

# 焦磷酸和锆的化合物对铯的吸附机理探讨

宋凤丽<sup>1</sup>, 苏哲<sup>2</sup>, 李辉波<sup>2</sup>, 丛海峰<sup>2</sup>,  
吕丹<sup>1,\*</sup>, 林灿生<sup>2</sup>, 王孝荣<sup>2</sup>, 叶国安<sup>2</sup>

1. 核与辐射安全中心 核燃料与放射性废物部, 北京 100082; 2. 中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

**摘要:**在不同条件下合成了焦磷酸锆, 选择出对铯吸附性能优良的焦磷酸锆。将焦磷酸氧锆和焦磷酸锆对铯的吸附性能进行了比较, 并研究了焦磷酸氧锆对铯的吸附机理。结果表明: 焦磷酸根与钼酸根摩尔比为 8 : 1、锆足量条件下制备所得焦磷酸锆吸附率最高; 与焦磷酸锆相比, 焦磷酸氧锆对铯的吸附受酸度的影响稍小, 静态吸附容量稍大; 焦磷酸氧锆与焦磷酸锆的化学稳定性相似; 焦磷酸氧锆对铯的吸附属化学吸附, 其吸附机理为  $\text{Cs}^+$  与焦磷酸氧锆上羟基的  $\text{H}^+$  发生离子交换反应。

**关键词:**焦磷酸氧锆; 吸附; 铯

**中图分类号:** TL241.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)03-0186-07

**doi:** 10.7538/hhx.2014.36.03.0186

## Discussion on Adsorption Mechanism of Cesium by Zirconyl Pyrophosphate Compound

SONG Feng-li<sup>1</sup>, SU Zhe<sup>2</sup>, LI Hui-bo<sup>2</sup>, CONG Hai-feng<sup>2</sup>,  
LU Dan<sup>1,\*</sup>, LIN Can-sheng<sup>2</sup>, WANG Xiao-rong<sup>2</sup>, YE Guo-an<sup>2</sup>

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Department of Nuclear Fuel and Radioactive Waste Management, Beijing 100082, China; 2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(26), Beijing 102413, China

**Abstract:** In this work, zirconyl molybopyrophosphate with good cesium adsorption performance was synthesized under different experimental conditions. The adsorption properties of zirconyl molybopyrophosphate and zirconyl pyrophosphate were compared. The adsorption mechanism of cesium by zirconyl pyrophosphate was studied. With enough zirconyl and when the ratio of pyrophosphate to molybdate was 8 : 1, zirconyl molybopyrophosphate with the best adsorption property was synthesized. Compared with zirconyl molybopyrophosphate, the adsorption performance of zirconyl pyrophosphate, which has a higher static adsorption capacity, is less affected by the solution acidity. Zirconyl pyrophosphate and zirconyl molybopyrophosphate have similar chemical stabilities. The adsorption mechanism involves ion exchanges between hydrogen ions of hydroxyl radical and cesium ions and is chemical adsorption.

**Key words:** zirconyl pyrophosphate; adsorption; cesium

收稿日期: 2013-06-26; 修订日期: 2013-08-23

作者简介: 宋凤丽(1980—), 女, 河北沧州人, 博士, 高级工程师, 核燃料循环与材料专业

\* 通信联系人: 吕丹(1985—), 女, 湖北武汉人, 硕士, 工程师, 化学工程与技术专业, E-mail: lvdan03@126.com

乏燃料经过后处理回收铀和钚后会产生大量的中放废液,它的最终处置<sup>[1]</sup>已成为当前核能发展中关注的问题。<sup>137</sup>Cs 是高释热裂变产物,需要将它分离出来。从中放废液中提取铯的方法有共沉淀法、溶剂萃取法<sup>[2-4]</sup>和离子交换法。其中无机离子交换技术<sup>[5-8]</sup>由于具有选择性好、辐照稳定性好和热稳定性好等优势成为较为经济和适宜的手段之一。其中多价金属磷酸盐以对铯吸附性能良好而引人注目,尤以磷酸锆<sup>[9-10]</sup>的研究最为详尽。但其吸附容量较低,若将焦磷酸根引入,将有可能提高吸附容量。

