新疆热液型铀铍矿中铀的赋存状态及选冶特性研究

马　嘉[1,2],李　广[1,2],叶开凯[1,2],李春风[1,2],田宇晖[1,2],张　晨[1,2],
张守逊[1],侯鲜名[2]

(1.中核矿业科技集团有限公司,北京　101149;
2.核工业北京化工冶金研究院,北京　101149)

摘要:新疆热液型铀铍矿是我国重要的铀多金属资源,但铀的赋存规律及其对选冶效率的制约机制尚不明确。研究采用偏光显微镜、扫描电镜、AMICS、EPMA 等多尺度矿物表征技术,系统解析了铀的赋存状态及其在浮选-浸出过程中的迁移规律。结果表明:铀主要赋存于硅钙铀矿(76%)、沥青铀矿(16%)及硅铅铀矿(6%)中,铀矿物嵌布粒度细(10～70 μm)且解离度低(<5%),需对样品进一步细磨以提高铀矿物解离度,使其能够与浮选药剂充分接触,从而确保选矿效果,另外硅钙铀矿因呈微细粒状,被长石、石英等脉石矿物包裹,在浸出过程中表面可能形成硅凝胶包裹,抑制铀浸出;将原矿细磨至－45 μm 后,铀矿物解离度得到显著改善,但由于浮选药剂选择性不足,导致其在铍精矿与尾矿中分布规律不明显;硫酸焙烧工艺可有效破坏硅酸盐骨架,使铀浸出率提升 99%以上。研究结果可为铀铍共生资源的协同提取工艺优化提供关键理论支撑。

关键词:铀铍矿;赋存状态;矿物解离;硫酸;焙烧;硅凝胶包裹

中图分类号:TL212　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2025)05-0597-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2025.05.003

铀作为核能行业的关键资源,其高效提取与综合利用对保障国家能源安全具有重要意义。新疆热液型铀铍矿床是我国重要的铀多金属矿床之一。该矿床的成因与中低温热液活动密切相关[1-2],铍以羟硅铍石形式分布,并与铀矿物呈现空间共生关系[3-5];矿浆 pH 调控、捕收剂类型及磨矿细度是影响浮选工艺中回收铍的关键因素,细粒级铀矿物的损失会影响综合回收效果[6-8];铀矿物的解离特性与铍赋存形式的多样性导致铀铍协同提取时存在浸出动力学差异[9];浮选尾矿中残留的铀可通过强化浸出进行回收[10]。目前,针对铀铍矿共生体系下铀的赋存规律及其在选冶过程中的迁移机制尚不明确,关于矿物学因素对铀回收的影响亟待深入解析。

试验通过多尺度矿物学表征,系统研究了新疆热液型铀铍矿的原矿、选矿产品及浸出渣中铀的赋存状态差异、铀载体矿物类型及其表面化学特性。通过对比浮选、浸出过程中铀的迁移规律,明确了选冶行为关联机制,以期为铀铍共生资源的协同提取工艺优化提供理论支撑并推动复杂多金属铀矿的高效利用。

1　样品制备及试验方法

矿石采自新疆某热液型铀铍矿床近地表区域,经颚式破碎机和对辊破碎机二段破碎至－2 mm粒纹后,混合均匀,得原矿样品;之后进一步细磨至－0.045 mm 粒级占比 93%以上,采用氧化石蜡皂(捕收剂)、水玻璃(抑制剂)及氢氧化钠(调整剂)浮选铍,得铍精矿与尾矿;铍精矿经浓 H_2SO_4 焙烧浸出后,得浸出渣。

采用多种矿物表征技术,对原矿、铍精矿、铍尾矿及浸出渣样品系统地开展铀的赋存状态及载体矿物研究。具体流程如下:1)基于 ZEISS Axio scope A1 pol 偏光显微镜开展薄片岩相学分析,

收稿日期:2025-05-22

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);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。

完成矿物组成鉴定、蚀变特征表征及共生关系解析;2)采用 ZEISS Σ300 场发射扫描电镜进行微纳米尺度形貌观测,结合 Bruker Quantax 200 Xflash 能谱仪进行微区元素组成分析;3)通过 AMICS-Mining 矿物参数自动定量分析系统实现含铀矿物的智能识别与参数提取,精确量化其含量、解离度及粒度分布特征;4)采用日本电子 JXA-8100 电子探针显微分析仪,在加速电压 15 kV、束流 20 nA 条件下,对特征含铀矿物进行点分析(spot analysis)与面扫描(mapping),获取主微量元素化学组成数据。

