溶液中微量的放射性(镭)除去。由此产生的除放渣中,钍-232 占比为 1.14%,故最终进入氯化稀土产品中的钍-232 含量极低。在独居石冶炼过程中碱分解、盐酸优溶、氯化稀土产品制备等工艺流程中,生产用水全部循环使用,无工艺废水产生,故冶炼生产废水不作为产出项目单独计算。

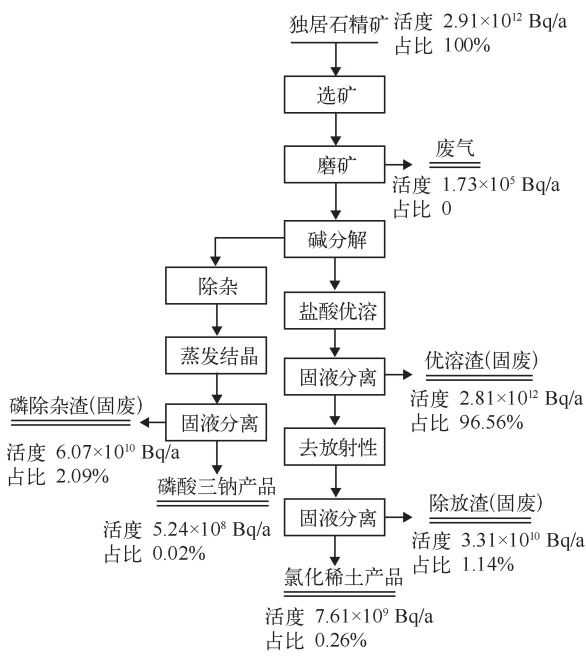


图 4 冶炼工艺钍-232 分布

Fig. 4 Thorium-232 distribution of smelting process

3.3 冶炼工作场所 γ 辐射剂量率和钍射气浓度

通过对湖南省某独居石冶炼企业工作场所开展 γ 辐射剂量率和钍射气浓度监测(表 5),发现独居石仓库内 γ 辐射剂量率和钍射气浓度最高,尾渣板框压滤区次之。主要是因为独居石中赋存的钍-232 在冶炼过程中进一步转移并浓缩于尾渣内,且压滤区空间相对封闭,通风条件有限,导致钍射气及其子体发生局部积累。相比之下,放射性废物库虽贮存高活度废渣,但因采取了实体屏蔽^[20],库外监测点的 γ 辐射剂量率和钍射气浓度

与工作车间其他普通区域处于同一水平。稀土产品存放区中的钍射气浓度显著降低,约为独居石精矿原料区的四分之一,表明后续工艺对放射性核素实现了有效富集。

针对独居石仓库、尾渣板框压滤区这类 γ 辐射剂量率和钍射气浓度偏高的场所,建议采取强制机械通风、墙体及堆存区域屏蔽防护等工程措施,同时规范物料堆存方式、严控人员作业时长并配套个人防护装备,以此实现辐射风险的有效管控。

表 5 湖南省某企业冶炼工艺工作场所 γ 辐射剂量率和钍射气浓度

Table 5 Gamma radiation dose rate and thoron concentration in smelting process workplace of an enterprise in Hunan

监测区域	γ 辐射剂量率/(μ Sv/h)			钍射气浓度/(Bq/m ³)		
	范围值	平均值	标准差	范围值	平均值	标准差
独居精矿区	8.90~17.10	13.0	5.80	168~176	172	3.27
磨矿厂房	3.60~5.20	4.40	1.13	24~30	27	2.5
碱分解区	3.20~6.55	4.88	2.37	34~37	36	1.4
盐酸酸溶区	7.60~10.30	8.95	1.91	44~57	51	5.5
尾渣板框压滤区(封闭)	5.30~10.50	7.90	3.68	156~169	163	5.48
产品装袋区	0.58~0.67	0.63	0.06	45~54	50	3.9
放射性废物库(室外)	0.41~0.69	0.55	0.20	36~40	38	1.6

