

## $^{90}\text{Y}$ 电沉积的实验研究

梁俊福, 侯晓飞, 欧阳琴

(清华大学核能与新能源技术设计研究院, 北京 100084)

**摘要:** 研究了用电沉积方法从 $^{90}\text{Sr}$ 母液中分离医用 $^{90}\text{Y}$ 的工艺条件。以 0.1 mol/L pH 2.5 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液为电沉积底液,以铂为阳极,铂或不锈钢为阴极,控制阴极电流密度为 0.5 A/cm<sup>2</sup>,电沉积 50 min 后, $^{90}\text{Y}$ 在阴极沉积率>95%。阴极上的 $^{90}\text{Y}$ 用 0.1~0.5 mol/L 的热硝酸洗脱后再次电沉积。二次电沉积后 $^{90}\text{Y}$ 与 $^{90}\text{Sr}$ 的分离系数> $8 \times 10^5$ , $^{90}\text{Y}$ 洗脱收率>70%。铂丝阴极上的 $^{90}\text{Y}$ 可用 200~400  $\mu\text{L}$ ,0.1~0.5 mol/L 的热硝酸洗脱,制成用于标记药物的 $^{90}\text{Y}$ 溶液;沉积有 $^{90}\text{Y}$ 的不锈钢阴极经热处理后,制成心血管放射性支架或医用敷贴器,其 $^{90}\text{Y}$ 的日浸出率分别<1%和 0.1%。残液中的 $^{90}\text{Sr}$ 经放置约 20 d 后,可用于再次分离 $^{90}\text{Y}$ 。

**关键词:** 电沉积; $^{90}\text{Y}$ ; $^{90}\text{Sr}$ ;分离系数

中图分类号: T192; O614.35 文献标识码: A 文章编号: 1000-7512(2007)03-0159-05

## Milking Medical $^{90}\text{Y}$ From $^{90}\text{Sr}$ Solution by Electrodeposition

LIANG Jun-fu, HOU Xiao-fei, OU-YANG Qin

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The technique of separating  $^{90}\text{Y}$  from  $^{90}\text{Sr}$  cow by electrodeposition was studied using 0.1 mol/L pH 2.5  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  as electrodeposition solution, platinum as anode, platinum or stainless steel as cathode, the current density of cathode 0.5 A/cm<sup>2</sup>. After electrodeposition for 50 minutes, more than 95%  $^{90}\text{Y}$  were deposited quantitatively on the cathode. Though two-step electrodeposition, the  $^{90}\text{Y}/^{90}\text{Sr}$  separative coefficient and elution recovery of  $^{90}\text{Y}$  were more than  $8 \times 10^5$  and 70% respectively. The  $^{90}\text{Y}$  deposited on platinum cathode was eluted by 200~400  $\mu\text{L}$  of 0.1~0.5 mol/L hot  $\text{HNO}_3$ , which was used to label monoclonal antibodies and peptide-receptor. The stainless steel cathode with deposited  $^{90}\text{Y}$  can be prepared to radioactive stent or medical patch, the daily leaching efficiency of  $^{90}\text{Y}$  were less than 1% and 0.1% respectively.  $^{90}\text{Sr}$  remained in the deposition solution will generate new  $^{90}\text{Y}$  again.

**Key words:** electrodeposition;  $^{90}\text{Y}$ ;  $^{90}\text{Sr}$ ; separative coefficient

近年来,血管内放射治疗成为预防血管再狭窄的研究课题<sup>[1]</sup>。放射性支架置于血管内,是预防血管再狭窄的放射治疗方法之一。它通过放

射性核素发出的射线抑制血管平滑肌细胞的增生,从而抑制血管内膜的增厚,达到预防再狭窄的目的。此外,对用于肿瘤治疗的 $^{90}\text{Y}$ 标记单克

隆抗体和受体的应用研究也逐渐增多。国内外学者对 $^{90}\text{Y}$ 在肝癌、骨癌、乳腺癌、卵巢癌等疾病治疗中的应用进行了大量研究,并取得了一些可喜的成果。