2 铀品位与赋存状态分析

2.1 铀在不同样品中的品位

铍铀矿中的主要脉石矿物为石英、钠长石、钾长石等(占比 83.83%),其次为伊利石、绿泥石等黏土矿物(占比 11.64%),铀、铍元素分别主要以硅钙铀矿和羟硅铍石形式分布。各样品中铀元素化学分析结果见表 1。原矿与铍精矿中铀质量分数分别为 0.225%和 0.227%,无明显差异,表明铍浮选药剂对铀矿物未产生选择性富集作用;铍尾矿中铀质量分数为 0.198%,较原矿和铍精矿略低;浸出渣中铀质量分数降至 0.001%,说明硫酸焙烧工艺的铀浸出率超过 99%。

表 1 各样品中铀元素的质量分数

Table 1 Mass fraction of uranium element in various samples

样品	w(U)/%
原矿	0.225
铍精矿	0.227
铍尾矿	0.198
浸出渣	0.001

2.2 铀的赋存状态

原矿中的铀主要赋存于独立铀矿物中。铀矿物占比见表 2,铀元素在不同铀矿物中的分布率见表 3。可知:硅钙铀矿为铀的主要载体矿物,其占比达 0.31%,铀元素在其中的分布率达 76%;其次为沥青铀矿(16%)及硅铅铀矿(6%);此外,约 2%的铀以类质同象形式赋存于磷灰石、磷钇矿及硅铅锰矿中,或以吸附态分布于伊利石、绿泥石及闪石族矿物表面。

表 2 原矿中各铀矿物占比

Table 2 Proportion of various uranium mineral in raw ore

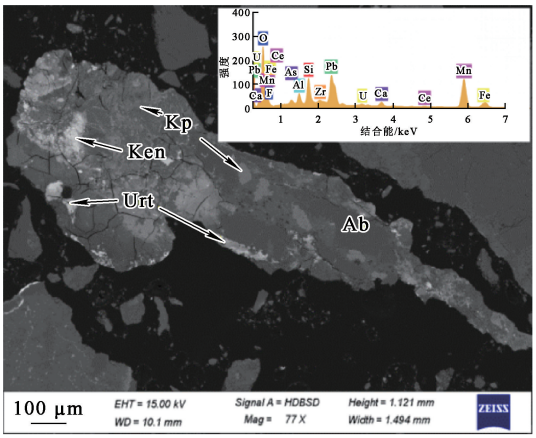
样品	w(硅钙铀矿)/%	w(沥青铀矿)/%	w(硅铅铀矿)/%
原矿	0.31	0.06	0.03
铍精矿	0.32	0.06	0.03
铍尾矿	0.29	0.04	0.02
浸出渣	—	—	—

表 3 铀元素在不同铀矿物中的分布率

Table 3 Distribution rate of uranium element in various uranium minerals %

样品	铀元素分布率			
	硅钙铀矿	沥青铀矿	硅铅铀矿	其他
原矿	76	16	6	2
铍精矿	77	16	6	1
铍尾矿	81	12	5	2

由表 3 可知,铍精矿与铍尾矿中铀的赋存状态与原矿基本一致,仍以硅钙铀矿为主导:铍精矿中 77%的铀富集于硅钙铀矿,少量分布于沥青铀矿和硅铅铀矿中,剩余 1%以类质同象形式分布于硅铅锰矿及磷钇矿中;铍尾矿中硅钙铀矿占比 81%,沥青铀矿占比 12%,其余少量分布于硅铅铀矿中,或以类质同象形式分布于硅铅锰矿中。硅铅锰矿分布特征及能谱如图 1 所示。



Ken—硅铅锰矿;Urt—硅钙铀矿;
Kp—被钾长石;Ab—钠长石。

图 1 硅铅锰矿的背散射图像及能谱

Fig. 1 Backscattered Electron (BSE) images and Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) spectra of kentrolite

铍精矿经浓硫酸焙烧后,独立铀矿物(硅钙铀矿、沥青铀矿、硅铅铀矿)已充分分解溶浸,经

AMICS 扫描未见残留。浸出渣中铀元素以 U^{4+} 呈类质同象形式置换 REE^{3+}，赋存于磷钇矿中。图 2 是浸出渣中磷钇矿背散射图像及能谱，磷钇矿颗粒表面粗糙并发育微裂缝。上述数据进一步验证铀的选冶行为受其赋存形态与工艺参数的协同调控。