4 结论

在独居石选冶全流程中,钍-232 核素随工序推进发生迁移。分选工艺中,电磁选工序使约 92.15% 的钍-232 随独居石富集并进入独居石精矿产品中。在后续冶炼分离过程中,盐酸优溶工序使钍-232 的进一步富集,产生的优溶渣中钍-232 含量占独居石原料总钍量的 96.56%。结果表明,电磁选与盐酸优溶是钍-232 分布迁移的关键工序。

根据选冶企业工作场所钍射气浓度分布情况,钍射气浓度较高的工作场所为储存独居石和尾渣的封闭场所。放射性废物库采取了实体屏蔽后,库外 γ 辐射剂量率和钍射气浓度显著降低,建议采取强制机械通风、墙体及堆存区域屏蔽防护的工程措施,同时规范物料堆存方式、严控人员作业时长并配套个人防护装备,以有效管控辐射风险。

参考文献:

[1] 侯伟强,张伟超.独居石碱转滤液精细过滤工艺改进研究[J].铈矿冶,2024,43(3):45-49.
Hou Weiqiang, Zhang Weichao. Improvement of fine filtration of filter liquor of monazite alkali decomposition[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43 (3):45-49.

[2] 桑园,覃波.独居石冶炼过程中的放射性污染与防护[J].有色冶金节能,2017,33(1):52-55.
Sang Yuan, Qin Bo. Radioactive pollution and protection in monazite smelting process [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2017, 33 (1): 52-55.

[3] 季根源,张洪平,李秋玲,等.中国稀土矿产资源现状及其可持续发展对策[J].中国矿业,2018,27(8):9-16.
Ji Genyuan, Zhang hongping, Li Qiuling, et al. Current status of rare earth resources in China and strategies for its sustainable development [J]. China

- Mining Magazine, 2018, 27(8):9-16.
- [4] 陆莎莎.独居石资源开发利用现状及政策建议[J].中国资源综合利用, 2023, 41(9):79-81.
Lu Shasha. Status and policy suggestions on the development and utilization of monazite resources[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(9):79-81.
- [5] 徐锦伯, 蒋敏, 刘浩, 等. 某独居石精矿污染物的去除技术研究[J]. 湿法冶金, 2024, 43(4):454-460.
Xu Jinbo, Jiang Min, Liu Hao, et al. Contaminant removal technology of a monazite concentrate[J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(4):454-460.
- [6] 赵芝, 王登红, 黄凡, 等. 独居石: 20 世纪稀土和钍资源的重要来源[J]. 国土资源科普与文化, 2020(3):18-21.
Zhao Zhi, Wang Denghong, Huang Fan, et al. Monazite: An important source of rare earths and thorium in the 20th century[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2020(3):18-21.
- [7] 孙岩, 韩昌甫. 我国滨海砂矿资源的分布及开发[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1):117-122.
Sun Yan, Han Changfu. The distribution and development of coastal placer resources in China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(1):117-122.
- [8] 杨慧根. 钛锆稀土砂矿精选新工艺的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 1998(3):24-26.
Yang huigen. Research on the new technology of titaniumzirconium rare earth placer selection[J]. Non-Ferrous Metals(Mineral Processing Part), 1998(3):24-26.
- [9] 湖南中核金原新材料有限责任公司. 一种从独居石精矿中冶炼分离铀、钍和稀土的工艺方法: CN201910848296.5[P]. 2021-07-20.
- [10] Porstendörfer J. Properties and behavior of radon and thoron and their decay product sintheair[J]. Journal of Aerosol Science, 1994, 25(2):219-263.
- [11] Porstendorfer J, Wicke A, Schraub A. The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon and thoron and their decay products in room air[J]. Health Physics, 1978, 34(5):465-473.
- [12] 夏益华. 高等电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010:117-139.
- [13] 刘啸晨, 杨明理, 王攀, 等. 氡钍射气连续测量装置的研制及其现场验证[J]. 铀矿冶, 2023, 42(3):69-74.
Liu Xiaochen, Yang Mingli, Wang Pan, et al. Development and on-site test of radon-thoron continuous monitoring device[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(3):69-74.
- [14] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation[R]. New York: United Nations, 2000.
- [15] 初旭阳, 胡鹏华, 杨明理, 等. 北方某露天铀伴生矿辐射防护实践和剂量估算[J]. 铀矿冶, 2023, 42(1):73-79.
Chu Xuyang, Hu Penghua, Yang Mingli, et al. Radiation protection and dose estimation of an open-pit uranium associated mine in north China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(1):73-79.
- [16] XB/T 104—2015 独居石精矿[S].
- [17] 梁耕宇, 苏学斌, 刘康, 等. 用 N235 从独居石优溶渣浸出液中萃取铁的动力学研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(2):127-132.
Liang Gengyu, Su Xuebin, Liu Kang, et al. Extraction kinetics of Fe^{3+} from monazite selective solution slag leaching solution using N235[J]. Hydrometallurgy of China, 2023, 42(2):127-132.
- [18] Lapidus G T, Doyle F M. Selective thorium and uranium extraction from monazite: II. approaches to enhance the removal of radioactive contaminants[J]. Hydrometallurgy, 2015, 155:161-167.
- [19] Demol J, Ho E, Soldenhoff K, et al. Beneficial effect of iron oxide/hydroxide minerals on sulfuric acid baking and leaching of monazite[J]. Hydrometallurgy, 2022, 211:105864.
- [20] 杨飞. 伴生放射性煤矿的辐射防护[J]. 煤炭技术, 2014, 33(11):326-328.
Yang Fei. Radiation protection for coal mine associated with radionuclides[J]. Coal Technology, 2014, 33(11):326-328.

