

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.10.008

内蒙古巴彦乌拉铀矿含矿层堵塞的水文地球化学机理

陈鑫睿^{1,2}, 刘金辉^{1,2}, 邢拥国³, 阳奕汉⁴, 胡鹏飞⁴,
王如意⁴, 梁大业⁵, 陈万利³

- (1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013;
2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;
3. 中核矿业科技有限公司, 北京 101149;
4. 中核内蒙古矿业有限公司, 呼和浩特 010010;
5. 湖南省核工业地质调查院, 长沙 410000)

摘要: 铀浸出是溶浸液与铀矿物之间发生一系列水文地球化学作用来实现的, 巴彦乌拉铀矿酸法地浸开采过程中出现了含矿层堵塞问题。基于含矿层矿物特征, 根据浸出液化学成分, 采用地球化学模式程序 PHREEQCI 对浸出液-矿物平衡进行模拟, 计算了矿物的饱和指数与反应条件指数, 确定了矿物溶解沉淀状态, 揭示了含矿层堵塞水文地球化学机理。结果表明, 含矿层堵塞水文地球化学原因是溶浸液中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 Fe^{3+} 处于过饱和状态, 产生了石膏、针铁矿、赤铁矿沉淀, 其饱和指数分别为 0.06~0.20、0.01~-0.83、0.94~2.58; 石膏的反应条件指数 $RCI_{\text{Ca}} = 0.34 \sim 0.42$, $RCI_{\text{S}} = 1.17 \sim 1.35$, Ca^{2+} 浓度是其溶解-沉淀的主要影响因素, 赤铁矿、针铁矿的 $RCI_{\text{pH}} = -3.47 \sim -3.27$, $RCI_{\text{Eh}} = -599.44 \sim -474.72 \text{ mV}$, $RCI_{\text{Fe}} = 0.96 \sim 1.37$, 均处于沉淀状态, 石膏、铁矿物沉淀是溶浸液与含矿层中的矿物作用后其离子活度积超过了其溶液积常数的结果。

关键词: 含矿层堵塞; 矿物特征; 水文地球化学; 平衡模拟; 巴彦乌拉铀矿

中图分类号: TL212.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)10-0058-08

Hydrogeochemical Mechanism of Ore Bearing Bed Plugging in Bayanwula Uranium Deposit, Inner Mongolia

CHEN Xin-rui^{1,2}, LIU Jin-hui^{1,2}, XING Yong-guo³, YANG Yi-han⁴,
HU Peng-fei⁴, WANG Ru-yi⁴, LIANG Da-ye⁵, CHEN Wan-li³

- (1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
3. China Nuclear Mining Technology Co., Ltd., Beijing 101149, China;
4. Inner Mongolia Mining Co., Ltd., CNMC, Huhhot 010010, China;
5. Hunan Nuclear Industry Geological Survey Institute, Changsha 410000, China)

Abstract: Uranium leaching is realized by a series of hydrogeochemical interactions between leaching solution and uranium minerals. In Bayanwula uranium mine, blockage of ore-bearing strata occurred in acid

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金核技术创新联合基金(U1967209)

作者简介: 陈鑫睿(1997-), 女, 甘肃酒泉人, 硕士研究生; 通信作者: 刘金辉(1961-), 男, 江西抚州人, 教授, 博士生导师

in-situ leaching. Based on mineral characteristics of ore-bearing bed and chemical components of leachate, leachate-mineral balance was simulated by model of geochemical process PHREEQCI, saturation index of mineral and reaction condition index (RCI) were calculated, mineral dissolution precipitation state was determined, and hydrogeochemical mechanism of blockage of ore-bearing bed was revealed. The results show that hydrogeochemical reason for blockage of ore-bearing strata is that Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Fe^{3+} in leaching solution are in supersaturated state, resulting in precipitation of gypsum, goethite and hematite, with saturation index of 0.06—0.20, 0.01—0.83 and 0.94—2.58, respectively. RCI_{Ca} of gypsum is 0.34—0.42, and RCI_{S} is 1.17—1.35. Ca^{2+} concentration is main factor affecting solution-precipitation of gypsum. RCI_{pH} (—3.47—3.27), RCI_{Eh} (—599.44—474.72 mV) and RCI_{Fe} (0.96—1.37) of hematite and goethite are all in precipitated state. Precipitation of gypsum and iron minerals is the result that ionic activity product of leaching solution exceeds its solution product constant after interaction between leaching solution and minerals in ore bearing layer.