张惠源等<sup>[11]</sup>用焦磷酸铝为基体制备的提铯离子筛,对铯的吸附性能很好,受到了广泛关注。文献<sup>[12-13]</sup>已经合成了焦磷酸和锆的化合物焦磷酸氧锆,发现焦磷酸氧锆的合成简单,对铯的吸附性能良好,有望用于从中放废液中分离提取铯。本工作拟合成焦磷酸铝锆,对焦磷酸氧锆和焦磷酸铝锆的吸附性能进行比较,并对焦磷酸氧锆吸附铯的机理进行研究,以期从理论上解释对铯选择性优良的原因。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂和仪器

硝酸铯,光谱纯,北京化学试剂公司。

GP-I 型单道  $\gamma$  能谱仪,北京核仪器厂;同轴型 HPGe  $\gamma$  谱仪,美国 ORTEC 公司;HY-4 型振荡器,江苏省常州国华电器有限公司;JI80-2B 台式离心机,上海安亭科学仪器厂;pHS-3C 酸度计,上海虹益仪器厂;ESCALAB250X 光电子能谱,美国 Thermo Analysis 公司。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 吸附剂的制备** 用  $\text{HNO}_3$  调节一定量的焦磷酸钾溶液  $\text{pH}=3$ ,用分液漏斗缓慢滴加适量的  $\text{ZrOCl}_2$ ,不断搅拌。待沉淀完全,加入  $\text{HNO}_3$  调节沉降液  $\text{pH}=1$ ,陈化 24 h。再抽滤沉淀,用水洗涤至  $\text{pH}=3$  后,于  $40^\circ\text{C}$  干燥。再将沉淀倾入  $1\text{ mol/L}$   $\text{HNO}_3$  中,并用  $\text{HNO}_3$  反复浸泡。再用水洗至流出液  $\text{pH}\approx 5$ ,在  $40^\circ\text{C}$  干燥。

**1.2.2 吸附分配系数的测定** 称取 25 mg 的焦磷酸氧锆于离心管内,加入 2 mL 含放射性 <sup>137</sup>Cs 的酸性溶液,水浴恒温振荡,达到吸附平衡后,取上层清液,用单道  $\gamma$  谱仪测定吸附前后溶液中 <sup>137</sup>Cs 的放射性比活度,用放射性比活度代表 Cs 的浓度。吸附分配系数为:

$$K_d = \frac{(c_0 - c)V}{cm}$$

其中:  $c_0$  和  $c$  分别为原始溶液和平衡溶液的铯离子浓度,  $V$  为平衡时溶液的体积,  $m$  为吸附剂的质量。

**1.2.3 静态吸附容量的测定** 称取 25 mg 吸附剂于离心管内,加入 2 mL 放射性 <sup>137</sup>Cs 为示踪剂已知浓度铯的溶液,水浴恒温振荡,达到吸附平衡后,离心分离,取上层清液,用单道  $\gamma$  谱仪测定吸附前后溶液中 <sup>137</sup>Cs 的放射性比活度,用比活度代表 <sup>137</sup>Cs 的浓度,则:

$$Q = \frac{(c_0 - c)V}{m} = \frac{c_0 V}{m} \left(1 - \frac{a}{a_0}\right)$$

其中:  $a_0$  和  $a$  分别为吸附前后溶液中 <sup>137</sup>Cs 的放射性比活度;  $Q$  为交换容量;  $V$  为平衡时溶液的体积;  $m$  为吸附剂的质量。

