

从柴达木盆地油田水和盐湖卤水中 分离提取铀的可行性分析

安世武, 吴志坚

(中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: 除固体铀矿和海水之外, 油田水和盐湖卤水是十分重要的液体铀资源。分析了从柴达木盆地油田水和盐湖卤水中分离提取铀的可行性, 预测了铀在油田水和盐湖卤水中的化学形态, 提出了适宜的铀分离提取方法(吸附法), 探讨了分离提取机理、分离提取过程中可能的干扰因素及相应的排除方法, 进而对研究工作提出了一些建议。

关键词: 柴达木盆地; 油田水; 盐湖卤水; 铀; 分离提取

中图分类号: TL212.5 文献标识码: A 文章编号: 1008-858X(2007)01-0055-08

0 引言

国际能源机构预测, 到2020年世界能源需求将增长65%, 世界能源供应与需求之间存在很大缺口, 核能在弥补这一缺口中将发挥巨大作用^[1]。在全球范围内不论是短中期需求还是长期需求, 核反应堆对天然铀的需求将稳步增长, 需求强劲。与目前每年6.7万吨铀的需求相比, 到2020年每年铀的需求将远远高于10万吨^[1]。随着需求的增加, 铀的国际市场价格也已从长达20年的下跌趋势中摆脱出来, 从最低的每千克铀18.2美元迅速攀升并超过目前的75.4美元^[1]。

随着我国国民经济的迅速发展, 对能源的需求与日俱增, 我国对核能给予了越来越高的重视, 核电发展方针已经由“适度发展”调整为“积极发展”^[2]。目前我国已经建成和在建核电机组共19台, 装机容量约1600万kW, 核电发电量占我国大陆总发电量的2.3%。到2020年我国核电装机容量要达到4000万kW,

约占全国装机容量的4%^[3]。我国的铀矿储量并不丰富, 加之铀矿国际市场价格上涨, 这将使我国在铀资源获得上遇到一定的“瓶颈”。

世界上平均每年所消耗的大约 7.0×10^7 kg的 U_3O_8 基本上都是从铀矿中提取的, 而全世界适合开采的铀矿只有 3.0×10^9 kg(以 U_3O_8 计), 即使把低品位的铀矿及其副产品铀化物, 以及所有库存、废铀等也计算在内, 总量也不会超过 5.0×10^9 kg, 仅够人类使用几十年^[4]。虽然海水中含有大约 4.0×10^{12} kg的铀, 是陆地储量的1000倍, 但其在海水中的含量太低(平均浓度约3.27mg/t), 从海水中分离提取铀的成本太高^[4]。

除了铀矿和海水之外, 盐湖卤水和油田水是另一个重要的铀资源。从盐湖卤水或油田水中提取铀时, 不需要固体铀矿提取铀的复杂浸取过程, 而其中铀的含量又比海水中的铀含量高得多。例如, 经过初步分析测定, 我国柴达木盆地盐湖饱和卤水以及柴达木盆地西部南翼山油田水中铀的含量比海水中的铀含量高一千倍左右, 很有提取价值。盐湖卤水和海水具有

收稿日期: 2006-09-26; 修订日期: 2006-10-26
基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(项目编号: 0660011106)
作者简介: 安世武(1979-), 男, 助研, 主要从事材料设计及材料制备的研究。

通讯联系人: 吴志坚

很多类似性,从某种意义上说,盐湖卤水可以看成是海水的天然蒸发浓缩物。柴达木盆地地区的气候与沿海地区完全不同,差异很大。在盆地地区降水少、日照强烈,盐湖卤水和油田水可以很容易通过盐田工艺蒸发浓缩以提高铀的浓度。

目前柴达木盆地中的制盐企业所用的原料,都是经盐田日晒蒸发的浓缩卤水,产生的废液一般都直接排放到厂区附近。在原料卤水、中间过程的料液和废液中含有富集程度不同的铀,对厂区及周边环境、乃至整个盆地会产生一定的不良影响,这将影响到盐湖经济的可持续发展。

1 国内外研究现状及发展趋势

1.1 国内外研究现状

国内外报道的从油田水和盐湖卤水中提铀相关和有参考价值的研究工作主要有:①固体铀矿中提铀工艺的完善及组成特殊的铀矿中铀的提取^[5-7];②新型铀吸附剂的制备及吸附性能研究^[8-18];③从海水中提铀的方法和工艺的研究^[4, 19, 20];④核废液及核污染水体中铀的回收处理^[21-26];⑤铀的化学形态、铀与颗粒物的相互作用以及铀的迁移规律^[27-31];⑥铀分析新方法研究^[32-42]。