Key words: ore bearing bed blocking; mineral characteristics; hydrogeochemistry; equilibrium simulation; Bayanwula uranium deposit

近年来,铀矿地浸开采技术以其独特的优越性和良好的经济效益倍受青睐,已成为我国铀矿开发的主要工艺技术。然而,在地浸采铀中,随着抽、注液作业的运行,溶浸剂注入造成含矿层堵塞问题也日益突出^[1]。严重堵塞会导致矿石渗透率、抽注水量下降,抽注孔无法工作,直接影响生产效益。

地浸开采中产生的化学沉淀也会填充砂岩的孔隙、覆盖岩石颗粒的表面^[2-4]。关于含矿层堵塞的水文地球化学机理,前人做过相关研究。焦学然等^[5]认为,当地下水中矿化度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度过高易产生石膏、方解石沉淀而引起化学堵塞。许根福^[6]通过 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀矿山工业试验,认为在 pH 为 6.0~9.0 时易产生 FeOOH 沉淀堵塞矿层。田新军等^[9]、吉宏斌等^[8]、袁若思等^[9]提出用 CO_2 调节的溶浸剂 pH 来减少或避免化学沉淀堵塞的技术。运用淡化少试剂工艺可有效防止高矿化度地下水地层进行地浸采铀,含矿层中硫酸钙和碳酸钙化学沉淀^[10]。针对巴彦乌拉铀矿,郑和秋野等^[11]、蒋小辉等^[12]从水文地质条件角度认为该矿床条件非常利于开发,杜自耕等^[13]、邢晓东等^[14]通过现场地层试验、室内酸法与碱法柱浸对比试验、浸泡试验等结果建议采用酸法地浸工艺。尽管对巴彦乌拉铀矿床的研究较多,但尚未开展对含矿层堵塞的水文地球化学机理的系统研究。为此,本文以内蒙古巴彦乌拉铀矿床作研究基地,运用地球化学模式软件(PHREEQC)对溶浸液与围岩矿物水岩作用进行模拟,对酸法地浸条件下含矿层堵塞的水文地球化学机理进行探讨,为防治含矿层堵塞提供科学依据。

1 自然地理与地质背景

巴彦乌拉铀矿位于内蒙古中部,二连盆地马尼特坳陷的西部^[12],隶属于内蒙古锡林郭勒盟苏尼特左旗巴彦乌拉苏木(乡),交通便利,附近的草原便道发达^[15]。矿床处于盆地中央地势相对低洼地带,海拔 954~978 m,为丘陵地貌,地形平坦,最大高差 14 m,主要为草原,局部为沙漠;区域内地表水不发育,季节性湖泊多,地下水资源丰富,主要接受大气降水和层间地下水补给,冬季寒冷少雪,春夏干燥少雨,且雨水时空分布不均,平均降水量 181.2 mm。

2 矿物工艺学特征

2.1 铀矿物

据前人研究成果^[16-17],铀矿石以低品位铀矿石(铀品位 $\leq 0.016\%$)为主,矿石中铀赋存形式以铀矿物为主。主要铀矿物类型为沥青铀矿、铀黑、铀石及铀钍石。

1) 沥青铀矿

沥青铀矿是巴彦乌拉铀矿最常见铀矿物,常与黄铁矿^[18]、赤铁矿和少量的方铅矿、辉钼矿、黑钨矿以及微晶石英、萤石、方解石伴生^[19]。 UO_2 含量 43.6%~74.60%; SiO_2 含量 0.08%~19.08%; CaO 、 PbO 含量分别为 0.19%~6.05%、10.00%~16.67%^[20-21]。

2) 铀黑

铀黑大多呈被膜状与白铁矿共生,或充填在砂岩胶结物中和有机质胞腔内部。 UO_2 铀含量 30.15%~54.15%^[20]。

3) 铀石

铀石多与沥青铀矿、石英共生^[22], SiO₂ 含量 7.19% ~ 34.68%, 铀石中含 4.61% ~ 6.42% 的钍^[21]。

4) 铀钍石

铀钍石常产出于石英、长石、黄铁矿边缘^[23]。UO₂ 含量仅 0.64% ~ 8.34%, ThO₂ 含量 10.61% ~ 55.79%, SiO₂ 含量 2.06% ~ 12.87%^[24]。

2.2 铁矿物

铁矿物是巴彦乌拉铀矿床矿石矿物中最主要的杂质矿物之一, 酸法地浸过程中, 铁矿物被硫酸溶出并进入地下水, 当铁浓度含量较高时, 易产生大量的铁矿物化学沉淀, 降低含矿层渗透性。

