

松辽盆地某铀矿床青山口组铀矿石工艺矿物学研究

刘晓奎¹, 侯春儒², 原 渊², 易爱飞², 呼日乐¹, 高永宏¹

(1. 中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 青山口组作为松辽盆地内铀矿床的主要发育层位之一, 其矿石的工艺矿物学特征直接制约地浸开采的可行性。本研究聚焦于青山口组砂岩型矿石, 采用岩矿鉴定、扫描电镜观察、能谱及电子探针分析等手段, 开展了工艺矿物学研究, 系统揭示了铀矿物的赋存规律。结果表明: 青山口组细砂岩中的铀矿物以铀石和沥青铀矿为主, 主要分布在碎屑颗粒的边缘, 有利于铀矿物与浸出液接触发生反应; 且细砂岩中的孔隙以粒间孔为主, 有利于浸出剂均匀扩散。而泥砾岩中的铀矿物以铀石为主, 且主要赋存于泥砾内部, 不利于浸出液与铀矿物接触, 增加了浸出难度。研究表明, 松辽盆地某铀矿床青山口组有望成为该地区较为理想的开采层位。

关键词: 松辽盆地; 青山口组; 铀矿物; 工艺矿物学; 赋存特征; 地浸采铀

中图分类号: P619.14; P585 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0009-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.09.01

松辽盆地作为中国北方砂岩型铀矿的主要赋矿盆地, 目前已发现并探明了多个大中型铀矿床^[1-4]。多年来, 松辽盆地姚家组一直是铀矿勘查找矿的主攻层位^[5-6], 随着勘查深度不断增大, 在姚家组下部的青山口组发现了工业铀矿床, 且资源量较为可观^[7-8]。学者对青山口组地层成矿条件的研究较多^[9-16], 但对青山口组地层中铀矿石的工艺矿物学特征和铀赋存状态缺少系统研究。

矿石的工艺矿物学特征对其浸出性能具有重要的控制作用, 是浸出工艺设计和优化的重要基础, 是评估矿石浸出性能的重要依据。在微观尺度分析青山口组铀矿石的工艺矿物学特征, 明确铀的赋存状态, 可为后期地浸工艺设计提供支撑。基于上述背景, 笔者对松辽盆地某铀矿床青山口组铀矿石的工艺矿物学特征进行了详细分析, 旨在对该铀矿床青山口组地浸工艺优化提供指导。

1 地质背景

1.1 青山口组矿层概况

松辽盆地某铀矿床青山口组的矿体主要位于姚家组一段下部, 矿体产状与地层产状基本一致, 矿体埋深整体具有北深南浅、西深东浅的特点。

矿层受层间氧化带控制, 岩性主要为紫红色厚层砂质砾岩夹紫红色泥岩, 下粗上细, 构成一个完整的正旋回沉积。上白垩统青山口组构造拗陷发育期, 断裂构造不发育, 整体为南西—北东向展布的河谷洼地^[17-18]。

1.2 青山口组矿层水文地质条件

青山口组含水层下伏于上白垩统姚家组含水层之下, 上覆于上白垩统泉头组之上, 区域上分布稳定, 含矿含水层平均厚度较大, 岩性以细砂岩为主, 渗透系数较低, 地下水类型为层间承压水, 且水位较为稳定, 地下水总体流向为近南北向径流。青山口组隔水顶板厚度较稳定, 岩性为泥岩、粉砂岩, 有效隔断了矿层与上覆含水层的水力联系。隔水底板岩石以紫红色粉砂质泥岩、紫红色泥岩为主, 岩石致密、不透水, 隔水性良好^[19-20]。

2 样品采集及分析方法

在松辽盆地某地浸矿山青山口组矿层, 共选取 5 个样品, 所有样品均取自同一个规模较大的矿块, 并分别取自具有代表性的两条勘探线附近: 样品 17-6591-1、17-6692-2 和 17-6490-2 位于同一条勘探线附近, 样品 4-w73-3 和 4-17-17-2 位于另

收稿日期: 2025-09-01; 修回日期: 2025-11-17

通信作者: 侯春儒

一条勘探线附近。为防止岩心样品被空气氧化和运输过程中破裂,取样后样品即用保鲜袋包裹,再用胶带和布袋进行外包装;接收样品后,首先对其进行预处理,去除泥皮,观察样品完整性,然后制备试验样品。17-6591-1、17-6692-2 为细砂岩,4-17-17-2 与 17-6490-2 为高碳酸盐泥砾岩、4-w73-3 为低碳酸盐泥砾岩。

