

用活性碳纤维从 ^{99}Mo 中提取 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$

阳国桂^{1,2}, 胡 骥^{1,2}

1. 中国原子能科学研究院 同位素研究所, 北京 102413;

2. 原子高科股份有限公司, 北京 102413

摘要: 使用色层法从有载体 ^{99}Mo 料液中提取医用同位素 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 是应对当前裂变 ^{99}Mo 供应危机的新途径。本研究采用静态吸附实验和动态吸附淋洗实验, 研究了利用活性碳纤维从 ^{99}Mo 中吸附分离其衰变子体 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 的工艺和性能。结果表明: 活性碳纤维可以在 3 mol/L NaOH 体系的钼酸钠溶液中选择性吸附高锝酸根离子, 静态吸附平衡时间约 500 s, 吸附过程符合准二级动力学模型, 饱和吸附容量为 32.47 mg/g。在动态吸附淋洗实验中, 1.0 g 装柱量的活性碳纤维色层柱的漏穿体积为 70 mL, 使用 40 mL 水即可将活性碳纤维色层柱上吸附的锝淋洗下来。本实验结果表明, 不使用有机溶剂即用活性碳纤维色层柱完成钼和锝分离, 锝的淋洗效率为 98%, 洗脱液中钼的残留为 3.5 mg/L。

关键词: 活性碳纤维; 吸附; 锝; 钼

中图分类号: TL922 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2018)02-0132-07

doi: 10.7538/hhx.2018.YX.2017009

Extraction of $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ From ^{99}Mo by Activated Carbon Fiber

YANG Guo-gui^{1,2}, HU Ji^{1,2}

1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(104), Beijing 102413, China;

2. HTA CO. LTD., Beijing 102413, China

Abstract: Using chromatography for extracting medical isotope $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ from ^{99}Mo is a potential way to deal with the current fission-based ^{99}Mo supply crisis. The process and properties of activated carbon fiber separating $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ from mother nuclide ^{99}Mo were studied by static and dynamic adsorption experiments. The results show that activated carbon fiber can selectively adsorb pertechnetate ions in 3 mol/L NaOH solution. The equilibrium time is about 500 s, and the adsorption, with 32.47 mg/g of saturated adsorption capacity, follows the pseudo 2nd order kinetic model. In the dynamic adsorption elution experiment, the breakthrough volume of 1.0 g activated carbon fiber chromatographic column is 70 mL, and pertechnetate is effectively eluted from activated carbon fiber chromatographic column in 40 mL water. The research results show that chromatographic column of activated carbon fiber can be used for separation of technetium from molybdenum without organic solvent. The yield of

收稿日期: 2017-02-17; **修订日期:** 2017-05-15

作者简介: 阳国桂(1981—), 男, 广西灵川人, 高级工程师, 从事放射性同位素技术研究, E-mail: yangguogui@163.com

* **通信联系人:** 胡 骥(1966—), 男, 安徽休宁人, 研究员, 从事放射性药物研究, E-mail: ji_hu@ciae.ac.cn

网络出版时间: 2018-03-16; **网络出版地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20180315.1723.016.html>

technetium is 98%, and residual concentration of molybdenum is 3.5 mg/L in eluates.

Key words: activated carbon fiber; adsorption; technetium; molybdenum

$^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 是核医学最常用的放射性核素。目前, $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 主要通过 $^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 氧化铝色层发生器获得。在发生器中,氧化铝色层柱吸附了无载体母体核素 ^{99}Mo ($T_{1/2}=66.7\text{ h}$),而用生理盐水可以将子体核素 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ ($T_{1/2}=6\text{ h}$)从发生器上淋洗下来,实现钼和锝的分离。但是这种发生器使用的 ^{99}Mo 基本上使用裂变 ^{99}Mo ,其制备方法是在反应堆中使用中子轰击 ^{235}U ,通过 ^{235}U 的裂变制备无载体 ^{99}Mo 。这些裂变 ^{99}Mo 主要由世界上少数几个反应堆提供^[1]。在目前裂变 ^{99}Mo 的供应过程中,存在一系列问题,因此,行业内开始积极寻找新的 ^{99}Mo 和 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 的获取方式^[2]。

