

高庙子膨润土与北山地下水的长期作用试验

李娜娜, 刘月妙, 郭永海

核工业北京地质研究院 中核高放废物地质处置评价技术重点实验室, 北京 100029

摘要: 以内蒙古兴和县高庙子钠基膨润土和甘肃北山 BS05 号钻孔地下水为研究对象, 依托低氧手套箱, 在常温低氧条件下开展膨润土与地下水长期作用试验研究, 获得了 1 年内膨润土-北山地下水体系 pH 和 Eh 值随时间的变化特征; 得到了作用前后体系液相关键离子成分以及固相可交换阳离子、化学成分, 依托拉曼光谱仪测定了作用前后膨润土的结构。结果表明, 膨润土-北山地下水体系在本试验条件和时间范围内可以保持相对稳定的状态。

关键词: 高庙子钠基膨润土; 蒙脱石; pH; Eh; 可交换阳离子

中图分类号: P592 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2019)03-0297-07

doi: 10.7538/hhx.2019.YX.2018053

Long Term Interaction Between GMZ Bentonite and Beishan Groundwater

LI Na-na, LIU Yue-miao, GUO Yong-hai

Beijing Research Institute of Uranium Geology, China National Nuclear Corporation Key Laboratory on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China

Abstract: In this paper, interaction between GMZ Na-bentonite sampled from Xinghe county, Inner Mongolia and Beishan BS05 groundwater of Gansu Province was carried out in glove box under ambient temperature and low-oxygen whose concentration was less than 0.005% condition for about 1 year. The variation characteristics of pH and Eh of bentonite-groundwater system with time were investigated. The concentrations of key cations in liquid were obtained. Chemical composition, exchangeable cations and chemical composition of bentonite after reaction were determined. At mean time, the structure of bentonite was analysed using Raman spectrometer. The results show that bentonite-groundwater system can maintain a relatively stable state in experimental condition and time range.

Key words: GMZ Na-bentonite; montmorillonite; pH; Eh; exchangeable cations

随着我国核电事业的发展, 核电站产生的高水平放射性废物(高放废物)将会大量累积。世界

其他国家核能发展的历程均表明, 高放废物的安全处置问题是制约核能可持续发展的关键因素之

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-10-23

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(No. 8194079)

作者简介: 李娜娜(1983—), 女, 山西太原人, 博士, 高级工程师, 从事高放废物地质处置研究, E-mail: alina0351@163.com

网络出版时间: 2019-06-03; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20190602.1422.002.html>

一。高放废物的安全处置现已成为关系到国土环境、公众安全和核能可持续发展的重大问题,是一个与核安全同等重要的问题,必须对高放废物的处置问题进行研究并加以妥善解决^[1]。半个多世纪的研究表明,基于多重屏障概念的深地质处置是唯一可行的高放废物的永久处置方案^[2-3]。缓冲/回填材料是多重屏障处置系统中的重要组成部分,是填充在废物罐和地质体之间的一道人工屏障,是地质处置库安全性和稳定性的有效保障^[4]。膨润土因具有低透水性、良好的膨胀性和吸附性、热稳定性和导热性、耐辐射性和化学稳定性,已经成为许多国家高放废物深地质处置系统的工程屏障材料^[5]。

作为缓冲材料,膨润土在处置库中的缓冲作用主要有机械缓冲、水力缓冲和化学缓冲三个方面,而其机械性能和水力学性能很大程度上依赖于膨润土在处置库辐射热和地下水作用下化学性能的稳定性^[6]。此外,任何最终与处置罐/乏燃料系统接触的地下水都是经过缓冲材料膨润土层并与之发生化学反应后的地下水。因此,近场的地球化学稳定性,即膨润土的酸碱性和氧化还原缓冲性能,主要由膨润土与地下水的相互作用控制。同时,膨润土所处的近场是核素向外迁移必须穿过的工程屏障,膨润土中的关键矿物蒙脱石、Fe(II)矿物等对部分核素具有吸附或还原沉淀作用,最终使得核素被