**1.2.4 稳定铯的标定** 铯的分析方法很多,有钼氯酸铯沉淀、四苯硼钠萃取、 $\text{K}_2\text{FeCo}(\text{CN})_6$  取代法和有机离子交换等,本工作采用钼氯酸铯沉淀法。取 5 mL  $\rho\approx 100\text{ g/L}$  的硝酸铯溶液准确稀释 5 倍待测。取 8 mL 待测含铯溶液于 10 mL 离心管内。再向离心管中加入 1 mL 乙醇,搅匀后加入 1 mL 钼氯酸溶液,搅拌沉淀 30 s,于冰浴中放置 5~10 min,离心,弃去水相。用 4 mL 无水乙醇洗沉淀 1 次,弃去乙醇(以除去沉淀母液),然后加 3 mL 重蒸馏水于沸水浴里煮 5 min(不断搅拌),冷却到室温,离心,弃去水相;再用 4 mL 无水乙醇洗沉淀 2 次和 4 mL 乙醚洗沉淀 1 次。用乙醚将沉淀转移到玻璃砂坩埚内抽滤,于恒温干燥箱内  $110^\circ\text{C}$  烘干 1 h,在干燥器内冷却 30 min,称重。 $\rho(\text{Cs}) = (18.7 \pm 0.3)\text{ g/L}$  ( $n=5$ ),相对标准偏差为 1.6%。得出所配硝酸铯溶液质量浓度为 93.5 g/L。

## 2 结果和讨论

### 2.1 焦磷酸铝锆合成条件的选择

在焦磷酸根与铝酸根的摩尔比为 2:1、4:1、6:1 时,铝不足量条件下制备出的焦磷酸铝锆编号为样品 1#、2#、3#;在焦磷酸根与铝酸根摩尔比为 2:1、4:1、6:1、8:1、10:1 时,铝足量条件下制得的焦磷酸铝锆编号为样品 4#、5#、6#、7#、8#。不同样品在 1 mol/L 硝酸介质下的吸附率和分配系数列入表 1。由表 1 可知,制得的焦磷酸铝锆在 1 mol/L 硝酸介质下对放射性

表 1 不同样品在 1 mol/L 硝酸介质下的吸附率和分配系数

Table 1 Adsorption percentage and  $K_d$  of different samples in 1 mol/L  $\text{HNO}_3$ 

样品(Samples)	$K_d/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	吸附率 (Adsorption percentage)/%	样品(Samples)	$K_d/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	吸附率 (Adsorption percentage)/%
1#	433	84.4	5#	452	85.0
2#	396	83.2	6#	428	84.3
3#	392	83.1	7#	514	86.5
4#	450	84.9	8#	320	80.0

铯的吸附率均在 80% 以上,其中焦磷酸根与钼酸根摩尔比为 8:1、钼足量条件下制备所得焦磷酸钼酸铈吸附率最高,高达 86.5%。后续对焦磷酸钼酸铈的制备均采用此条件。

## 2.2 焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯吸附性能的比较

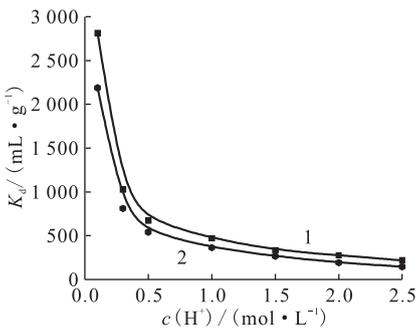
### 2.2.1 不同酸介质下吸附分配系数的变化

采用介质  $\text{HNO}_3$  浓度分别为 0.1、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mol/L,在室温下进行吸附实验。焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯的吸附分配系数随酸度的变化结果示于图 1。由图 1 可看出,焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯的吸附分配系数均随酸度的增加而降低,但焦磷酸氧铈对铯的吸附分配系数比焦磷酸钼酸铈稍大,而且对于焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈,在相同的分配系数下对应的酸度相差很大,尤其在酸度较高的范围内,如  $K_d = 250 \text{ mL/g}$  时,对应于焦磷酸钼酸铈对铯的吸附的介质酸度为 1.5 mol/L  $\text{HNO}_3$ ,而对应于焦磷酸氧铈对铯吸附