其他可制备 ^{99}Mo 的方法已经被广泛研究,包括基于热中子俘获的 ^{99}Mo 制备技术,基于 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的 ^{99}Mo 制备技术,基于 $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ 反应的 ^{99}Mo 制备技术,基于 $^{100}\text{Mo}(n, nn)^{99}\text{Mo}$ 反应的 ^{99}Mo 制备技术,还有基于加速器的通过 ^{100}Mo 直接生产 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 的技术^[3]。但是这些方法有个共同点,所获得的 ^{99}Mo 含有大量 Mo 同位素载体,比活度是裂变 ^{99}Mo 的万分之一左右。而作为裂变 $^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 氧化铝色层发生器使用的氧化铝对 Mo 的吸附容量约为 20 mg/g ,氧化铝的吸附容量不足以吸附足够的非裂变 ^{99}Mo 制备 $^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 色层发生器。因此,如何从低比活度 ^{99}Mo 中分离提取 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 成为关键。

为了从低比活度 ^{99}Mo 中提取满足临床要求的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$,已经开展了大量的研究。从有载体 ^{99}Mo 中分离提取 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 的技术可以分为四代:溶剂萃取法^[4]、电化学法^[5]、升华法^[6]及色层法^[7]。色层法的关键是使用一种固相材料从含大量 ^{99}Mo 的溶液中吸附微量的 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$,而不吸附或者很少吸附 ^{99}Mo ,从而实现钼和锝的分离。这种方法具有容易实现自动化,稳定可靠的特点。文献^[8-9]报道了使用 ABEC 树脂作为固相分离材料的方法,也报道了使用 Dowex-1 $\times$ 8 和 ABEC-2000 作为固相吸附材料分离钼和锝的研究^[10]。其中,使用 Dowex-1 $\times$ 8 阴离子交换树脂作为分离钼和锝的固相材料需要使用有机溶剂或者高氯酸才能将锝从固相材料上解吸下来,这对于临床使用存在风险。而 ABEC-2000 作为钼锝固相分离材料有个显著的优势,其可以在高离子强度溶液中吸附

$^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$,而在水溶液中解吸 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 。然而,ABEC-2000 也有一些缺点,比如其耐辐照性能较差,材料结构复杂,用其制备的色层柱一致性差。

活性炭作为一种用途广泛的固相吸附材料,已经有报道^[11]其可用于分离钼和锝,以及用于从水中吸附锝^[12]。基于高铈酸根离子和高锝酸根离子化学性质的相似性,本研究工作拟选用活性炭纤维(ACF),对其吸附分离高锝酸根离子和钼酸根离子的方法和性能进行研究。

1 实验部分

1.1 仪器与材料

UV 2700 紫外可见分光光度计,日本岛津;Raytest GABI γ 计数器,德国 Straubenhardt 公司;MS 204S 电子天平,精度 0.01 mg ,梅特勒托利多公司;PHS-3E 酸度计,上海仪电(雷磁);全自动伽马计数器,PerkinElmer 公司。

灭菌注射用水,石家庄四药有限公司;高铈酸钾、氢氧化钠、氧化钼、钼酸钠、硫酸、硫酸铜、硫氰酸铵、抗坏血酸,分析纯,国药集团北京化学试剂公司;HLF-1300 活性炭纤维,南通森友炭纤维有限公司,比表面积 $(1200\pm 100)\text{ m}^2/\text{g}$;钼 $[^{99}\text{Mo}]$ 酸钠、高锝 $[^{99}\text{Tc}]$ 酸钠注射液,原子高科股份有限公司。

1.2 ACF 的预处理

为了去除活性炭纤维表面的无机盐及其他杂质的干扰,将 ACF 浸入灭菌注射用水中煮沸,每隔 1 h 换水一次,连续煮沸 3次 。最后将 ACF 在烘箱中以 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 12 h 备用^[13]。

1.3 静态吸附实验

高铈酸根离子与高锝酸根离子的化学性质非常相近,通常可使用高铈酸根离子模拟高锝酸根离子,以避免直接使用 ^{99}Tc 或 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 造成的环境污染和安全问题^[14]。

