

CNIC-01789

CAEP-0148

电沉积法制备²³⁵U靶

陈琪萍 钟文彬 李有根

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

电沉积法制备用于反应堆生产裂变⁹⁹Mo的²³⁵U靶,是在一个密闭的圆筒形不锈钢结构的容器内进行的。不锈钢靶容器的内表面薄薄地镀一层铀,镀层应牢固而均匀。文中介绍了两种电沉积方法:一种是铀以氧化物的形式从含有铀盐的 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{CO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 水溶液中沉积出来;另一种方法是从熔盐体系中直接电沉积金属铀,其电沉积效率和电沉积量都要高于水溶液体系电沉积铀。

关键词: 电沉积 ²³⁵U靶 裂变 ⁹⁹Mo

Preparation of ^{235}U Target by Electrodeposition (*In Chinese*)

CHEN Qiping ZHONG Wenbin LI Yougen

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

A target for the production of fission ^{99}Mo in a nuclear reactor is composed of an enclosed, cylindrical vessel. Preferable vessel is comprised of stainless steel, having a thin, continuous, uniform layer of ^{235}U integrally bonded to its inner walls. Two processes are introduced for electrodepositing uranium on to the inner walls of the vessel. One process is electrodepositing UO_2 from $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ solution; the other is electrodepositing pure uranium metal from molten salt. Its plating efficiency and plating quantity from a molten bath is higher than UO_2 from the aqueous system.

Key words: Electrodeposition, ^{235}U target, Fission ^{99}Mo

引言

在现代核医学诊断中, $^{99}\text{Tc}^m$ 是应用最广泛的放射性药物之一,其用量约占临床诊断用放射性药物的 80%。由于 $^{99}\text{Tc}^m$ 发生器在核医学诊断中迅速普及和发展,导致市场对高纯医用 ^{99}Mo 的大量需求。多年来,许多国家对裂变法生产 ^{99}Mo 的工艺进行了广泛深入的研究,并建立了单次生产上千居里的 ^{99}Mo 生产线。世界上第一个裂变法生产 ^{99}Mo 的化学流程是由布鲁克海文实验室实现的,当时采用的是丰度为 93% 的 U-Al 合金为靶材料,经反应堆辐照后,利用氧化铝色层柱对裂变产物进行分离而获得 ^{99}Mo 。

^{99}Mo 的裂变产额达 6.06%, ^{235}U 裂变产物中还存在几种钼的稳定同位素,如 ^{95}Mo , ^{97}Mo , ^{98}Mo 及 ^{100}Mo ,但是由于总的稳定钼的绝对量很少, ^{99}Mo 的比活度仍高达 $3.7 \times 10^{14} \sim 3.7 \times 10^{15} \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$,比堆照天然钼高 $10^3 \sim 10^4$ 倍。

从 ^{235}U 裂变产物中提取高纯医用 ^{99}Mo 的生产工艺流程比较复杂,需要解决诸如铀靶设计和制造、反应堆照射时靶件的冷却、高纯 ^{99}Mo 的分离纯化、强放废物处理、 ^{235}U 回收等一系列问题。目前用于生产 ^{99}Mo 的靶材料绝大多数均采用丰度 90% 以上的高丰度铀,其优点是处理铀量少;生产设备紧凑,便于热室操作;产生的高放废物比较少。靶材料多为铝壳包裹的片状^[1] 或棒状^[2] 的 U-Al 合金,有的也用 UAl_x 或 UMg_x 的弥散靶。用电沉积法也可制备用于反应堆裂变同位素生产的 ^{235}U 靶,它具有一些 U-Al 合金靶所不可替代的优势。

靶在反应堆内辐照时,将因发生核反应和核辐射在其中能量损耗而产生可观的发热量。因此,选择合适的靶结构,使大量热能在辐照过程中能迅速传导出去就变得尤为重要。电沉积法制备的铀靶是一个密封的圆柱形不锈钢容器,不锈钢靶容器的内表面薄薄地镀上了一层铀,镀层牢固而均匀,和具有良好导热性能的不锈钢管壁以及外部的反应堆冷却水系统相邻。根据热工计算,芯体温度与芯体同包壳之间的间隙有关,间隙小传热效率高。用电沉积法制备的铀靶采用包壳和芯体密合一体的结构,有利于靶件辐照时产生的热量的散失,从传热观点看,热工性能好,因而降低了辐照时靶件的温度,增加了辐照安全性。

