

矿物材料对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的竞争吸附性能与表征

王金明¹, 易发成²

(1. 安徽理工大学 化工学院, 安徽 淮南 232001; 2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘要:采用间歇法研究了相同摩尔浓度 Sr^{2+} 、 Cs^+ 溶液中, 矿物材料对核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的竞争吸附性能, 用 XRD 对吸附 Cs^+ 、 Sr^{2+} 后的矿物材料进行了表征和分析。实验表明: NF、ZF、CA 对 Cs^+ 、 Sr^{2+} 的平衡吸附时间分别约为 7、3 和 14 d。ZF 对 Cs^+ 、 Sr^{2+} 的平衡吸附量最大, 其次是 NF, 最后是 CA。NF 对 Cs^+ 的吸附具有明显的选择性, CA 的选择性较差, ZF 最差。ZF 对 Sr^{2+} 的去除率基本达 100%, 对 Cs^+ 的去除率达 72%; NF 对 Cs^+ 的去除率达 66%, 而对 Sr^{2+} 的去除率仅为 15%; CA 对 Sr^{2+} 的去除率达 29%, 而对 Cs^+ 的去除率仅为 16%。矿物材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后晶胞体积均变小, 晶胞参数 c 亦变小, 其它晶胞参数 a 、 b 、 β 变化不规则。

关键词:矿物材料; 铯; 镭; 竞争吸附性能; 表征

中图分类号: O647.3; TQ424.2; X591

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)02-0165-07

Competitive Adsorption Properties and Characterization of Mineral Materials to Sr^{2+} and Cs^+

WANG Jin-ming¹, YI Fa-cheng²

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The competitive adsorption properties of mineral materials were studied by employing the discontinuous process in the same molar concentration Sr^{2+} and Cs^+ solutions, and then mineral materials adsorbing Sr^{2+} and Cs^+ were characterized and analyzed by using XRD. The experiment results demonstrate that the equilibrium adsorption time of NF, ZF and CA to Sr^{2+} and Cs^+ is about 7 d, 3 d and 14 d, respectively. The adsorptive quantity of ZF to Sr^{2+} and Cs^+ is the greatest, that of NF the second, and that of CA the third. The adsorption of NF to Cs^+ is the most obviously selective, the selectiveness of CA is comparatively worse, and that of ZF is the worst. The removal efficiency of Sr^{2+} by ZF is about 100%, the removal efficiency of Cs^+ by ZF reaches 72%; the removal efficiency of Cs^+ by NF is 66%, but that of Sr^{2+} by NF is only 15%; the removal efficiency of CA to Sr^{2+} comes to 29%, while that of Cs^+ is only 16%. The crystal unit cell volumes of the mineral materials as well as their crystal unit

cell parameters c become smaller after adsorbing Sr^{2+} and Cs^+ , but other crystal unit cell parameters a , b , and β change irregularly.

Key words: mineral materials; Sr^{2+} ; Cs^+ ; competitive adsorption property; characterization

随着核技术的广泛应用,必然会有大量放射性废物产生,如果不对其进行有效处理,势必会对其周围环境造成一定影响,最终影响到人们的身体健康。放射性废物处置最终是要将其安全处置于地质岩石层中,而这些废物释放和输送到人类环境中,最重要的途径是由于地下水的侵入,导致核素随地下水而迁移。所以必须设置各种屏障,以阻止地下水与核废物接触,在隔离失效后也能有效阻滞放射性核素迁移。有用天然矿物及其加工提炼的物质材料(如膨润土、蒙脱石、伊利石、蛭石等),也有用人工合成的钠云母、层状锰的氧化物材料等来进行吸附研究^[1-8]。但一种材料同时对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的竞争吸附情况研究不多。本文采用间歇法研究合成沸石、凹凸棒石等对模拟核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 在同一浓度溶液中的竞争吸附行为,旨为评价中低放废物安全处置提供依据。

1 实验

1.1 试剂与设备

氯化铯($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、氯化铯、硝酸钾、硝酸镧($\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)均为分析纯试剂。

