

内蒙古碱性花岗斑岩型多金属矿选冶产物中 锆元素的存在形式研究

马 嘉^{1,2}, 李春风^{1,2}, 刘志超^{1,2}, 李 广^{1,2}, 田宇晖^{1,2}, 张 晨^{1,2},
张守逊^{1,2}, 候鲜名¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要:为提高多金属矿床中锆资源综合回收效率和保障清洁能源发展,采用光学显微分析、扫描电镜-能谱分析、X 射线衍射及定量矿物分析等多技术联用方法,对内蒙古某碱性花岗斑岩型多金属矿原矿、锆精矿、尾矿及不同阶段水冶产物进行了系统分析,并揭示了锆元素在选冶全流程中的赋存状态与解离特性。研究结果表明:锆在原矿及选矿产品中主要以独立锆石形式存在,其次以类质同象形式,置换 Th^{4+} 、 U^{4+} 等离子,分散于钽石、烧绿石及独居石等载体矿物中;锆石在选矿过程中逐步富集和解离,但重选尾矿中仍有微细粒锆石因包裹或连生而损失;水冶过程中,锆石经碱熔转化为 Zr 化合物,但部分颗粒因反应不完全或被新生硅质包裹,导致酸解渣中仍残留一定以锆石或含锆硅质化合物形式存在的锆。基于分析结果提出了“阶段磨矿-阶段分选优化解离-强化碱熔预处理”的改进工艺,为矿石选冶流程优化提供矿物学依据。

关键词:多金属矿;锆;工艺矿物学;选冶流程;稀土;赋存状态

中图分类号:TF803.2;TF841.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)03-0448-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.021

锆作为一种不可替代的关键金属,因具有优异的中子经济性、耐腐蚀性和高温稳定性,广泛应用于核反应堆、航空航天及先进陶瓷等高科技领域^[1-3]。我国锆资源对外依存度长期高于 90%,且国内资源以品位低、共伴生关系复杂的岩矿型为主,开发利用难度大^[4]。因此,实现内蒙古某碱性花岗斑岩型超大型稀有稀土多金属矿床中锆资源的高效综合回收,对保障国家资源安全具有重要意义。

目前,针对该矿床的研究已取得重要进展。在地质矿物学方面,研究揭示了其与高演化 A 型碱性花岗岩的成因联系和控矿因素^[5-7],并提出了锆与稀土元素在时空上“离散成矿”的精细模型,表明锆(主要呈锆石)的矿化独立且复杂^[8-9];在选矿方面,相关研究多围绕“磁-重-浮”联合工艺展开,旨在从复杂矿石中富集锆石,但普遍面临因矿

物嵌布粒度细、共生关系复杂导致的锆回收率偏低问题^[10-11];在水冶方面,针对砂矿已形成较成熟的工艺,但有关这类岩矿型锆精矿的脉石包裹、连生体多等特性的针对性研究仍较薄弱^[12-17],该矿床中的铀元素因赋存于未充分反应的锆石中而流失,间接印证了反应不完全是关键障碍^[18]。综上可知,当前研究相互脱节,缺乏对锆在“原矿→精矿→尾矿→水冶渣”全流程中赋存状态演变的系统追踪,导致工艺优化缺乏针对性依据。

因此,试验以内蒙古某碱性花岗斑岩型多金属矿为研究对象,通过多尺度分析手段耦合,系统分析揭示了锆在该矿石的选冶过程中的赋存状态与解离特性演变规律。重点探究了影响锆回收的关键矿物学因素,并提出了相应的工艺优化建议,以期为该类资源的绿色高效利用提供理论支撑。

收稿日期:2026-03-02;**修订日期:**2026-03-19

基金项目:中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(2023NRE-LH-20);铀资源探采与核遥感全国重点实验室基金项目(NKLUR-2024-YB-017);中核集团基础研究项目(CNNC-JCYJ-202331);核技术研发科研项目资助。