目前有关新型铀吸附剂的制备及吸附性能、核废液及核污染水体中铀的回收处理,及铀的分析方法的研究报道较多;而有关从固体铀矿及海水中提取铀的研究报道不多。低浓度铀和复杂体系中铀的分析方法尚没有得到很好的解决,目前研究报道,大多是有关将低浓度铀样品进行预浓集,然后借助光谱等方法进行分析。由于从固体铀矿中提铀的技术及工艺已经基本成熟,从海水中提铀成本高,因而这两方面的研究报道已经不多。铀造成的化学及放射性污染及相关的环境效应越来越受重视,与此相关的研究报道越来越多。

1.2 研究发展趋势

国内外提铀研究工作的发展趋势体现在如

下几个方面:

(1) 利用固体铀矿和海水之外的其它铀资源分离提取铀。随着高品位固体铀矿资源的逐渐枯竭,从低品位固体铀矿中提铀,或寻找固体铀矿和海水之外的其它铀资源显得尤为重要。从低品位铀矿中提铀需要复杂的浸取过程,随着矿石中铀含量的减少,分离提取铀的成本相应增加。除固体铀矿和海水之外,盐湖卤水和一些油田水是非常重要的液体铀资源,当从油田水或盐湖卤水中提铀的成本与从含铀量不高的固体铀矿中提铀的成本具有可比性时,从盐湖卤水中提铀将势在必行;

(2) 新型高效铀吸附剂的研制。从固体铀矿中提铀时,铀矿经浸取后浸取液中铀含量较高,一般用溶剂萃取法从浸取液中提铀。从海水中提铀时,海水中铀含量很低,基本不用萃取法,主要用吸附法。可以预测,如果从盐湖卤水中,或低品位铀矿的浸取液中提铀,也将主要使用吸附法。用吸附法提铀的关键是要有吸附容量高、选择性好的吸附剂,有了这样的吸附剂,才能缩短工艺流程,降低成本。积极研制新型高效铀吸附剂仍将是以后的一个工作重点;

(3) 铀分析方法的规范及铀环境效应的深入评估。我国曾经颁布实行了一些铀分析方法的国家标准和部颁标准,如《水中微量铀分析方法 GB 6768》,《食品中放射性物质检验—天然钍和铀的测定 GB 14883.7—94》,以及《岩石中微量铀钍的分析方法 EJ 349—88》(中华人民共和国核工业部部颁标准)。虽然有了这样一些标准,但低浓度铀和复杂体系中铀的分析方法尚没有得到很好的解决,我国曾于 1989 年 12 月 6 日实施了土壤中铀的测定标准方法《土壤中铀的测定三烷基氧膦萃取—固体荧光法 GB/T 11220.2—1989》,2006 年国家环境保护总局已将该标准废止。目前国内外仍有相当多的铀分析方法的研究报道,对不同的分析方法目前尚难做出全面的综合比较和评估,铀的分析方法需要逐步完善和规范。

随着环境意识的提升和环保要求的提高,对铀造成的化学及放射性污染及相关的环境效应越来越受重视,铀污染的整治越来越强化。

在这样的情况下, 铀的一些环境效应需要深入考察和评估。

2 铀在柴达木盆地油田水和盐湖卤水中可能的化学形态

明确铀在油田水和盐湖卤水中可能的化学形态, 有利于以此为根据设计合适的铀分析及分离方法。尽管在浓缩、储存、运输和样品处理的过程中, 铀化学形态的分布可能会发生变化, 但只要体系没有转换, pH 值没有发生太大的变化, 铀化学形态的分布就一般不会发生实质性的变化。

铀在天然水体中的存在形态取决于共存的配位阴离子及水体的 pH 值, 天然水体中一般都存在浓度远高于铀浓度的 CO_3^{2-} , CO_3^{2-} 与 U (VI) 形成的络合物比较稳定, 这使铀倾向于停留在水溶液中而非沉积^[21]。随溶液 pH 值的不同, 铀离子可以形成稳定的配位数不同的碳酸根络合物, 其中大部分为阴离子^[27]。将化学热力学平衡分析模式与地球化学条件相结合, 应用铀元素水文地球化学迁移形式热力学分析方法, 计算出某特定场址地下水中铀的化学形态分布为 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 占 84.1%, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)]^0$ 占 8.7%, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 占 6.5%^[28]。