设备为 80-2 型离心沉淀机(0~4 000 r/min),KS 康氏振荡器,FA1604 电子天平(精度为 0.000 1 g),AA-7003 型全自动火焰-石墨炉原子吸收分光光谱仪,D/max-A 型射线粉晶衍射仪。

1.2 矿物材料的处理

1) 合成沸石的制备

将去晶化的高岭石和一定浓度的 NaOH 溶液按一定比例混合,然后放入 1 000 mL 锥形瓶中,在恒温水浴振荡器中加热振荡反应,在 55 °C 下恒温振荡数小时,然后升温至 85 °C 并保温若干小时,然后冷却,冷却后反复过滤、洗涤至溶液 pH 约为 8 为止。最后将滤渣在 105 °C 下用烘箱烘干,冷却后研磨至颗粒度为 200 目。将合成沸石的 XRD 图与标准图谱库中的 4A 沸石的 XRD 图相比后,确认合成沸石为 4A 沸石,本文把 4A 沸石简称为 ZF。ZF 的结构分析如图 1a 所示。

2) 天然沸石处理

精选天然沸石,然后经粉碎、洗涤、烘干,研磨成 200 目,以备实验使用。本文把处理过的沸石简称为 NF。NF 结构分析如图 1b 所示。

3) 凹凸棒石改性

将一定纯度的凹凸棒石按一定比例溶于一定浓度的改性剂溶液中,先在常温下反应若干小时,然后在 85 °C 恒温水浴中振荡反应,由 85 °C 开始升温,在 1 h 左右到达 90 °C 并保温若干小时。然后冷却,冷却后反复过滤、洗涤至溶液 pH 为 8 左右为止。最后将滤渣在 105 °C 下用烘箱烘干,冷却后研磨至颗粒度为 200 目。本文把改性凹凸棒石简称为 CA。原样凹凸棒石(NA)与 CA 的结构分析如图 2 所示。

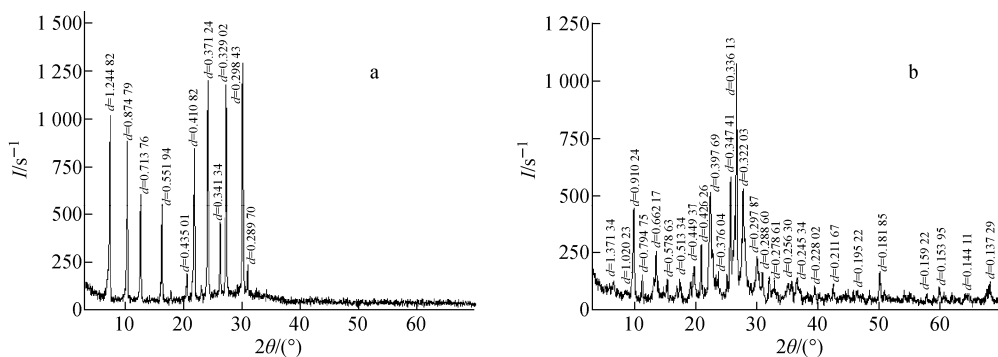


图 1 合成的 4A 沸石(a)及处理过的沸石(b)的 XRD 图

Fig. 1 X-ray diffraction charts of synthetic 4A zeolite (a) and treated zeolite (b)