第一作者简介:马嘉(1987—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为工艺矿物学。

1 试验部分

1.1 试验样品制备与设备

试验样品主要包括原矿、锆精矿、重选尾矿,以及水冶过程产生的水洗样、转型料和酸解渣。样品制备流程见图 1。

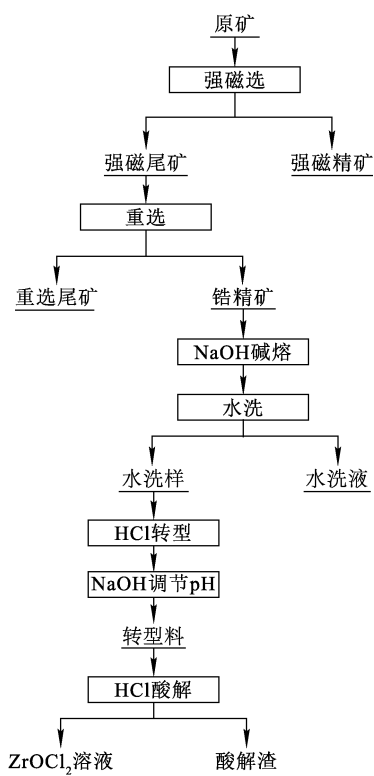


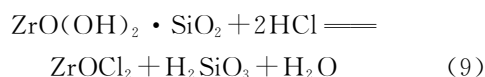
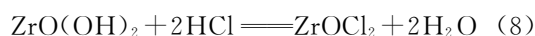
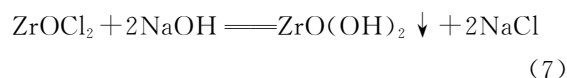
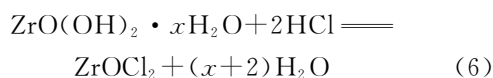
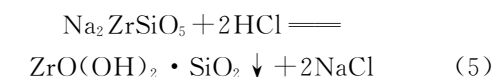
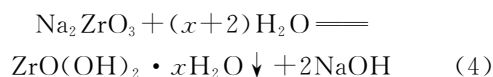
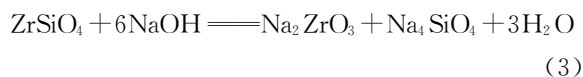
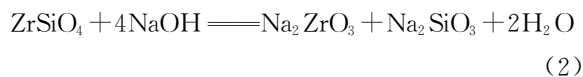
图 1 样品的制备工艺流程

Fig. 1 Flowchart of sample preparation

原矿样品采自矿床近地表区域,其中脉石矿物占比约 85%(石英、长石、钠长石等),有用矿物为兴安石、易解石、独居石、烧绿石、氟碳铈镧矿、铌铁矿、锆石、钽石等,有价元素在不同矿物中以类质同象形式相互置换,呈现出复杂混含的特点。原矿破碎至 -1 mm 混匀后制备原矿样品,采用阶段细磨、磁选重选联合工艺获得 -200 目锆精矿。

锆精矿经碱熔、水洗、转型、酸解等处理工艺,获得系列水冶产物。锆精矿先利用 NaOH 进行碱熔,绝大部分锆石转化为可溶性的锆酸钠(如 Na_2ZrO_3 等)(方程式(1)~(3)),后经水洗(方程式(4))、转型(方程式(5)~(7))及酸解(方程式(8)、(9))等步骤,最终形成 ZrOCl_2 溶液,过滤后所得固体即为

以硅酸(H_2SiO_3)为主的酸解渣^[19]。涉及到的主要化学反应如下:



主要分析仪器:ZEISS Axio Scope A1 pol 偏光显微镜、ZEISS $\Sigma 300$ 扫描电镜、Bruker Quantax 200 Xflash 能谱仪、AMICS-Mining 矿物参数自动定量分析系统、日本电子 JXA8100 电子探针分析仪等。

1.2 研究方法

首先对原矿开展锆存在形式及含锆矿物特征研究,之后对磁-重联合选矿工艺得到的锆精矿和重选尾矿中锆的分布特征进行研究,最后对锆精矿经水洗、转型和酸解后分别得到的水洗样、转型料和酸解渣 3 类水冶产物中的锆赋存状态进行研究,工艺路线如图 2 所示。