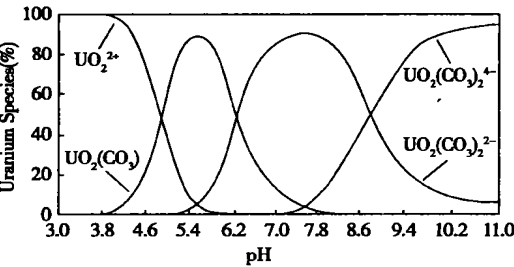


图 1 加拿大 St Lawrence 河水中 U (VI) 的化学形态分布与 pH 值的关系

Fig. 1 Distribution of U (VI) species as a function of pH in St. Lawrence River, Canada

图 1 给出了计算所得加拿大 St. Lawrence 河水 (来自安大略湖, 该湖附近有核设施) 中铀的化学形态分布与 pH 值的关系^[27], 铀总浓度为 1.0 mg/L, CO_3^{2-} 浓度为 20 mg/L, 其它离

子浓度 (mg/L) 及相关参数为 Na^+ 11.9, K^+ 1.47, Ca^{2+} 32.0, Mg^{2+} 7.92, Cl^- 22.1, SO_4^{2-} 25.9, 溶解有机碳 DOC 6.42, 总无机碳 TIC 21.2, 总碳 TC 27.6, pH=8.2, 碱度 (CaCO_3) Alk 83.3。

用强碱性阴离子交换树脂从碳酸盐溶液中回收铀的研究结果也表明, 在过量碳酸盐存在的 U (VI) 溶液中, U (VI) 的化学形态与溶液的 pH 值有关。当 $\text{pH} > 8$ 时, U (VI) 以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 离子存在, 当 pH 在 6.5~8.0 的范围内时, U (VI) 在溶液中还可能以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 或 $\text{Hn}[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{n-4}$ 形式存在^[21]。在天然水体中 U (VI) 也可能与腐殖质形成络合物, 但这样的络合物只能存在于中性或酸性溶液中^[27]。用酸法从铀矿石中浸取铀时, UO_2^{2+} 一般与相应的酸根形成配合物。

3 从油田水和盐湖卤水中分离提取铀的适宜方法——吸附法

以浓缩后的油田水或盐湖卤水中铀的含量为 10 mg/L 计, 假定分离提取铀的回收率为 100%, 可以计算出制备 1 g $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ 需要处理浓缩油田水或盐湖卤水 75 L。由于液体处理量较大, 用溶剂萃取法不太合适。用沉淀法、浮选法和生物法存在着沉淀物、表面活性剂和微生物的完全回收困难等问题^[4]; 因而吸附法更适合于从油田水或盐湖卤水中分离提取铀, 该法适合于处理大量液体物料, 容易实现连续的自动化生产。

铀的吸附剂分无机和有机两类。从盐湖卤水中提取铀时利用有机树脂吸附剂可能存在两个主要问题: ①盐湖卤水中含盐量太高, 在吸附与洗脱的过程中有机吸附剂可能会有较大的收缩和膨胀, 这可能会给柱吸附的连续自动操作带来不便^[10], 并可能会影响有机树脂吸附剂的机械性能; ②铀等放射性元素的辐射也可能影响到有机吸附剂的机械性能, 因为有机材料的抗辐射性能一般较差。由于无机吸附剂具有不收缩和抗辐射的优点^[8], 应考虑制备或选用无机吸附剂用于铀的分离提取。制备和选

用无机吸附剂时,应考虑两个主要问题:①由于料液的处理量较大,吸附剂的用量也大,在考虑吸附剂的吸附容量和选择性的同时,必须考虑吸附和解吸速度(尤其是解吸速度),否则吸附操作在动力学上会遇到很大困难,甚至使操作无法连续进行;②由于吸附剂的用量较大,制备无机吸附剂时,应选用价廉易得的或天然的材料作为吸附剂的基质材料。

4 用吸附法分离提取铀时可利用的吸附机理

对铀在盐湖卤水中的化学形态有了一定的认识后,就可以结合油田水及盐湖卤水的组成特点,对用吸附法提取分离铀可以利用的吸附机理进行预测,以指导吸附剂的选择、制备及分离提取过程。

一般情况下,吸附剂和吸附质之间可能发生的作用包括:①氢键;②静电吸引;③离子交换;④筛分效应;⑤疏水作用;⑥络合作用;⑦配体置换^[43-52]。在实际的吸附分离过程中,可依靠其中几种机制的作用来实现吸附分离。