阻滞而不能大量地随地下水向外迁移。膨润土在一定程度上可保持地下水的化学性能不发生太大的变化,同时自身性能也保持稳定。因此研究膨润土与地下水在近场环境条件下相互作用的地球化学行为是研究核素迁移的先决试验条件,也是处置库性能评价的重要输入条件,更是描述膨润土作为工程屏障材料性能所必须开展的研究工作。目前国内尚未系统地开展处置库条件下缓冲材料与地下水之间长期相互作用的地球化学特性研究,本工作拟开展高庙子钠基膨润土与甘肃北山地下水在低氧条件下长期作用1年的研究,并获得两者长期作用的地球化学特征参数,以对处置库工程屏障设计及处置库建设提供参考。

1 实验部分

1.1 研究对象

通过对我国膨润土矿床的调查和筛选,从经济和技术层面考虑,我国已明确内蒙古兴和县高庙子膨润土作为高放废物处置库首选的缓冲/回填材料^[7-9]。本工作以高庙子钠基膨润土GMZ01为研究对象,其基本性能参数列入表1—3。由表1—3可知:该膨润土样品主要矿物是蒙脱石,可交换阳离子主要为Na⁺,其交换容量占阳离子交换容量的50.9%,可确定为钠基膨润土。

表1 膨润土阳离子交换容量(CEC)和可交换性阳离子

Table 1 Cation exchange capacity(CEC) and exchangeable cations of GMZ Na-bentonite

10 ⁻² CEC/ (mmol · g ⁻¹)	10 ⁻² 可交换阳离子容量/(mmol · g ⁻¹)				碱性系数
	K ⁺	Na ⁺	$\frac{1}{2}$ Ca ²⁺	$\frac{1}{2}$ Mg ²⁺	
77.06	0.55	37.52	23.18	10.17	1.14

表2 高庙子钠基膨润土的化学成分

Table 2 Chemical composition of GMZ Na-bentonite

化学成分	w/%	化学成分	w/%
SiO ₂	65.04	K ₂ O	0.71
Al ₂ O ₃	14.15	MnO	0.02
Fe ₂ O ₃	2.63	TiO ₂	0.12
MgO	3.15	P ₂ O ₅	0.02
CaO	1.06	FeO	0.29
Na ₂ O	1.75	烧失量	11.06

表3 高庙子钠基膨润土的矿物成分

Table 3 Mineral composition of GMZ Na-bentonite

矿物成分	w/%	矿物成分	w/%
石英	11.7	蒙脱石	75.4
钾长石	4.3	高岭石	0.8
方英石	7.3	方解石	0.5

甘肃北山地区是目前我国高放废物处置库的重点预选区^[10]。选取BS05号钻孔地下水为研究对象,其化学成分列入表4。由表4可知:该地下

水主要阳离子为 Na^+ , 化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 。
 $\text{pH}=7.2$, $\text{Eh}=43 \text{ mV}$ 。

表4 甘肃北山 BS05 地下水化学成分分析
 Table 4 Chemical composition
 of Beishan BS05 groundwater in Gansu province

化学成分	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	化学成分	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
Na^+	608	Al^{3+}	0.111
K^+	3.8	F^-	1.4
Ca^{2+}	90.2	Cl^-	621
Mg^{2+}	18.5	NO_3^-	13.8
Si^{4+}	9.1	SO_4^{2-}	591
ΣFe	0.032	HCO_3^-	136
CO_3^{2-}	-		

注:1) 取样深度为 393~403 m

2) “-”表示未测出

1.2 仪器

Advanced(2440/750)型低氧手套箱,上海米开罗那机电技术有限公司;CP70ME型超速制备离心机,日本日立公司;6309POT酸度/氧化还原/温度测试系统,美国任氏公司;ZCA-1000SF原子吸收分光光度计,美国戴安公司;X'pert PRO MPD X射线衍射仪,荷兰帕纳科;DIONEX-500离子色谱仪,美国热力公司;5300DV电感耦合等离子体发射光谱仪,美国铂金埃尔默公司;LabRAM HR800拉曼光谱仪, HORIBA 科学仪器事业部。