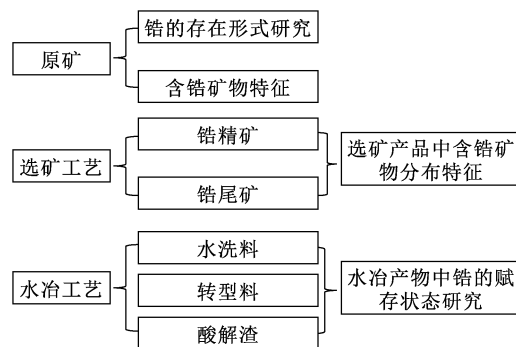


图 2 选冶过程中锆赋存状态演变研究路线

Fig. 2 Research roadmap for zirconium occurrence state evolution during beneficiation and metallurgy

研究采用多技术联用的系统矿物学方法: 1) 采用偏光显微镜岩相学观察, 鉴定矿物组成与共生关系; 2) 采用扫描电镜联合能谱测试 (SEM-EDS) 进行微区形貌观察与成分分析; 3) 利用矿物参数自动定量分析系统 (AMICS-Mining) 进行矿物定量统计、解离度与粒度分析; 4) 采用电子探针 (EPMA) 开展主微量元素面扫描与点分析。

2 试验结果与讨论

2.1 锆含量

化学分析及矿物学反算结果 (表 1) 表明: 原矿锆品位为 2.7% (ZrO_2 约 3.6%); 经选矿富集锆石后, 锆精矿中 Zr 品位达 44.97%; 水冶产物中锆含量发生显著变化, 水洗样与转型料中锆质量分数较高, 均达 48.1%; 而酸解渣中锆质量分数仍维持在 16.86%, 说明部分锆石未充分浸出, 或锆元素在酸解过程中分散于硅质渣相中。

表 1 不同样品中锆质量分数
Table 1 Zirconium mass fraction in different samples

样品	$w(\text{Zr})/\%$
原矿	2.7
锆精矿	44.97
重选尾矿	0.98
水洗样	48.10
转型料	48.16
酸解渣	16.86

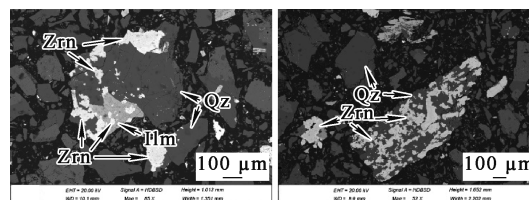
2.2 锆的赋存状态及分布率

原矿中锆主要以独立锆石 (ZrSiO_4) 形式存在, 其次以类质同象形式, 置换 Th^{4+} 、 U^{4+} 等离子, 分散于钍石、烧绿石及独居石等载体矿物中 (表 2)。

锆石作为 Zr 的核心载体矿物 (图 3), 经“磁选-重选”联合工艺选矿后, 其品位由原矿的 5.45% 富集至 70.34%。烧绿石 ($\text{Ca}(\text{Pb}, \text{Ce})\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH})$)、独居石 ($\text{Ce}_{0.5}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.2}\text{Th}_{0.05}(\text{PO}_4)$) 及钍石 ($\text{Th}(\text{SiO}_4)$)、作为矿床中 Zr 元素的次要载体矿物, 虽具有弱磁性, 但因粒度细、连生复杂, 在精矿中仍有少量残留。重选尾矿中仍可见微细粒锆石 (图 4), 这是锆流失的主要矿物载体。

表 2 锆在不同样品中的赋存状态及分布率
Table 2 Occurrence state and distribution rate of zirconium in different samples