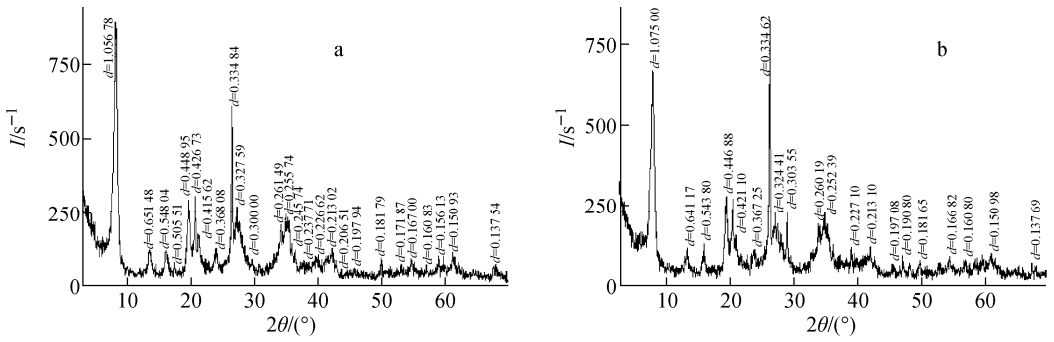


图 2 天然凹凸棒石(a)和改性后凹凸棒石(b)的 XRD 图

Fig. 2 X-ray diffraction charts of natural (a) and changed (b) palygorskite

1.3 模拟核素 Sr²⁺、Cs⁺ 混合溶液的配制

用电子天平准确称量氯化铯 0.664 6 g, 氯化钡 0.402 9 g, 将其放在同一烧杯中, 用去离子水溶解, 然后将溶液注入 1 000 mL 干净容量瓶中; 烧杯、玻璃棒反复用去离子洗涤 5 次, 洗涤液也注入容量瓶中。然后用去离子水精确定位后上下倒置反复振荡 3~5 次, 放置待用, 即得 2.5 mmol/L Sr²⁺、Cs⁺ 的混合溶液。

1.4 实验方法

在 7 个 100 mL 锥形瓶中, 分别称取 0.100 g NF, 然后用 50 mL 移液管, 准确量取 2.5 mmol/L Sr²⁺、Cs⁺ 溶液, 将其放在振荡器中以每分钟 75 次的频率进行振荡, 每天早晚各振荡 1 次, 每次振荡时间为 30 min。在 2、5、8、11、14、17、20 d 中, 各取出 1 个锥形瓶, 统一取 10 mL 溶液在离心机离心分离, 然后用原子吸收光谱仪进行浓度测量。用同样方法对 ZF、CA 进行上述实验。实验参数计算详见文献[9]。

2 结果与讨论

实验条件: 介质为去离子水, 温度为室温, 固液比为 1 : 500。

2.1 ZF 对核素 Sr²⁺、Cs⁺ 竞争吸附分析

ZF 对 Sr²⁺ 的吸附平衡时间约为 3 d, 而对 Cs⁺ 的吸附平衡时间约为 11 d(图 3a)。若粗略估计 ZF 对核素 Sr²⁺、Cs⁺ 的平衡吸附时间也可认为是 3 d。ZF 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附量均较大, 对 Sr²⁺ 的吸附量略小于对 Cs⁺ 的。在第 1 d 吸附中, ZF 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附速率较大, 其对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附量接近其平衡吸附量, 在以后的吸附中, ZF 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附量随吸附时间的变化很小, 由此可得出, ZF 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附可能是化学吸附为主。

在第 1 d 吸附中, ZF 对 Sr²⁺ 的吸附率达 93%, 而对 Cs⁺ 的吸附率则达 72%; 在第 3 d 吸附中, ZF 对 Sr²⁺ 的吸附率达 99.98%, 而对 Cs⁺ 的吸附率则达 72.8%; 以后随着吸附时间的推移, 吸附率发生微小变化, 逐渐接近其平衡吸附率。从吸附率随吸附时间的变化情况看, 也可得出 ZF 对模拟核素 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附主要是化学吸附(图 3b)。

ZF 在同条件下的竞争吸附与非竞争吸附实验的数据列于表 1。分析表 1 可知, 在竞争吸附 Sr²⁺、Cs⁺ 达到平衡时, Sr²⁺、Cs⁺ 的平衡

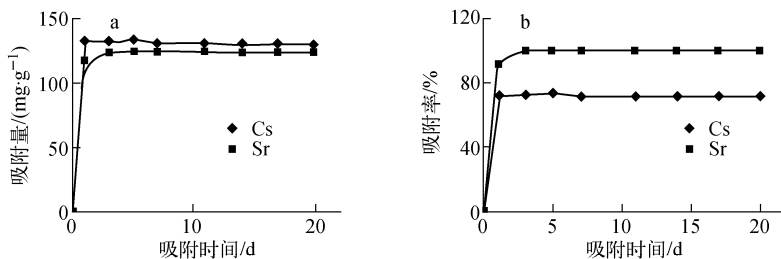


图 3 ZF 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附量(a)和吸附率(b)