1) 黄铁矿

黄铁矿含量一般为 1% ~ 5%^[24], 是地浸溶液中铁离子的主要来源。铀矿物通常与黄铁矿密切共生。

2) 铁氧化物

铁氧化物(FeO) 含量一般为 0.39 ~ 1.68%, 平均 0.82%, Fe₂O₃ 含量 1.06% ~ 6.76%, 一般为 1.5 ~ 3.5%, 平均 2.45%^[24]。

2.3 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物含量是酸法地浸可行性的决定性因

素之一, 含矿层碳酸盐总体含量低, 一般围岩碳酸盐含量 0.10% ~ 4.41%, 平均 0.67%, 矿石含量 0.08% ~ 0.36%, 平均 0.28%, 有利于酸法地浸开采^[24]。

3 含矿层堵塞水文地球化学机理

地浸采铀就是将配置好的溶浸液通过注液钻孔注入到含矿含水层中, 注入后的溶浸液与含矿层中的矿物发生作用后, 某些化学组分进入溶浸液中。在此过程中, 沿着溶浸液(地下水)流向, 溶浸液矿化度不断增加, 当溶浸液到达抽液钻孔时, 便通过抽液孔抽出地表, 抽出后的浸出液含有大量来源于含矿层矿物的溶解成分。为此, 本文根据浸出液化学成分, 运用地球化学模拟软件(PHREEQC), 对浸出液-矿物之间的水岩相互作用进行平衡模拟, 以此来揭示含矿层堵塞的水文地球化学机理。

3.1 溶浸液化学成分特征

目前, 巴彦乌拉铀矿地浸生产已开拓 10 个生产采区(C1-C10)。本文以 C10 采区为例, 研究地浸过程中含矿层堵塞的水文地球化学机理。巴彦乌拉铀矿床 C10 采区抽液孔浸出液化学成分如表 1 所示。

表 1 巴彦乌拉铀矿 C10 采区浸出液化学成分

Table 1 Chemical compositions of leachate of C10 mining area in Bayanwula uranium deposit

/(mg · L⁻¹)

孔号	pH*	Eh**	余酸***	U	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	SO ₄ ²⁻ ***	Cl ⁻
KC11842	1.38	260	3.90	10.06	705.76	512.56	1 092	0	605.76	13.57	512.31
KC12240	1.41	238	3.49	9.38	557.18	646.27	1 222	0	807.68	15.87	610.57
KC11840	1.37	226	3.80	10.71	594.32	1114.25	1 898	0	1 186.28	20.62	701.80
KC12638	1.49	239	2.77	10.36	668.61	935.97	1 196	0	807.68	15.33	596.53
KC12238	1.59	300	2.16	7.30	594.32	802.26	1 056	26.00	631.00	12.89	561.44
KC11838	1.32	313	4.13	24.87	631.47	958.26	2 210	62.40	1 085.32	25.62	596.52
KC13036	1.39	256	3.70	10.46	705.76	824.55	1 196	15.60	681.48	14.84	575.48
KC12636	1.34	286	4.31	13.52	705.76	646.27	1 092	0	681.48	13.77	596.52
KC12236	1.31	248	4.62	27.64	705.76	913.69	1 430	0	1 034.84	19.59	575.48
KC13034	1.60	268	2.16	5.28	668.61	579.41	832	0	378.60	9.80	652.67
KC12634	1.36	234	4.31	11.84	668.61	891.40	1 196	0	681.48	15.53	603.55
KC12234	1.38	227	3.90	13.82	594.32	623.98	1 274	0	1 110.56	16.56	659.69
KC11834	1.39	249	3.18	22.50	594.32	913.69	2 106	0	1 590.12	23.41	603.55
KC12232	1.38	262	3.90	24.71	594.32	735.41	988	0	681.48	13.23	231.59
KC11832	1.25	324	4.93	39.09	668.61	824.55	1 768	88.40	1 312.48	21.55	603.55
KC11432	1.26	354	4.42	24.09	445.74	802.26	2 392	312	25.24	23.32	701.80
KC11032	1.25	348	4.93	21.32	520.03	935.97	2 340	234	1 640.60	26.35	610.57
KC12242	1.36	303	3.90	15.00	594.32	757.69	1 196	26	656.24	15.13	687.76
KC12642	1.38	298	3.80	13.82	594.32	579.41	1 170	15.60	656.24	15.13	456.17

注: * 无单位, **单位为 mV, ***单位为 g/L

3.2 浸出液-矿物平衡模拟

3.2.1 水文地球化学参数

浸出液矿物平衡模拟结果通过水文地球化学(饱和指数和反应条件指数)来表征,并根据这些参数来分析矿物的溶解与沉淀特征。

1) 饱和指数(SI)