在靶辐照后处理阶段,电沉积法制备的铀靶由于其镀层薄,如果选择合适浓度的溶剂就可以使裂变产物很容易地被溶解下来,而不影响到不锈钢基体本身,溶解时间大约只有几分钟,可缩短处理时间。并且最终溶液中所含的基体金属杂质几乎可以忽略不计,从而简化了后面的化学分离过程,便于得到高纯度的产品,同时产生的放射性废物较少。相比之下,U-Al 合金靶溶解较困难,为使靶件溶解完全往往需要几个小时的时间,由于铝也被溶解,因此一方面需要大量的溶剂;另一方面溶解液中杂质铝的含量也使放射性废物处理和后续分离的难度明显增加。

用电沉积法制备铀靶主要有两种方法:一种是在水溶液中电沉积氧化铀,该方法较简便,工艺也较成熟^[1~6];另一种是在熔盐中电沉积金属铀^[7~14],主要用于低丰度铀的电沉积,操作条件目前还处于可行性研究阶段,尚未正式用于商业生产。

1 从水溶液中电沉积铀

1.1 靶材料

靶筒材料可供选择的范围较大,如不锈钢、镍、镍合金、锆、镀锌铝等多种金属或合金都能用作制造靶筒的材料,但最常采用的还是不锈钢,靶筒必须是经抛光和退火处理的无缝不

锈钢管,这是为了保证辐照过程中管壁内表面的铀镀层可以得到更好的散热冷却。钢管长约 450 mm,外径 30~50 mm,管壁厚 1~2.5 mm。靶筒上端有一个舱门,上下两端包括舱门都需焊接密封,与管壁形成一个整体,以保证在辐照及后续工序中的安全性。

一个携带有可裂变物质的 450 mm 长的铀靶,假设其内部铀沉积层的长度为 380 mm,沉积层厚度 $20 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,每个靶所含铀量约 7~10 g,在辐照过程中将产生约 3.7×10^{15} Bq 的放射性裂变产物。当沉积层厚度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,则每个靶所含铀量约 18~25 g,同样大小的铀靶将产生 9.25×10^{15} Bq 的放射性裂变产物,因此必须保证辐照的安全性。同时铀靶应耐受反应堆中子辐照所产生的高温高压,靶筒不变形,镀层无脱落。

1.2 电沉积工艺

1.2.1 工艺参数

电沉积通常是在外加电压下使放射性核素的金属离子在电解液中进行电迁移,最终在阴极表面上被还原而沉积下来。在电沉积过程中,放射性金属离子在阴极上的沉积速率随电流密度的增加而增加。为了获得致密的沉积层,使用的电流密度不能过大,电沉积时间也不能过短。金属离子的电沉积量与消耗的电量密切相关,它符合法拉第定律。实验证明,铀可以以氧化物的形式从含有铀盐的水溶液中沉积出来,电沉积铀的厚度可以达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

电沉积法制备铀靶所采用的电镀溶液为铀酰盐溶液,电镀溶液 pH 值控制在 4~9,最佳 pH 值为 7.2。 UO_3 溶于合适的酸即可生成铀酰盐溶液,其他铀酰化合物如硝酸铀酰、氯化铀酰、草酸铀酰、硫酸铀酰等都是易溶于水的,都可用于电沉积铀,硝酸铀酰可以用在硝酸溶液中溶解金属铀或任一种铀的氧化物,这些物质溶于水后形成的溶液有特征性的黄绿色荧光。

在进行电沉积以前,制靶用的不锈钢管需经清洁和酸处理,以保证铀沉积层与钢管结合的牢固性。将内壁抛光的不锈钢管用无水乙醇和丙酮擦拭彻底除油,然后将管的一头用橡皮塞塞住,往管中注入约 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 25% 的硫酸溶液,保留至少 20 min,然后用蒸馏水冲洗干净。