Fig. 3 Adsorptive quantity (a) and adsorptive rate (b) of ZF to Sr²⁺ and Cs⁺

吸附量为 254 mg/g,平衡吸附率为 84%。在竞争吸附时,材料 ZF 吸附核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的量较单独吸附时分别多 37%和 51%。竞争吸附时,ZF 优先除去 Sr^{2+} ,而在非竞争吸附时, Cs^+ 的去除率优于对 Sr^{2+} 的去除率, Cs^+ 最先除去,ZF 在竞争或非竞争吸附中对核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附性能均较好。ZF 在竞争吸附时,对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附效能较单独吸附 Sr^{2+} 或 Cs^+ 的效能好。

表 1 ZF 在竞争与非竞争条件下对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附性能

Table 1 Adsorption capacities of ZF to Sr^{2+} and Cs^+ in competitive and non-competitive adsorption conditions

实验方案	平衡吸附量/(mg·g ⁻¹)		平衡吸附率/%	
	Sr^{2+}	Cs^+	Sr^{2+}	Cs^+
竞争吸附	124	130	100	72
非竞争吸附	186	168	58	81

2.2 NF 对核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 竞争吸附分析

由图 4a 可知:NF 对 Sr^{2+} 的吸附在第 7 d 时的吸附量已很接近其平衡吸附量,粗略估计也可认为它对 Sr^{2+} 的平衡吸附时间为 7 d。NF 对 Cs^+ 的吸附在第 3 d 时的吸附量与其平衡吸附量相差不大。因此,可粗略地认为 NF 对 Cs^+ 的平衡吸附时间为 3 d。

NF 在第 1 d 吸附中,对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附量相差较小,反映了在第 1 d 中 NF 对二者的平均吸附速率相差不大。在第 2 d 的吸附中,NF 对 Cs^+ 的吸附量在继续增大,而对 Sr^{2+} 的吸附量反而在降低。反映了 NF 对 Cs^+ 的吸附速率仍大于其对 Cs^+ 的解吸速率,而对 Sr^{2+} 的吸附速率则小于其解吸速率,所以它对 Cs^+ 的吸附量是继续增大的,对 Sr^{2+} 的吸附量是减小

的。在第 1 d 吸附时,可能是以在 NF 外表面上的吸附为主,以后的吸附是内表面吸附逐渐增大,并逐渐占主要地位。内表面的吸附与沸石的孔径大小、离子半径、离子强度等因素有关。由于 Sr^{2+} 、 Cs^+ 在 NF 吸附中总是竞争有利于使吸附体系的能量最低的位置,又由于 NF 对各自的吸附能力大小不同,主要体现在吸附速率的变化率上不同,所以会出现 NF 对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附量发生反复交替的变化。

由图 4b 可知:在第 1 d 吸附中,沸石对 Sr^{2+} 的吸附率大于其对 Cs^+ 的吸附率,在第 2 d 吸附中,NF 对 Sr^{2+} 的吸附率反而下降,下降得较快;它对 Cs^+ 的吸附率仍继续增大,且增大得较快;在第 3 d 后的吸附中,NF 对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附率变化较小,将接近其平衡吸附率。