在矿物学研究中,利用探针薄片开展相关观察和分析,用光学显微镜分析矿石主要矿物组成、矿石结构和构造,用扫描电镜对矿石主要矿物组成、铀矿物微观结构进行详细观察(扫描电镜工作电压 15 kV),用电子探针定量分析铀矿物和其他敏感矿物化学组成。

3 结果分析及讨论

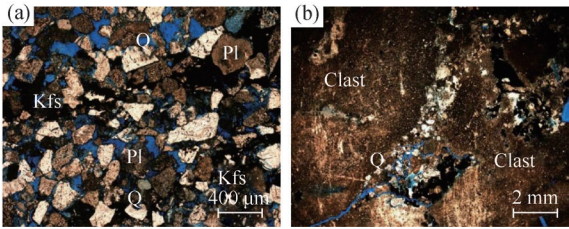
3.1 含矿岩石学特征

为了更好地研究青山口组含矿岩石学特性,分别对 5 个样品进行了光学显微镜和扫描电镜观察,其中 17-6591-1 样品的光学显微镜观察结果见图 1(a)。可以看出,岩石主要由长石(~60%)、石英(~30%),以及岩屑、少量云母、黏土矿物和不透明矿物(10%)组成。长石、石英和岩屑构成了岩石的骨架结构,表现为颗粒支撑结构。长石和石英颗粒粒径为 100~500 μm,平均粒径约为 300 μm,分选性较好,磨圆性较差,呈次棱角状。长石颗粒蚀变严重,表面粗糙,部分石英颗粒的边部可见溶蚀港湾结构。岩屑主要以泥岩岩屑为主,粒径 1~2 mm。细砂岩孔隙类型以粒间孔隙为主,面孔隙率约为 19%。填隙物以黏土矿物为主。在细砂岩的填隙物中有星点状或草莓状黄铁矿发育,在部分孔隙中可见明显的碳酸盐矿物充填。

对泥砾岩 17-6490-2 样品的光学显微镜观察结果见图 1(b)。可以看出,泥质基质中包含着泥岩的砾石,岩石中孔隙不发育,主要以裂隙为主,局部见粒内溶孔或粒间孔隙,面孔隙率为 8%。碎屑颗粒主要为泥砾、碳酸盐集合体等。泥质中含有大量的泥晶方解石和黏土矿物,砾石主要由一些砂岩团块构成。

从细砂岩 17-6591-1 样品扫描电镜观察结果(图 2)可看出,在细砂岩中含有部分泥砾,在泥砾中发育大量的黄铁矿颗粒,在细砂岩的填隙物中可见星点状或草莓状黄铁矿发育(图 2a),在部

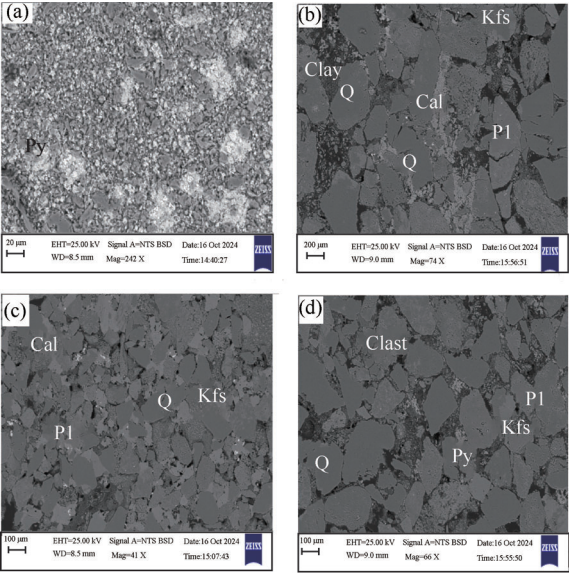
分孔隙中可见明显的碳酸盐矿物充填(图 2b),填隙物以黏土矿物为主(图 2c),长石、石英和岩屑构成了岩石的颗粒支撑骨架结构(图 2d)。



Q—石英(Quartz);Kfs—钾长石(K-feldspar);
Pl—斜长石(Plagioclase);Clast—碎屑。
(a)17-6591-1 样品;(b)17-6490-2 样品。

图 1 单偏光显微图像

Fig. 1 Orthogonal polarized light microscopic image



Q—石英(Quartz);Kfs—钾长石(K-feldspar);
Pl—斜长石(Plagioclase);Cal—方解石(Calcite);
Py—黄铁矿(Pyrite);Clay—黏土矿物;Clast—碎屑。
(a)细砂岩中发育泥砾,其中含有大量黄铁矿;(b)碳酸盐胶结物;
(c)黏土胶结物;(d)细砂岩颗粒支撑结构。