样品类型	矿物类型	质量分数/%	矿物中 $w(\text{ZrO}_2)/\%$	ZrO_2 分布率/%
原矿	锆石	5.45	59.96	99.958
	钍石	0.19	0.5	0.029
	烧绿石	0.08	0.21	0.005
	独居石	0.2	0.13	0.008
锆精矿	锆石	70.34	59.96	99.997
	钍石	0.22	0.5	0.002
	烧绿石	0.08	0.21	<0.001
	独居石	0.22	0.13	0.001
重选尾矿	锆石	1.94	59.96	100
水洗样	锆石	6.24	59.96	8.914
	Zr 化合物	83.71	45.28	90.307
	硅质化合物	7.22	4.53	0.779
转型料	锆石	5.88	59.96	7.907
	Zr 化合物	90.64	45.28	92.043
	稀土-Zr、Th 混合物	0.12	18.7	0.050
酸解渣	锆石	16.72	59.96	65.902
	Zr 化合物	3.67	45.28	10.924
	硅质化合物	77.45	4.53	23.063
	稀土-Zr、Th 混合物	0.09	18.7	0.111



Qz—石英; Zrn—锆石; Ilm—钛铁矿

图 3 原矿中微细粒锆石充填石英颗粒溶蚀孔洞
Fig. 3 Micro-fine zircon filling dissolution pores in quartz particles

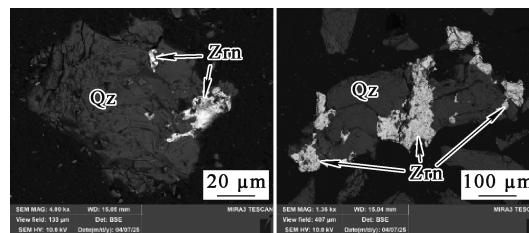


图 4 重选尾矿中微细粒锆石嵌布于石英裂隙
Fig. 4 Fine-grained zircon in gravity tailings lodged in quartz cracks

水冶过程中,大部分锆石经碱熔分解转化形成 $\text{Na}_2\text{ZrSiO}_5$ 、 Na_2ZrO_3 等 Zr 化合物,部分因颗粒粗大或包裹严重而未充分反应,从而形成包壳结构(图 5)。 $\text{Na}_2\text{ZrSiO}_5$ 、 Na_2ZrO_3 等 Zr 化合物在经过水洗、转型后形成 $\text{ZrO}(\text{OH})_2$,并在酸解后转化为可溶的 ZrOCl_2 。因此在酸解渣中,未充分反应的锆石及被硅质(H_2SiO_3)包裹的 Zr 化合物成为锆的主要存在形式,部分锆亦分散于含锆硅质化合物及稀土锆钽混合物中(图 6)。在不同样品中,Zr 化合物在元素分布和结构特征上存在差别:水洗样中,Zr 和 Si 元素分布相对均匀,质量分数分别稳定在 45%和 5%左右,内部多发育裂纹,团粒边缘较为粗糙;转型料和酸解渣中,裂纹较少,呈现片状或团粒状结构,Zr 化合物元素分布不均匀, Si 质量变化幅度较大(3%~15%),且酸解渣中 Zr 质量分数也存在较大波动(40%~60%),部分 Zr 化合物边缘出现硅质壳。