$^{90}\text{Y}$ 系纯 $\beta^-$ 射线核素, $\beta^-$ 射线能量高( $E_{\max}=2.27\text{ MeV}$ , $E_{\text{mean}}=0.93\text{ MeV}$ ),在组织内最大射程可达 $12\text{ mm}$ , $R_{95}$ (95% $\beta^-$ 粒子的能量传给靶组织的距离)可达 $5.94\text{ mm}$ ,平均组织射程为 $2.5\text{ mm}$ ,约相当于 $100\sim 1\,000$ 个细胞直径,是 $^{131}\text{I}$ 的 $10\sim 20$ 倍。 $^{90}\text{Y}$ 半衰期适中( $T_{1/2}=64.1\text{ h}$ ),比活度高,其子体为稳定核素 $^{90}\text{Zr}$ ,87%的 $^{90}\text{Y}$ 能量在8天内释放,有效治疗时间为7个半衰期,约3周,可使肿瘤在短期内接受较大的照射剂量,保证治疗效果。因此,在治疗效果上, $^{90}\text{Y}$ 明显优于 $^{131}\text{I}$ 、 $^{32}\text{P}$ 等纯 $\beta^-$ 医用放射性核素。

$^{90}\text{Y}$ 可由中子照射钇金属或其氧化物制得,但制得的 $^{90}\text{Y}$ 含有大量非放射性核素,比活度低,不能用于放射治疗。生产高比活度 $^{90}\text{Y}$ 最常用的方法是从裂变产物 $^{90}\text{Sr}$ 中提取。母体 $^{90}\text{Sr}$ ( $T_{1/2}=28.7\text{ a}$ )经 $\beta$ 衰变后生成子体 $^{90}\text{Y}$ ,经过一段时间后, $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 会达到平衡,从 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 平衡体系中分离的 $^{90}\text{Y}$ 无载体,比活度高达 $2.01\times 10^{16}\text{ Bq/g}$ 。分离 $^{90}\text{Y}$ 后,经过一段时间(约20天), $^{90}\text{Sr}$ 重新生成 $^{90}\text{Y}$ , $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 又接近平衡,可以再次分离 $^{90}\text{Y}$ ,从而形成不断提取 $^{90}\text{Y}$ 的“ $^{90}\text{Sr}$ 母牛”。

虽然 $^{90}\text{Sr}$ 及其子体 $^{90}\text{Y}$ 都是 $\beta$ 放射性核素,但 $^{90}\text{Sr}$ 是亲骨的高毒性核素,且半衰期长。它进入人体骨中的吸收量受到严格的限制。 $^{90}\text{Sr}$ 在人体内的最大允许吸入量为 $7.4\times 10^4\text{ Bq}(2\ \mu\text{Ci})$ [2]。因此, $^{90}\text{Sr}$ 在医用 $^{90}\text{Y}$ 样品中的控制指标为 $7.4\times 10^2\text{ Bq}$ ,即为人体允许吸入量的1%。如果一次治疗用 $^{90}\text{Y}$ 样品为 $7.4\times 10^8\text{ Bq}(20\ \mu\text{Ci})$ ,则 $^{90}\text{Y}$ 与 $^{90}\text{Sr}$ 分离系数应大于 $10^6$ 。

从20世纪50年代开始,科学家们就展开了 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 发生器的研制,采用的 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 分离方法主要有:沉淀法、离子交换法[3]、溶剂萃取法、溶剂萃取色层法[4]、电沉积法[5]等。离子交换和溶剂萃取法可以有效分离 $^{90}\text{Sr}$ ,但在使用过程中,由于 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  $\beta$ 射线对离子交换剂和有机溶剂的辐射分解作用,使其性能下降,最终达不到对 $^{90}\text{Sr}$ 的有效分离。本工作拟研究用电沉积法制备医用 $^{90}\text{Y}$ ,以克服以上不足。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器和试剂