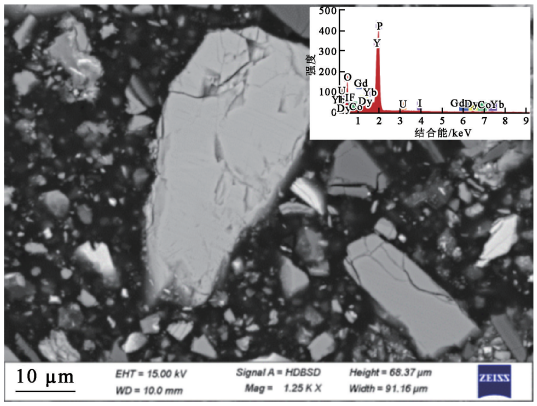


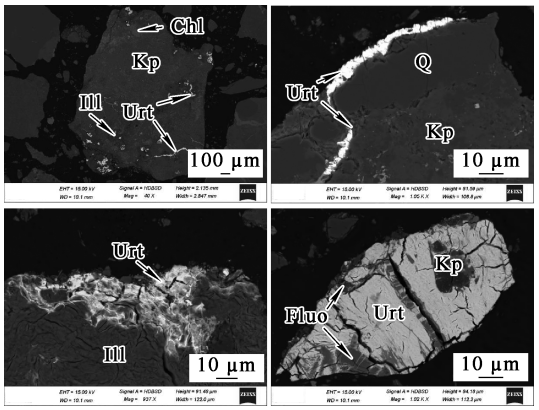
图 2　浸出渣中磷钇矿的背散射图像及能谱

Fig. 2　Backscattered Electron (BSE) images and Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) spectra of xenotime in leaching residue

3　铀的主要载体矿物特征

3.1　硅钙铀矿

硅钙铀矿（$Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$）属单斜晶系轴双面晶类，摩氏硬度 2～3，比重 3.81～3.96[11]，是表生环境中广泛分布的铀酰硅酸盐矿物，也是该矿床中铀的主要赋存载体。其常以纤维状、肾状或放射状集合体形式产出，粒径分布范围较宽（2～250 μm），表面多发育不规则裂纹，常以细脉状或纤维状充填石英、长石等脉石矿物微裂隙，或以不规则粒状与长石或萤石共生，分布特征如图 3 所示。硅钙铀矿中铀质量分数约 50%，钙质量分数 4%，硅质量分数 5%～10%。由于该矿物易溶于稀酸并生成硅胶（$SiO_2 \cdot nH_2O$），导致其在酸浸过程中易被包裹，从而对溶解起到抑制作用。矿物分布特征显示，硅钙铀矿在原矿和选矿产品中均稳定存在（分布率＞76%），而在浸出渣中未被检出，表明硫酸焙烧工艺可彻底破坏其晶体结构。



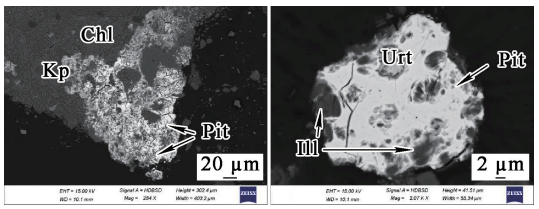
Urt—硅钙铀矿；Kp—钾长石；Ill—伊利石；Chl—绿泥石；Fluo—萤石；Q—石英。

图 3　硅钙铀矿的背散射图像

Fig. 3　Backscattered Electron (BSE) images of uranophane

3.2　沥青铀矿

沥青铀矿（$(U^{4+},U^{6+})_3O_{8-x}$）属等轴晶系，是晶质铀矿的沥青状隐晶质变种，摩氏硬度3～5，比重 6.5～8.5[11]，为该矿床中次要铀载体矿物。其常以葡萄状、致密块状或浸染状集合体形式产出，粒径集中在 10～50 μm 之间，表面发育网状裂纹，多与长石、伊利石或绿泥石等黏土矿物共生，分布特征如图 4 所示。沥青铀矿中铀质量分数为50%～60%，并含少量 Si（1%～3%）、Ca（0.5%～1.5%）、Pb（0.2%～0.8%）、Ce（<0.1%）及 Fe（0.3%～1.2%）等杂质元素。沥青铀矿的浸出率受表面钝化膜（如 U_3O_7 或 SiO_2）及杂质元素协同调控，使其在酸浸过程中易被包裹，从而抑制溶解。矿物分布特征显示，沥青铀矿在原矿和选矿产品中均有分布，而浸出渣中未检出，表明硫酸焙烧工艺可彻底破坏其晶体结构。