NF 在同条件下的竞争吸附与非竞争吸附实验的数据列于表 2。通过分析表 2 可知,在竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 达到平衡时, Sr^{2+} 、 Cs^+ 的平衡吸附量为 139 mg/g,平衡吸附率为 45%。在竞争吸附时,NF 吸附核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的量较单独吸附 Sr^{2+} 时多 157%,而较单独吸附 Cs^+ 时少 14%。竞争吸附时,NF 优先除去 Cs^+ ,而在非竞争吸附时, Cs^+ 的去除率优于对 Sr^{2+} 的去除率, Cs^+ 最先除去。NF 在竞争或非竞争吸附中对 Cs^+ 的吸附性能均较好,明显优越于 Sr^{2+} ,因此 NF 在竞争或非竞争吸附中都是优先除去 Cs^+ 。NF 在竞争吸附时,材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的效能较单独吸附 Cs^+ 的效能有所降低,较单独吸附 Sr^{2+} 的效能有较大提高。

2.3 CA 对核素 Sr^{2+} 、 Cs^+ 竞争吸附分析

CA 对 Sr^{2+} 和 Cs^+ 的吸附平衡时间分别约为 14 d 和 17 d(图 5a)。但 CA 对 Sr^{2+} 和 Cs^+ 的吸附分别第 11 d 和 14 d 时,其吸附量已基

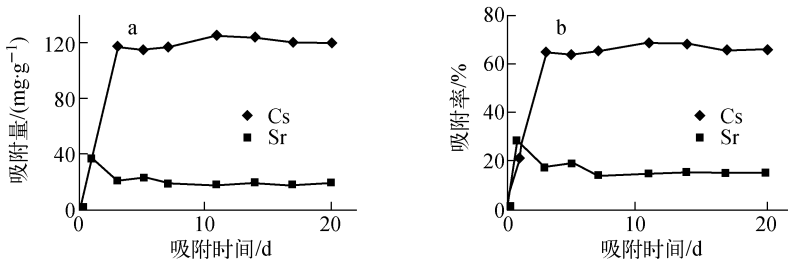


图 4 NF 对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 的吸附量(a)和吸附率(b)

Fig. 4 Adsorptive quantity (a) and adsorptive rate (b) of NF to Sr^{2+} and Cs^+

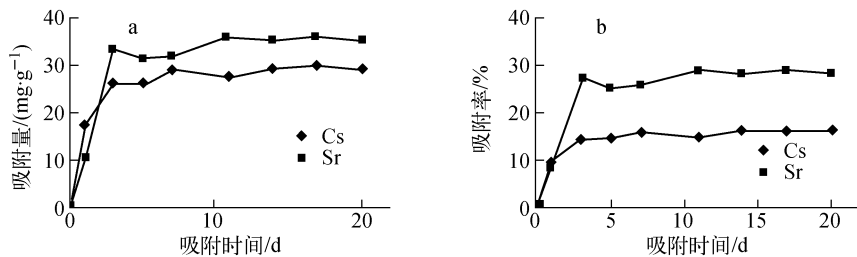


图 5 CA 对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附量(a)和吸附率(b)

Fig. 5 Adsorptive quantity (a) and adsorptive rate (b) of CA to Sr²⁺ and Cs⁺

表 2 NF 在竞争与非竞争条件下对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附性能

Table 2 Adsorption capacities of NF to Sr²⁺ and Cs⁺ in competitive and non-competitive adsorption conditions

实验方案	平衡吸附量/ (mg · g ⁻¹)		平衡 吸附率/%	
	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺
竞争吸附	19	120	15	66
非竞争吸附	54	161	26	49

本接近其平衡吸附量,且以后的变化也较小,粗略估计可认为它对 Sr²⁺ 和 Cs⁺ 的平衡吸附时间分别为 11 d 和 14 d。

CA 在第 1 d 吸附时对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附率相差较小,对 Cs⁺ 的吸附率略高于它对 Sr²⁺ 的吸附率;在第 3 d 吸附时对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附率仍在继续增加,但它对 Sr²⁺ 的吸附率高于其对 Cs⁺ 的吸附率;以后它们的吸附率随吸附时间的变化发生微小变化,直至达到它们的平衡吸附率(图 5b)。