Migration Behavior and Radiological Impact Characteristics of Thorium-232 in Beneficiation and Smelting Processes of Monazite

TIAN Sirong^{1,2,3}, FAN Hongbo^{2,3}, GAO Xiang^{2,3}, GAO Jie⁴

(1. Research Institute No. 230, CNNC, Changsha 410007, China;

2. Hunan CNNC Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China;

3. Hunan Engineering Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources, Changsha 410007, China;

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

Abstract: This study investigated typical enterprises engaged in the integrated beneficiation and smelting of monazite, with a focus on characterizing the behavior of thorium-232 throughout the production chain. Through systematic analysis of activity concentrations in various raw materials and products from different manufacturers, the pathways and final distribution of thorium-232 across the entire technological process were traced. Workplace monitoring of thoron concentrations was carried out to assess inhalation hazards, collectively revealing the distinct migration and enrichment patterns of thorium-232 and its associated radiological exposure risks. Through the analysis of the chemical composition in monazite ore, it is found that the REO content is the key factor influencing the activity concentration of thorium-232. The monazite dressing process primarily involves stages such as shaking table gravity separation, drying, and electromagnetic separation, while the smelting process includes magnetic separation, alkali decomposition, and hydrochloric acid preferential dissolution. Thorium-232 exhibits a pronounced tendency for selective enrichment within these sequences. Comprehensive data on chemical composition and radionuclide activity from multiple enterprises in Hainan Province demonstrate that about 92.15% of thorium-232 is concentrated into the monazite product during electromagnetic separation. Further analysis based on material chemistry and activity measurements from a smelting enterprise in Hunan Province indicates that about 96.56% of the thorium-232 is subsequently transferred and further enriched in the residue generated from the hydrochloric acid preferential dissolution stage. It is noteworthy that emissions of thorium-232 in waste gases and process waters throughout both dressing and smelting operations are negligible relative to the total inventory.

Key words: monazite; thorium-232; distribution pattern; migration pattern; beneficiation; smelting