1) ACF 对高锝酸根离子和钼酸根离子的静态吸附

用 NaOH 和盐酸配制 pH 值从 $1\sim 14$ 的溶液,并用 pH 计测定其 pH 值。配制浓度为 $2, 3, 4, 5\text{ mol/L}$ 的 NaOH 溶液。用上述溶液分别配制 0.28 mmol/L 的高铈酸钾溶液,并加入少量高锝 $[^{99}\text{Tc}^{\text{m}}]$ 酸钠作为示踪剂,得到待吸附溶液。分

别取 1 mL 待吸附溶液样品测量其计数率 A_0 。取 2 mL 待吸附溶液加入到装有 30 mg ACF 的注射剂瓶中,室温下吸附 4 h 后,取 1 mL 上清液用伽马计数器测定吸附后溶液的计数率 A_1 。计算吸附率 $\eta = (A_0 - A_1)/A_0$ 。

用上述 pH 溶液和 NaOH 溶液分别配制浓度为 6 mmol/L 的钼酸钠溶液,并加入少量钼 [^{99}Mo]酸钠作为示踪剂,得到待吸附溶液。分别取 1 mL 待吸附溶液样品测量其计数率 A'_0 ,取 2 mL 待吸附溶液加入到装有 30 mg ACF 的注射剂瓶中,室温下吸附 4 h 后,取 1 mL 上清液静置 48 h 后用伽马计数器测定吸附后溶液的计数率 A'_1 (经衰变矫正)。计算吸附率 $\eta' = (A'_0 - A'_1)/A'_0$ 。

2) 吸附动力学实验

用 3 mol/L NaOH 溶液配制高铈酸钾浓度为 0.28 mmol/L 的待吸附溶液 20 mL,加入少量高铈 [$^{99}\text{Tc}^m$]酸钠作为示踪剂。称定 0.1 g ACF 投入上述溶液,每间隔一段时间抽取上清液 20 μL ,最后用全自动伽马计数器测量样品计数率。

3) 等温吸附实验

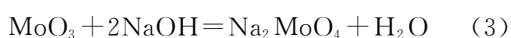
用 3 mol/L NaOH 溶液配制质量浓度为 0.3 g/L 高铈酸钾的待吸附溶液,加入少量高铈 [$^{99}\text{Tc}^m$]酸钠作为示踪剂,取 1 mL 测定待吸附溶液的计数率 A_0 。精密称定质量为 m_a 的 ACF 吸附材料投入 10 mL 待吸附溶液中,振荡吸附平衡 6 h 后,取平衡液 1 mL 测量平衡液的计数率 A_e (仪器自动进行衰变矫正)。按照上述实验方法,开展质量浓度分别为 0.5、0.8、1.0、1.2 g/L 高铈酸钾待吸附溶液中的吸附平衡实验。根据获得的溶液吸附前的计数率 A_0 和平衡后的计数率 A_e ,以及吸附质质量 m_{solv} 和吸附剂质量 m_a ,按照以下公式计算材料的吸附量 q 和平衡液质量浓度 ρ_e 。

$$q = \frac{(A_0 - A_e)m_{\text{solv}}}{m_a} \quad (1)$$

$$\rho_e = m_{\text{solv}} \frac{A_e}{A_0 \times 10 \text{ mL}} \quad (2)$$

1.4 动态吸附淋洗实验

以热中子活化法制备的低比活度 ^{99}Mo 料液成分为参照物配制模拟溶液。可以用氧化钼和氢氧化钠反应配制模拟溶液:



该模拟溶液中氢氧化钠浓度为 3 mol/L,钼酸钠浓度为 1 mol/L,高铈酸钾质量浓度为 2.44 mg/L (相当于含铈 [$^{99}\text{Tc}^m$] 质量浓度为