1.3 实验方法

在低氧手套箱内开展试验,控制箱体内氧体积分数低于 0.005%,先后将 1 kg 高庙子钠基膨润土和 10 L 甘肃北山 BS05 地下水加入到 10 L 大桶内静置,不搅拌。用 6309POT 酸度/氧化还原/温度测试系统每天监测体系的 pH 和 Eh 值。每 30 天取样,利用超速制备离心机以 50 000 r/min 的转速离心分离,测定上清液主要离子成分,固相自然风干后用玛瑙研钵研磨至 74 μm ,测定矿物成分、化学成分、可交换阳离子。检测方法依据相关标准^[11-16]。

2 结果与讨论

开展了常温低氧($\varphi(\text{O}_2) < 0.005\%$)条件下高庙子钠基膨润土与北山地下水作用 1 年的实验研究,通过对体系 pH 值的长期监测,以及固液两

相化学成分的定期监测,考察了各指标随时间的变化特征。

2.1 体系 pH 随时间的变化特征

在膨润土与北山地下水的固液比(m/V)为 100 g/L 时,对于长期静置实验条件下,膨润土与北山地下水体系上清液的 pH 值随时间的变化示于图 1。由图 1 可知:第一个月缓慢上升,略有波动;pH 在 40 天左右短暂下降后逐渐上升,在 210 天时达到最高值 9.03,随后开始下降,到第 220 天达到稳定,pH 值稳定在 8.84 左右。由上可知:体系 pH 升高并维持在碱性范围,膨润土的这一 pH 缓冲性能有利于处置库的长期安全性。

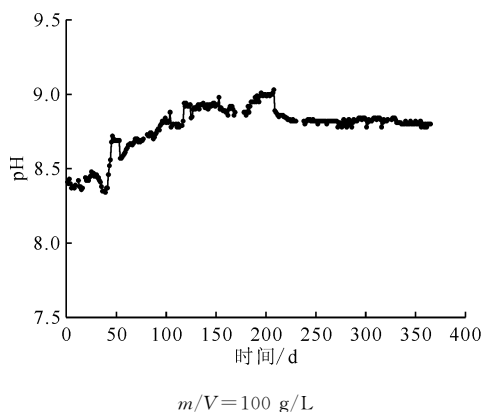
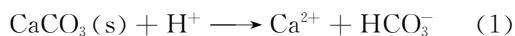


图1 膨润土与北山地下水体系 pH 值随时间的变化
 Fig.1 pH value versus time in system
 of bentonite and Beishan groundwater

pH 的升高主要有两方面原因:(1) 方解石的溶解,反应如式(1);(2) H^+ 与膨润土层间可交换阳离子 Na^+ 发生的离子交换,反应如式(2)。



此外,相关研究发现,处置库条件下膨润土对体系 pH 的缓冲作用还有其它两个方面,即硅铝酸盐边缘的表面质子化作用(反应式(3)和(4))和蒙脱石的风化作用(montmorillonite weathering reactions)^[6]。



反应(1)~(4)的速率相对较快,且为可逆反应,可以用热力学性能表述。蒙脱石的风化作用相对较慢,且是不可逆的,因此是一个动力学的缓冲性能。本研究中 pH 的升高主要是由反应(1)和(2)引起的。

2.2 体系 Eh 随时间的变化特征

长期静置条件下,膨润土与北山地下水体系上清液的 Eh 值随时间的变化示于图 2。由图 2 可知:反应一开始,体系的 Eh 值快速降低,在第 30 天出现短暂波动后,继续降低,并于第 72 天达到最低值 -110 mV,之后缓慢回升,第 150~230 天波动后,逐渐趋于稳定,并最终稳定在 -58 mV。研究表明,大部分核素在还原环境中更易被吸附,同时还原环境可以减缓废物罐的氧化腐蚀,因此,体系处于还原状态对处置库近场环境的地球化学稳定性至关重要。