研究表明,在靶筒内壁预先电沉积上一层非常薄的铀有助于提高铀沉积层的牢固性,预电镀的铀可以是 ^{238}U ,之后再正式电镀 ^{235}U 。水溶液体系电沉积铀的工艺参数列于表 1。

表 1 草酸铵溶液电沉积铀工艺参数

电镀液	$0.042 \text{ mol } \text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, 0.125 \text{ mol } (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
阴极	不锈钢靶筒
阳极	碳棒
温度/ $^\circ\text{C}$	93 ± 1
pH 值	7.2
槽压/V	1.5
电流/A	0.3~1.0

1.2.2 工艺流程

经退火和抛光处理的无缝 304 不锈钢靶筒(长 450 mm,外径 30 mm),用约 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 25% 的硫酸溶液进行预处理以后,用蒸馏水冲洗干净,垂直放置于水浴中,将碳棒阳极插入靶筒

正中位置,并固定,阴极导线连接于靶筒外壁。最佳的预电沉积条件是:电压 1.5 V;电流 0.3~1.0 A,一般控制在 0.9 A;电沉积时间 1 h;电沉积铀可以在 50~100 °C 的温度下进行,但在较高的温度下可获得较高的电流效率,一般将水浴温度控制在(93±1)°C。

预电沉积完成后,从水浴中取出靶筒,冲洗干净,烘干,称重,经预电沉积的靶筒可长期存放。正式电沉积铀的方法与之类似,采用预电沉积时相同的装置,但在插入阳极时需格外小心,以免破坏预电沉积的铀层,当水浴温度达到(93±1)°C时接通电源,开始电沉积,为了减少气泡的产生并使铀沉积层牢固,采用循环电流的方法:初始电流为 0.3 A,电沉积 15 min,将电流调至 0.6 A,电沉积 15 min,再将电流增至 0.9 A,电沉积 15 min,之后又回到 0.3 A,电沉积 15 min,如此循环,电沉积时间约 8 h。电沉积完毕将铀靶取出洗净,热空气烘干。

为了便于焊接,靶筒两端分别在 35 °C 的浓硝酸中浸泡几分钟,以除去两端一部分的铀沉积层,使剩下的铀沉积层长度约为 380 mm,洗净烘干后,靶置于 500 °C 的惰性气体(氦气)环境下灼烧 1 h,使靶筒内部沉积的各种价态的铀的氧化物均转化为 U_3O_8 的形式。充入约 1×10^5 Pa 的氦气,两端焊封,用氦质谱法检漏。

用该工艺电沉积 UO_2 速率为 $1.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, ^{235}U 沉积层厚度约 $20 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,总的 ^{235}U 沉积量(用重量法测定)约为每靶 7 g。

生产裂变钚的 ^{235}U 靶如图 1 所示。

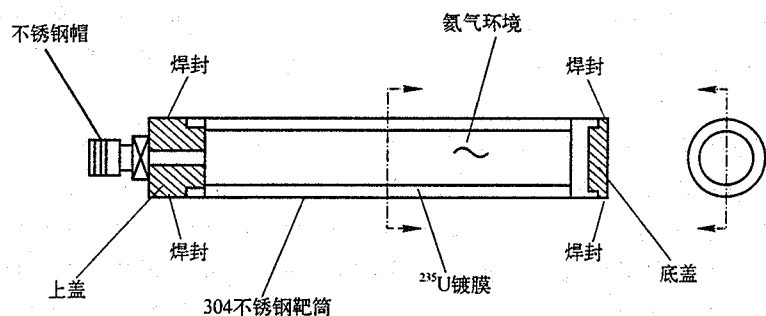


图 1 生产裂变钚的 ^{235}U 靶

1.2.3 质量检验

(1) 镀层的牢固性试验包括振荡试验和热冲击试验(室温至 500 °C),镀层松脱量应不大于 1%。

(2) 靶的泄漏检验:用氦质谱检漏仪进行检验,允许最大漏率为 $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。靶筒置于 300 °C 下烘烤 250 h 以及 500 °C 下烘烤 24 h,用放射性探测器检测应无明显泄漏。