835 $\mu\text{g/L}$, $^{99}\text{Tc}^m$ 放射性浓度为 4.4 Ci/mL (1 Ci = 3.7×10^{10} Bq)), 并加入适量高铈 [$^{99}\text{Tc}^m$] 酸钠注射液作为示踪剂。使用 1.0 g ACF 制成的色层柱,用蠕动泵以 5、10、20 mL/min 的流速泵送模拟溶液上柱,流出液流经 Raytest GABI γ 计数器,实时监测高铈 [$^{99}\text{Tc}^m$] 酸根离子的漏穿,可以得到高铈酸根离子的漏穿体积,并确定动态吸附最佳流速。另外分别使用 0.5、1.5 g ACF 制备色层柱,按照上述实验方法,研究 ACF 装柱量对漏穿体积的影响。

动态吸附实验完成后,对装柱量为 1.0 g 的 ACF 色层柱做钼酸钠洗涤实验。用 3 mol/L NaOH 溶液洗涤 ACF 色层柱,洗涤流速为 10 mL/min,每 10 mL 收集流出液。最后用紫外分光光度法测量其中的钼酸钠的浓度^[15]。

钼酸钠洗涤完成后,对装柱量为 1.0 g 的 ACF 色层柱进行淋洗实验。使用蠕动泵分别以 5、10、20 mL/min 的流速泵过灭菌注射用水,淋洗柱上的铈。洗脱液流经 Raytest GABI γ 计数器,实时测量洗脱液的计数率。最后使用紫外分光光度法测量洗脱液中钼酸钠的浓度,使用伽马计数器测量模拟溶液和洗脱液的计数率,计算淋洗效率。

2 结果和讨论

2.1 pH 值和 NaOH 浓度对 ACF 吸附钼酸根离子和高铈酸根离子的影响

ACF 本体由疏水性微晶炭构成,具有极高的比表面,其表面带有丰富的含 O 酸性基和含 N 碱性基团。在不同的酸性条件下 ACF 表现出不同的表面性质。根据实验数据作 ACF 吸附率与 pH 值和 NaOH 浓度的关系曲线,示于图 1。由图 1 可知,在 pH 值为 12 左右,ACF 对高铈酸根离子存在一个吸附极低值,在 pH 值大于 12 左右,溶液中的 OH^- 抑制了 ACF 表面的碱性基团的电离,ACF 表现出疏水性,吸附随着 NaOH 浓度的增加而提高。在 pH 值小于 12 左右,ACF 表面的碱性基团以离子交换作用对高铈酸根离子进行吸附,吸附量随着 pH 值的降低而升高。而 ACF 对钼酸根离子的吸附随着 OH^- 浓度的增加而显著减小。这与钼酸根离子在水溶液中的聚合性质相符。在酸性溶液中,钼酸钠聚合成同多酸盐:仲钼酸钠 $\text{Na}_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 和四钼酸钠 $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$ 。这些同多酸可看作两个或多个

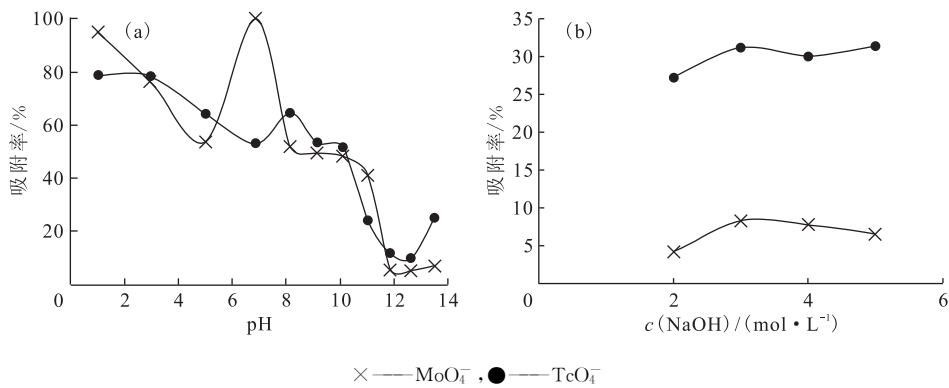


图 1 pH 值(a)和 NaOH 浓度(b)对 ACF 吸附钼酸根离子和高锝酸根离子的影响
Fig. 1 Effect of pH value(a) and concentration of NaOH(b)
on adsorption of molybdate and pertechnetate ions