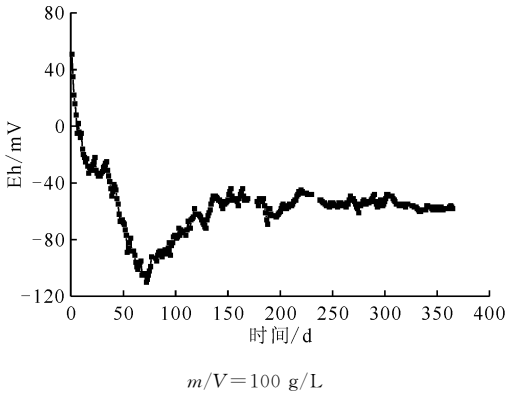
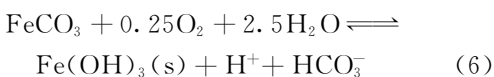


图 2 膨润土与北山地下水体系 Eh 值随时间的变化
Fig. 2 Eh value versus time in system of bentonite and Beishan groundwater

体系 Eh 的降低有以下几个因素。(1) 由于高庙子钠基膨润土 GMZ01 中并未检测到还原性矿物,故起到还原作用的是膨润土中的二价铁:一方面二价铁被氧化消耗了体系中的氧,进而降低了体系的 Eh 值;另一方面二价铁可以置换出方解石(CaCO_3)中的 Ca^{2+} ,与体系中的 O_2 发生反应,见反应(5)和(6),这个反应很容易发生,可以用热力学过程来表述。但膨润土中的 Fe^{2+} 对方解石中的 Ca^{2+} 的置换率还有待进一步研究。(2) 本研究中体系由氧化态转变成还原态,并最终维持在一定水平,低氧手套箱内不间断进行的循环除氧也起到很大的作用。体系中的 O_2 逸散到箱体,并最终与箱体内部的气体环境达到气液平衡。而手套箱利用铜触媒不断地对箱体内部的气体进行除氧(反应(7))循环,这一过程对维持膨润土-北山地下水体系的还原状态起到一定的作用。



2.3 液相化学成分随时间的变化特征

定期采取体系混合液离心分离,对液相中主要离子进行分析,结果示于图 3。由图 3 可知:与反应前北山地下水相比(表 4),反应后北山地下水中 K^+ 、 Na^+ 的质量浓度整体升高了,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的质量浓度降低,阴离子含量整体较原地下水中含量高。液相离子含量随着作用时间的增加,也呈现出一定的规律:(1) Na^+ 质量浓度随着反应的进行逐渐升高,最终上升至 830 mg/L;(2) K^+ 质量浓度前九个月先升高稳定在 8 mg/L,后逐渐降低至 5 mg/L;(3) Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度随着作用时间略有波动,但整体呈现下降趋势;(4) HCO_3^- 含量随着作用时间延长而降低,这是由于 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量的变化有一定的相关性,后期在矿物溶解-沉淀达到平衡后,体系中液相出现了 CO_3^{2-} ;(5) Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 整体呈现升高趋势。经过 1 年的相互作用,北山地下水的化学类型依旧是 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 。

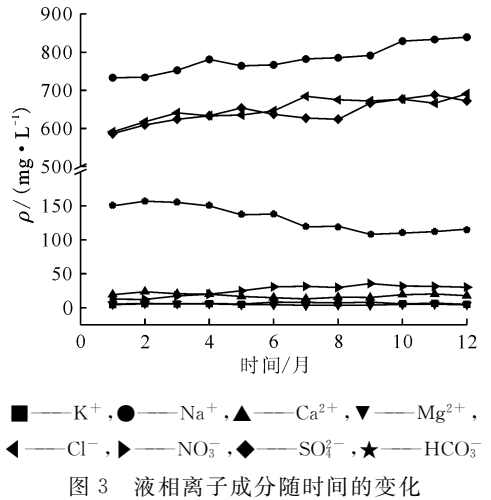


图 3 液相离子成分随时间的变化
Fig. 3 Concentration of key ions in liquid versus time

产生上述变化的原因有:(1) Na^+ 含量的增加是由于蒙脱石可交换 Na^+ 与北山地下水的 Na-Ca 交换(反应式(8))、 Na-Mg 交换(反应式(9))、 Na-K 交换(反应式(10))和 Na-H 交换(反应式(2))导致;(2) 液相中 Ca^{2+} 的变化是由方解石的溶解和 Na-Ca 交换共同作用造成,方解石溶解为体系提供更多的 Ca^{2+} ,而蒙脱石可交换 Na^+ 与北山地下水发生的 Na-Ca 交换则在消耗液相中的 Ca^{2+} ,由于液相中 Ca^{2+} 含量的降低,因而 Na-Ca 交换占据主导作用;(3) 液相中 Mg^{2+} 含量的降低