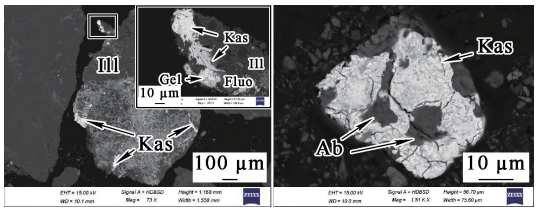
Pit—沥青铀矿；Kp—钾长石；Chl—绿泥石；Ill—伊利石；Urt—硅钙铀矿。

图 4　沥青铀矿的背散射图像

Fig. 4　Backscattered Electron (BSE) images of pitchblende

3.3 硅铅铀矿

硅铅铀矿($Pb(UO_2)SiO_4 \cdot H_2O$),属单斜晶系,摩氏硬度 4～5,比重 5.037～6.50[11],是矿石中次要铀矿物。其常以柱状、针状或星状集合体形式产出,局部可见隐晶质结构,粒径范围为10～40 μm,常呈束状集合体嵌布于伊利石层间,或与长石、方铅矿及萤石共生,分布特征如图 5 所示。该矿物中铀、铅、硅质量分数分别为 40%、20%及 4%,并含微量 Fe(0.3%～0.8%)与 Ca(0.1%～0.5%)。硅铅铀矿与硫酸反应可能形成 $PbSO_4$ 钝化层阻碍,导致铀浸出率偏低。硅铅铀矿在各样品中的分布情况与与硅钙铀矿相似,硫酸焙烧工艺可彻底破坏其晶体结构。



Kas—硅铅铀矿;Gel—方铅矿;Fluo—萤石;
Ill—伊利石;Ab—钠长石。

图 5 硅铅铀矿的背散射图像

Fig. 5 Backscattered Electron (BSE) images of kasolite

4 影响铀提取的矿物学因素

4.1 粒度分布与解离度

铀矿物的粒度分布与解离度是影响选冶工艺指标的关键参数。粒度分布特征是调控矿物解离程度、表面反应活性及矿浆流体动力特性的重要依据,直接决定磨矿能耗、浮选回收率与浸出动力学行为。铀矿物在不同样品中的粒度分布如图 6 所示。解离度作为工艺矿物学核心评价指标,按暴露表面积占比划分为 11 个等级:100%代表单体解离;90%～100%代表矿物 90%以上表面暴露,0%～10%代表仅边缘 0%～10%区域未与共生矿物连接,铀矿物暴露面分布特征见表 4。

由图 6 看出:原矿样品(制样粒度－2 mm)中铀矿物粒径均小于 300 μm;硅钙铀矿粒径分布范围最宽(10～70 μm),呈大团粒集合体与微细单晶颗粒共存特征;沥青铀矿与硅铅铀矿粒度偏细(10～40 μm),多呈浸染状嵌布于脉石矿物。浮选最佳粒度范围为－10～－100 μm[12-14],可见该矿中铀矿物粒度符合最佳浮选条件。但表 4 反映出各铀矿物解离程度均较低,单体解离度普遍低于 5%,70%以上颗粒暴露面积≤30%。未充分解离的铀矿物多以不规则粒状、细脉状或隐晶质集合体形式赋存于长石、伊利石等脉石中,导致其与浮选药剂及浸出剂接触面积受限,严重制约铀的提取效率。

将原矿细磨至－0.045 mm 后,铀矿物粒度显著细化(5～30 μm),解离度大幅提升:硅钙铀矿单体解离度＞18%,暴露面积≥80%的颗粒占比＞35%;未完全解离的铀矿物(约 65%)仍以浸染状或细脉状与羟硅铍石、长石共生。

值得注意的是,细磨导致－10 μm 颗粒占比增加 5%,此类微细颗粒易引发矿泥罩盖现象,导致浮选回收率下降。此外,矿浆黏度因细颗粒含量升高而增大,可能阻碍后续水冶工艺中浸出剂扩散。