同种简单含氧酸分子缩水而成。同多酸盐由于体积比较大,离子形变较大,更容易被吸附材料所吸附。随着 pH 值的增加,钼酸钠的同多酸盐转化为钼酸钠,离子变小,材料对其吸附能力降低。因此,在 pH 值大于 12 的溶液体系下,ACF 对高锝酸根离子存在较强吸附,而对钼酸根离子存在较弱吸附。可以利用上述性质,在 3 mol/L NaOH 体系下,从钼[⁹⁹Mo]料液中分离提取衰变子体锝[⁹⁹Tc^m]。

2.2 吸附动力学

由吸附动力学实验可以获得吸附速率、平衡吸附量及吸附机理方面的信息。图 2 为 ACF 的吸附量 q_t (以锝[⁹⁹Tc^m]计)与时间 t 的关系。分别用准一级吸附动力学模型方程(式(4))和准二级吸附动力学模型方程(式(5))拟合实验数据。拟合结果示于图 3,动力学模型参数列于表 1。

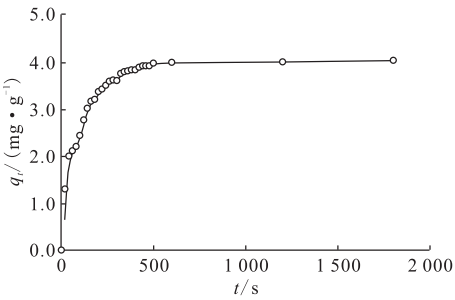


图 2 ACF 的吸附量 q_t (以锝[⁹⁹Tc^m]计)与时间 t 的关系
Fig. 2 Relationship of ACF adsorption amount q_t
(count with technetium [⁹⁹Tc^m]) and time t

式中: q_e 为平衡吸附量,mg/g; q_t 为 t 时刻的吸附量,mg/g; k_1 、 k_2 为准一级吸附速率常数(min^{-1})和准二级吸附速率常数($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$); t 为吸附时间,min。

由图 2 结果可知,ACF 在 3 mol/L NaOH 溶液中,对高锝酸根离子的吸附平衡需要约 500 s。由图 3 可知,拟合的准二级动力学模型的 $r^2 = 0.9974$,大于准一级动力学模型的,且准二级动

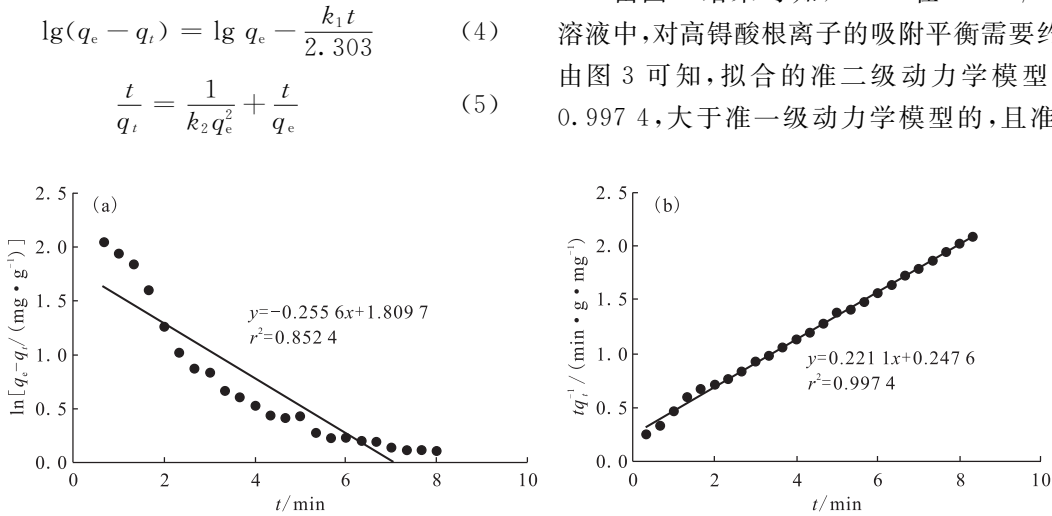


图 3 ACF 吸附高锝酸根离子的准一级(a)和准二级(b)动力学模型
Fig. 3 Pseudo-first order(a) and pseudo 2nd order(b) kinetic model of ACF adsorption pertechnetate ions