1.2.4 辐照及 ^{99}Mo 的制备

反应堆辐照系统由电镀 ^{235}U 的密封靶筒和不锈钢外壳组成,用反应堆冷却水冷却,并置一铅块,以保证辐照时靶子处于水下。该电沉积 ^{235}U 靶是按照单次生产 $1.48 \times 10^{13} \text{ Bq}$ ^{99}Mo 产额来设计的。在中子注量率 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,辐照 100 h,然后冷却 1~2 d,冷却后靶件被转移到热室中,切开铀靶上端的盖子,向靶容器中注入 15 ml 浓 H_2SO_4 和 60 ml 10% 的 H_2O_2 以溶解 UO_2 。溶靶释放出的气体用液氮冷阱捕集,而含混合裂变产物的溶液

通过一根 Al_2O_3 色谱柱, ^{99}Mo 被 Al_2O_3 选择性吸附, 适当洗涤后用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{OH}$ 从 Al_2O_3 色谱柱中解吸 ^{99}Mo 。解吸下来的 ^{99}Mo 用强碱性大孔阴离子交换柱进行纯化以获得高比活度的医用 ^{99}Mo 。

2 从熔盐中电沉积铀

2.1 概况

利用丰度在 90% 以上的高丰度 ^{235}U (HEU) 生产医用的 ^{99}Mo , 是当前乃至今后相当长时间内世界范围 ^{99}Mo 的重要来源。但是近年来, 为了防止核扩散, 已经开始限制高丰度 ^{235}U 的使用, 因此, 以低丰度 ^{235}U (LEU) 作为靶材料进行裂变 ^{99}Mo 的生产是一个值得重视的发展趋势, 不少国家和地区的相关机构对此已进行了大量的研究, 有的已用于裂变 ^{99}Mo 的生产中。

低丰度铀是指 ^{235}U 含量低于 20% 的铀。因此, 为了获得同样活度的医用 ^{99}Mo , 与高丰度 ^{235}U 靶相比, 一个低丰度的 ^{235}U 靶必须包含至少五倍量的低丰度 ^{235}U 。用低丰度 ^{235}U 取代高丰度 ^{235}U 无论在靶结构的设计上还是在化学流程上都有很大差别。以电镀铀靶来说, 要在一个靶上沉积比原来多五倍量的铀, 单靠增加靶筒的体积几乎是不可能的, 因为内表面沉积 UO_2 的圆筒形靶的尺寸已经接近通常反应堆辐照用靶的极限, 采用低丰度 ^{235}U 后的新靶必须具备更大的铀沉积层厚度才能满足使用的要求。因此, 直接在靶筒上电沉积金属铀是唯一可行的方法, 因为金属铀的密度约为 UO_2 的两倍, 其热传导性也明显优于 UO_2 。但是电沉积用于反应堆辐照铀靶的足够纯的金属铀是很困难的。铀与氧、氮和碳可形成很稳定的化合物, 它还能还原很多普通耐熔氧化物。在低于铀熔点温度 (1130°C) 下, 各种方法生产的金属铀均呈细粉状, 它在空气中迅速氧化, 并难集结成金属块, 铀不能从水溶液中电解沉积, 但可以采用熔盐电解的方法沉积出来, 最早西屋电气公司曾研究熔盐电解质中金属燃料电沉积法, 该方法主要应用于从裂变产物中分离铀和钚。20 世纪 80 年代后期, 为了防止核扩散, 美国 Argonne 国家实验室 (ANL) 开始研究利用低丰度 ^{235}U 熔盐电沉积的方法研制生产裂变 ^{99}Mo 的铀靶。他们认为, 采用该方法制备的铀靶虽然必须在熔盐体系中, 在高温 (约 450°C) 和惰性气体保护下进行, 且沉积形态学趋向于树枝状, 但它具有满意的电沉积量和热传导系数, 因此该工艺还是很有发展前途的。