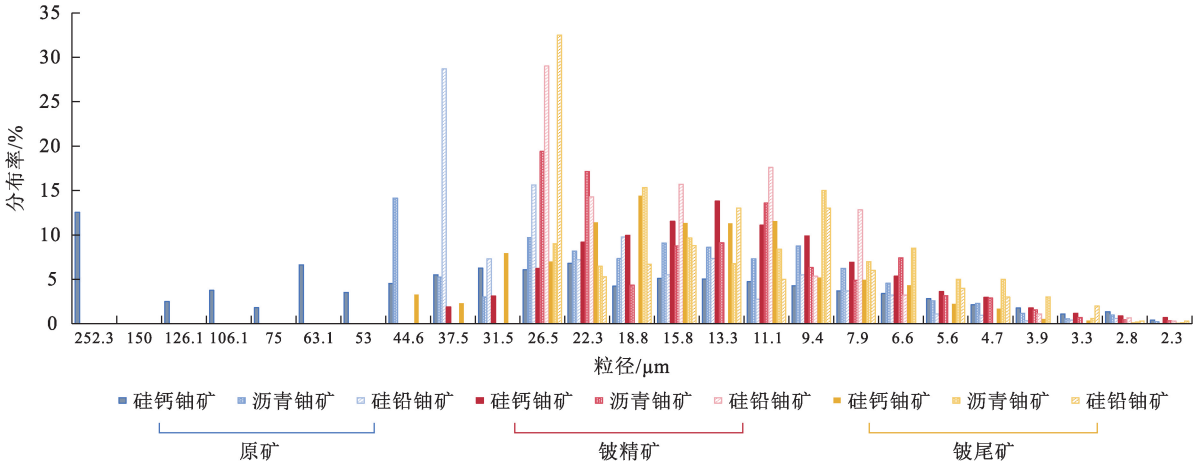


图 6 铀矿物的粒度分布

Fig. 6 Particle size distribution of uranium minerals

表 4　铀矿物的暴露面分布特征

Table 4　Exposure characteristics of uranium minerals

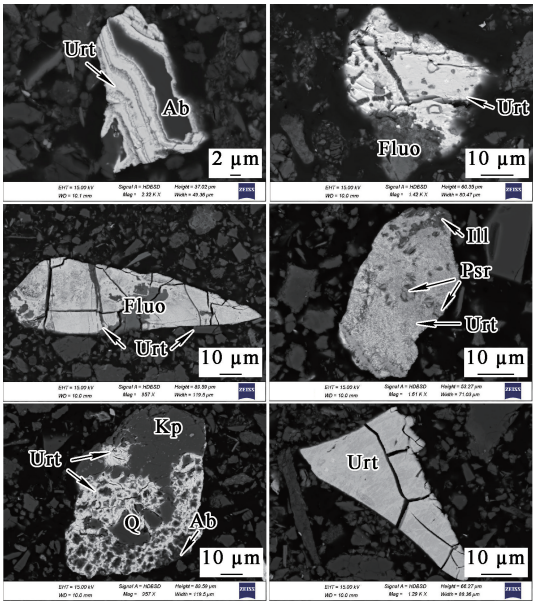
样品	铀矿物	暴露面积/%										
		0～10	10～20	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	70～80	80～90	90～100	100
原矿	硅钙铀矿	21.06	30.67	36.78	1.75	3.50	1.04	1.82	0.24	0.60	1.32	1.22
	沥青铀矿	12.48	38.00	22.51	5.90	0.39	3.49	5.43	5.44	1.83	0	4.53
	硅铅铀矿	78.41	21.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
铍精矿	硅钙铀矿	26.21	6.12	3.53	6.36	2.67	8	6.62	5.43	6.87	9.91	18.28
	沥青铀矿	15.65	6.79	4.33	8.2	3.77	6.41	7.32	4.58	8.66	12.93	21.36
	硅铅铀矿	39.2	0	3.22	0	0	0	0	0	0	43.28	14.3
铍尾矿	硅钙铀矿	6.57	6.42	5.53	6.34	3.44	4.06	9.42	6.35	12.38	10.73	28.77
	沥青铀矿	7.66	9.18	5.37	4.96	2.49	7.59	17.33	6.18	12.26	4.55	22.43
	硅铅铀矿	19.01	2.19	6.88	0	0	0	18.2	7.28	9.36	21.77	10.53

