

基于 C30 加速器的¹⁰³Pd 制备工艺研究

温 凯^{1,2,3}, 马承伟^{1,2,3}, 褚浩森^{1,2,3}, 段 菲^{1,2,3}, 王晓明^{1,2,3},
李 光^{1,2,3}, 李 超^{1,2,3}, 赵紫宇^{1,2,3}, 王成志^{1,2,3}, 王春林^{1,2,3}

1. 原子高科股份有限公司, 北京 102413; 2. 国家原子能机构核技术(放射性药物工程转化)研发中心, 北京 102413;
3. 中国核工业集团有限公司放射性药物工程技术研究中心, 北京 102413

摘要: 组织间近距离治疗可以有效地杀死肿瘤细胞, 同时减少对肿瘤周围正常组织的损伤, 已成为治疗恶性肿瘤的有效手段。¹⁰³Pd 的半衰期为 16.96 d, 因其独特的衰变性质, 在近距离放射治疗领域具有显著优势。为了实现¹⁰³Pd 的规模化生产, 基于 Cyclone-30(C30)加速器对¹⁰³Pd 的制备工艺进行研究。以铜为靶基底, 利用脉冲电镀法在铜靶托上电镀铑金属。将镀铑靶片转移至 C30 固体靶站进行辐照, 束流能量为 16~18 MeV, 束流强度为 200 μA。为获得居里级¹⁰³Pd, 束流积分值应大于 10000 μA·h。辐照结束后将靶片转移至分离纯化热室, 采用硫酸氢钾高温熔融法溶解, 将金属铑转化为可溶性硫酸铑, 再使用 AG1-X8 阴离子交换树脂分离纯化。用 6 mol/L 盐酸和 0.03 mol/L 盐酸分别淋洗 Rh、Fe、Cu 和 Zn。最后用氯化铵-氨水(体积比 1:1)混合溶液解吸¹⁰³Pd。分别测定¹⁰³Pd 的放射性活度、放射性核纯度以及比活度。同时, 利用制备的¹⁰³Pd 料液, 对密封籽源制备进行了研究。检验结果显示, 制得的铑靶镀层平整致密、与铜基底结合牢固, 铑镀层质量厚度大于 150 mg/cm²。¹⁰³Pd 产能大于 37 GBq, 放射性核纯度大于 99.9%, 比活度可大于 875 GBq/mg, 活度浓度大于 6.2 GBq/mL, 能够满足密封籽源制备的要求。¹⁰³Pd 制备工艺稳定、质量可控, 达到了规模化生产能力, 为未来¹⁰³Pd 密封籽源的研究提供了稳定的核素来源。

关键词: ¹⁰³Pd; Cyclone-30 加速器; 铑靶制备; 加速器核素; 近距离放射治疗

中图分类号: TL92 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2024)05-0462-06

doi: 10.7538/hhx.2024.46.05.0462

Preparation Process of ¹⁰³Pd Based on C30 Cyclotron

WEN Kai^{1,2,3}, MA Cheng-wei^{1,2,3}, CHU Hao-miao^{1,2,3}, DUAN Fei^{1,2,3}, WANG Xiao-ming^{1,2,3},
LI Guang^{1,2,3}, LI Chao^{1,2,3}, ZHAO Zi-yu^{1,2,3}, WANG Cheng-zhi^{1,2,3}, WANG Chun-lin^{1,2,3}

1. High-Tech Atomic Co., Ltd., Beijing 102413, China; 2. China Atomic Energy Authority Center of Excellence on Nuclear Technology Applications for Engineering and Industrialization of Radiopharmaceuticals, Beijing 102413, China;
3. China National Nuclear Corporation Engineering Research Center of Radiopharmaceuticals, Beijing 102413, China

Abstract: Brachytherapy can kill cancer cells more effectively and make the normal tissues around the tumor free or less irradiated. It has become an effective means for the treatment of malignant tumors. ¹⁰³Pd has a half-life of 16.96 days and a significant advantage in the field of brachytherapy due to its unique decay properties. In order to achieve the large-scale production of ¹⁰³Pd, the preparation process based on Cyclone-30(C30) cyclotron was studied. The rhodium metal was electroplated on the copper target base by pulse electroplating method. The rhodium-plated target was transferred to C30 solid target station for irradiation with beam energy of 16-18 MeV, and the beam current was 200 μA. In order to obtain Curie-

level ^{103}Pd , the beam integral should be more than 10 000 $\mu\text{A}\cdot\text{h}$. After irradiation, the target was transferred to the separation and purification hot cell, the rhodium plating was separated from the target base first, then was ground into powder, and dissolved by high temperature melting of potassium bisulfate. The rhodium was converted into soluble rhodium sulfate, and the ^{103}Pd nuclide was separated and purified by AG1-X8 resin. The impurities of Rh, Fe, Cu and Zn were rinsed with 6 mol/L hydrochloric acid and 0.03 mol/L hydrochloric acid, respectively. At last, ^{103}Pd was desorbed with a mixed solution of ammonium chloride-ammonia mixed solution(volume ratio 1 : 1). The radioactive activity, radionuclide purity and specific activity of ^{103}Pd were measured respectively. The preparation of sealed seed core was studied by using the prepared ^{103}Pd feed solution. The results show that the rhodium plating layer is smooth and dense, and firmly bonded with the copper plate, the rhodium layers mass thickness is greater than 150 mg/cm^2 . The production capacity of ^{103}Pd is greater than 37 GBq, the radionuclide purity is greater than 99.9%, and the specific activity is greater than 875 GBq/mg, and activity concentrations greater than 6.2 GBq/mL. The preparation field of ^{103}Pd brachytherapy sources is more than 90%, it can meet the requirements. The ^{103}Pd preparation process is stable, and the quality is controllable. The large-scale production capacity has been reached, and it provides a stable source for the research of ^{103}Pd brachytherapy sources.