2.2 熔盐电沉积方法

金属铀可以从氟化物或氯化物熔盐体系中被沉积出来, 但是由于氟化物熔盐的强腐蚀性和受湿度的影响较大, 且操作所需的温度也比氯化物熔盐高, 所以一般采用氯化物熔盐电沉积金属铀 (工艺参数列于表 2)。

表 2 LiCl-KCl 熔盐体系电沉积铀工艺参数

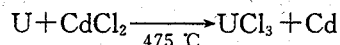
电解液	UCl_3 溶于 $\text{BaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-LiCl-NaCl}$ 共熔体系
阴极	镀镍的不锈钢
阳极	铀棒
温度/ $^\circ\text{C}$	450~500
气体环境	氩气或氙气

由于湿气的存在对电沉积铀的影响极大,所以熔盐中电沉积铀的过程是在充氮的手套箱中进行的。金属铀沉积层的质量还与电沉积时的电流密度、电流模式(直流电流或脉冲电流)以及基体金属的选择有关,最初研究较多的是采用直流电源来进行铀的电沉积,之后的研究发现采用脉冲电流可以获得更大的沉积量。靶的基体材料对电沉积铀的质量影响较大,在不锈钢、碳钢和铝合金表面电沉积铀的这些镀层均结合不牢固,镀层不均匀,而在镍和铜的表面附着力较好,因此,现在对基体金属材料的选择趋向于选用镀镍的不锈钢或铝合金。

常选用的电沉积体系有 LiCl-KCl (质量比 44.2%-55.8%), $\text{BaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-LiCl}$ (摩尔比 17.2%-28.8%-54.0%) 和 $\text{BaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-LiCl-NaCl}$ (摩尔比 14.9%-38.3%-34.0%-12.8%) 共熔体系,所有这些熔盐体系均加入 3%~6% 的 UCl_3 ,在这些熔盐中电沉积铀的效果都差不多。

2.2.1 制备电解液

在正式的电沉积开始前,需先进行电解液的制备,在坩锅中加入 450 g $\text{BaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-LiCl-NaCl}$ (14.9%-38.3%-34.0%-12.8%) 混合物以及 24 g CdCl_2 ,加热到 475 °C 使之熔化,然后在熔盐体系中加入 28 g 低丰度铀,继续加热、搅拌 24 h, U 与 CdCl_2 反应生成 UCl_3 和金属镉。



反应完毕停止搅拌,将该熔盐电解液移入电镀槽内,插入电极,阳极采用 ^{235}U 丰度约 12% 的低丰度铀棒,阴极为镀镍的不锈钢棒,电沉积体系温度 475 °C。

2.2.2 直流电沉积实验

在直流电沉积实验中采用了三种电流方式:(1) 阴极电流密度 $22.4\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,电沉积 12.17 h;(2) 阴极电流密度 $53.5\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,电沉积 4.83 h;(3) 阴极电流密度 $105\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,电沉积 2.5 h。三种电流方式通过阴极的电量均为约 $750\text{ mA}\cdot\text{h}$ 。研究发现,采用较小电流长时间电沉积的方式制备的铀靶与不锈钢底层结合最牢固,不易脱落。铀沉积层厚度可达近 $300\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,电流效率接近 100%,沉积层结构均匀致密。

2.2.3 脉冲电沉积实验

与直流电沉积一样,阳极采用丰度约 12% 的低丰度铀棒,电解液为溶有 6% UCl_3 的 $\text{BaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-LiCl-NaCl}$ 熔盐体系,熔盐体系温度 475 °C。电脉冲方式如下:(1) 120 mA, 15 s, 间歇 15 s;(2) 360 mA, 15 s, 间歇 15 s;(3) 采用高效直流电脉冲,电流峰值 175 mA, 100 ms, 间歇 40 ms,电沉积 6 h。整个过程的平均电流密度约为 $43\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,可以得到厚度为 0.3 mm ($580\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) 的铀沉积层,含 ^{235}U 约 $74\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,假设圆筒形铀靶的内表面积为 400 cm^2 ,则一个铀靶理论上可载带 30 g 左右的 ^{235}U 。