饱和指数是水中难溶化合物的离子活度积(IAP)与其溶度积常数(K_{sp})的比值,常用于判断矿物的沉淀与溶解,计算公式为:

$$SI = \lg(IAP/K_{sp})$$

$SI=0$, 矿物处于平衡状态; $SI>0$, 矿物处于沉淀状态; $SI<0$, 矿物处于溶解状态^[25]。

2) 反应条件指数(RCI)

反应条件指数是指固液体系中反应条件实测值与反应条件边界值的差值或对数值之差。将实际条件下的水文地球化学作用条件与发生作用的临界条件进行比较,从而得到作用发生的状态、条件的参数。水文地球化学作用反应条件通常有:浓度 C、

pH、氧化还原电位(Eh)、温度(T)、压力(P)等。其相应的反应条件指数表达式分别为:

$$RCI_c = \lg(C/C_b) = \Delta \lg C \tag{1}$$

$$RCI_{pH} = pH - pH_b = \Delta pH \tag{2}$$

$$RCI_{Eh} = Eh - Eh_b = \Delta Eh \tag{3}$$

$$RCI_T = T - T_b = \Delta T \tag{4}$$

$$RCI_P = P - P_b = \Delta P \tag{5}$$

式中的下标代表反应条件边界值。 RCI 与 SI 是建立在热力学基础上彼此之间具有正相关关系的两个参数。 $RCI<0$, 体系处于溶解状态; $RCI=0$, 体系处于溶解、沉淀平衡; $RCI>0$, 体系产生沉淀^[26]。

3.2.2 矿物饱和指数特征

根据浸出液化学成分数据,运用地球化学模式软件计算得到的矿物饱和指数如表 2 所示。从表 2 可以看出,C10 采区中石膏、针铁矿和赤铁矿矿物浸出液饱和指数均大于 0,是地浸过程中化学沉淀的主要矿物。

表 2 巴彦乌拉矿床 C10 采区浸出液矿物饱和指数

Table 2 Mineral saturation index of leaching solution in C10 mining area of Bayanwula deposit

孔号	石膏	针铁矿	赤铁矿	氯氢氧化铁	硬石膏	草铁矾	纤铁矿	磁铁矿
KC11842	0.16	0.24	1.42	-5.09	-0.18	-16.75	-1 000	-1 000
KC12240	0.08	0.36	1.64	-4.98	-0.26	-16.56	-1 000	-1 000
KC11840	0.11	0.37	1.68	-4.96	-0.23	-16.20	-1 000	-1 000
KC12638	0.15	0.57	2.08	-4.76	-0.19	-16.65	-1 000	-1 000
KC12238	0.10	0.83	2.58	-4.51	-0.24	-16.78	-15.46	-9.50
KC11838	0.20	0.26	1.45	-5.08	-0.14	-15.81	-15.71	-10.89
KC13036	0.16	0.29	1.52	-5.04	-0.18	-16.68	-16.08	-11.20
KC12636	0.13	0.13	1.18	-5.21	-0.20	-16.84	-1 000	-1 000
KC12236	0.18	0.10	1.14	-5.23	-0.16	-16.42	-1 000	-1 000
KC13034	0.13	0.8	2.52	-4.54	-0.21	-17.07	-1 000	-1 000
KC12634	0.14	0.2	1.34	-5.13	-0.20	-16.65	-1 000	-1 000
KC12234	0.08	0.28	1.50	-5.05	-0.25	-16.63	-1 000	-1 000
KC11834	0.13	0.46	1.85	-4.88	-0.21	-16.05	-1 000	-1 000
KC12232	0.06	0.21	1.35	-5.13	-0.28	-16.92	-1 000	-1 000
KC11832	0.14	0.01	0.94	-5.33	-0.19	-16.28	-15.64	-11.33
KC11432	0.07	0.11	1.16	-5.22	-0.27	-15.62	-15.15	-10.62
KC11032	0.06	0.09	1.11	-5.25	-0.27	-15.94	-15.25	-10.77
KC12242	0.09	0.21	1.34	-5.13	-0.25	-16.64	-15.92	-11.21
KC12642	0.11	0.26	1.45	-5.08	-0.23	-16.59	-16.11	-11.29

3.2.3 矿物反应条件指数

在确定了产生沉淀的矿物之后,还要进一步确定这些矿物溶解与沉淀的边界条件。为此,要对难溶矿物的反应条件指数进行计算。根据浸出液化学成分数据,分别对溶浸液-矿物平衡条件下的相关离子浓度的溶解沉淀、边界值进行了计算,并根据地浸条件下这些离子实测值减去其边界值则得到石膏、