UO_2^{2+} 自身形成氢键的能力很弱^[31],除非与其形成配合物的配体能与吸附剂形成较强的氢键,否则吸附分离铀时,氢键没有多大利用的价值。由于盐湖卤水中存在大量阳离子,有的浓度已接近饱和,所以将盐湖卤水充分酸化后,使铀以 UO_2^{2+} 的形式靠静电吸引和离子交换(离子交换的本质也是静电吸引)的机理,用阳离子交换剂来吸附分离也存在困难,因为盐湖卤水中存在的大量阳离子会参与竞争而使 UO_2^{2+} 无法被吸附。

在适当阴离子配体的存在下,如果将油田水或盐湖卤水的 pH 值调高,使铀完全转化成络阴离子,并将离子交换剂转化成相应的配位阴离子的形式,则铀络阴离子有可能靠配体置换被吸附^[23,53],配体置换是铀络阴离子中的配体与吸附在离子交换剂上的配位阴离子进行交换的过程,在这个过程中铀络阴离子被保留在离子交换剂上。

筛分效应是根据吸附质分子或离子的几何

尺寸进行选择吸附的一种机制,几何尺寸小于吸附剂孔径的吸附质分子或离子才能被吸附。铀(VI)的配位数一般大于周期表中 d 区过渡金属离子的配位数,铀配离子的几何尺寸一般大于 d 区过渡金属配离子的几何尺寸,因此依据筛分效应选择吸附铀时,将存在较大困难。

通过铀在水中的化学形态分析可知,在一定的条件下,铀可以以中性络合物的形式存在。通过调节溶液的组成和 pH 值使铀以中性配合物的形式存在于溶液中,就有可能通过疏水作用利用疏水型的吸附剂来吸附分离铀,因为中性形态物质的疏水性强于离子形态物质的疏水性,疏水机制起作用时,盐湖卤水中存在的大量阴阳离子将起到盐析剂的作用,促进铀的吸附。利用活性炭可以从 pH=3.0 的水溶液中吸附铀^[22],说明疏水作用可能确实有利于铀的吸附。

铀(VI)很容易形成络合物^[54-50],在吸附剂上引入铀(VI)的络合剂,就可以靠络合作用使铀被吸附。络合作用也是吸附金属离子时所普遍利用的机制,例如,在酸性溶液中含有磷酰基或碳酰基的吸附剂,可以靠磷酰基或碳酰基的配位氧原子的络合作用有效提取中性金属络合物^[19]。

基于以上分析,吸附铀时应主要利用的吸附机理为疏水作用、络合作用和配体置换,如果将这三种作用(或其中的两种)结合起来,将更有利于铀的吸附。

5 铀分离过程中可能的干扰因素及相应的排除方法

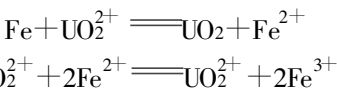
在铀分离过程中可能的干扰因素包括:①盐湖卤水中的常量阴阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-});②盐湖有机质;③铁离子及其它过渡金属离子;④颗粒物及胶体。

盐湖卤水中常量阴阳离子的干扰,可以在铀吸附的过程中靠疏水作用和络合作用得到很大程度的排除。

盐湖中有机质的含量可能不会太高,原因主要有两条:①盐湖中含盐量太高,不适合浮

游动物和浮游植物生存; ②盐湖地区紫外线比较强烈, 有机质在表面张力的作用下倾向于富集在盐湖表层^[57, 58], 富集于表层的有机质在紫外线作用下会分解。目前在盐湖地区的工厂都没有遇到有机质干扰生产的问题, 盐湖有机质对铀吸附的干扰有待通过实验进行评估。如果干扰确实严重, 可以考虑在吸附之前加入氧化剂 (如 KMnO_4 或通入 O_3) 使盐湖有机质降解。加入氧化剂也可使油田水或盐湖卤水中可能存在的其它氧化态的铀完全转化为六价的铀。

若天然水体中存在铁 (III), 铁 (III) 一般都会发生水解, 水解产物中可能会夹带铀:
$$\text{nFe}_x(\text{OH})_y^{(3x-y)} + \text{UO}_2^{2+} \rightleftharpoons \text{UO}_2[\text{Fe}_x(\text{OH})_y^{(3x-y)}]_n^{2+}$$
 pH 值越高, 夹带越严重。如果铀 (VI) 被包裹在铁 (III) 沉积物中, 则不易被 Na_2CO_3 浸出或脱附^[3]。除了发生夹带外, 铀 (VI) 也会被铁 (III) 的水解产物吸附。在水体中不存在碳酸根的情况下, 铀可以以 UO_2^{2+} 的形式被氢氧化铁吸附, 在有碳酸根存在的情况下铀以碳酸根络合物的形式被氢氧化铁吸附^[39]。在酸性溶液中, 有 Cl^- 离子存在时, 如果用阴离子交换树脂分离提取铀, 则铁可能会以 FeCl_4^- 的形式被共吸附^[23, 59]。另外, 所有的实验流程及实验装置都不应有单质铁介入, 否则会对铀的分离提取造成干扰^[3]:



从盐湖卤水中吸附分离铀的过程中, 如果铁的干扰确实存在, 可以考虑将料液酸化至 pH 值 3~3.5, 靠疏水作用和络合作用吸附铀, 把铁的干扰减小到最低程度。

盐湖卤水中的颗粒物也会造成铀的流失, 因为在天然条件下铀 (VI) 能与颗粒物形成多种形式的表面络合物^[29]。固体颗粒表面与铀 (VI) 络合的配体一般为弱酸, 将体系酸化后至少可使一部分铀游离出来。

6 对研究工作的建议

根据以上分析, 对从柴达木盆地油田水和

盐湖卤水中分离提取铀的研究工作提出如下建议:

(1) 油田水及盐湖卤水中铀分析方法的建立。目前铀的测定方法主要有紫外—可见分光光度法和荧光光度法。荧光光度法虽然灵敏度高, 检出限低, 但对杂质干扰很敏感, 不够稳定; 紫外—可见分光光度法的灵敏度虽然不够高, 但其测试较稳定。油田水和盐湖卤水经蒸发浓缩后, 其中铀的含量可考虑利用紫外—可见分光光度法测定。利用紫外—可见分光光度法测定铀含量时, 建议采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 或 HClO_4 对样品进行酸化, 酸化的同时氧化分解可能存在的有机物, 以偶氮砷 III 或 8-羟基喹啉为显色剂进行测定, 如果存在铁离子等过渡金属离子的干扰, 可以考虑用 EDTA 进行掩蔽。过渡金属离子及 Th (IV) 与 EDTA 形成的络合物比 UO_2^{2+} 与 EDTA 形成的络合物稳定得多, 而 UO_2^{2+} 与 8-羟基喹啉形成的络合物比过渡金属离子及 Th (IV) 与 8-羟基喹啉形成的络合物稳定得多^[11]。大量常量离子的干扰可以采用系统消除法, 既以组成和待测样品尽可能接近的人工卤水 (不含铀) 为溶剂加入铀标准溶液后, 在和待测样品完全相同的测定条件下测定标准曲线, 用于样品中铀含量的分析。对于个别铀含量太低的样品, 可以用吸附法进行预浓集后再测定;

(2) 柴达木盆地油田水及盐湖卤水中铀资源的调查。对柴达木盆地油田水的湖区及盐湖卤水中铀的资源分布进行调查, 得出铀资源的分布规律, 优选出铀含量高的水体作为分离提取铀的原料;

(3) 油田水及盐湖卤水浓缩蒸发过程中铀在固液两相之间的分配规律研究。将原料卤水通过实验室或现场盐田的蒸发, 研究蒸发浓缩过程中铀在固液两相之间的分配规律, 跟踪铀的浓缩和流失情况, 确定有利于提取分离铀的最佳浓缩程度;

(4) 铀吸附剂的设计制备及吸附性研究。根据油田水和盐湖卤水的组成特点, 设计制备或者选择无机吸附剂。用静态法研究吸附和脱附的动力学、热力学、机理及吸附剂的循环使用性能。根据最佳的吸附和脱附条件, 用动态