Tri-Carb 2200CA型液体闪烁测量仪:美国Packard公司;PHS-3B精密pH计:上海雷磁仪器厂; $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 标准溶液: $227\text{ TBq/L}$ ,核工业兰州核燃料厂; $0.6\text{ mol/L HNO}_3$ :自制。水相闪烁液组成参考文献[6]。

电解池:A型电解池用于不锈钢圆片的电沉积[7]。B型电解池用于铂丝或不锈钢心血管支架的电沉积。B型电解池的结构示意图示于图1。

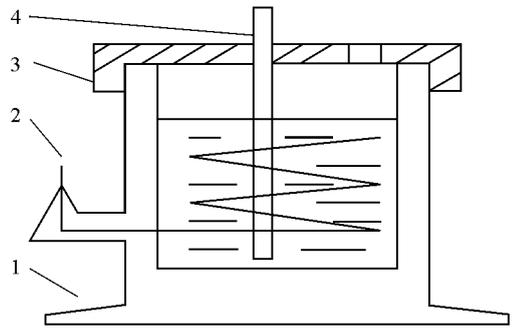


图1 B型电解池的结构

1——玻璃池体;2——铂丝阳极;  
3——聚四氟乙烯池盖;4——铂丝或不锈钢丝阴极

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 阴极处理

不锈钢片表面光滑,只需去除油污。铂丝和不锈钢丝经多次使用后会钝化,在每次使用前最好进行活化处理:先用热硝酸和去离子水分别洗涤两次,再在酒精灯焰上灼烧至红热,待自然冷却后用小号砂纸将其表面磨平。

#### 1.2.2 电沉积方案

(1)一般电沉积步骤。在电解池中加入 $10\text{ mL}$ 电沉积底液(pH一定、浓度一定的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液)后,再加入 $100\ \mu\text{L}$  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 平衡溶液。控制阴极电流密度一定,电沉积一定时间。若在A型电解池中进行,在电沉积结束前 $1\text{ min}$ 加入一定体积的 $3\text{ mol/L}$ 的氨水碱化,电解结束后断开电源,倒出残液,取出不锈钢阴极片;若在B型电解池中进行,电解结束后,在通电下迅速拔出铂丝或不锈钢丝阴极,然后断开电源,倒出残液并测定其活度。

(2)二次电沉积步骤。在B型电解池中加入 $10\text{ mL}$  pH 2.5浓度为 $0.1\text{ mol/L}$ 的

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 底液,加入 1 000 μL <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 平衡溶液,用铂丝做阴极,控制阴极电流密度为 0.5 A/cm<sup>2</sup> (铂丝 φ1 mm × 2.5 cm,电流为 0.4 A,电压约为 6 V),电沉积 50 min。通电下迅速拔出阴极,断开电源,用少量去离子水淋洗铂丝,然后用 0.5 mol/L 的热硝酸溶液将 <sup>90</sup>Y 洗脱下来,每次 50 μL,洗涤 8 次,得到 <sup>90</sup>Y 的粗产品。粗产品再加入装有新(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 底液的另一 B 型电解池中,控制电沉积条件同步骤 1,进行第二次电沉积。洗脱步骤同第一次,即可制得医用 <sup>90</sup>Y 的稀硝酸溶液。

制备医用 <sup>90</sup>Y 放射性支架时,在 B 型电解池中加入新的电沉积底液,再加入由一般电沉积步骤得到的 <sup>90</sup>Y 粗产品,用心血管不锈钢支架做阴极,控制条件同一般电沉积步骤(不锈钢丝 φ1.2 mm × 2.5 cm,则电流为 0.5 A,电压约为 8 V),进行第二次电沉积。最后在通电下,迅速将阴极支架拔出,用少量去离子水淋洗铂丝。经热处理,即得到医用 <sup>90</sup>Y 放射性支架。