4.2　浮选药剂对矿物的选择性

针对铍铀矿中主要铍矿物——羟硅铍石（$Be_4[(OH)_2Si_2O_7]$）[15]，采用氧化石蜡皂（阴离子型捕收剂）进行浮选分离。该药剂由石蜡氧化后皂化制得，成本低廉且应用广泛，适用于非硫化矿浮选体系，通过羧酸根（$-COO^-$）与矿物表面 Be^{2+}、Ca^{2+} 及 Pb^{2+} 等离子发生配合反应，形成疏水性金属皂膜，从而增强矿物-气泡界面吸附强度。在浮选体系中，水玻璃（$Na_2O \cdot nSiO_2$）作为抑制剂能有效抑制石英、长石等硅酸盐脉石上浮，氢氧化钠（pH＝9～10）则能调控矿浆电位实现对捕收剂吸附行为的优化。

但该药剂组合对铀矿物分选效率较低，各粒级、不同暴露程度的铀矿物在铍精矿和尾矿中均有分布。精矿中硅钙铀矿呈环带状包裹钠长石或与萤石共生；尾矿中硅钙铀矿多呈粒状或浸染状分布，颗粒内部孔缝充填萤石、伊利石等脉石矿物，浸染状硅钙铀矿嵌布于钾长石、石英、钠长石等脉石矿物中，具体特征如图 7 所示。微细粒铀矿物（＜30 μm）因被石英、长石包裹或共生，随抑制剂作用进入铍尾矿；沥青铀矿表面氧化膜（U_3O_7/SiO_2）致密且阳离子活性位点不足，使得捕收剂无法对其有效吸附[16]，导致沥青铀矿无法在铍精矿中富集；暴露面较高的硅钙铀矿与硅铅铀矿虽含 Ca^{2+}/Pb^{2+} 活性位点，但其强亲水性表面会阻碍捕收剂选择性吸附[17]。

上述因素会导致铍精矿与尾矿中铀矿物类型及含量与原矿相近（U 品位差异＜0.05%）。因此，建议在药剂研发方面，开发兼具疏水性与金属选择性的新型捕收剂（如膦酸酯类或两性表面活性剂），或引入螯合剂（如 EDTA）优先解离铀矿物-脉石界面；在工艺方面，调整选冶流程，尝试优先利用稀硫酸浸出铀，再浮选浸出渣中的铍矿物，之后再针对铍精矿开展拌酸熟化浸出，以实现铀铍资源的协同高效回收。



Urt—硅钙铀矿；Ab—钠长石；Fluo—萤石；Ps—硬锰矿；Ill—伊利石；Kp—钾长石；Q—石英。

图 7　选矿产品中硅钙铀矿的背散射图像

Fig. 7　Backscattered Electron (BSE) images of uranophane in benificiation products

4.3　铀元素溶浸的影响因素

铀元素的赋存状态及氧化态对其浸出行为具有决定性影响。沥青铀矿（UO_2）以四价铀（U^{4+}）为主，其致密晶体结构需氧化至六价（U^{6+}）方可有效溶解。表面氧化膜（如 U_3O_7 或 SiO_2 钝化层）

的形成显著抑制浸出效率。硅钙铀矿与硅铅铀矿为六价铀酰矿物(UO_2^{2+}),其铀酰离子在酸性介质中可直接生成可溶性硫酸铀酰配合物。但硅酸盐骨架分解产生的 SiO_2 残渣及硅酸聚合形成的硅凝胶($SiO_2 \cdot nH_2O$)可能会包裹铀矿物颗粒,导致浸出率降低。此外,铀矿物与羟硅铍石、绿泥石及萤石(CaF_2)共生,酸浸过程中萤石与硫酸反应生成 $CaSO_4$ 沉淀,会进一步引发矿层堵塞。

浸出渣中铀的赋存状态研究结果表明,采用硫酸焙烧工艺(200～450 ℃)可有效破解矿物结构限制:在高温下,硫酸能破坏硅钙铀矿/硅铅铀矿的硅酸盐骨架,释放 UO_2^{2+},同时生成 $CaSO_4$/$PbSO_4$ 沉淀,如式(1)、(2)、(4)所示;沥青铀矿中的 U^{4+} 会被氧化为 U^{6+},如式(3)所示,从而使浸出率提升至 98%以上;硅凝胶经焙烧转化为惰性硅渣,固液分离效果明显改善。

$$Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O \xrightarrow{\Delta} Ca(UO_2)_2Si_2O_7 + 6H_2O\uparrow; \quad (1)$$

$$Ca(UO_2)_2Si_2O_7 + 3H_2SO_4 \xrightarrow{\Delta} 2UO_2SO_4 + CaSO_4 + 2SiO_2 + 3H_2O\uparrow; \quad (2)$$

$$U_3O_8 + 3H_2SO_4 + 0.5O_2 \longrightarrow 3UO_2SO_4 + 3H_2O\uparrow; \quad (3)$$

$$Pb(UO_2)SiO_4 \cdot H_2O + 3H_2SO_4 \longrightarrow UO_2SO_4 + PbSO_4\downarrow + Si(SO_4)_2 + 4H_2O\uparrow。 \quad (4)$$