的介质酸度却达到 2 mol/L  $\text{HNO}_3$ 。实际应用中,需要吸附剂在较大酸度范围内对铯的吸附较好,可见,与焦磷酸钼酸铈相比,焦磷酸氧铈表现出一定的优越性。

### 2.2.2 静态吸附容量

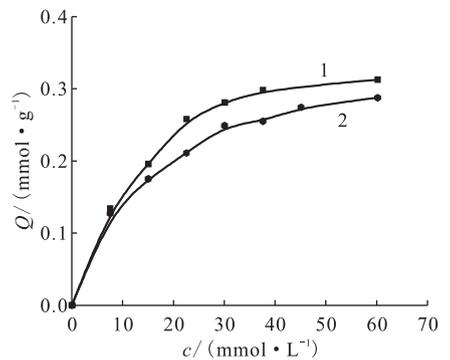
配制 1 mol/L 硝酸介质下稳定铯质量浓度分别为 1、2、3、4、5、6、8 g/L 的溶液,室温下进行吸附实验,实验结果示于图 2。由图 2 可知,通过对不同酸度下焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯离子静态吸附容量的比较,得出焦磷酸氧铈饱和离子交换容量稍高于焦磷酸钼酸铈。



1——焦磷酸氧铈(Zirconyl pyrophosphate),  
2——焦磷酸钼酸铈(Zirconyl molybopyrophosphate)

图 1 焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯的吸附分配系数随酸度的变化

Fig. 1 Effect of nitric acid concentration on adsorption distribution ratios of cesium by zirconyl pyrophosphate and zirconyl molybopyrophosphate



1——焦磷酸氧铈(Zirconyl pyrophosphate),  
2——焦磷酸钼酸铈(Zirconyl molybopyrophosphate)

图 2 焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯的静态吸附容量

Fig. 2 Static adsorption capacity of cesium by zirconyl pyrophosphate and zirconyl molybopyrophosphate

### 2.2.3 不同浓度硝酸和碱处理的焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈

为了研究焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈的化学稳定性,分别将一定量的样品放入 10 mol/L  $\text{HNO}_3$ 、5 mol/L  $\text{HNO}_3$ 、1 mol/L  $\text{NaOH}$ 、0.5 mol/L  $\text{NaOH}$  及 0.5 mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  中,在水浴条件调节温度为 90 °C,加热 2 h。研究了处理过的焦磷酸氧铈和焦磷酸钼酸铈对铯的吸附性能,结果列入

表2。由表2可知:用NaOH处理过的焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆几乎不吸附铯,而用10 mol/L HNO<sub>3</sub>处理的焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆与处理前对铯的吸附的变化可忽略不计;用5 mol/L HNO<sub>3</sub>处理的焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆对铯的吸附有所下降;焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆都溶于0.5 mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液中。初步推测焦磷酸氧

锆和焦磷酸钼酸锆表面存在—OH,—OH中的氢可以与铯离子交换,从而吸附铯,但是NaOH处理后将表面—OH中和,使它失去了离子交换能力。用硝酸处理后不会破坏表面—OH,也就不会影响其离子交换能力。焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆都溶于Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液可能是由于吸附剂结构中的锆和溶液中的碳酸根形成了络合物。

表2 焦磷酸氧锆和焦磷酸钼酸锆处理前后对铯的吸附率

Table 2 Percentage adsorption of cesium by zirconyl pyrophosphate and zirconyl molybopyrophosphate before and after handling with HNO<sub>3</sub> and NaOH

样品 (Samples)	未处理 (Before handling)	5 mol/L	10 mol/L	0.5 mol/L	1 mol/L	0.5 mol/L
		HNO <sub>3</sub> 处理 (Handling with 5 mol/L HNO <sub>3</sub> )	HNO <sub>3</sub> 处理 (Handling with 10 mol/L HNO <sub>3</sub> )	NaOH 处理 (Handling with 0.5 mol/L NaOH)	NaOH 处理 (Handling with 1 mol/L NaOH)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 处理 (Handling with 0.5 mol/L Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
焦磷酸氧锆 (Zirconyl pyrophosphate)	85%	78%	83%	3%	4%	溶解 (Dissolved)
焦磷酸钼酸锆 (Zirconyl molybopyrophosphate)	83%	77%	82%	3%	3%	溶解 (Dissolved)