法进行柱吸附和脱附实验，得出柱操作的基本工艺参数；

(5) 铀分离提取工艺研究。进行全面系统的工艺流程实验，设想的工艺流程图如图 2 所示。

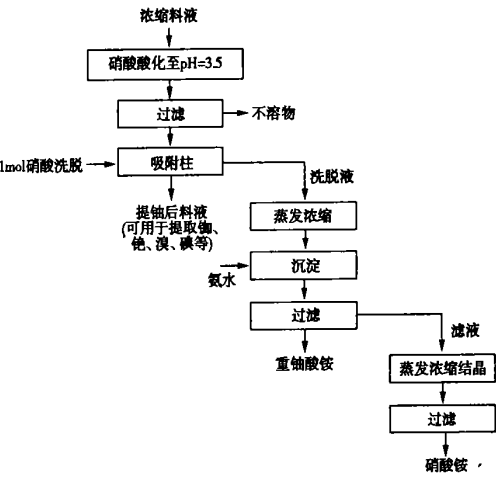


图 2 铀分离提取工艺流程图

Fig 2 process flow chart for uranium extraction

如果有机质吸附干扰使吸附剂中毒，可以间歇性地进行的解毒，解毒剂采用 80 g/L NaOH 和 80 g/L NaCl 的混合溶液，解毒周期视具体情况而定。根据洗脱液中杂质的种类和含量，确定是否用其它方法或步骤对铀溶液（洗脱液）进行提纯。在吸附分离铀的过程中铷、铯、溴、碘等不被吸附或吸附量很低，提铀后的料液可用于提取铷、铯、溴、碘等。重铀酸铵过滤后的滤液中含有浓度较高的硝酸铵，可以考虑回收。

参考文献：

[1] 张建国, 孟晋. 世界铀资源、生产、供应与需求的新动态 [J], 铀矿冶, 2006 (25): 21—28.
[2] 赵凤民. 世界铀资源现状及发展趋势 [J]. 中国核工业, 2006 (1): 45—48.
[3] Noubactep C, Schoner A, Meinrath G. Mechanism of uranium removal from the aqueous solution by elemental iron [J]. J. Hazard Mater, 2006 (B132): 202—212.
[4] 金可勇, 俞三传, 高从阶. 从海水中提取铀的发展现状 [J]. 海洋通报, 2001 (20): 78—82.
[5] 李海辉, 赵伍成, 段忠武, 等. 蓝田铀矿某矿床碱法堆浸工业性试验 [J]. 铀矿冶, 2006 (25): 9—14.
[6] 蔡萍莉, 史文革, 梁建龙, 等. 某铀矿石碱法浸出及

回收工艺试验研究 [J]. 南华大学学报 (自然科学版), 2006 (20): 50—53.
[7] 黄宗良, 世界铀提取技术的发展动向 [J]. 铀矿冶, 1996 (15): 236—243
[8] Barbette F, Rascalou F, Chollet H, et al. Extraction of uranyl ions from aqueous solutions using silica-gel-bound macrocycles for alpha contaminated waste water treatment [J]. Anal Chim Acta, 2004 (502): 179—187
[9] Jamali M R, Asadi Y, Shemirani F, et al. Synthesis of salicylaldehyde-modified mesoporous silica for separation, preconcentration and determination of uranium by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Anal Chim Acta, 2006, in press
[10] Maheswari M A, Subramanian M S. Selective enrichment of U (VI), Th (IV) and La (III) from high acidic streams using a new chelating ion-exchange polymeric matrix [J]. Talanta, 2004 (64): 202—209
[11] Singh B N, Maiti B. Separation and preconcentration of U (VI) on XAD-4 modified with 8-hydroxy quinoline [J]. Talanta, 2006 (69) 393—396.
[12] Coleman S J, Coronado P R, Maxwell R S, et al. Granulated activated carbon modified with hydrophobic silica aerogel-potential composite materials for the removal of uranium from aqueous solutions [J]. Environ Sci Te, 2003 (37): 2286—2290
[13] Jal P K, Patel S, Mishra B K. Chemical modification of silica surface by immobilization of functional groups for extractive concentration of metal ions [J]. Talanta, 2004 (62): 1005—1028
[14] Stewart D I, Csövari M, Barton C S, et al. Performance of a functionalised polymer-coated silica at treating uranium contaminated groundwater from a Hungarian mine site [J]. Environ Geol, 2006 (85): 174—183.
[15] Jain V K, Pandya R A, Pillai S G, et al. Simultaneous preconcentration of uranium (VI) and thorium (IV) from aqueous solutions using a chelating calixarene anchored chloromethylated polystyrene solid phase [J]. Talanta, 2006 (70): 257—266.
[16] Praveen R S, Metilda P, Daniel S, et al. Solid phase extractive preconcentration of uranium (VI) using quinoline-8-ol anchored chloromethylated polymeric resin beads [J]. Talanta, 2005 (67): 960—967
[17] Metilda P, Sanghamitra K, Gladis J M, et al. Amberlite XAD-4 functionalized with succinic acid for the solid phase extractive preconcentration and separation of uranium (VI) [J]. Talanta, 2005 (65): 192—200.
[18] Metilda P, Gladis J M, Rao T P. Influence of binary/ternary complex of imprint ion on the preconcentration of uranium (VI) using ion imprinted polymer materials [J]. Anal Chim Acta, 2004 (512): 63—73