图 2 细砂岩(17-6591-1 样品)扫描电镜特征
Fig. 2 SEM characteristics of fine-grained sandstone(Sample 17-6591-1)

对比细砂岩和泥砾岩岩相学特征发现,细砂岩孔隙率远高于泥砾岩孔隙率。细砂岩中的孔隙以粒间孔为主,孔隙分布较为均匀;而泥砾岩中主要发育裂隙孔隙,此类孔隙结构易导致浸出液在渗流过程中形成优势通道,可能

对铀浸出不利。

3.2 XRD 矿物组成分析

样品主要组成矿物 XRD 分析和黏土定量 XRD 分析结果见表 1 和表 2。可以看出,青山口组矿石样品矿物组成及含量变化较大。17-6591-1 和 17-6692-2 细砂岩主要由石英、正长石、钠长石、黏土矿物、白云石、方解石、黄铁矿、铁矾组成。黏土矿物种类以伊利石、高岭石和伊蒙混层为主。2 个样品中,石英质量分数分别为 50.27% 和 68.91%,正长石质量分数分别为 14.64% 和 15.85%,钠长石质量分数分别为 15.07% 和 8.94%,黏土矿物质量分数分别为 11.02% 和 4.62%;17-6591-1 样品中含有 1.27% 方解石和 7.73% 的白云石,17-6692-2 样品中含有 1.68% 黄铁矿。

4-17-17-2 和 17-6490-2 高碳酸盐泥砾岩主要

由石英、正长石、钠长石、方解石、白云石和黏土矿物组成,此外还含有少量的黄铁矿。黏土矿物类型主要有伊利石、高岭石和伊蒙混层。其中,石英质量分数分别为 21.62% 和 23.46%,正长石质量分数分别为 18.81% 和 22.52%,钠长石质量分数分别为 6.71% 和 8.16%,方解石质量分数分别为 23.51% 和 31.96%,白云石质量分数分别为 20.92% 和 9.75%,黏土矿物质量分数分别为 8.43% 和 3.08%。样品 17-6490-2 中黄铁矿质量分数为 1.06%。

4-w73-3 低碳酸盐泥砾岩主要由石英(38.48%)、正长石(6.33%)、钠长石(12.43%)、黄铁矿(5.23%)、铁矾(12.93%)和黏土矿物(24.59%)组成,黏土矿物类型主要有伊蒙混层(59%)、伊利石(19%)、高岭石(13%)和蒙脱石(9%)。

表 1 矿石样品中主要矿物 XRD 分析结果
Table 1 XRD analysis results of major minerals in the ore sample

样品编号	岩性	$w_B/\%$							
		石英	正长石	钠长石	方解石	白云石	黄铁矿	铁矾	黏土总量
17-6591-1	细砂岩	50.27	14.64	15.07	1.27	7.73	0	0	11.02
17-6692-2	细砂岩	68.91	15.85	8.94	0	0	1.68	0	4.62
4-17-17-2	高碳酸盐泥砾岩	21.62	18.81	6.71	23.51	20.92	0	0	8.43
17-6490-2	高碳酸盐泥砾岩	23.46	22.52	8.16	31.96	9.75	1.06	0	3.08
4-w73-3	低碳酸盐泥砾岩	38.48	6.33	12.43	0	0	5.23	12.93	24.59

表 2 矿石样品中黏土矿物 XRD 分析结果
Table 2 XRD analysis results of clay minerals in the ore sample

样品编号	$w_B/\%$						
	蒙脱石	伊利石	高岭石	伊蒙混层(无序)	伊蒙混层比(无序)	伊蒙混层(有序)	伊蒙混层比(有序)
17-6591-1	0	38	41	0	0	21	76.0
17-6692-2	0	34	26	0	0	40	79.4
4-17-17-2	0	39	20	11	43.7	30	82.6
17-6490-2	0	33	22	45	36.3	0	0
4-w73-3	9	19	13	16	42.7	43	76.5

3.3 矿物电子探针分析

对岩性为细砂岩的完整岩心样品(17-6591-1 样品、17-6692-2 样品)开展了电子探针分析,结果见表 3。可以看出,矿石中存在沥青铀矿、铀石和钛铀集合体等铀矿物:沥青铀矿中 $w(\text{UO}_2)$ 在 55% 以上, $w(\text{SiO}_2)$ 为 1.61%~