氯氢氧化铁、赤铁矿沉淀的浓度反应条件指数。

1) 石膏

石膏溶解与沉淀的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度反应条件指数如表 3 所示, RCI_{Ca} 为 0.34~0.42, RCI_S (SO_4^{2-} 浓度反应条件指数)为 1.17~1.35。抽液孔饱和指数大于 0, RCI_{Ca} 小于 RCI_S ,表明该抽液孔在石膏处于沉淀状态, Ca^{2+} 浓度是主要影响因素。图 1 显示

KC12638、KC11838、KC13036、KC12236、KC12634 的平衡浓度积曲线均在抽液孔 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度下方,表明 C10 采区浸出液中石膏处于沉淀状态。

2) 铁矿物

针铁矿和赤铁矿是主要沉淀矿物,选取 5 个

抽液孔的数据,模拟计算铁矿物的边界值,并得到其 RCI 值(表 4)。图 2 分别为 C10 采区部分抽液孔浸出液针铁矿、赤铁矿浓度平衡浓度积曲线,从图 2 可知针铁矿、赤铁矿处于过沉淀状态。

表 3 C10 采区石膏溶解、沉淀的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度反应条件指数
Table 3 Reaction condition indexes of Ca^{2+} and Fe^{3+} concentration of dissolution and precipitation in C10 mining area

编号	抽液孔	SI	$C[\text{Ca}^{2+}]^*$	$C[\text{Ca}^{2+}]_b^*$	RCI_{Ca}	$C[\text{SO}_4^{2-}]^*$	$C[\text{SO}_4^{2-}]_b^*$	RCI_{S}
4	KC12638	0.15	668.61	291.88	0.36	15 330	1 042.56	1.17
6	KC11838	0.20	631.47	242.60	0.42	25 620	1 143.36	1.35
7	KC13036	0.160	705.76	306.08	0.36	14 840	1 012.80	1.17
9	KC12236	0.180	705.76	292.32	0.38	19 590	1 049.28	1.27
11	KC12634	0.140	668.61	304.72	0.34	15 530	1 024.32	1.18

注: * 单位为 mg/L , 下标 b 表示临界值, 下同

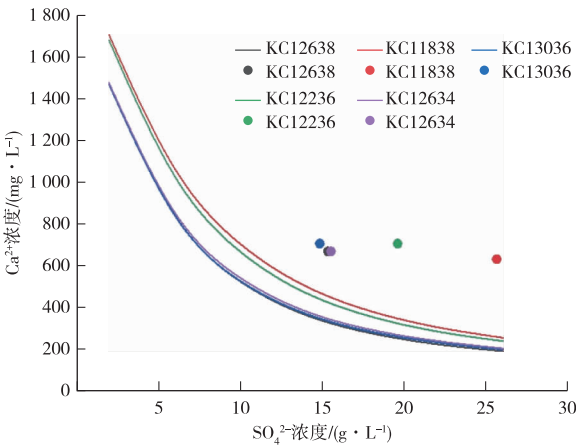


图 1 C10 采区部分抽液孔浸出液 CaSO_4 平衡浓度积曲线

Fig. 1 Equilibrium concentration curves of CaSO_4 in leachate from some drainage holes in C10 mining area

表 4 C10 采区铁矿物溶解、沉淀的 pH 、 Eh 与 Fe^{3+} 浓度反应条件指数
Table 4 Reaction condition indexes of pH value, Eh value and Fe^{3+} concentration of dissolution and precipitation of iron mineral in C10 mining area

孔号	SI	pH	pH_b	RCI_{pH}	Eh/mV	Eh_b/mV	RCI_{Eh}/mV	$C[\text{Fe}^{3+}]/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C[\text{Fe}^{3+}]_b/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	RCI_{Fe}
KC12638	0.150	1.49	4.760	-3.27	239	828.03	-589.03	1 196	50.73	1.37
KC11838	0.200	1.32	4.751	-3.43	313	787.72	-474.72	2 210	163.86	1.13
KC13036	0.160	1.39	4.759	-3.37	256	799.26	-543.26	1 196	92.62	1.11
KC12236	0.180	1.31	4.780	-3.47	248	820.34	-572.34	1 430	158.26	0.96
KC12634	0.140	1.36	4.766	-3.41	234	833.44	-599.44	1 196	112.00	1.03