### 1.3 分离效果的测定<sup>[8]</sup>

通过测定不同时间 <sup>90</sup>Y 溶液的放射性活度变化情况,可以计算 <sup>90</sup>Y 的收率和 <sup>90</sup>Sr 的分离效果。溶液中的放射性活度由液体闪烁测量仪测定。取 0.1 mL <sup>90</sup>Y 洗脱液加入到 10 mL 闪烁液中,测定 5~2 000 keV 内的计数率 C,在本工作的测定条件下,液闪仪对 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 的测定效率都在 99% 以上,因此假定它们的测定效率相同。

假定: A<sub>1</sub><sup>0</sup>、A<sub>2</sub><sup>0</sup> 分别为电沉积溶液中 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 的活度; A<sub>1,0</sub>、A<sub>2,0</sub> 分别为电沉积完成时阴极上 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 的活度; A<sub>t</sub> 为电沉积完成后 t 时刻阴极上 <sup>90</sup>Sr 与 <sup>90</sup>Y 的活度和。

则:溶液总活度 A<sup>0</sup> 由(1)式计算:

$$A^0 = A_1^0 + A_2^0 = 2A_1^0 \quad (1)$$

电沉积完成时阴极总活度 A<sup>0</sup> 由(2)式计算:

$$A_0 = A_{1,0} + A_{2,0} \quad (2)$$

$${}^{90}\text{Y 电沉积率}/\% = \frac{A_2}{A_2^0} \quad (3)$$

$$\text{SF 分离系数} = A_{2,0}/A_{1,0} = A/A_1 - 1 \\ = (2A_0 - A_t - A_0 e^{-\lambda_2 t}) / (A_t - A_0 e^{-\lambda_2 t}) \quad (4)$$

(4)式中的活度 A 用计数率表示,则为 C,因此

$$\text{SF} = 2C_0 - C_t - C_0 e^{-\lambda_2 t} / (C_t - C_0 e^{-\lambda_2 t}) \quad (5)$$

(5)式中, λ<sub>2</sub> 为 <sup>90</sup>Y 的衰变常数, λ<sub>2</sub> =

0.010 811 h<sup>-1</sup>

## 2 结果和讨论

### 2.1 电沉积条件的选择

为了定量地从 <sup>90</sup>Sr 母液中提取医用 <sup>90</sup>Y,应保证具有较高的 <sup>90</sup>Y 电沉积率。为此,必须确定各种电沉积条件:底液(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度、pH、电流密度、电沉积时间等对电沉积率的影响。按照实验方案逐一改变条件,进行电沉积条件选择实验。

#### 2.1.1 电沉积底液(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度的选择

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的浓度对电沉积率的影响示于图 2。由图 2 可以看出,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的浓度为 0.1~0.25 mol/L 时,对电沉积率的影响不大。但当其浓度较高时,硫酸盐会影响对最后载有 <sup>90</sup>Y 的阴极的清洗。因此,本工作选择底液(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的浓度为 0.10 mol/L。

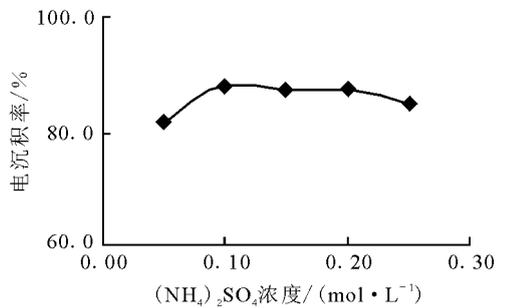


图 2 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度对电沉积率的影响

底液 pH 对电沉积率的影响示于图 3。图 3 显示,底液的 pH 是影响电沉积率的一个重要因素,当 pH < 2.0 或 > 3.5 时,电沉积率都很低; pH 为 2.0~3.5 时,电沉积率较高且稳定。因此,本工作选择硫酸铵底液的 pH 为 2.5。