5.82%,此外还含有 Ti、Zr、Ca、P、Fe、Al、As 等元素;铀石中 $w(\text{UO}_2)$ 约为 46.93%~55.97%, $w(\text{SiO}_2)$ 约为 8.71%~11.45%,此外还含有 Al、Ti、Zr、P、Ca、Fe、As 等元素;钛铀集合体中, $w(\text{UO}_2)$ 约为 35%, $w(\text{TiO}_2)$ 约为 35%,Al 质量分数较高。

表 3 铀矿物电子探针结果
Table 3 Uranium mineral electron probe results

样品编号	w(TiO ₂)	w(CaO)	w(UO ₂)	w(ZrO ₂)	w(P ₂ O ₅)	w(As ₂ O ₅)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(FeO)	Total	铀矿物
17-6591-1	2.26	3.29	64.14	3.72	1.91	0.91	4.59	4.57	1.63	89.77	沥青铀矿
17-6591-1	35.64	2.04	35.69	3.20	1.10	0.84	1.90	13.98	0.78	97.45	钛铀集合体
17-6692-2	4.69	0.57	70.16	3.68	2.62	1.33	1.90	0.10	0.64	90.61	沥青铀矿
17-6692-2	4.54	0.68	71.82	3.70	2.62	1.33	1.61	0.05	1.29	93.44	沥青铀矿
17-6692-2	4.40	0.66	65.50	3.89	2.42	1.23	2.54	0.54	1.34	86.64	沥青铀矿
17-6692-2	4.22	1.55	68.53	3.61	2.57	1.30	1.79	0	0.41	87.45	沥青铀矿
17-6692-2	3.70	0.86	57.22	3.35	2.26	1.23	5.82	2.31	1.44	85.94	沥青铀矿
17-6692-2	4.16	0.58	55.56	3.54	2.40	0.50	3.34	0.79	3.68	78.94	沥青铀矿
17-6692-2	3.03	1.39	46.93	2.21	1.79	0.49	8.71	4.28	2.32	75.68	铀石
17-6692-2	4.11	2.11	61.32	3.44	2.53	1.13	5.27	1.30	0.91	86.17	沥青铀矿
17-6692-2	3.26	2.70	55.97	3.11	2.21	1.15	11.45	3.14	0.85	87.31	铀石

对细砂岩样品中的高岭土进行电子探针分析,结果见表 4。可以看出,原矿样品中的高岭土表面吸附有微量的铀,其含量在千分之一至万分之一,平均约为 0.069%。然而,浸出后的黏土矿

物中铀含量低于电子探针检测限,表明在浸出过程中黏土矿物表面的铀被浸出,且高岭土并未吸附浸出的铀。

表 4 高岭土矿物电子探针结果
Table 4 Clay mineral electron probe results

样品编号	w(CaO)	w(K ₂ O)	w(UO ₂)	w(Na ₂ O)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(FeO)	w(Sc ₂ O ₃)	w(H ₂ O)	Total
17-6591-1	0.478	1.387	0.094	5.802	0.214	46.121	29.104	0.432	0.009	16.044	100
17-6692-2	0.137	1.985	0.027	0.111	0.354	47.193	37.751	1.200	0	11.051	100
17-6692-2	0.168	1.996	0.086	0.245	0.403	48.039	37.851	1.088	0	9.942	100
17-6692-2	0.409	2.053	0.018	0.206	0.791	46.272	35.792	0.707	0.009	13.398	100
17-6591-1	0.404	0.107	0.120	0.100	0.096	37.391	39.037	0.181	0.027	22.316	100