## 2.3 焦磷酸氧锆对铯吸附机理探讨

### (1) 吸附等温线

关于固体吸附气体的研究比较深入,已总结出若干规律,提出了吸附模型和方程式。而对于固体和溶液间的吸附现象,由于溶剂的参加,使过程复杂化,现今尚无成熟的理论指导,因此常将气体的吸附理论借用到溶液中。这种借用是有条件和经验的,这时气体吸附方程式中的压力  $p$  常换成溶液浓度  $c$ 。本工作研究的是固-液过程,也按这个思路进行探讨。文献[14]提出了5种吸附等温线,反映了吸附剂的表面性质有所不同,孔分布性质及吸附质和吸附剂的相互作用不同。配制一系列不同初始浓度的铯溶液,通过实验来测定焦磷酸氧锆的饱和交换容量,绘制焦磷酸氧锆对铯的吸附等温线示于图3。将其与文献[14]的五种吸附等温线对照,即可知焦磷酸氧锆属于第I类型。

郎缪尔(Langmuir)吸附理论的等温方程形式如下:

$$Q = \frac{Q_m bc}{1 + bc} \quad (1)$$

其中:  $Q$ , 吸附量, mmol/g;  $c$ , 溶液中吸附质的浓度, mmol/L;  $Q_m$ 、 $b$  均为常数。此方程可写成直线方程形式:

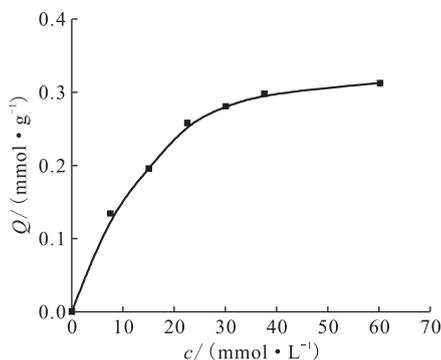


图3 焦磷酸氧锆的吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isotherm of cesium by zirconyl pyrophosphate

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_m b} \times \frac{1}{c} \quad (2)$$

图4所示为焦磷酸氧锆30℃下对铯的吸附数据的1/Q~1/c图。由图4可知,1/Q与1/c呈线性关系,说明郎缪尔(Langmuir)吸附理论能较好地解释焦磷酸氧锆从溶液中吸附铯离子的现象。

郎缪尔公式的实验拟合示于图5。由图5可知,理论值与实验值吻合很好。可见,焦磷酸氧锆对铯的吸附是符合郎缪尔吸附理论的,即为单分子层吸附。

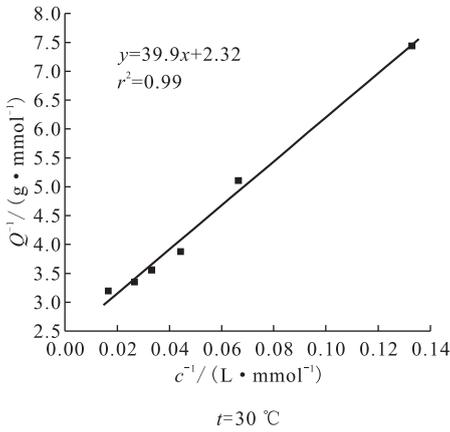
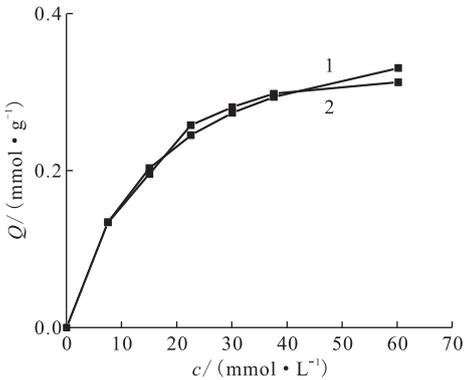