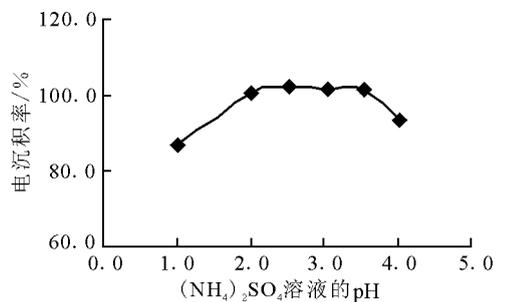


图 3 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液的 pH 对电沉积率的影响

#### 2.1.2 电流密度的选择

电流密度对电沉积率的影响示于图 4。由

图4可知,当电沉积时间 $>30$  min及电流密度 $\geq 0.2$  A/cm<sup>2</sup>时,电流密度对电沉积率影响不大。因此,本工作选用的电流密度为0.5 A/cm<sup>2</sup>。

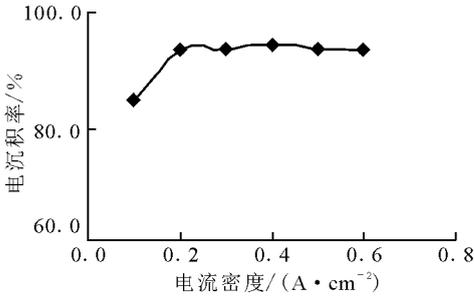


图4 电流密度对电沉积率的影响

### 2.1.3 电沉积时间的选择

选择电流密度为0.5 A/cm<sup>2</sup>,改变电沉积时间,观察电沉积率的变化。结果表明:当电沉积时间大于30 min时,电沉积率基本无变化,因此,本工作选择电沉积时间为50 min。

### 2.1.4 碱化液体积的选择

以不锈钢片为阴极,用A型电解池制备医用<sup>90</sup>Y敷贴片时,在取阴极不锈钢片前必须向电解池中加入碱化液,防止<sup>90</sup>Y在断电后被残液溶解。在电沉积结束前1 min向电解池中加入不同体积、浓度为3 mol/L的氨水,观察电沉积率的变化,结果示于图5。由图5可知,加入碱化液体积越大,电沉积率越高。但是,加入过多的碱化液可能会造成<sup>90</sup>Sr与<sup>90</sup>Y共沉淀,降低<sup>90</sup>Y、<sup>90</sup>Sr分离系数。因此,本工作选择在电沉积结束前1 min加入1 mL 3 mol/L的氨水进行碱化。

## 2.2 阴极沉积<sup>90</sup>Y的洗脱

研究了用水及各种酸溶液从阴极上洗脱<sup>90</sup>Y。考虑到应用等实际情况,首选为稀HNO<sub>3</sub>。

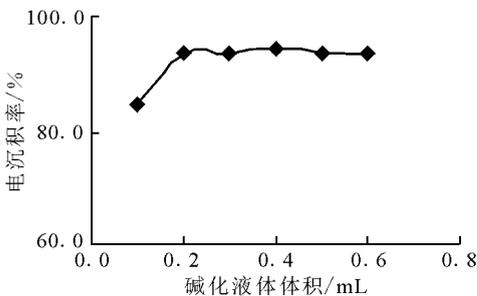


图5 碱化液体积对电沉积率的影响

本工作取100 μL样品做一次电沉积,选择0.1~0.5 mol/L的热HNO<sub>3</sub>分别洗脱铂丝、不锈钢丝、不锈钢片阴极上沉积的<sup>90</sup>Y,每次50 μL,作洗脱率曲线。结果表明,沉积在铂丝阴极上的<sup>90</sup>Y很容易洗脱下来。每次用50 μL 0.1或0.5 mol/L的热HNO<sub>3</sub>,分别淋洗8次和4次就可将 $>99\%$ 的<sup>90</sup>Y洗下。沉积在不锈钢丝阴极上的<sup>90</sup>Y也比较容易洗脱下来。每次用50 μL 0.5 mol/L的HNO<sub>3</sub>,淋洗6次可将99%以上的<sup>90</sup>Y洗下。但沉积在不锈钢片上的<sup>90</sup>Y不容易洗下,0.5 mol/L的HNO<sub>3</sub>淋洗6次,淋洗率只有约85%。