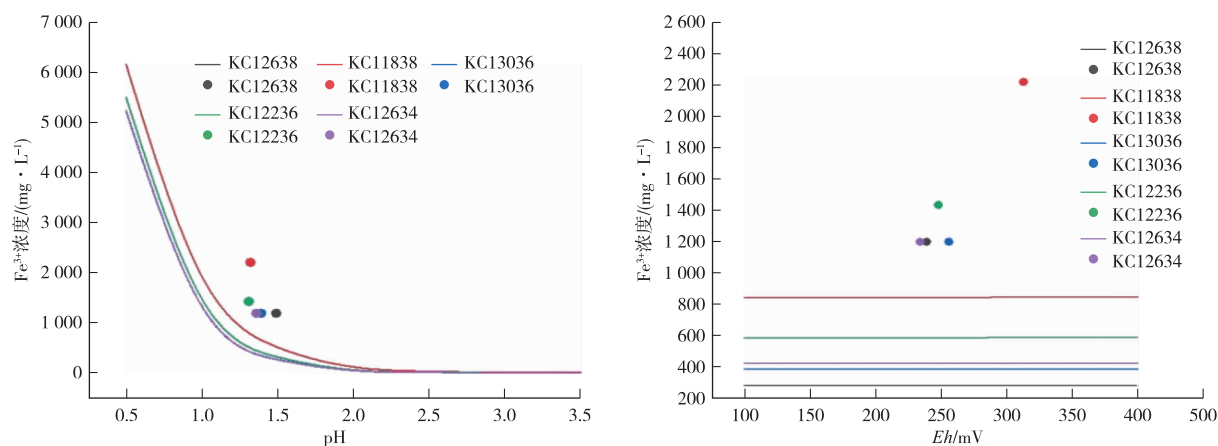


图2 C10采区部分抽液孔浸出液针铁矿(a)和赤铁矿(b)的平衡浓度积曲线

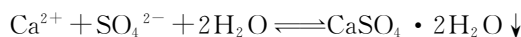
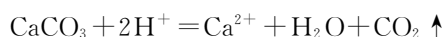
Fig. 2 Equilibrium concentration curves of goethite (a) and hematite (b) in leachate from some drainage holes in C10 mining area

3.2.4 含矿物堵塞机理分析

根据模拟结果得到酸法地浸采铀过程中主要沉淀矿物为石膏、针铁矿、赤铁矿。下面从水文地球化学角度对含矿层堵塞机理进行分析。

1) 石膏(硬石膏)

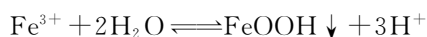
酸法地浸生产中,由注液孔将高酸度溶浸液注入含矿层后,硫酸会与含矿层中的碳酸钙作用,产生硬石膏(CaSO_4)或石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)沉淀:



根据水文地球化学模拟结果,石膏沉淀的 SO_4^{2-} 浓度已超出其边界值,沉淀反应主要受 Ca^{2+} 浓度控制, Ca^{2+} 浓度边界值为242.6~306.08 mg/L, RCI_{Ca} 为0.34~0.42,由于浸出液中 Ca^{2+} 浓度为631.47~705.76 mg/L,实际浓度大于边界值浓度,具备了 CaSO 沉淀的条件,因而在酸法地浸生产中,含矿层中产生了大量石膏沉淀。

2) 针铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或 $\alpha\text{-FeOOH}$)

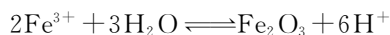
针铁矿的饱和指数大于0,是地浸采铀矿生产中产生的另一种难溶矿物。主要与含矿层中铁矿物的溶解产生 Fe^{3+} 有关,当溶液中pH小、Fe浓度较大时,生成针铁矿沉淀:



根据浸出液化学成分, Fe^{3+} 浓度为1 196~2 210 mg/L,pH为1.31~1.49时,氢氧化铁可以形成沉淀析出。

3) 赤铁矿(Fe_2O_3)

当水中有一定量 Fe^{3+} 时,易于形成赤铁矿沉淀:



当溶液pH有所上升时,赤铁矿沉淀则不可避免,由于浸出液pH在1.31~1.49,赤铁矿 $RCI_{\text{pH}} = -3.47 \sim -3.27$, $RCI_{\text{Fe}} = 0.96 \sim 1.37$,巴彦乌拉铀矿酸法地浸开采过程中,同样易产生赤铁矿沉淀。

4 结论

1)根据浸出液化学成分,通过模拟计算得到了地浸条件下石膏、针铁矿与赤铁矿的饱和指数,分别为0.06~0.20、0.01~0.83、0.94~2.58,具备产生沉淀的条件。

2)石膏的 Ca^{2+} 边界条件浓度为242.60~306.08 mg/L,浸出液中为631.47~705.76 mg/L, RCI_{Ca} 为0.34~0.42; SO_4^{2-} 边界条件浓度为1 012.80~1 143.36 mg/L,浸出液中 SO_4^{2-} 浓度为14 840~25 620 mg/L, RCI_{S} 为1.17~1.35,石膏处于沉淀状态。针铁矿、赤铁矿 $RCI_{\text{pH}}(-3.47 \sim -3.27)$ 、 $RCI_{\text{Eh}}(-599.44 \sim -474.72 \text{ mV})$ 、 $RCI_{\text{Fe}}(0.96 \sim 1.37)$,均处于沉淀状态