磷钇矿作为浸出渣中铀元素的主要赋存载体,其晶体结构中 Y^{3+} 与 PO_4^{3-} 形成的强共价键(P—O 键能约 600 kJ/mol)具有高度稳定的三维网络结构,采用常规浓硫酸焙烧工艺时难以直接实现矿物的分解。另外,在硫酸焙烧过程中,磷钇矿表层可能发生部分硫酸化反应,生成难溶性硫酸钇($Y_2(SO_4)_3$)及焦磷酸钇($Y(PO_3)_3$)等产物,通过表面钝化效应抑制浸出剂与矿物进一步接触,从而阻碍铀的有效浸出。但由于磷钇矿在渣相中的赋存比例及铀元素的分配率均处于较低水平,其对铀整体回收效率的影响可忽略不计。

5 结论

1)新疆热液型铀铍矿中的铀主要以独立矿物形式赋存于硅钙铀矿、沥青铀矿及硅铅铀矿中,其中硅钙铀矿为关键载体矿物(占比为 76%)。铀矿物嵌布粒度细、解离度低,无法与浮选药剂有效接触,会影响选矿效果,硅钙铀矿的微细粒包裹及浸出过程中可能形成的表面硅凝胶包裹可能成为抑制铀浸出的主要因素。

2)选冶过程中,通过强化矿石粒度控制,能显著改善铀矿物解离度,但因浮选药剂选择性不足,铀在铍精矿与尾矿中未能有效富集;采用的硫酸焙烧工艺通过破坏硅酸盐骨架及氧化四价铀能显著提升铀浸出率至 99%以上。

3)通过聚焦铀元素在原矿及选冶过程中的赋存规律,在传统工艺矿物学研究基础上持续追踪选矿产品和浸出渣中铀元素的迁移和载体矿物的变化,查明了影响铀矿物高效选冶的关键矿物学因素,为后续优化选冶工艺流程提供了理论基础。

4)为实现铀矿物的高效富集,后续应结合铀载体矿物的晶体结构特性开发高效捕收剂,以提升铀浮选选择性,进一步优化铀铍资源的协同提取效率。

参考文献:

[1] 张鑫,张辉. 新疆白杨河大型铍铀矿床成矿流体特征及矿床成因初探[J]. 地球化学,2013,42(2):143-152.
ZHANG Xin, ZHANG Hui. Geochemical characteristics of the ore forming fluid and ore genesis of the Baiyanghe Be-U Deposit, Xinjiang, China[J]. Geochimica, 2013, 42(2): 143-152.

[2] 赵振华,沈远超,涂光炽. 新疆金属矿产资源的基础研究[M]. 北京:科学出版社,2001.

[3] 李久庚. 新疆某铀铍矿田铍的赋存状态及铀铍关系[J]. 矿物岩石地球化学通报,1991(2):2-4.
LI Jiugeng. The occurrence of berylium and the relationship between uranium and beryllium at a U-Be ore field in Xinjiang[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1991(2): 2-4.

[4] 陈光旭,李光来,刘晓东,等. 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿矿物特征及形成环境[J]. 地质学报,2019,93(4):865-878.
CHEN Guangxu, LI Guanglai, LIU Xiaodong, et al. Mineralogical characteristics and formation environment of pitchblende in the Baiyanghe uranium deposit in west Junggar [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(4): 865-878.

[5] 艾永亮,李伯平,郭冬发,等. 影响白杨河铀铍矿提取工艺的矿物学因素探讨[J]. 有色金属(选矿部分),2015(3):1-3.
AI Yongliang, LI Boping, GUO Dongfa, et al. Investigate of-Be extraction process on mineralogy factors of Baiyanghe Deposit[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(3): 1-3.

[6] 田宇晖,李广,李镯,等. 新疆某羟硅铍石型铀铍矿浮选试验研究[J]. 湿法冶金,2025,44(40):433-439.
TIAN Yuhui, LI Guang, LI Zhuo, et al. Experimental study on flotation of a uranium-beryllium ore in Xinjiang[J]. Hydrometallurgy of China, 2025, 44(40): 433-439.