是由于蒙脱石可交换 Na^+ 与北山地下水发生的 Na-Mg 交换;(4) K^+ 含量的升高主要是由钾长石的溶解导致;(5) 阴离子含量的改变则主要由矿物溶解造成。



2.4 膨润土性能随时间的变化特征

定期采取体系混合液离心分离,固相自然风干后研磨至检测要求粒度,对膨润土性能进行分析。可交换阳离子分析测定结果示于图 4。

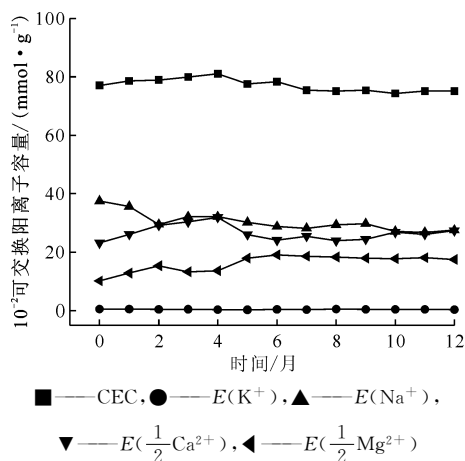


图 4 膨润土可交换阳离子随时间的变化

Fig. 4 Exchangeable cations in bentonite versus time

(1) 膨润土可交换阳离子的变化特征

由图 4 可知:与北山地下水作用后,膨润土的阳离子交换容量(CEC)呈现先缓慢升高,后略有降低并最终稳定在 75.12 mmol/100 g,与原土相比,CEC 降低了约 2 mmol/100 g;可交换 Na^+ 容量($E(\text{Na}^+)$)随着作用时间呈现下降趋势,并最终稳定在 27.58 mmol/100 g,与原土相比,降低了约 10 mmol/100 g;可交换 Ca^{2+} 容量($E(\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+})$)呈现先逐步升高后略有降低、最终趋于稳定的特征,反应结束后由原土的 23.18 mmol/100 g (表 1)上升至 27.36 mmol/100 g;可交换 Mg^{2+} 容量($E(\frac{1}{2}\text{Mg}^{2+})$)在前 5 个月升高后逐步稳定在 17.56 mmol/100 g,与原土相比,升高了约 7 mmol/100 g;可交换 K^+ 容量($E(\text{K}^+)$)与原土相比略有降低,由 0.55 mmol/100 g 降至 0.38 mmol/100 g,但随作用时间整体变化不大,基本保持稳定。

与北山地下水作用后,高庙子钠基膨润土各可交换阳离子的变化刚好验证了 2.3 节中液相离子的变化以及发生的各反应(式(8)、(9))。依据我国对膨润土属性的划分^[17],与北山地下水作用 1 年后, $E(\text{Na}^+)/\text{CEC} \times 100\% = 36\%$,低于 50%,而可交换 Ca^{2+} 与 Na^+ 均成为主要的可交换阳离子,钠基膨润土向钠-钙基膨润土转变。说明高庙子钠基膨润土与甘肃北山 BS05 号钻孔地下水作用,有向钙基膨润土转化的可能。

钠基膨润土向钙基膨润土的转化,源于两个方面:(1) 离子交换(反应(8));(2) 方解石的溶解(反应(11)),即方解石的浓度和地下水中 Ca^{2+} 的浓度直接决定了 Na-Ca 之间的交换^[18]。说明钠基膨润土有向钙基膨润土转化的可能,但这一转化过程很大程度取决于膨润土中 CaCO_3 的含量,一旦碳酸盐耗尽,这一过程将相当缓慢。



钠基膨润土向钙基膨润土转化导致膨润土膨胀性能下降,渗透性能增加^[19]。这一过程还需更长的试验时间进行验证。

(2) 膨润土化学成分的变化特征

反应后膨润土化学成分分析列入表 5。由表 5 可知:膨润土与北山地下水长期作用,膨润土的化学成分随时间的变化不大,说明膨润土的化学稳定性较好,也有可能是在实验时间(12 个月)内的变化不大,后续的变化需要进行长期实验,或者利用软件进行模拟计算。