3)石膏、铁矿物沉淀是溶浸液与含矿层中的矿物作用后其离子活度积超过了其溶液积常数的结果。

参考文献

- [1] 蔡佳玲,冯佳慧,吴金虎,等.地浸采铀除垢解堵工艺进展[J].云南化工,2021,48(1):9-12.
CAI J L,FENG J H,WU J H,et al. Progress of in-situ leaching of uranium for descaling and plugging[J]. Yunnan Chemical Technology,2021,48(1):9-12.
- [2] ZHAO L X,DENG J X,XU Y,et al. Mineral alteration

- and pore-plugging caused by acid in situ leaching: A case study of the Wuyier uranium deposit, Xinjiang, NW China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 707. DOI:10.1007/s12517-018-4064-7.
- [3] EMERENCE H, FABRICE G, MICHEL C, et al. An integrated multiscale approach to heap leaching of uranium-ore agglomerates[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 178:274-282.
- [4] WENNRICH R, MATTUSCH J, MORGENSTERN P, et al. Multi-elemental analysis in size fractions of fine-grained solid residue of ore grinding[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2000, 77(1):63-74.
- [5] 焦学然, 孙占学, 张霞. 某高矿化度砂岩型铀矿地浸开采堵塞机理的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2013(8): 25-28.
- JIAO X R, SUN Z X, ZHANG X R. Study on blockage mechanism of in-situ leaching sandstone-type uranium minning in high-TDS groundwater area[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2013(8):25-28
- [6] 许根福. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀主要工艺参数及化学沉淀堵塞问题分析[J]. *铀矿冶*, 2014, 33(4):197-202, 222.
- XU G F. Analysis of the main technological parameters of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in situ leaching uranium and problems by chemical precipitation blocking[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2014, 33(4):197-202, 222.
- [7] 田新军, 沈红伟, 陈雪莲, 等. 用二氧化碳减缓碱法地浸采铀中的化学沉淀堵塞[J]. *铀矿冶*, 2006, 25(1): 15-20.
- TIAN X J, SHEN H W, CHEN X L, et al. Using CO_2 for reducing chemical precipitation jamming in alkaline in-situ leaching of uranium[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2006, 25(1):15-20.
- [8] 吉宏斌, 周义朋, 孙占学, 等. 蒙其古尔铀矿床 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸浸出过程分析与探讨[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2018(3):55-59.
- JI H B, ZHOU Y P, SUN Z X, et al. Analysis of and discussion on $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of uranium process at Mengqiguer deposit[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2018(3):55-59.
- [9] 袁若思, 刘金辉, 李于冰. 十红滩矿床含矿含水层地下水水质对于地浸采铀的影响[J]. *科技资讯*, 2010(18):36.
- YUAN R S, LIU J H, LI Y B. Effect of groundwater quality of ore-bearing aquifer on in-situ leaching of uranium in Shihongtan deposit [J]. *Science & Technology Information*, 2010(18):36.
- [10] 陈振, 徐显义, 王学民. 基于某铀矿的地浸采铀方法[J]. *世界核地质科学*, 2011, 28(4):237-239.
- CHEN Z, XU X Y, WANG X M. The method for the in-situ leaching of a uranium mining[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2011, 28(4):237-239.
- [11] 郑和秋野, 邢拥国, 刘金辉, 等. 内蒙某铀矿床地浸水文地质特征[J]. *江西化工*, 2017(2):69-72.
- ZHENG H Q Y, XING Y G, LIU J H, et al. Hydrogeology characteristics of in-situ leaching in Bayanwula uranium deposit [J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2017(2):69-72.
- [12] 蒋小辉, 邢拥国, 丁武. 砂岩铀矿开发新展望[J]. *中国核工业*, 2017(11):38-39.
- JIANG X H, XING Y G, DING W. New prospect of development of sandstone uranium deposit[J]. *China Nuclear Industry*, 2017(11):38-39.
- [13] 杜自耕, 邢拥国, 刘金辉, 等. 某铀矿床矿石酸、碱柱浸试验研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(1):38-41.
- DU Z G, XING Y G, LIU J H, et al. The study on acid and alkaline column leaching uranium tests for a uranium deposit[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(1):38-41.
- [14] 邢晓东, 邢拥国, 刘金辉, 等. 某砂岩型铀矿床矿石酸法柱浸试验研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(01):23-28.
- XING X D, XING Y G, LIU J H, et al. Research on acid leaching uranium experiments of a sandstone type uranium ore [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(1):23-28.
- [15] 黄镔俯. 内蒙古苏尼特左旗巴润地区铀成矿特征及找矿方向[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
- HUANG Q F. Uranium metallogenic characteristics and prospecting direction in Barun area, Sunite Left Banner, Inner Mongolia[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- [16] 邢拥国, 刘金辉, 唐华章, 等. 巴彦乌拉矿床铀矿体分布与铀矿物赋存特征[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(1):1-6.
- XING Y G, LIU J H, TANG H Z, et al. Characteristic of uranium body distribution and uranium mineral storage in Bayanwula uranium deposit[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 40(1):1-6.
- [17] 陈万利. 巴彦乌拉铀矿地浸过程中含矿层化学堵塞机理研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- CHEN W L. Study on chemical plugging mechanism of ore-bearing strata during in-situ leaching of Bayanwula uranium mine[D]. Nanchang: East China Institute of