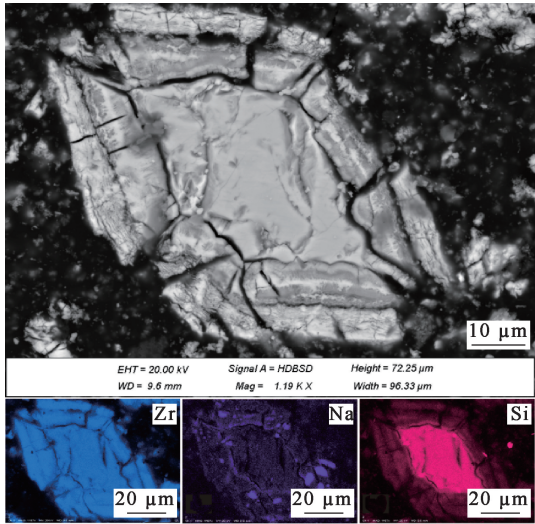


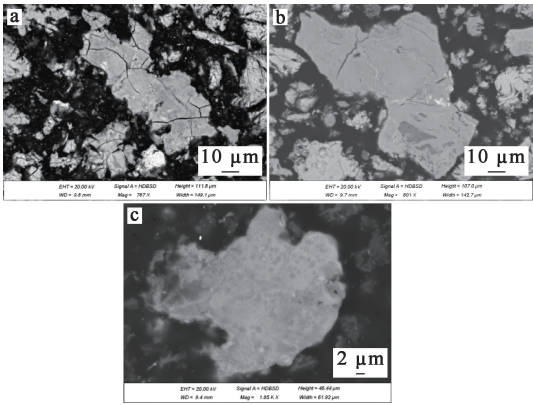
图 5 水洗样中锆石部分碱熔形成的包壳结构

Fig. 5 Coating structure of partially alkali-fused zircon in washed sample

2.3 选冶过程中锆石/锆化合物粒径及解离特性

原矿及选矿产物中锆石粒径分布如图 7 所示,原矿及选矿产物中锆石与其他矿物共生关系特征如图 8 所示。由图 7 看出:原矿中锆石粒径呈宽泛且连续的分布特征,主要分布于 31.53~126.13 μm 区间,其中 D_{50} 约为 63 μm ;从粒级分布来看,原矿锆石在 63.07~106.07 μm 粗粒级区间分布最为集中,粒径为 63.07 μm 的锆石体积分布率为 9.65%,粒径为 106.07 μm 的锆石体

积分布率为 10.46%;在 22.3~37.5 μm 细粒级区间也存在一定程度的富集,粒径为 22.3 μm 锆石体积分布率为 4.25%,粒径为 37.5 μm 的锆石体积分布率为 6.91%。原矿中锆石的解离与嵌布特征分析结果表明,原矿中仅约 14%的锆石达到单体解离,其余均以不同形式与脉石或金属矿物共生。其中,约 55%的锆石充填于石英颗粒的溶蚀孔洞中,与石英形成紧密包裹关系;约 16%的锆石与长石类矿物连生;另有约 3%的锆石与铁氧化物(如赤铁矿)及钽石等金属矿物构成复杂共生集合体。



a—水洗样;b—转型料;c—酸解渣

图 6 不同水冶样品中 Zr 化合物背散射图像

Fig. 6 BSE images of Zr-Si compounds in different hydrometallurgical samples

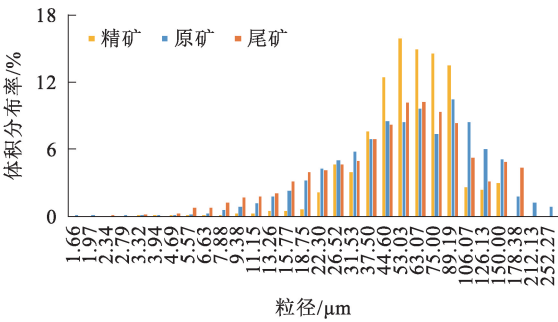


图 7 原矿及选矿产物中的锆石粒径分布

Fig. 7 Grain size distribution of zircon in raw ore and beneficiation products

由图 7 还可看出,不同选矿产物中锆石的粒径分布与解离特征发生显著分异:精矿中的锆石粒径分布重心向粗粒迁移,主富集区集中于 44.6~75 μm (体积分布率 12.4%~15.87%),粒

径集中度较原矿显著提升;尾矿中的锆石粒径分布范围略窄,细粒级($<20\ \mu\text{m}$)累计体积分布率达 15.75%,粗粒级($>150\ \mu\text{m}$)亦有个别残留。精矿中锆石的解离与嵌布特征分析结果表明,精矿中锆石的单体解离度大幅提高至 68%,主要连生矿物仍为石英(16%)和钾长石(5%)。尾矿中锆石的解离与嵌布特征分析结果表明,尾矿中锆

石的单体解离度仅为 10%,多与脉石矿物(79%为石英或长石)嵌布共生(图 4),这是导致锆损失的主要原因。

水冶产物分析结果表明,锆石/Zr 化合物粒径进一步细化,酸解渣中主要分布在 $10\sim 35\ \mu\text{m}$,微细粒级及硅质包裹是阻碍锆高效浸出的重要因素(图 9)。