- [19] Zhang A, Uchiyama G, Asakura T. pH Effect on the uranium adsorption from seawater by a macroporous fibrous polymeric material containing amidoxime chelating functional group [J] . *React Funct Po*, 2005 (63): 143—153.
- [20] 张锦瑞. 国外从海水中提取铀的现状研究方向 [J] . *铀矿冶*, 1995 (14): 49—52.
- [21] 宋胤杰, 赵爱民. 用强碱性阴离子交换树脂从碳酸盐溶液中回收铀的研究 [J] . *兰州大学学报 (自然科学版)*, 1998 (34): 52—55.
- [22] Mellah A, Chegrouche S, Barkat M. The removal of uranium (VI) from aqueous solutions onto activated carbon: Kinetic and thermodynamic investigations [J] . *J Colloid Inte*, 2006 (296): 434—441.
- [23] Gu B, Ku Y-K, Jardine P M. Sorption and binary exchange of nitrate, sulfate, and uranium on an anion-exchange resin [J] . *Environ Sci Te*, 2004 (38): 3184—3188.
- [24] Duff M C, Hunter D B, Hobbs D T, et al Mechanisms of strontium and uranium removal from high-level radioactive waste simulant solutions by the sorbent monosodium titanate [J] . *Environ Sci Te*, 2004 (38): 5201—5207.
- [25] Badavya S M, Sokkerb H H, Othmane S H, et al. Cloth filter for recovery of uranium from radioactive waste [J] . *Radiat Phys Ch*, 2005 (73): 125—130.
- [26] Ladeira A C Q, Morales C A. Uranium recovery from industrial effluent by ion exchange-column experiments [J] . *Miner En*, 2005 (18): 1337—1340.
- [27] Li W, Zhao J, Li C, et al Speciation measurements of uranium in alkaline waters using diffusive gradients in thin films technique [J] . *Anal Chim Acta*, 2006 (575): 274—280.
- [28] 张东, 李宽良, 康厚军, 等. 铀在特定场址地下水存在和迁移形态研究及其沉积热力学分析 [J] . *核化学与放射化学*, 2004 (26): 44—47.
- [29] Davis J A, Meece D E, Kohler M, et al Approaches to surface complexation modeling of uranium (VI) adsorption on aquifer sediments [J] . *Geochim Cosmoe*, 2004 (68): 3621—3641.
- [30] Wazne M, Korfiatis G P, Meng X. Carbonate effects on hexavalent uranium adsorption by iron oxyhydroxide [J] . *Environ Sci Te*, 2003 (37): 3619—3624.
- [31] Hagberg D, Karlstrom G, Roos B O, et al. The coordination of uranyl in water: A combined quantum chemical and molecular simulation study [J] . *J Am Chem Soc*, 2005 (127): 14250—14256.
- [32] Tosheva Z, Stoyanova K, Nikolchev L. Comparison of different methods for uranium determination in water [J] . *J Environ Radi*, 2004 (72): 47—55.
- [33] 吴志强. TBP-二甲苯萃取分离荧光法测定人体尿中微量铀 [J] . *理化检验—化学分册*, 2002 (38): 348—349.
- [34] 罗道成, 杨运泉. 流动注射—分光光度法测定环境水中微量铀 [J] . *化学试剂*, 2004 (26): 25—26.
- [35] 蔡金芳, 张富平, 张洁, 等. 野外快速测定砂岩铀矿样品中铀的分析方法研究 [J] . *西北铀矿地质*, 2004 (30): 112—118.
- [36] Safavi A, Bagheri M. A novel optical sensor for uranium determination [J] . *Anal Chim Acta*, 2005 (530): 55—60.
- [37] Korob R O, G. Nuno A B. A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution γ spectrometry [J] . *Appl Radiat Is*, 2006 (64): 525—531.
- [38] 俞通武, 朱永先. 用 Br-PADAP 萃取分光光度法测定水质及土壤中微量铀 [J] . *盐湖科技资料 (内部)*, 1980 (1, 2): 98—105.
- [39] Rao T P, Metilda P, Gladis J M. Preconcentration techniques for uranium (VI) and thorium (IV) prior to analytical determination—an overview [J] . *Talanta*, 2006 (68): 1047—1064.
- [40] 杨乡珍. 铀的光度分析进展 [J] , *湿法冶金*, 2002 (21): 154—159.
- [41] Khan M H, Warwick P, Evans N. Spectrophotometric determination of uranium with arsenazo-III in perchloric acid [J] . *Chemosphere*, 2006 (63): 1165—1169.
- [42] Hosseini M S, Raissi H, Yavari H R. Synergistic flotation of U (VI) -alizarin complex with some diamines followed by spectrophotometric determination of U (VI) using 4, 4' -diaminophenylmethane [J] . *Anal Chim Acta*, 2006 (559): 181—185.
- [43] Wu Z, You L, Xiang H, et al. Comparison of dye adsorption by mesoporous hybrid gels: Understanding the interactions between dyes and gel surfaces [J] . *J Colloid Inte*, in press, 2006, available online 17 August.
- [44] Wu Z, Xiang H, Kim T, et al. Surface properties of submicrometer silica spheres modified with aminopropyltriethoxysilane and phenyltriethoxysilane [J] . *J Colloid Inte*, in press, 2006, available online 1 September.
- [45] Wu Z, Jiang Y, Xiang H, et al. Understanding the mechanisms of reaction and release of acid-base indicators entrapped in hybrid gels [J] . *J Non-Cryst So*, 2006, accepted.
- [46] Wu Z, Ahn I-S, Lin Y, et al. Methyl orange adsorption by microporous and mesoporous $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ and $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ composite xerogels [J] . *Compos Interfa*, 2004 (11): 205—212.
- [47] Wu Z, Joo H, Ahn I-S, et al. Organic dye adsorption on mesoporous hybrid gels [J] . *Chem Eng J*, 2004 (102): 277—282.
- [48] Wu Z, Ahn I-S, Lee C-H, et al. Enhancing the organic dye adsorption on porous xerogels [J] . *Colloid Surfa*, 2004 (240): 157—164.
- [49] Wu Z, Lee K. Adsorption mechanisms of mesoporous adsorbents in solutions [J] . *Chem Res Chine*, 2004 (20): 185—187.