2.3 熔盐电溶法的设备估价

从熔盐体系中电沉积金属铀可以得到 $300\sim 500\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的铀沉积层,与水溶液体系中电沉积铀的 $50\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 相比大了将近一个数量级,因此可用于低丰度 ^{235}U 靶的制备。但是要实现熔盐体系中电沉积 ^{235}U 靶,工艺复杂,设备价格也较昂贵。美国 Argonne 国家实验室从 20 世纪 80 年代后期开始开展熔盐体系电沉积铀靶的设计和经费预算的工作,所需设备包括手套箱、远距离控制、空气净化、氧气和湿气检测装置、电加热设备和电沉积设备

等,大约需要 \$ 125 000(1989 年的估价),至今该方法仍处于实验阶段,还未正式应用于商业生产,熔盐法电沉积铀的实验装置如图 2 所示。

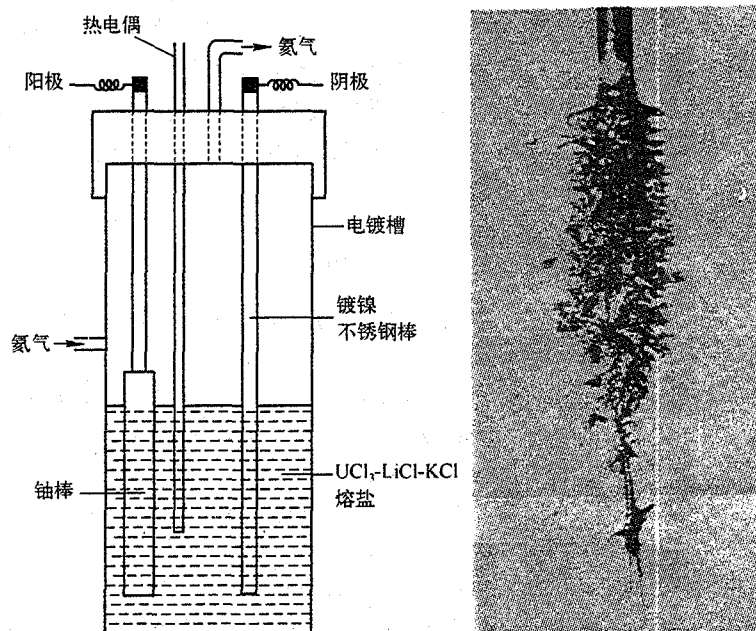


图 2 从熔盐中电沉积铀的实验装置及阴极沉积的树枝状的金属铀

2.4 其他 LEU 靶制备方法介绍

近年来,ANL 投入大量精力开展 LEU 代替 HEU 靶的研究,从 1998 年开始,Argonne 国家实验室与印度尼西亚的同位素生产中心(RPC)合作开始进行铀箔靶的制备工艺研究。其制备工艺简述如下:

低丰度铀加工成的 $130\ \mu\text{m}$ 厚的铀箔,首先要在熔融的铅浴中进行热处理($t > 668\ ^\circ\text{C}$),为了减小熔铅液的氧化,还需在加热时采用惰性气体保护。经热处理后的铀箔取出后快速冷却。铀箔表面电镀上一层厚度 $> 7\ \mu\text{m}$ 的镍或锌或者厚度 $> 14\ \mu\text{m}$ 的铝,用以屏蔽辐照后产生的裂变产物。铀箔装配在两个同心的壁厚 $380\ \mu\text{m}$ 的 304 不锈钢靶筒之间,内部充入氮气,两端焊封。根据靶的大小不同,该结构所制备的铀靶可包含 $30\sim 100\ \text{g}$ 的 $130\ \mu\text{m}$ 铀金属箔。辐照后从上端切开铀靶,抽出铀箔进行溶靶。

3 结束语

近年来,医用同位素使用量逐年增加,其中 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 的使用量约占核医学诊断显像药物的 80%,而 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 半衰期短(6 h),只能从其母体核素 ^{99}Mo (半衰期 66 h)获得。利用 CMRR 堆进行医用裂变 ^{99}Mo 的生产具有很好的社会效益和经济效益。在目前不具备冶金设备的条件下,研究采用电沉积法制备 ^{235}U 同位素靶件,结合溶靶工艺和同位素提取纯化工艺的研究,可制得产品纯度达到医用同位素产品纯度、符合药典要求的医用放射性同位素产品。