- Technology, 2017.
- [18] 黄国龙,尹征平,凌洪飞,等. 粤北地区 302 矿床沥青铀矿的形成时代、地球化学特征及其成因研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 352-360.
- HUANG G L, YI Z P, LING H F, et al. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No. 302 uranium deposit in Northern Guangdong [J]. Mineral Deposits, 2010, 29 (2): 352-360.
- [19] 刘汉彬,夏毓亮,林锦荣,等. 砂岩型铀矿化铀系不平衡特征研究[C]//第八届全国同位素地质年代学和同位素地球化学学术讨论会论文集. 中国地质学会, 南京, 2005: 134-139.
- LIU H B, XIA L L, LIN J R, et al. The uranium isotopic disequilibrium characteristics of sandstone type uranium mineralization[C]//Papers of the 8th National Symposium on Isotope Geochronology and Isotope Geochemistry. Acta Geoscientica Sinica, Nanjing, 2005: 134-139.
- [20] 刘正义,张玉燕,李晓光. 花岗岩型铀矿床中矿前期蚀变对铀活化溶解的实验研究及其找矿意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 216-222.
- LIU Z Y, ZHANG Y Y, LI X G. Alternation Effect on the solution of uranium in granite type uranium deposit and its significance for ore exploring [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 216-222.
- [21] 聂逢君,陈安平,胡青华,等. 内蒙古二连盆地早白垩世砂岩型铀矿目的层时代探讨[J]. 地层学杂志, 2007(3): 272-279.
- NIE F J, CHEN A P, HU Q H, et al. Discussion on the age of early cretaceous sandstone type uranium deposit in Erlian basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Stratigraphy, 2007(3): 272-279.
- [22] 王贵,王强,苗爱生,等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿物特征与形成机理[J]. 矿物学报, 2017, 37(4): 461-468.
- WANG G, WANG Q, MIAO A S, et al. Characteristic of uranium minerals in Nalinggou uranium deposit of Ordos basin and their formation mechanism[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2017, 37(4): 461-468.
- [23] 杨建新,梁齐端. 内蒙古苏尼特左旗巴彦乌拉铀矿床及外围普查地质报告[R]. 内蒙古包头:核工业 208 大队, 2015.
- YANG J X, LIANG Q D. Survey geological report of Bayanwula uranium deposit and its periphery in Sunite Left Banner, Inner Mongolia[R]. Baotou: 208 Brigade of Nuclear Industry, 2015.
- [24] 胥国龙,姚益轩,闻振乾,等. 碳酸盐矿物在酸法地浸采铀过程中的行为研究[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集第 2 册(铀矿冶分卷). 北京:原子能出版社, 2017.
- XU G L, YAO Y X, WEN Z Q, et al. Study on the behavior of carbonate minerals in the process of in-situ acid leaching uranium mining [C]//China Nuclear Society. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China (Vol. 5): Proceedings of 2017 Annual Conference of China Nuclear Society Vol. 2: Uranium Mining and Metallurgy. Beijing: Atomic Energy Press, 2017.
- [25] 李学礼,孙占学,刘金辉. 水文地球化学[M]. 3 版. 北京:原子能出版社, 2010.
- LI X L, SUN Z X, LIU J H. Hydrogeochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.
- [26] 刘金辉. 地球化学模式在确定砂岩型铀矿矿化地段研究中的应用[J]. 矿物岩石, 2004(1): 65-70.
- LIU J H. Application of geochemical models in the study of determining the mineralization locations of sandstone-type uranium deposits [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004(1): 65-70.