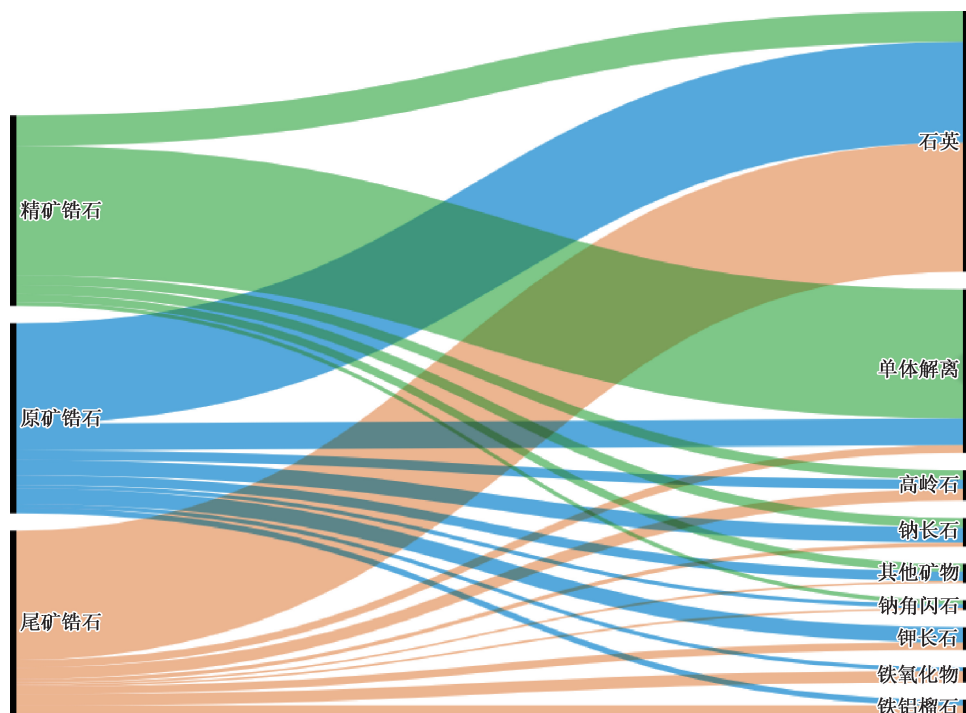


图 8 原矿及选矿产物中锆石与其他矿物共生关系特征

Fig. 8 Characteristics of paragenetic relationship between zircon and associated minerals in raw ore and beneficiation products

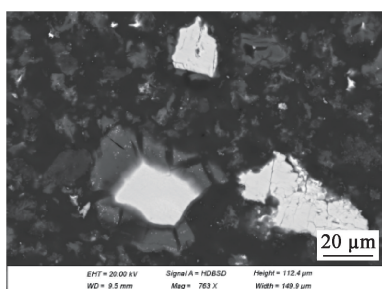


图 9 酸解渣中含锆硅质化合物包裹锆石颗粒

Fig. 9 Zircon grains encapsulated by Zr-bearing siliceous compounds in acid-leached residue

2.4 影响锆元素选冶指标的矿物学因素

在原矿中,锆石多被石英等脉石包裹,或与铁氧化物/稀土矿物形成复杂连生结构,导

致其难以充分解离,从而限制了后续反应界面的有效暴露;在选矿工序,部分已解离的微细粒锆石,尤其是 $<20\ \mu\text{m}$ 颗粒在重选过程中易于流失,造成物理回收损失;进入水冶工序后,粗粒或包裹严重的锆石在碱熔过程中反应不完全,形成包壳结构,同时反应新生成的含锆硅质化合物会在锆石或锆化合物表面形成钝化层,阻碍浸出剂的扩散及后续反应。选矿前、选矿后及水冶后的矿物学特征在成因上相互关联,对锆回收的影响逐级传导,共同构成了制约锆综合回收率的关键瓶颈。基于上述结果,建议采用“阶段磨矿-阶段分选优化解离—强化碱熔预处理”的改进工艺,优化矿石选冶流程。

3 结论

针对内蒙古某碱性花岗斑岩型多金属矿的原矿、锆精矿、尾矿及不同阶段水冶产物,通过光学显微分析、扫描电镜-能谱分析、X 射线衍射及定量矿物分析等多种手段探讨了锆在不同选冶产物中的存在形式,为后续高效选冶锆提供理论依据。研究结论如下:

1) 矿床中的锆主要以独立锆石形式存在,多嵌布于石英、长石粒间或受其包裹。“磁选重选”联合工艺虽可有效富集锆石(精矿质量分数达 70.34%),但微细粒锆石易流失到尾矿中。水冶过程中损失的锆元素多以反应不完全或受新生硅质包裹的锆石形式残留于酸解渣中。

2) 锆石粒径、解离特性、包裹连生关系及水冶中形成的硅质钝化层是制约锆整体回收率的关键矿物学因素。

3) 基于矿物学因素研究结果,可通过“阶段磨矿-阶段分选”提高解离度、强化碱熔预处理以破坏硅酸盐包裹、优化浸出条件以抑制硅质钝化层形成等方式优化选冶工艺。

参考文献:

- [1] 王学求,李龙雪,吴慧,等.关键元素超常富集与战略资源效应[J].地学前缘,2025,32(1):11-22.
WNAG Xueqiu, LI Longxue, WU Hui, et al. Super enrichment of critical elements: implications for strategic mineral resources[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(1): 11-22.
- [2] 冯志浩,夏超群,张新宇,等.高强韧锆合金的发展与应用[J].材料科学与工艺,2018,26(2):1-8.
FENG Zhihao, XIA Chaoqun, ZHANG Xinyu, et al. Development and applications of zirconium alloys with high strength and toughness[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(2): 1-8.
- [3] 周志兵.纯锆体系辐照损伤行为中电子效应的影响[D].成都:四川大学,2021.
- [4] 尹传凯,王春连,游超,等.中国锆矿资源特征、矿床类型、关键应用及找矿远景[J].中国地质,2024,51(6):1930-1945.
YIN Chuankai, WANG Chunlian, YOU Chao, et al. Zircon resource characteristics, deposit types, key applications and prospecting prospects in China[J]. Geology in China, 2024, 51(6): 1930-1945.
- [5] 杨武斌,牛贺才,单强,等.巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究[J].岩石学报,2009,25(11):2924-2932.
YANG Wubin, NIU Hecai, SHAN Qiang, et al. Ore-forming mechanism of the Baerzhe super-large rare and rare earth elements deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2924-2932.
- [6] 陈金勇,范洪海,王生云,等.内蒙古扎鲁特旗巴尔哲超大型矿床控矿因素分析[J].地质力学学报,2019,25(1):27-35.
CHEN Jinyong, FAN Honghai, WANG Shengyun, et al. Ore-controlling factors of the Baerzhe super-large deposit in Jarud Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(1): 27-35.
- [7] 丁腾飞,张国宾,鞠楠,等.华北克拉通北缘东段巴尔哲锆-铌-稀土矿床碱性岩浆演化对稀有-稀土元素富集成矿的制约[J].地质论评,2023,69(增刊1):153-154.
DING Tengfei, ZHANG Guobin, JU Nan, et al. Restriction on rare-earth element enrichment and mineralization by alkaline magmatic evolution of the Baerzhe zircon-niobium-rare earth deposit in the eastern section of the northern margin of the North China Craton[J]. Geological Review, 2023, 69(Sup. 1): 153-154.
- [8] 吴鸣谦,马甲栋,邓军,等.巴尔哲锆-铌-铍-稀土矿床成矿精细过程研究[J].岩石学报,2024,40(6):1817-1836.
WU Mingqian, MA Jiadong, DENG Jun, et al. A study of the fine Zr-Nb-Be-REE mineralizing processes of the Baerzhe deposit, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1817-1836.
- [9] QIU K F, YU H C, WU M Q, et al. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China[J]. The American Mineralogist, 2019, 104(9/10): 1487-1502.
- [10] 陈勇,宋永胜,温建康,等.某含稀土、锆复杂铌矿的选矿试验研究[J].稀有金属,2013,37(3):429-436.
CHEN Yong, SONG Yongsheng, WEN Jiankang, et al. Beneficiation of a complex niobium ore containing rare earths and zirconium[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(3): 429-436.
- [11] 廖璐,李红立,尹江生,等.内蒙古某稀有稀土矿磁选-浮选-磁选-重选联合工艺选矿试验研究[J].内蒙古科技与经济,2016(3):66-68,73.
- [12] 张楷,徐亮.锆冶金技术的研究进展[J].稀有金属与硬质合金,2020,48(6):30-37,55.
ZHANG Kai, XU Liang. Research progress in zirconium metallurgical technology[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2020, 48(6): 30-37, 55.
- [13] 刘飞,陈伟东,闫淑芳,等.锆精矿火法冶金作业过程中水洗除硅的工艺研究[J].稀有金属,2018,42(1):83-87.
LIU Fei, CHEN Weidong, YAN Shufang, et al. Process of washing and silicon removal for pyrometallurgical operation of zircon sand[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018, 42(1): 83-87.
- [14] 张永航.钠化焙烧-酸浸出分解稀有金属精矿研究[D].包头:内蒙古科技大学,2021.
- [15] 雋荣斐,王敏,包燕平,等.矿石中含 Zr 物相在冶金过程中的迁移和转变[J].金属材料与冶金工程,2020,48(5):9-15.
JUAN Rongfei, WANG Min, BAO Yanping, et al. Migration and transformation of Zr-containing phase in ore during