使用电沉积法制备铀靶具有沉积效率高、涂层牢固均匀、设备简单、条件易于控制等优

点。电沉积铀靶主要有两种工艺:水溶液体系电沉积铀由于其沉积量有限,因此主要用于高丰度 ^{235}U 靶和加速器 ^{233}U 靶的制备;而熔盐体系电沉积铀的工艺由于其沉积量大、电流效率高,可应用于低丰度铀靶的制备和高放废液中回收 ^{235}U 的工艺。 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 水溶液体系中电沉积 ^{235}U 靶的工艺方法较成熟,设备较简单,工程上容易实现,但如果由于特材管制的限制,只能采用低丰度铀来制备 ^{235}U 靶,则需研究熔盐体系金属铀的电沉积工艺,该方法工艺复杂,设备价格也较昂贵,但是我们认为该电沉积 ^{235}U 靶的工艺还是值得开发的,也是很有意义的,即使不用于医用裂变 ^{99}Mo 的生产也可以用于高放废液中 ^{235}U 的回收。

参考文献

- 1 Sameh A A, Ache H J. Production Techniques of Fission ^{99}Mo . Organized by the International Atomic Energy Agency, Karlsruhe, IAEA-TECDOC-515, 1989, 23~33
- 2 Burrell K A, Harrison R J. Development of the ^{99}Mo Process at CRNL. Fission Molybdenum for Medical Use, Organized by the International Atomic Energy Agency, Karlsruhe, IAEA-TECDOC-515, 1989, 23~33
- 3 Arino H, Kramer H H, McGovern J J, Thornton A K. Production of High Purity Fission Product Molybdenum 99. U. S. Patent 3, 799, 883, March 28, 1974
- 4 Arino H, Cosolito F J, Geotge K D, Thornton A K. Preparation of a Primary Target for the Production of Fission Products in a Nuclear Reactor. U. S. Patent 3, 940, 318, February 24, 1976
- 5 Massey C D, Miller D L, Carson S D. Feasibility Study of Medical Isotope Production at Sandia National Laboratories. SAND95-2703 Rev. O, Sandia National Laboratories, 1995
- 6 秦芝. 电沉积法制备 ^{233}U 同位素靶. 核技术, 1995, 18 (2)
- 7 Mirashi N N, Mathur J N, Prakash Satya. Studies on the Electrodeposition of Uranium on Aluminium. Applied Radiation and Isotopes UK, 1986, 37(4):358~359
- 8 Aggarwal S K, Shah P M, Duggal R K. Electrodeposition of Milligram Amounts of Uranium on Electropolished Stainless Steel Disks. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Letters, 1991, 154 (2):103~110
- 9 Cruz P A, Poledna R. Alpha-source Preparation by Electrodeposition. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 1990, 286(3):453~456
- 10 Vandergrift G F, Kwok J D, Marshall S L. Continuing Investigations for Technology Assessment of ^{99}Mo Production from LEU (Low Enriched Uranium) Targets. International RERTR meeting, Buenos Aires, Argentina, 28 Sep 1987, IAEA-TECDOC-515, 110~128, 1989
- 11 Vandergrift G F, Conner C, Bakel A. RERTR Progress in Mo-99 Production From LEU. 6th International Topical Meeting Research Reactor Fuel Management, Ghent, Belgium, March 17~20, 2002
- 12 Smirnov M V, Koryushin A P, Komarov V E. Influence of Fluoride Ions on Electrolytic Deposition of UO_2 from Molten Salt. J. Electrochem. Soc. 1968
- 13 G. Boisde, G. Chavin, H. Corion. Electroforming Pure Uranium at Molybdenum Cathode by Reduction of UCl_4 Dissolved in LiCl-KCl . Electrochim. Acta, 1961(14), 521
- 14 M. Kolodney. Preparation of the First Electrolytic Plutonium and of Uranium from Fused Chlorides. J. Electrochem. Soc. 1982(129), 2438