(3) 膨润土结构的变化

为了研究高庙子钠基膨润土与甘肃北山 BS05 地下水作用 1 年后,其结构的变化情况,采用拉曼光谱仪对反应前后的膨润土进行了结构分析,结果示于图 5。由图 5 可知:与北山地下水作用前后的膨润土样品在 708 cm^{-1} 处均有强峰,属于 Al—O 的对称伸缩振动;原土样品和北山地下水反应过的样品,拉曼谱图形状基本相同,说明北山地下水并未改变蒙脱石的结构,但原土样品整体吸收强度更大,是因为反应后膨润土样品的表面耗散了散射能;在 400~800 cm^{-1} 范围内的拉曼谱是硅氧四面体间桥氧(即 Si—O—Si)的弯曲或伸缩振动的反映,表现了硅氧四面体间的连接性;原样品中还可能存在一些反应后膨润土样品中没有的峰,如 1 386 cm^{-1} 表明原样品中存在许多杂质溶于地下水。在同一拉曼位移处,

表5 膨润土化学成分随时间的变化
Table 5 Time-variation of chemical composition of bentonite

作用时间/ 月	w/%											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	烧失量
1	63.34	13.78	2.47	2.96	1.22	1.61	0.736	0.023	0.133	0.044	0.38	13.32
2	63.43	13.76	2.44	2.99	1.22	1.53	0.722	0.023	0.131	0.040	0.35	13.38
3	62.93	13.74	2.47	3.03	1.21	1.65	0.712	0.024	0.135	0.042	0.34	13.72
4	63.78	13.76	2.48	2.97	1.18	1.76	0.739	0.024	0.138	0.044	0.37	12.79
5	63.52	13.73	2.47	2.91	1.16	1.78	0.798	0.022	0.145	0.041	0.59	12.89
6	63.65	13.70	2.48	2.87	1.16	1.75	0.814	0.022	0.144	0.047	0.54	12.96
7	63.83	13.82	2.48	2.86	1.15	1.78	0.825	0.024	0.144	0.044	0.57	12.49
8	63.48	13.77	2.48	2.88	1.13	1.77	0.829	0.023	0.149	0.042	0.38	13.17
9	63.06	13.79	2.53	2.86	1.08	1.73	0.873	0.032	0.116	0.042	0.43	13.63
10	64.24	13.79	2.48	2.85	1.12	1.76	0.885	0.023	0.147	0.046	0.51	12.28
11	64.33	13.71	2.44	2.83	1.17	1.74	0.846	0.025	0.145	0.046	0.53	12.34
12	64.28	13.72	2.44	2.85	1.16	1.78	0.855	0.024	0.148	0.046	0.52	12.32

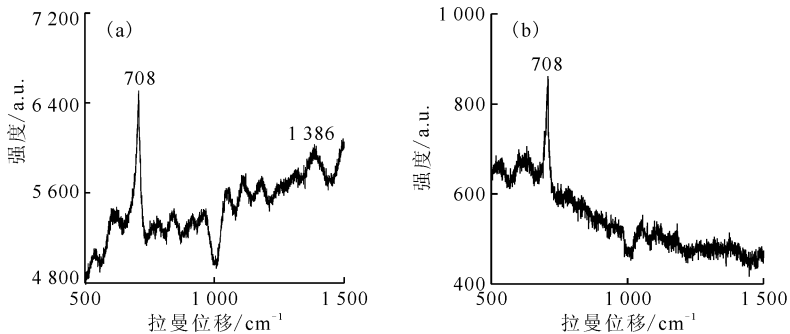


图5 与北山地下水作用前(a)后(b)钠基膨润土的拉曼光谱

Fig. 5 Raman spectra comparison of bentonite before(a) and after(b) reacting with Beishan groundwater