[50] Wu Z, Joo H, Lee K. Kinetics and thermodynamics of the organic dye adsorption on the mesoporous hybrid xerogel [J] . Chem Eng J, 2005 (112): 227—236

[51] Wu Z, Wu J, Xiang H, et al Organosilane-functionalized Fe₃O₄ composite particles as effective magnetic assisted adsorbents [J] . Colloid Surfac, 2006 (279): 167—174

[52] You L, Wu Z, Kim T, et al Kinetics and thermodynamics of bromophenol blue adsorption by a mesoporous hybrid gel derived from tetraethoxysilane and bis (trimethoxysilyl) hexane [J] . J Colloid Inte, 2006 (300): 526—535.

[53] Su Q, Wu Z, Gao C. Solvent-extraction of terbium (III, IV) periodate complexes with quaternary amine [J] . Solvent Extr I 1995 (13): 275—283.

[54] Szabo Z, Toraishi T, Vallet V, et al Solution coordination chemistry of actinides: Thermodynamics, structure and reaction mechanisms [J] . Coordin Chem R, 2006 (250): 784—815.

[55] Sessler J L, Melfi P J, Pantos G D. Uranium complexes of multidentate N-donor ligands [J] . Coordin Chem R, 2006 (250): 816—843.

[56] Horn J D V, Huang H. Uranium (VI) bio-coordination chemistry from biochemical, solution and protein structural data [J] . Coordin Chem R, 2006 (250): 765—775

[57] 吴志坚, 李军, 丁海兵, 等. 浮游生物对某些化学物质在海洋微表层中富集所起的作用 [J] . 海洋湖沼通报, 1997 (1): 43—49.

[58] 吴志坚, 李军, 丁海兵, 等. 海洋微表层中物质富集机理 [J] . 海洋科学, 1998 (1): 21—22.

[59] Gu B, Brown G M, Maya L, et al. Regeneration of perchlorate (ClO₄⁻) -loaded anion exchange resins by a novel tetrachlorofenate (FeCl₄⁻) displacement technique [J] . Environ Sci Te, 2001 (35): 3363—3368.

Feasibility of Uranium Extraction from Oilfield Waters and Salt Lake Brines in Qaidam Basin

AN Shi-wu, WU Zhi-jian

(Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: Besides uranium ores and seawater, oilfield waters and salt lakes brine are important uranium resources. The feasibility of uranium extraction from oilfield waters and salt lake brines in Qaidam Basin was analyzed. The chemical species of uranium in oilfield water and salt lake brines were predicted. A suitable uranium extraction method (adsorption) was proposed. Furthermore, the mechanisms and possible interferences on uranium extraction were preliminarily discussed. Finally, some suggestions on the research works of uranium extraction from oilfield waters and salt lake brines were presented.

Key words: Qaidam Basin; Oilfield water; salt lake brine; Uranium; Extraction