### 2.3 一次电沉积的分离效果

在选定的电沉积条件下,按照一般电沉积步骤,分别用铂丝、不锈钢丝和不锈钢片为阴极进行电沉积实验,测定残液活度,计算电沉积率和分离效果。一次电沉积的分离效果列于表1。由表1可知,铂丝阴极的电沉积率 $>96\%$ ,洗脱收率 $>81\%$ ,经一次电沉积得到的<sup>90</sup>Y分离系数 $>3 \times 10^3$ 。不锈钢丝阴极的电沉积约为95%,洗脱收率 $>80\%$ ,经一次电沉积得到的<sup>90</sup>Y分离系数 $>1 \times 10^3$ 。

表1 一次电沉积的分离效果

阴极	$C_0 / \text{min}^{-1}$	$C_t / \text{min}^{-1}$	$t / \text{h}$	SF
铂丝	1 509 581	23 979	387	3 053
	1 515 720.5	49 995	316	12 909
	1 589 724.5	92 529.5	264	3 154
不锈钢丝	1 451 695	20 780	405	1 118
	1 263 928	57 275	289	1 414
	1 305 989	72 844.5	269	1573

### 2.4 二次电沉积的分离效果

二次电沉积分离效果列于表2。由表2可以看出,<sup>90</sup>Y的分离系数 $>8 \times 10^5$ ,洗脱收率 $>70\%$ 。只要控制好条件,分离系数 $>10^6$ 是完全可能的。

表2 二次电沉积的分离效果

产品编号	$A_0 / \text{min}^{-1}$	$A_t / \text{min}^{-1}$	$t / \text{h}$	SF
1	1 350 356	9 763	456	940 031
2	1 345 508	42 312.5	320	814 454
3	1 360 363	53 103.5	300	1 368 234

### 2.5 <sup>90</sup>Zr 的干扰影响及其消除

<sup>90</sup>Zr 作为 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 平衡体系最终衰变形成的稳定核素, 会随时间的延长而在体系中不断积累, 存放 3 年的 <sup>90</sup>Sr 源中 <sup>90</sup>Zr 含量约为 <sup>90</sup>Y 的 270 倍。实验发现, 体系中 <sup>90</sup>Zr 含量高, 会抑制 <sup>90</sup>Y 的电沉积, 必须在 Sr 与 Y 电沉积前去除。本工作用电沉积方法除 <sup>90</sup>Zr; 用铂丝做电极, 控制阴极电流密度为 0.5 A/cm<sup>2</sup>, 电沉积 15 min 后, 断开电源, 取出阴极, 用浓硝酸将其洗脱干净。等离子光谱分析表明, 95% 以上的 <sup>90</sup>Zr 从电解液中去掉。<sup>90</sup>Zr 的去除对 <sup>90</sup>Y 沉积率的影响列于表 3。由表 3 可知, 除 Zr 后溶液再电沉积, <sup>90</sup>Y 的电沉积率 > 95%。当然用该方法在除去 <sup>90</sup>Zr 的同时会损失一部分 <sup>90</sup>Y, 但 <sup>90</sup>Sr 不损失, 只需将体系放置一个月, <sup>90</sup>Y 与 <sup>90</sup>Sr 会重新平衡。