原样品的拉曼强度比北山地下水浸泡的高很多,是因为浸泡后膨润土中的蒙脱石浓度与原样品相比有一定的降低。

3 结论

通过常温低氧条件下开展高庙子钠基膨润土 GMZ01-甘肃北山 BS05 地下水长期作用试验研究,获得了膨润土与北山地下水不同条件下相互作用化学缓冲性能特征参数随时间的变化趋势,解释了变化原因,分析了相关反应过程,为近场地球化学环境及膨润土化学性能评价提供了基础数据和参考依据。得出以下结论:

(1) 膨润土-北山地下水体系的 pH 值最终稳定在 8.8 左右, Eh 值最终稳定在 -58 mV 左右,

这对处置库的长期稳定性和安全性有利;

(2) 在离子交换和矿物溶解的协同作用下,反应后地下水中 Na⁺ 和 K⁺ 含量升高, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量降低,但其水化学类型依旧为 Cl·SO₄-Na;

(3) 高庙子钠基膨润土在甘肃北山地下水中主要发生 Na-Ca 交换和 Na-Mg 交换,钠基膨润土转化为钠-钙基膨润土,但随着碳酸盐的耗尽,钠基膨润土向钙基膨润土转化将变得极为缓慢;

(4) 高庙子钠基膨润土-北山 BS05 地下水体系在试验条件和时间范围内可以保持相对稳定的状态,膨润土中的关键矿物——蒙脱石虽含量有所降低,但结构未发生改变,基本可以在北山地下水中保持稳定。

参考文献:

- [1] 潘自强,钱七虎.高放废物地质处置战略研究[M].北京:原子能出版社,2009.
- [2] Pusch R. Geological storage of highly radioactive waste[M]. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [3] 王驹.高放废物深地质处置:回顾与展望[J].铀矿地质,2009,25(2):71-77.
- [4] 王驹,陈伟明,苏锐,等.高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(4):801-812.
- [5] 刘月妙.高放废物处置库工程屏障用粘土材料研究综述[J].世界核地质科学,1999(3):247-252.
- [6] Bruno J, Arcos D, Duro L. Processes and features affecting the near field hydrochemistry (groundwater-bentonite interaction): TR-99-29[R]. Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), 1999.
- [7] 刘月妙,王驹,曹胜飞,等.中国高放废物处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究[J].岩土力学,2013,34(10):2756-2762.
- [8] 刘月妙,陈璋如.内蒙古高庙子膨润土作为高放废物处置库回填材料的可行性[J].矿物学报,2001,21(3):541-543.
- [9] 刘月妙,温志坚.用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究[J].矿物岩石,2003,23(4):42-45.
- [10] 郭永海,王驹.高放废物地质处置中的地质、水文地质、地球化学关键科学问题[J].岩石力学与工程学报,2007(S2):3926-3931.
- [11] 唐秀珍,鄢龙喜. DZ/T0064. 28-93 地下水水质检验方法:离子色谱法测定钾、钠、锂、氨[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [12] 鄢龙喜,唐秀珍. DZ/T0064. 51-93 地下水水质检验方法:离子色谱法测定氯离子、氟离子、溴离子、硝酸根和硫酸根[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [13] 史继东. DZ/T0064. 49-93 地下水水质检验方法:滴定法测定碳酸根、重碳酸根和氢氧根[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [14] 王春伟,林鸿福,李树君,等. GB/T 20973-2007 膨润土[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [15] 李亚,邢云秋,王苏明. GB/T 14506. 14-2010 硅酸盐岩石化学分析方法:第14部分:氧化亚铁量测定[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [16] 王苏明,颜茂宏. GB/T 14506. 28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法:第28部分:16个主次成分量测定[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [17] 李俊,叶志远,熊军,等. DZ/T 0206-2002 高岭土、膨润土、耐火粘土矿产地地质勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [18] Hans W, Paul W, Nicolas S. Thermodynamic modelling of bentonite-groundwater interaction and implications for near field chemistry in a repository for spent fuel: TR-92-37[R]. Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), 1992.
- [19] Pusch R, Kasbohm J, Thao H T M. Chemical stability of montmorillonite buffer clay under repository-like conditions: a synthesis of relevant experimental data[J]. Appl Clay Sci, 2010, 47(1): 113-119.