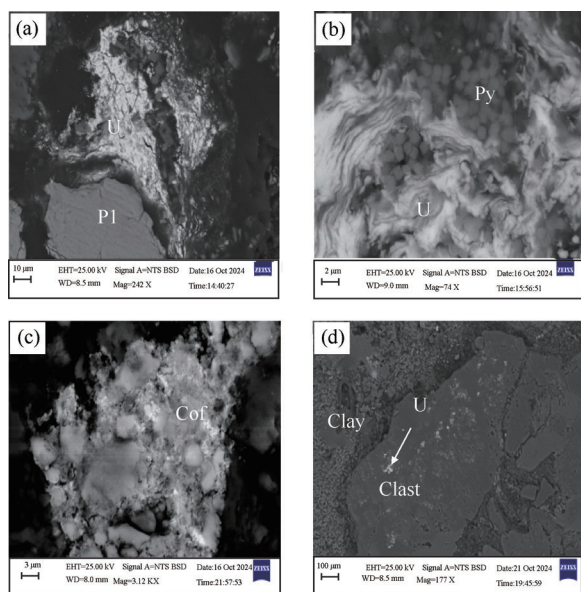
3.4 铀的赋存状态

在细砂岩中,铀矿物以铀石和沥青铀矿为主,吸附态铀和含铀矿物次之。铀石主要呈胶状或颗粒集合体形态出现在碎屑颗粒的边缘,或与填隙物中的黏土矿物伴生,甚至有一些纳米级铀石颗粒呈星点状与黏土矿物共生,也有部分铀石产于碎屑颗粒内部。沥青铀矿主要呈胶状与填隙物中的黏土矿物共生,甚至形成互层结构(图 3)。部分沥青铀矿呈纳米级自形粒状结构或粒状集合体,粒度分布不均匀,多呈块状构造、浸染状构造,少量呈脉状或蜂窝状反应边交代黄铁矿或充填在裂隙中。沥青铀矿多与黄铁矿交代共生,包裹在方解石、白云石、菱铁矿、石英、钾长石等

矿物中(图 4~图 7)。吸附态铀主要表现在黏土矿物(高岭石)吸附铀,其出现位置主要与纳米级星点状铀矿物出现位置紧密相关;在背散射图像中,吸附铀的黏土矿物亮度明显高于正常的黏土矿物亮度。

另外,细砂岩中还存在一些含铀矿物,这些铀主要以类质同象存在于其他矿物的晶格中,包括锐钛矿、金红石、硒铅矿、磷灰石。细砂岩中的重矿物低于 XRD 检测限,且其内的铀质量分数均小于 1%,可忽略不计。黏土矿物在细砂岩中的平均质量分数约为 7.82%,黏土矿物中的铀质量分数约为 0.043%,因此,黏土吸附的铀约占全岩铀的 0.003%,而细砂岩矿石中的铀品位约为 0.007%。

该结果表明,铀矿物约占青山口组细砂岩中铀总量的57%,而吸附态铀约占铀总量的43%。



U—沥青铀矿;Cof—铀石;Pl—斜长石;Py—黄铁矿;
Clay—黏土矿物;Clast—碎屑。

(a)胶状铀石发育在长石颗粒边缘;(b)细颗粒铀石与黏土矿物共生;(c)短柱状的铀石;(d)发育在碎屑颗粒内部的铀石。

图3 细砂岩(17-6591-1样品)中铀矿物形态

Fig. 3 Morphology of uranium minerals in fine sandstone (Sample 17-6591-1)