CA 在同条件下的竞争吸附与非竞争吸附实验的数据列于表 3。通过分析表 3 可知,在竞争吸附 Sr²⁺、Cs⁺ 达到平衡时,Sr²⁺、Cs⁺ 的平衡吸附量为 66 mg/g,平衡吸附率为 22%。在竞争吸附时,CA 吸附核素 Sr²⁺、Cs⁺ 的量较单独吸附 Sr²⁺ 多 10%,较单独吸附 Cs⁺ 多 187%;CA 对 Cs⁺ 的去除率较单独吸附 Cs⁺ 的去除率有所提高,对 Sr²⁺ 的去除率与单独吸附

Sr²⁺ 的去除率相差较小。CA 在竞争或非竞争吸附中都是优先除去 Sr²⁺。CA 在竞争吸附时,材料的使用效能有所提高。

表 3 CA 在竞争与非竞争条件下对 Sr²⁺、Cs⁺ 的吸附性能

Table 3 Adsorption capacities of CA to Sr²⁺ and Cs⁺ in competitive and non-competitive adsorption conditions

实验方案	平衡吸附量/ (mg · g ⁻¹)		平衡 吸附率/%	
	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺
竞争吸附	36	30	29	16
非竞争吸附	60	23	29	10

2.4 矿物材料对核素 Sr²⁺、Cs⁺ 竞争吸附比的分析

矿物材料在不同吸附时间对 Sr²⁺、Cs⁺ 的摩尔竞争吸附比列于表 4。

由表 4 可知:ZF、NF 和 CA 在第 1 d 对 Cs⁺ 的摩尔吸附量分别是对 Sr²⁺ 摩尔吸附量的 0.751、0.706 和 1.101 倍,在第 3 d 则分别为 0.701、3.74 和 0.521 倍,Cs⁺、Sr²⁺ 的摩尔竞争吸附比分别为 0.701、3.74 和 0.521。随后 Cs⁺、Sr²⁺ 的摩尔竞争吸附比变化幅度较小,直至达到吸附平衡。当吸附平衡时,ZF、NF 和 CA 对 Cs⁺ 的摩尔吸附量约是对 Sr²⁺ 摩尔吸附量的 0.69、4.28 和 0.551 倍。

表 4 矿物材料对 Sr²⁺、Cs⁺ 的摩尔竞争吸附比

Table 4 Mol competitive adsorption ratios of mineral materials to Sr²⁺ and Cs⁺

矿物材料	不同吸附时间矿物材料对 Sr ²⁺ 、Cs ⁺ 的摩尔竞争吸附比							
	1 d	3 d	5 d	7 d	11 d	14 d	17 d	20 d
NF	0.706	3.736	3.301	4.410	4.528	4.208	4.275	4.302
ZF	0.751	0.701	0.714	0.695	0.693	0.688	0.690	0.694
CA	1.101	0.521	0.552	0.604	0.509	0.550	0.553	0.550

2.5 矿物材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后晶胞参数变化

在对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 竞争吸附中,矿物材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 前后的结构表征如图 6 所示。分析图 6 可知:ZF、NF、CA 竞争吸附前后,晶体结构的主要变化位置约在 $3^\circ\sim 40^\circ$ 。其中 ZF 晶体结构变化显著,其结构特征峰有的消失,有的减小,此外还增加了部分新峰。NF 晶体结构变化较大,其结构特征峰有的消失,有的减小。CA 晶体结构变化较小,其结构特征峰多数是减小,也有少

量特征峰消失。因此从它们的晶体结构特征的变化情况也验证了 ZF 的吸附性能最好,NF 其次,CA 的吸附性能最差。

矿物材料在不同条件下吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后的晶胞参数变化情况列于表 5。表中,部分非竞争吸附晶胞参数(ZF、NF)源于文献[9-10]。分析表 5 可知:ZF 竞争或非竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后,其晶胞参数 a 、 b 、 c 和晶胞体积相应地较 ZF 原样的小,而晶胞参数 α 、 β 、 γ 未变化。