力学模型推导的平衡吸附容量 4.52 mg/g 更加符合实际。因此,准二级动力学模型能更好地描述 ACF 对高锝酸根离子的吸附过程。说明 ACF 对高锝酸根离子的吸附受到 ACF 吸附面积或位点以及高锝酸根离子浓度两个因素的影响,属于单分子层吸附。

表 1 ACF 吸附高锝酸根离子的动力学模型参数
Table 1 Kinetic parameters of pertechnetate ions adsorption on ACF

模型	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	k	r^2
准一级动力学模型	64.52	0.520 min^{-1}	0.852 4
准二级动力学模型	4.52	$0.198 \text{ g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$	0.997 4

2.3 等温吸附线

根据吸附等温曲线的类型可以判断吸附的类型,计算吸附材料的饱和吸附容量,研究吸附机理。通常使用 Freundlich 等温吸附模型和 Langmuir 等温吸附模型拟合实验数据,两个模型都适用于物理吸附和化学吸附。其中 Langmuir 等温吸附模型的变换式能够获得饱和和吸附容量 Q 的信息。根据获得的溶液吸附前的计数率 A_0 和平

衡后的计数率 A_e ,以及吸附质质量和吸附剂质量,计算材料的平衡吸附量 q_e 和平衡液浓度 ρ_e 。

Freundlich 等温吸附模型如式(6)所示, Langmuir 模型方程如式(7)所示。

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln \rho_e \tag{6}$$

$$\frac{\rho_e}{q_e} = \frac{1}{K_L Q} + \frac{\rho_e}{q} \tag{7}$$

其中: K_F 、 K_L 、 $1/n$ 为与 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附模型有关的常数, Q 为饱和吸附容量, mg/g 。根据实验数据分别拟合 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附线,结果示于图 4,图中 q_e 和 ρ_e 全部等效为以锝[^{99}Tc]计。实验表明 ACF 对高锝酸根离子的吸附同时符合 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附模型,属于单分子层吸附。但从拟合相关系数 r^2 来看,Langmuir 等温吸附模型能更好地描述 ACF 对高锝酸根离子的吸附过程。根据 Langmuir 等温吸附方程,可以计算得到饱和和吸附容量 $Q=32.47 \text{ mg/g}$,与吸附作用强弱有关的吸附系数 K_L 为 7.33。因此,ACF 的饱和和吸附容量完全胜任于一次分离居里级别的高锝[$^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$]酸根离子,而其吸附作用力较小,这种性质可能有利于锝的洗脱。

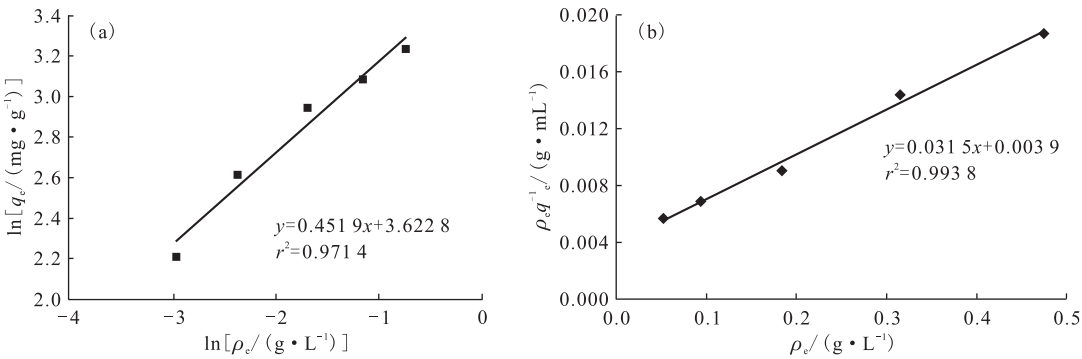


图 4 Freundlich(a)和 Langmuir(b)等温吸附线
Fig. 4 Freundlich(a) and Langmuir(b) isothermal sorption curves