### 2.6 阴极热处理对 <sup>90</sup>Y 浸出率的影响

对于直接用于医疗目的的不锈钢支架, 希望

其沉积的 <sup>90</sup>Y 能牢固地负载。为此, 需对电沉积后的不锈钢阴极进行热处理, 即在惰性气体(氩气)中将阴极加热到 500 °C, 保持 2 h 后, 令其自行冷却即可。

将经热处理后的不锈钢支架和敷贴片浸泡在去离子水中, 检测其浸出率, 结果列于表 4。由表 4 可以看出, <sup>90</sup>Y 在 24 h 内浸出率分别低于 1% 和 0.1%, 而未经热处理的阴极 <sup>90</sup>Y 的浸出率要高得多。

表 3 <sup>90</sup>Zr 的去除对 <sup>90</sup>Y 沉积率的影响

取样体积	是否除 <sup>90</sup> Zr	10 <sup>-9</sup> 残液活度/min <sup>-1</sup>	电沉积率/%
50 μL	否	0.227	66.5
	是	0.185	91.2
1 000 μL	否	6.6	6
	是	3.1	108

表 4 心血管支架和敷贴片的 <sup>90</sup>Y 浸出率

阴极类型	热处理	浸泡不同时间(h)下的浸出率/%						
		1	4	24	48	72	96	120
心血管 支架	热处理		0.21	0.53			2.3	
	未热处理	7		48	59	63		
敷贴片	热处理		0.02	0.07				1.1
	未热处理	3	11	26	33			

## 3 小 结

(1) 本工作建立电沉积方法具有稳定可靠、操作简便、<sup>90</sup>Y 收率高、<sup>90</sup>Sr 母液重复利用率高等特点。它能实现 <sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y 有效分离, 其两次电沉积的 <sup>90</sup>Y/<sup>90</sup>Sr 分离系数 > 8 × 10<sup>5</sup>, 能基本达到制成标记药物溶液、心血管放射性支架或医用敷贴片的纯度要求。

(2) 本工作建立的从示踪水平 <sup>90</sup>Sr 母液中用电沉积法分离医用 <sup>90</sup>Y 的工艺条件, 可以作为研究从毫居里或居里水平 <sup>90</sup>Sr 母液中分离医用 <sup>90</sup>Y 工艺的参考。

### 参考文献:

[1] 罗全勇. 放射性支架预防血管再狭窄的研究现状[J]. 同位素, 2002, 15(1): 32-37.  
 [2] ICRP. Publication 30, Limits of Intakes of Radionuclides; Part 12, Strontium-90[R]. ICRP, Pergamon Press, 1979.  
 [3] 金小海, 于海滨, 张锦明, 等. <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 发生器的

研制[J]. 同位素, 1990, 3(3): 161-169.

[4] HSIEH BT, TING G, HSIEH HT, et al. Preparation of Carrier-free Yttrium-90 for Medical Applications by Solvent Extraction Chromatography [J]. Appl Radiat Isot, 1993, 44(12): 1 473-1 480.  
 [5] REISCHL G, ROSCH F, MACHULLA HJ. Electrochemical Separation and Purification of Yttrium-86[J]. Radiochim Acta, 2002, 90: 225-228.  
 [6] 梁俊福, 刘秀琴, 郭一飞. 萃取液闪法测定高放废液及其处理工艺中的 <sup>90</sup>Sr[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 31(11): 86-92.  
 [7] 贾瑞和, 刘秉仁, 梁俊福, 等. 电沉积制备镧和铈的 α 源[J]. 同位素, 2000, 13(3): 135-141.  
 [8] 田国新, 王建晨, 张平, 等. 从 <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 的平衡体系中分离医用放射性同位素 <sup>90</sup>Y 的电沉积方法: 中国, CN1455023[P]. 2003-01-12.  
 [9] 梁俊福, 刘秀琴, 郭一飞. 高放废液处理过程中总 β 放射性活度的分析[J]. 核化学与放射化学, 1998, 20(4): 228-233.