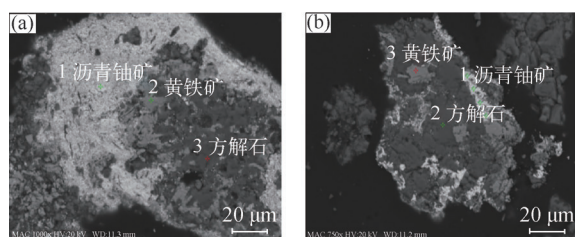


图4 沥青铀矿在方解石中形态

Fig. 4 Pitchblende in calcite morphology

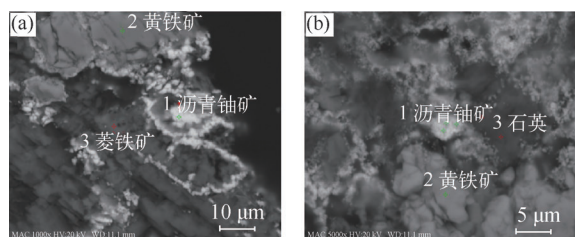


图5 沥青铀矿嵌布在菱铁矿、黄铁矿、石英及其裂隙中形态

Fig. 5 Pitchblende embedded in siderite, pyrite, quartz and their fissures

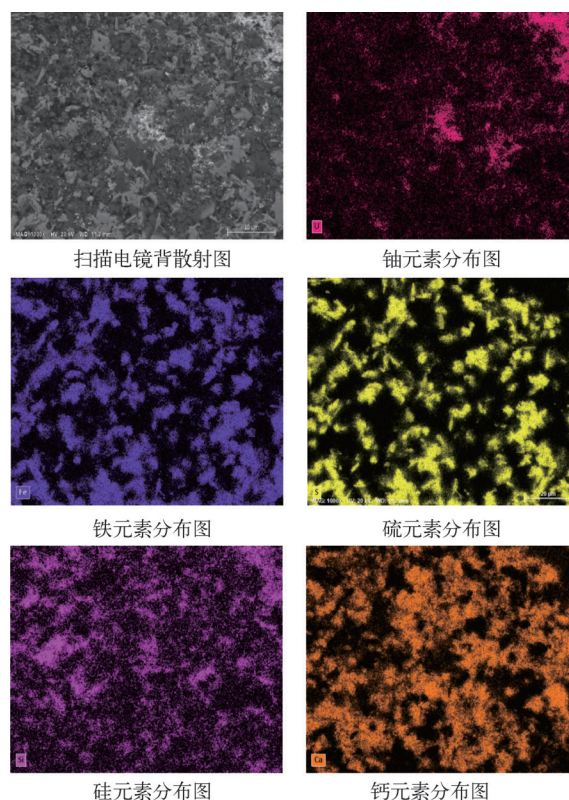


图6 沥青铀矿嵌布在镁方解石、黄铁矿、长石及其裂隙中形态

Fig. 6 Pitchblende embedded in magnesium calcite, pyrite, feldspar and their fissures

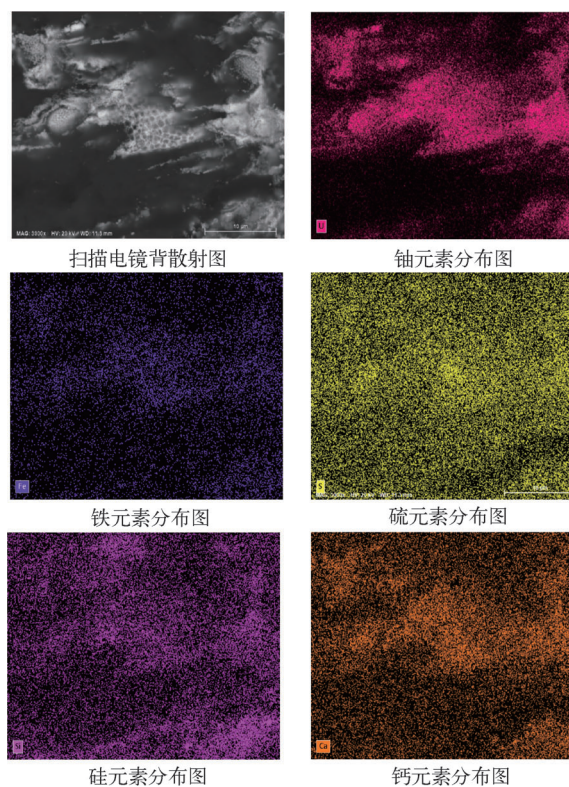


图7 沥青铀矿状与黄铁矿交代共生

Fig. 7 Pitchblende with pyrite metasomatism

3.5 铀价态及伴生铼含量分析

对青山口组 5 个样品开展了铀价态和铼含量分析,结果见表 5。样品的铀质量分数变化较大,其中样品 4-17-17-2、4-w73-3 和 17-6591 中 $w(\text{U})$ 较高,分别达 0.674%、0.214%、0.130%,样品 17-6692、17-6490 的 $w(\text{U})$ 相近,分别为 0.006%、0.008%。 $\text{U}(\text{VI})$ 在青山口组样品中的含量偏高,其中 3 个样品的 $w[\text{U}(\text{VI})]$ 在 80% 以上,其余 2 个样品中 $w[\text{U}(\text{VI})] \leq 50\%$ 。样品中铼含量均很低,仅 4-w73-3 中 $w(\text{Re})$ 超过 1 $\mu\text{g/g}$ 。

表 5 青山口组矿石铀含量及铼含量
Table 5 Uranium and rhenium content of ore from the Qingshankou Formation

样品编号	$w(\text{U})/\%$	$w[\text{U}(\text{VI})]/\%$	$w[\text{U}(\text{VI})]/w(\text{U})/\%$	$w(\text{Re})/(\mu\text{g/g})$
4-17-17-2	0.674	0.567	84.12	0.83
4-w73-3	0.214	0.197	92.06	1.35
17-6692	0.006	0.003	50.00	0.04
17-6591	0.130	0.110	84.62	<0.01
17-6490	0.008	0.003	37.50	0.28

4 结论

对松辽盆地某铀矿床青山口组铀矿物样品制作探针薄片、铸体薄片,通过光学显微镜、扫描电镜和电子探针等手段,分析样品中可能会对铀的浸出产生影响的工艺矿物因素,为后期对该矿床开采提供支撑,主要结论如下:

- 1) 细砂岩中的孔隙以粒间孔为主,分布较为均匀,孔隙分布与铀矿物的分布具有较高相关性,有助于浸出液与铀矿物接触。另外,黏土矿物在孔隙中的分布较少,能够有效降低其水化膨胀造成的孔隙堵塞,有利于降低浸出液运移阻力。但部分细砂岩中有较高含量的泥砾岩,以裂隙分布为主,易造成浸出液局部集中形成优势流;由于裂隙与铀矿物的空间相关性低,对铀浸出不利。
- 2) 细砂岩中铀矿物主要以铀石和沥青铀矿为主,且分布在碎屑颗粒的边缘,有利于铀矿物与浸出液发生反应;而泥砾岩中铀矿物以铀石为主,且主要分布在泥砾中。与沥青铀矿相比,铀石的反应活化能高、浸出难度较大,且铀石分布在碎屑中,难以与浸出液接触,增加了浸出难度。

参考文献:

[1] 卢胜军. 松辽盆地青山口组二、三段沉积特征及铀成矿分析[J]. 铀矿冶, 2022, 41(1): 12-20.
Lu Shengjun. Analysis on sedimentary characteristics uranium mineralization conditions of the second and third members Qingshankou Fm in Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(1): 12-20.

[2] 陈程. 松辽盆地通辽地区构造特征与铀成矿作用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2018.

[3] 王冰, 刘成东, 李仁泽, 等. 鹿井矿田某铀矿床矿物学特征及铀的赋存状态研究[J]. 铀矿冶, 2016, 35(1): 48-54.
Wang Bing, Liu Chengdong, Li Renze, et al. Study of mineralogical characteristics and occurrence state of uranium of an uranium deposit in Lujing orefield[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(1): 48-54.

[4] 杨松林. 松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化带地球化学特征[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 321-332.
Yang Songlin. Geochemical characteristics of inter-layer oxidation zone in Qianjiadian sandstone-type uranium deposits, Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(2): 321-332.

[5] 刘晓辉, 罗敏, 李研. 松辽盆地拜泉地区上白垩统姚家组沉积相特征[J]. 铀矿冶, 2024, 43(2): 13-23.
Liu Xiaohui, Luo Min, Li Yan. Sedimentary facies characteristics of Yaojia Formation in Baiquan area of Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2): 13-23.

[6] 禹宝利, 张振强. 松辽盆地南部钱家店凹陷姚家组含水层水成铀矿作用分析[J]. 铀矿冶, 2022, 41(4): 346-351.
Yu Baoli, Zhang Zhenqiang. Analysis on hydrogenic uranium mineralization of Yaojia Formation aquifer in Qianjiadian Depression of south Songliao Basin [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4): 346-351.

[7] 夏毓亮, 郑纪伟, 李子颖, 等. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊 1): 154-155.
Xia Yuliang, Zheng Jiwei, Li Ziyang, et al. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 154-155.