2.4 ACF 色层柱的动态吸附性能

动态吸附实验结果示于图 5。如图 5 所示,在实验条件下,流速对漏穿体积没有影响,可以用 20 mL/min 的流速进行动态吸附操作。0.5、1.0、1.5 g 装柱量的 ACF 色层柱的漏穿体积分别为 15、70、200 mL,随着装柱量的增加,动态吸附容量显著增加。

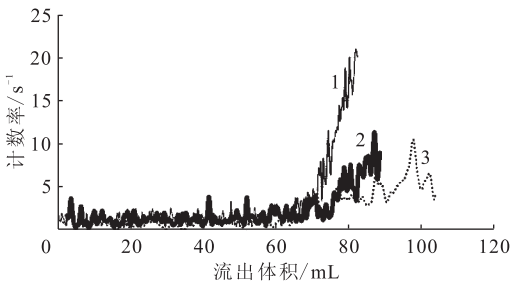
洗涤实验结果列于表 2。表 2 数据表明,流

出液中钼的含量快速减小。第 40 mL 流出液中钼的含量为 11.2 mg/L。对于 1.0 g 装柱量的 ACF 色层柱,可以用体积为 30 mL 的 3 mol/L NaOH 溶液进行洗涤。

2.5 ACF 色层柱淋洗性能

ACF 色层柱淋洗实验结果示于图 6。由图 6 可知,淋洗流速对淋洗体积影响甚微,淋洗流速可以为 20 mL/min,淋洗体积约 40 mL,淋洗效率约

98%,洗脱液 pH 值 13.34。使用紫外分光光度法测量洗脱液中的钼含量为 3.5 mg/L。



流速, mL/min: 1——5, 2——10, 3——20

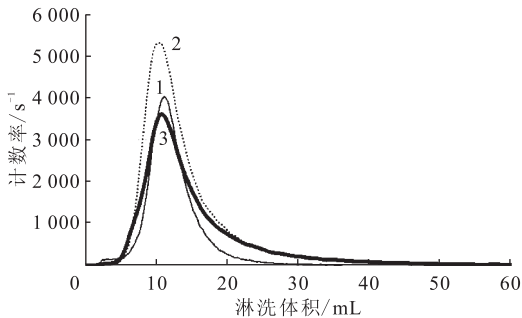
图 5 流速对漏穿体积的影响

Fig. 5 Effect of flow velocity on breakthrough volume

表 2 流出液中钼的浓度

Table 2 Concentration of molybdenum in effluent

流出体积/mL	$\rho(\text{Mo})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
0	95 900
10	7 570
20	842
30	95.4
40	11.2
50	1.5



流速, mL/min: 1——5, 2——10, 3——20

图 6 淋洗曲线

Fig. 6 Elution curve

因此,活性碳纤维是一种优良的钼锝固相分离材料,在不使用有机溶剂的条件下,能够从⁹⁹Mo中提取⁹⁹Tc^m。且锝的收率高,钼的残留小,钼锝分离工艺过程简单,色层柱的柱床阻力小,分离速度快,相对于液液萃取易于实现自动化。但是,经过 ACF 分离获得的含锝洗脱液 pH 值为 13.34,且非等渗溶液,尚不能直接用于临床。洗

脱液还需经过强酸性阳离子交换树脂中和碱性,再经过氧化铝色层柱吸附高锝[⁹⁹Tc^m]酸根离子和微量钼[⁹⁹Mo]酸根离子,最后用生理盐水将高锝[⁹⁹Tc^m]酸根离子淋洗下来,才能获得临床用途的高锝酸钠注射液^[10]。

3 结 论

(1) ACF 在 3 mol/L NaOH 体系的钼酸钠溶液中能够吸附高锝酸根离子而很少吸附钼酸根离子,可以利用该性质分离钼和锝。在 pH 为 12 左右的 NaOH 溶液中,ACF 对高锝酸根离子的吸附存在一个极小值,用水将柱上的锝淋洗下来。