- ing metallurgical process[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2020, 48(5): 9-15.
- [16] 刘敬崇. 碱法分解锆英砂新工艺探索及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [17] 刘飞, 陈伟东, 闫淑芳, 等. 锆英砂碱熔分解产生废渣中锆的回收工艺研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(7): 831-836.
- LIU Fei, CHEN Weidong, YAN Shufang, et al. Recovery process of decomposed zirconium from zirconium metallurgical slag[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(7): 831-836.
- [18] 马嘉, 刘会武, 李广, 等. 某多金属矿选冶过程中铀的赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(3): 1-9.
- MA Jia, LIU Huiwu, LI Guang, et al. Study on the occurrence state of uranium in a polymetallic ore during beneficiation and metallurgy [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(3): 1-9.
- [19] 齐涛. 钛、锆、镍湿法冶金技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

Occurrence Forms of Zirconium in Beneficiation and Metallurgical Products from an Alkaline Granite Porphyry-type Polymetallic Deposit in Inner Mongolia

MA Jia^{1,2}, LI Chunfeng^{1,2}, LIU Zhichao^{1,2}, LI Guang^{1,2}, TIAN Yuhui^{1,2}, ZHANG Chen^{1,2},
ZHANG Shouxun^{1,2}, HOU Xianming¹

- (1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;
2. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: To enhance comprehensively recovery efficiency of zirconium resources from polymetallic deposits, and support the development of clean energy, a systematic analysis was conducted on the raw ore, zircon concentrate, tailings, and hydrometallurgical products at different stages from an alkaline granite porphyry-type polymetallic deposit in Inner Mongolia. Multi-techniques, including optical microscopy, SEM-EDS, XRD, and AMICS was used to systematically reveal the occurrence forms and liberation characteristics of zirconium throughout the entire beneficiation and metallurgical process. The research results show that zirconium mainly occurs as independent zircon in the raw ore and processing products, with minor amounts occurring in the form of isomorphic, substituting for Th^{4+} and U^{4+} ions and dispersing in carrier minerals such as thorite, pyrochlore, and monazite. Zircon is progressively enriched and liberated during beneficiation, although fine-grained zircon particles are still lost in gravity tailings due to encapsulation or intergrowth. During hydrometallurgical treatment, zircon is converted into Zr compounds via alkali fusion, but some particles remain incompletely reacted or are encapsulated by newly formed siliceous materials, leading to residual zirconium in the acid-leaching residue, either as zircon or zirconium-bearing siliceous compounds. Based on these findings, an improved process of "stage grinding-stage separation optimization dissolution-enhanced alkali fusion pretreatment" is proposed, providing mineralogical support for optimizing the ore beneficiation and metallurgical process.

Key words: polymetallic ore; zirconium; process mineralogy; beneficiation and metallurgy process; REE; occurrence state