图 4 焦磷酸氧锆对铯吸附数据的  $1/Q \sim 1/c$  图  
Fig. 4 Relationship of  $1/Q$  and  $1/c$  of cesium by zirconyl pyrophosphate



1——模拟值(Simulation data), 2——实验值(Experiment data)  
图 5 郎缪尔公式的实验拟合  
Fig. 5 Simulation and experiment adsorption isotherm of cesium by zirconyl pyrophosphate

(2) 吸附热

吸附热的数值范围可以根据 Clausius-Clapeyron 方程作图来确定,其积分形式如下:

$$\ln p = -\frac{\Delta H}{RT} + C \quad (3)$$

其中:  $p$  为压力,  $\Delta H$  为汽化热,  $T$  为绝对温度,  $R$  为气体平衡常数,  $C$  为常数。上式适用于汽液平衡,对于液固平衡可以浓度  $c$  来代替压力  $p$ ,则上式可改为以下形式:

$$\ln c = -\frac{\Delta H}{RT} + C \quad (4)$$

假设铯离子在焦磷酸氧锆上的吸附为化学吸附,当  $Cs$  浓度很低时,只与焦磷酸氧锆上的一个羟基交换氢离子,则其反应为:



其中  $R$  代表焦磷酸氧锆主体。

$$K = \frac{c(R-Cs)c(H^+)}{c(R-H)c(Cs^+)} = e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (6)$$

$$K_d = \frac{c(R-Cs)}{c(Cs^+)} = K \frac{c(R-H)}{c(H^+)} = e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \frac{c(R-H)}{c(H^+)} \quad (7)$$

因为实验中  $c(R-H)$  和  $c(H^+)$  一定,所以

$$K_d = q \cdot e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (8)$$

$$\ln K_d = -\frac{\Delta G}{RT} + \ln q = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} + \ln q \quad (9)$$

$$\text{令 } \frac{\Delta S}{R} + \ln q = C' \text{ 则 } \ln K_d = \frac{-\Delta H}{RT} + C' \quad (10)$$

以  $\ln K_d$  对  $1/T$  作图可拟合出一条直线,直线斜率即为  $-\Delta H/R$ ,由斜率可计算出吸附热  $\Delta H$ 。实验中固定吸附剂量和酸度,测定不同温度时的  $K_d$  值。采用  $2 \text{ mol/L HNO}_3$  介质下的  $^{137}\text{Cs}$  溶液,分别在水浴恒温  $20, 40, 60, 70, 80 \text{ }^\circ\text{C}$  下进行吸附,以  $\ln K_d$  对  $1/T$  作图,示于图 6。由图 6 直线斜率可求得焦磷酸氧锆吸附铯离子的吸附热  $\Delta H = -33.7 \text{ kJ/mol}$ ,说明此吸附反应为放热过程,且吸附热数值在化学吸附热范围内,初步推断焦磷酸氧锆对铯的吸附是化学吸附。

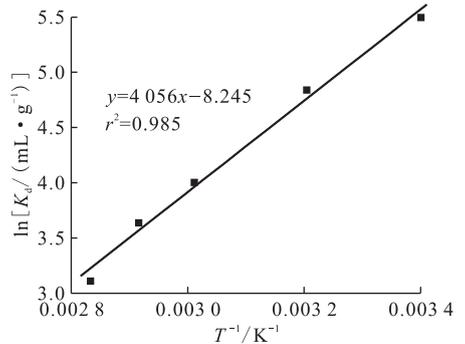


图 6 焦磷酸氧锆对铯吸附热的测定  
Fig. 6 Measurement of adsorption heat of cesium by zirconyl pyrophosphate