(2) 静态吸附实验表明,ACF 对钼酸根离子的静态吸附平衡时间约 500 s,饱和和吸附容量为 32.47 mg/g。吸附过程符合准二级动力学模型,且同时符合 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附模型,属于单分子层吸附。

(3) 动态吸附实验表明,漏穿体积随着装柱量的增加而迅速增大,一个 1.0 g 装柱量的 ACF 色层柱的漏穿体积为 70 mL,可以使用 30 mL 3 mol/L 的 NaOH 溶液洗涤柱上残留的钼。

(4) 淋洗实验表明,40 mL 水即可将锝从 ACF 色层柱上高效地淋洗下来,锝的淋洗效率为 98%,洗脱液 pH 值为 13.34,钼的残留为 3.5 mg/L。

(5) 使用 ACF 色层柱实现了对钼和锝的分离,且分离过程无需使用有机溶剂,ACF 耐辐射性能好,柱床阻力小,锝的收率高,钼的残留小,工艺过程简单,分离速率快,易于实现自动化。为下一步开发基于非裂变⁹⁹Mo的全自动⁹⁹Mo-⁹⁹Tc^m同位素分离装置提供了一种新型固相分离材料。

参考文献:

[1] IAEA. Production technologies for molybdenum-99 and technetium-99m, IAEA-TECDOC-1065[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999.

[2] 汪勇先. 关于保障我国同位素供应安全的考虑[J]. 核技术, 2013, 36(3): 44-47.

[3] Jun B J, Tanimoto M, Kimura A. Feasibility study on mass production of (n, γ) ⁹⁹Mo[J]. JAEA-Research, 2010, 46: 36-37.

[4] Tachimori S, Nakamura H, Amano H. Diffusion of Tc-99m in neutron irradiated molybdenum trioxide and its application to separation[J]. J Nucl Sci Technol, 1971, 8(6): 295-301.

- [5] Chakravarty R, Dash A, Venkatesh M. A novel electrochemical technique for the production of clinical grade Tc using (n, γ) Mo[J]. Nucl Med Biol, 2010, 37(1): 21.
- [6] Bigott H M, Laforest R, Liu X D, et al. Advances in the production, processing and micro-PET image quality of technetium-94m[J]. Nucl Med Biol, 2006, 33: 923-933.
- [7] Chattopadhyay S, Das S S, Das M K, et al. Recovery of $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ from $\text{Na}_2[^{99}\text{Mo}]\text{MoO}_4$, solution obtained from reactor-produced (n, γ) ^{99}Mo using a tiny Dowex-1 column in tandem with a small alumina column[J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2008, 66(12): 1814.
- [8] Rogers R D, Bond A H, Zhang J H, et al. New technetium-99m generator technologies utilizing polyethylene glycol-based aqueous biphasic systems[J]. Sep Sci Technol, 1997, 32(1-4): 867-882.
- [9] Spear S K, Griffin S T, And J G H, et al. Radiopharmaceutical and hydrometallurgical separations of perrhenate using aqueous biphasic systems and the analogous aqueous biphasic extraction chromatographic resins[J]. Indust Engin Chem Res, 2000, 39(9): 3173-3180.
- [10] Morley T J, Dodd M, Gagnon K, et al. An automated module for the separation and purification of cyclotron-produced $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ [J]. Nucl Med Biol, 2012, 39(4): 551-559.
- [11] 周迎春,冯世红,周艳军. 活性炭吸附法分离铼钼的研究[J]. 表面技术, 2003, 32(4): 7-9.
- [12] Viglašová E, Daňo M, Galamboš M, et al. Column studies for the separation of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ using activated carbon[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2016, 307(1): 591-597.
- [13] 王秀丽,盛义平,李争. 活性炭纤维电吸附去除 Cr(VI) 的研究[J]. 燕山大学学报, 2008, 32(6): 525-529.
- [14] Suzuki T, Fujii Y, Wu Y, et al. Adsorption behavior of VII group elements on tertiary pyridine resin in hydrochloric acid solution[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2009, 282(2): 641-644.
- [15] 李树昌,赵建为. 细菌浸出液中微量钼的测定[J]. 云南冶金, 2001, 30(6): 49-50.