[7] 苏玉成. 某低品位铍矿选冶工艺试验研究[D]. 衡阳:南华

大学，2024.

[8] 郑惠敏，李丽匣，马嘉，等. 新疆某含羟硅铍石矿分选实验[J]. 矿产综合利用，2024，45(5)：24-30.
ZHENG Huimin，LI Lixia，MA Jia，et al. Beneficiation of bertrandite ores in Xinjiang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2024，45(5)：24-30.

[9] 王培闻. 某铀铍矿中铀和铍的浸出和提取工艺研究[D]. 衡阳：南华大学，2020.

[10] 叶开凯，苏学斌，梁耕宇，等. 从铀铍浮选尾矿中回收铀的工艺研究[J]. 铀矿冶，2023，42(2)：34-38.
YE Kaikai，SU Xuebin，LIANG Gengyu，et al. Study on recovery uranium from uranium-beryllium flotation tailings[J]. Uranium Mining and Metallurgy，2023，42(2)：34-38.

[11] 赵凤民，陈璋如，张静宜，等. 铀矿物鉴定手册[M]. 北京：原子能出版社，1988.

[12] 马斌，刘建远. 磨矿产品粒度组成对铅浮选的影响研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2016(2)：29-33.
MA Bin，LIU Jianyuan. Research of effect of the particle size composition of grinding product on the flotation of lead[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)，2016(2)：29-33.

[13] 杨稳权，方世祥，庞建涛，等. 胶磷矿不同磨矿细度单体解离度测定及其浮选应用[J]. 武汉工程大学学报，2014，36(4)：31-34.
YANG Wenquan，FANG Shixiang，PANG Jiantao，et al. Determination of collophane monomer dissociation degree under different grinding fineness and its use in flotation[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2014，36(4)：31-34.

[14] 李博，李杨丽，杨芳，等. 磨矿粒度对浮选工艺指标影响的研究[J]. 云南冶金，2023，52(增刊 1)：26-30.
LI Bo，LI Yangli，YANG Fang，et al. Study on the effect of grinding particle size on flotation process indicators[J]. Yunnan Metallurgy，2023，52(Sup. 1)：26-30.

[15] 梁冬云，李波. 稀有金属矿工艺矿物学[M]. 北京：冶金工业出版社，2015.

[16] 李春风，刘志超，李广，等. 一种沥青铀矿的浮选捕收剂及其应用：CN201910462875. 2[P]. 2019-12-24.

[17] 王德荫，傅永全. 铀矿物学[M]. 北京：原子能出版社，1981.

Occurrence State and Beneficiation and Metallurgical Characteristics of Uranium in Hydrothermal Uranium-Beryllium Deposits in Xinjiang

MA Jia[1,2]，LI Guang[1,2]，YE Kaikai[1,2]，LI Chunfeng[1,2]，TIAN Yuhui[1,2]，ZHANG Chen[1,2]，ZHANG Shouxun[1]，HOU Xianming[2]

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

Abstract：Xinjiang hydrothermal uranium-beryllium deposit is a critical polymetallic resource in China，yet the occurrence characteristics of uranium and its migration behavior during beneficiation and metallurgy remain unclear. The occurrence state of uranium and its migration patterns during flotation-leaching processes were systematically investigated through multi-scale mineralogical characterization techniques (polarizing microscope，SEM，AMICS，EPMA). The results indicate that uranium primarily occurs in uranophane (76%)，pitchblende (16%)，and kasolite (6%). Uranium minerals exhibit fine dissemination sizes (10～70 μm) and low liberation degrees (<5%). The samples needs to be further finely ground to increase the dissociation degree of uranium minerals，so that they can fully contact the flotation reagents，thereyby ensuring the beneficiation effect. Among these factors，uranophane is a primary constraint on uranium leaching due to its fine-grained encapsulation and potential formation of surface silica gel coatings during leaching. While grinding the raw ore to −45 μm significantly improves mineral liberation，insufficient selectivity of flotation reagents results in non-significant distribution patterns between beryllium concentrate and tailings. Sulfuric acid roasting effectively decomposes silicate frameworks，achieving a uranium leaching rate exceeding 99%. The study can provide theoretical insights for optimizing the co-extraction of uranium and beryllium from complex polymetallic ores.

Key words：uranium-beryllium ore；occurrence state；mineral liberation；sulfuric acid；roasting；silica gel encapsulation