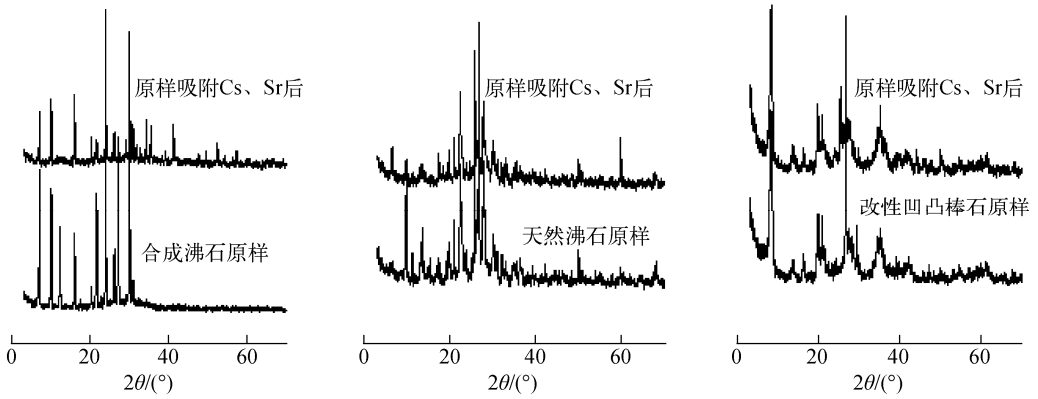


图 6 矿物材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 前后的 XRD 图

Fig. 6 X-ray diffraction charts of mineral materials before and after adsorbing Sr^{2+} and Cs^+

表 5 矿物材料吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后的晶胞参数变化

Table 5 Changes of crystal unit cell parameters of mineral materials before and after adsorbing Sr^{2+} and Cs^+

实验条件	a/nm	b/nm	c/nm	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	V/nm^3
ZF 原样	2.464 03	2.464 03	2.464 03	90.00	90.00	90.00	14.960 18
ZF 竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+	2.462 00	2.462 00	2.462 00	90.00	90.00	90.00	14.923 35
ZF 吸附 Sr^{2+}	2.460 83	2.460 83	2.460 83	90.00	90.00	90.00	14.901 93
ZF 吸附 Cs^+	2.457 22	2.457 22	2.457 22	90.00	90.00	90.00	14.836 51
NF 原样	0.745 57	1.789 36	1.588 54	90.00	91.12	90.00	2.118 85
NF 竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+	0.747 14	1.791 72	1.581 97	90.00	91.46	90.00	2.117 05
NF 吸附 Sr^{2+}	0.745 98	1.787 05	1.581 93	90.00	91.26	90.00	2.108 36
NF 吸附 Cs^+	0.743 53	1.789 74	1.585 59	90.00	91.35	90.00	2.109 38
CA 原样	0.518 14	1.805 01	1.269 67	90.00	90.91	90.00	1.187 31
CA 竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+	0.521 99	1.787 77	1.264 85	90.00	90.64	90.00	1.180 28
CA 吸附 Sr^{2+}	0.519 01	1.785 36	1.292 45	90.00	89.54	90.00	1.197 57
CA 吸附 Cs^+	0.520 21	1.789 05	1.281 31	90.00	89.68	90.00	1.192 48

NF 竞争或非竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后,其晶胞参数 β 变大, α 、 γ 未变化,晶胞体积变小。竞争吸附后,其晶胞参数 a 、 b 变大,而 c 则变小。

而非竞争吸附后,其晶胞参数 c 变小;吸附 Sr^{2+} 后,晶胞参数 a 变大,而 b 则变小;吸附 Cs^+ 后,晶胞参数 b 变大,而 a 则变小。

CA 竞争或非竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后的晶胞参数 a 变大,而晶胞参数 b 和 β 变小, α 、 γ 未变化。在竞争吸附后,其晶胞体积和晶胞参数 c 变小;而非竞争吸附后,晶胞参数 c 变大,晶胞体积变大。