(3) X 光电子能谱分析

为了研究吸附铯前后焦磷酸氧锆表面的元素变化,对焦磷酸氧锆和吸附铯后的焦磷酸氧锆进行 X 光电子能谱分析,结果示于图 7。由图 7 可以看出,焦磷酸氧锆表面存在  $Zr, P, O$  元素;吸附铯后的焦磷酸氧锆表面除了存在  $Zr, P, O$  元素外,还有  $Cs$  元素。可见通过吸附实验,铯进入了焦磷酸氧锆的表面。



稳定性相似；

(3) 吸附热为  $-33.7 \text{ kJ/mol}$ , 说明吸附为放热反应, 且数值在化学吸附热范围内, 初步推断, 焦磷酸氧锆对铯的吸附是化学吸附；

(4) X 光电子能谱分析得出, 吸附铯后的焦磷酸氧锆表面引入了铯原子；

(5) 低酸介质中吸附前后溶液中的 pH 变化实验证明, 焦磷酸氧锆对铯的吸附是铯离子与羟基上的氢离子进行交换反应。

**致谢:** 本研究得到中国原子能科学研究院放射化学研究所 31 室六组同志的大力支持, 特此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Kastenberg M E, Newman C D. A cost/risk framework for evaluation of nuclear waste management strategies[J]. Nucl Tech, 1992, 97: 241-251.
- [2] Schulz W W, Bray L A. Solvent extraction recovery of byproduct  $\text{Cs}^+$  and  $\text{Sr}^{2+}$  from  $\text{HNO}_3$  solutions: a technology review and assessment [J]. Sep Sci Technol, 1987, 22(2&3): 191-214.
- [3] Vanura P, Makrlík E. Extraction of cesium by a nitrobenzene solution of sodium bis-1, 2-dicarboxylcobaltate in the presence of 15-crown-5[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1999, 241(2): 369-372.
- [4] 杨群, 韩延德, 刘大鸣. 冠醚-HSbCl<sub>6</sub> 加合物萃取模拟高放废液中  $\text{Cs}^+$  的研究[J]. 工业水处理, 1997, 17(1): 31-38.
- [5] 翁皓珉, 刘正浩, 史英. 利用无机离子交换剂从碱性澄清液中除去  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{90}\text{Sr}$  的研究[J]. 北京师范大学学报, 1985, (4): 55-58.
- [6] Lukac P, Hložek P, Foldesová M. Sorption ability of chemically treated clinoptilolites with regard to cobalt and cesium [J]. J Radioanal Nucl Chem, 1992, 164(4): 241-246.
- [7] Sylvester P, Clearfield A. The removal of strontium and cesium from simulated Hanford groundwater using inorganic ion exchange materials [J]. Solvent Extra Ion Exch, 1998, 16(6): 1527-1539.
- [8] 王秋萍, 宋崇立, 姜长印, 等. 除 Cs 用无机离子交换剂的筛选[J]. 离子交换与吸附, 2000, 16(3): 225-233.
- [9] 林灿生, 朱国辉, 平佩贞. 以  $^{137}\text{Cs}$  为监测体的放射法测定核燃料的燃耗[J]. 核化学与放射化学, 1983, 5(3): 233-242.
- [10] Bortun A I, Bortun L N, Khaikov S A, et al. Modified titanium phosphates as cesium selective ion exchange [J]. Solvent Extra Ion Exch, 1997, 15(5): 895-907.
- [11] 张惠源, 王淑兰, 王榕树, 等. 从高放废液中提取铯的新型环境材料[J]. 物理化学学报, 2000, 16(10): 952-955.
- [12] 宋凤丽, 李辉波, 苏哲, 等. 分离铯的吸附剂焦磷酸氧锆的合成与表征[J]. 核化学与放射化学, 2013, 35(6): 334-338.
- [13] 宋凤丽, 李辉波, 苏哲, 等. 焦磷酸氧锆对铯的吸附性能[J]. 核化学与放射化学, 2014, 36(1): 60-64.
- [14] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.