[8] 张超, 王善博, 俞初安, 等. 柴北缘冷湖砂岩型铀矿

- 铀矿物赋存特征及成因机制[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(1): 47-60.
- Zhang Chao, Wang Shanbo, Yu Reng'an, et al. Genetic mechanism and occurrence characteristics of uranium minerals in the Lenghu sandstone-type uranium deposit, northern Qaidam Basin[J]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 2022, 41(1): 47-60.
- [9] 李佳桐. 松辽盆地西部斜坡区青山口组-嫩江组沉积体系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [10] 王之晟, 卢天军, 郭恒飞, 等. 松辽盆地开鲁拗陷上白垩统姚家组与青山口组地层发育特征及铀成矿条件[J]. 铀矿地质, 2024, 40(4): 619-632.
- Wang Zhisheng, Lu Tianjun, Guo Hengfei, et al. Development characteristics and uranium metallogenic condition of the upper cretaceous Yaojia Formation and Qingshankou Formation in Kailu Depression of Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 2024, 40(4): 619-632.
- [11] 李林强. 钱家店铀矿床红色泥砾砂岩岩石学特征及矿化成因分析[J]. 铀矿地质, 2014, 30(5): 271-275.
- Li Linqiang. Petrological characteristic and mineralization analysis of red muddy gravelled sandstone in Qianjiadian uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 2014, 30(5): 271-275.
- [12] 朱强, 焦养泉, 吴立群, 等. 松辽盆地钱家店地区姚家组铀储层岩石学特征及成岩作用[J]. 中国科技论文, 2015, 10(15): 1802-1808.
- Zhu Qiang, Jiao Yangquan, Wu Liqun, et al. Petrology and diagenesis of the uranium reservoir in the Yaojia Formation of Songliao Basin, Qianjiadian area [J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(15): 1802-1808.
- [13] 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 等. 松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束[J]. 地球科学, 2016, 41(1): 153-166.
- Rong Hui, Jiao Yangquan, Wu Liqun, et al. Epigenetic alteration and its constraints on uranium mineralization from the Qianjiadian uranium deposit, southern Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(1): 153-166.
- [14] 田增辉, 宋昊, 范元清, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀赋存状态及铀矿物工艺矿物学研究[J]. 矿物岩石, 2024, 44(1): 61-70.
- Tian Zenghui, Song Hao, Fan Yuanqing, et al. Study on uranium occurrence state and process mineralogy of uranium minerals in Nalinggou uranium deposit, Ordos Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(1): 61-70.
- [15] 李子颖, 秦明宽, 郭庆银, 等. 渗出砂岩型铀矿成矿预测与找矿标志[J]. 铀矿地质, 2024, 40(1): 1-15.
- Li Ziyang, Qin Mingkuan, Guo Qingyin, et al. Metallogenic prediction and exploration indication of exudative sandstone type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 2024, 40(1): 1-15.
- [16] 董惠琦, 李喜龙, 张渤. 内蒙古某铀矿 CO₂ + O₂ 地浸采铀浸出试验研究[J]. 铀矿冶, 2019, 38(1): 8-13.
- Dong Huiqi, Li Xilong, Zhang Bo. Experimental study CO₂ + O₂ in-situ leaching of uranium in a uranium mine in Inner Mongolia[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2019, 38(1): 8-13.
- [17] 邓刘敏, 葛祥坤, 刘章月, 等. 松辽盆地西南部 DL 铀矿带铀赋存状态及矿物组成特征[J]. 铀矿地质, 2021, 37(2): 192-204.
- Deng Liumin, Ge Xiangkun, Liu Zhangyue, et al. The occurrence and mineral composition of uranium ore of DL mineralized zone in southwestern Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 2021, 37(2): 192-204.
- [18] 马汉峰, 罗毅, 李子颖, 等. 沉积特征对砂岩型铀成矿类型的制约: 以松辽盆地南部姚家组为例[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(1): 6-10.
- Ma Hanfeng, Luo Yi, Li Ziyang, et al. Constrains of sedimentary characteristics on the mineralization type of sandstone hosted uranium deposits: A case study of Yaojia Formation in the southern Songliao Basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2010, 27(1): 6-10.
- [19] 东艳, 黄少华, 王鹏, 等. 钱家店铀矿田草莓状黄铁矿特征及其地质意义[J]. 铀矿地质, 2023, 39(2): 202-215.
- Dong Yan, Huang Shaohua, Wang Peng, et al. Characteristics and geological significance of framboidal pyrite in Qianjiadian uranium ore field[J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(2): 202-215.
- [20] 罗毅, 何中波, 马汉峰, 等. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 2012, 31(2): 391-400.
- Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfeng, et al. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao Basin[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(2): 391-400.

Process Mineralogical Study of Uranium Ores in Qingshankou Formation of a Uranium Deposit in Songliao Basin

LIU Xiaokui¹, HOU Chunru², YUAN Yuan², YI Aifei², HU Rile¹, GAO Yonghong¹

(1. Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China;

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

Abstract: The Qingshankou Formation is one of the primary ore-bearing layers for uranium deposits in the Songliao Basin, where the techno-metallurgical characteristics of the ores directly determine the feasibility of in-situ leaching uranium. This study focuses on sandstone type ores in the Qingshankou Formation, employing petrographic analysis, scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, and electron probe microanalysis to conduct techno-metallurgical research, systematically revealing the occurrence patterns of uranium minerals. The results indicate that uranium minerals in fine sandstones of the Qingshankou Formation are predominantly uraninite and pitchblende, primarily distributed along the edges of clastic particles, which facilitates contact between uranium minerals and leaching solutions. Additionally, the pores in fine sandstones are mainly intergranular, promoting uniform diffusion of leaching agents. In contrast, uranium minerals in mud breccia are primarily uraninite, mainly distributed within the mud breccia, which hinders contact between leaching solutions and uranium minerals, increasing leaching difficulty. The study suggests that the Qingshankou Formation of a uranium deposit in the Songliao Basin has the potential to become an ideal mining horizon in the region.

Key words: Songliao Basin; Qingshankou Formation; uranium minerals; process mineralology; endowed characteristics; in-situ leaching of uranium