3 结论

1) 在竞争吸附或非竞争吸附中,ZF 对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 都具有优良的吸附性能,NF 对 Cs^+ 具有优良的吸附性能,而对 Sr^{2+} 具有良好吸附性能,CA 对 Sr^{2+} 、 Cs^+ 也都具有较好的吸附性能。

2) 在竞争吸附中,ZF、CA 优先除去 Sr^{2+} ,而 NF 优先除去 Cs^+ ;在非竞争吸附中,ZF、NF 优先除去 Cs^+ ,而 CA 仍优先除去 Sr^{2+} 。

3) 竞争吸附平衡时,ZF 吸附 Cs^+ 、 Sr^{2+} 摩尔比为 0.69,NF 吸附 Cs^+ 、 Sr^{2+} 摩尔比为 4.28,CA 吸附 Cs^+ 、 Sr^{2+} 摩尔比为 0.55。

4) 矿物材料竞争吸附 Sr^{2+} 、 Cs^+ 后,晶胞体积均变小,晶胞参数 c 均变小;而在非竞争吸附后,ZF、NF 晶胞体积均变小,而 CA 晶胞体积变大。其他参数变化规律各不同。

5) 在竞争吸附中,ZF 的使用效能有较大提高,CA 的使用效能也有所提高,但 NF 的使用效能较单独吸附 Sr^{2+} 有所提高,较单独吸附 Cs^+ 有所降低。

参考文献:

[1] 李利华,傅依备. Sr,Cs 在回填材料中的吸附与迁移研究[J]. 原子能科学技术,1998,32(增刊): 76-82.
LI Lihua, FU Yibei. Study of adsorption and migration of Sr and Cs in backfilling materials[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(Suppl.): 76-82(in Chinese).

[2] 连会青,武强. 大亚湾废物处置场中工程地球化学屏障的研究[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(5):563-568.
LIAN Huiqing, WU Qiang. Study into engineering geochemistry barrier in Dayawan wastes disposal site[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 563-568(in

Chinese).

- [3] CHOI J, KANG C H, WHANG J. Experimental assessment of non-treated bentonite as the buffer material of a radioactive waste repository [J]. J Environ Sci Health A: Toxic/Hazard Subst Environ Eng, 2001, 36(5): 689-714.
- [4] TSAI S C, OUYANG S, HSU C N. Sorption and diffusion behavior of Cs and Sr on Jih-Hsing bentonite[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 54(2): 209-215.
- [5] DYER A, JOHN K K, CHOW U, et al. The uptake of caesium and strontium radioisotopes onto clays[J]. J Mater Chem, 2000, 10(12): 2 734-2 740.
- [6] KODAMA T, HIGUCHI T, KOMARNENI S, et al. Synthesis of Na-2-mica from metakaolin and its cation exchange properties[J]. J Mater Chem, 2001, 11(8): 2 072-2 077.
- [7] DYER A, PILLINGER M, NEWTON J, et al. Sorption characteristics of radionuclides on synthetic birnessite-type layered manganese oxides [J]. J Mater Chem, 2000, 10(8): 1 867-1 874.
- [8] 王金明,易发成. 合成沸石对模拟核素 Cs^+ 的吸附性能研究[J]. 核动力工程,2006,27(3):108-112.
WANG Jinming, YI Facheng. Study on sorption capacity of synthetic zeolite for simulated nuclide Cs^+ [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(3): 108-112(in Chinese).
- [9] 王金明,易发成. 浙江天然沸石对 Cs^+ 的吸附性能研究及其晶体结构表征 [J]. 硅酸盐通报, 2010,29(3):670-675.
WANG Jinming, YI Facheng. Study on adsorption capacity of Cs^+ on Zhejiang natural zeolite and structure characterization[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(3): 670-675 (in Chinese).
- [10] 王金明,易发成. 合成沸石对 Sr^{2+} 的吸附性能及其表征[J]. 核动力工程,2010,31(2):89-93.
WANG Jinming, YI Facheng. Study on sorption capacity and characterization of Sr^{2+} on synthetic zeolite[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(2): 89-93(in Chinese).