Key words: ^{103}Pd ; Cyclone-30 cyclotron; rhodium target preparation; radionuclide based-on cyclotron; brachytherapy

近距离治疗是一种重要的放射治疗手段,是将放射源引入到肿瘤体内或被肿瘤侵犯的组织中,利用放射源释放出的射线在小范围内对肿瘤进行破坏的一种治疗技术,此方法优点在于对周围正常组织辐照较小,使肿瘤组织本身得到高剂量的照射,实现对靶区的“精准打击”。特别对外照射难以控制的、难治的适应症具有独特的治疗优势。目前,国内获批可以上市的产品仅有 ^{125}I 密封籽源,产品及功效相对单一。

^{103}Pd 半衰期为 16.99 d,主要通过电子捕获衰变发射大量俄歇电子和低能 X 射线($\text{EC}, K_{\alpha}=20.1\text{ keV}$ (64.7%), $K_{\beta}=22.7\text{ keV}$ (12.3%))^[1],俄歇电子由于具有高的线性能量传递(LET)性质,使得它们能够诱导双链 DNA 断裂^[2]。此外,俄歇电子的辐射范围小于一个细胞直径,可以有效地照射目标细胞,同时在很大程度上不影响周围的健康组织。因此, ^{103}Pd 被制成密封籽源用于各种癌症肿瘤部位的间质近距离治疗植入物,治疗快速增殖的肿瘤,如眼癌和前列腺癌^[3-4]。随着近距离治疗放射性核素治疗领域的迅速发展,对核素 ^{103}Pd 的需求量也会快速增长。因此,建立稳定、规模化的 ^{103}Pd 制备工艺显得尤为重要。

制备 ^{103}Pd 的方法有多种,最初是在反应堆中通过 $^{102}\text{Pd}(n,\gamma)^{103}\text{Pd}$ 反应,然而由于该方法生产率低,以及富集 ^{102}Pd 靶材料的成本高等问题,导致转向使用回旋加速器生产 ^{103}Pd 。根据回旋加速

器中带电粒子的不同可分为 $^{103}\text{Rh}(d,2n)^{103}\text{Pd}$ 及 $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ 反应生产无载体的 ^{103}Pd ^[5]。目前最广泛使用的加速器生产方法是基于加速器质子辐照通过 $^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$ 核反应产生无载体的医用 ^{103}Pd ^[6-7]。

国内外已有 ^{103}Pd 的制备报道^[8-9]。张春富等^[8]用电镀铑箔靶,在 30 MeV 加速器上,以质子能量 21 MeV、束流强度为 200 μA 、辐照 120 h、最终经分离纯化后得到 35 GBq 的 ^{103}Pd , ^{103}Pd 放射性核纯度为 99.8%。邓雪松等^[9]采用脉冲电镀法进行了铑靶制备工艺研究,证明采用脉冲电镀法可以用于制备厚铑靶,但工艺稳定性较差,虽然可以制备居里级 ^{103}Pd ,但无法满足批量化生产的需求。在此基础上,马承伟等^[10]通过改变铑镀液分子构型、选取合适的电镀添加剂,对脉冲电镀工艺参数进行了系统研究,建立了稳定的厚铑靶制备工艺。Sadeghi 等^[1]以质子能量 18 MeV、束流强度为 200 μA 、辐照 15 h、最终经分离纯化后得到 25.9 GBq 的 ^{103}Pd ,放射性核纯度大于 99%。目前,国外研究机构已形成稳定的 ^{103}Pd 生产工艺,并实现了 ^{103}Pd 的商业化供应。而国内受限于加速器硬件条件以及制备工艺的不稳定,近 20 年来 ^{103}Pd 在国内市场处于空白状态。

为了实现 ^{103}Pd 的批量化生产,本工作拟分别对制靶、溶靶以及分离纯化等工艺、质量控制方法开展研究,建立稳定的 ^{103}Pd 制备工艺。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

ML303 电子天平, 精度 0.0001 g, 德国 Mettler Toledo 公司; 高频脉冲整流器, 北京浩越天电源技术有限公司; 置顶式电动搅拌器, 常州恩培仪器制造有限公司; 超级恒温水浴锅, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂; 高纯锗多道 γ 谱仪, 美国 ORTEC 公司; Agilent 7800 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS), 安捷伦科技 (中国) 有限公司; NB10L 无油隔膜真空泵, 九联科技; LC-MSH-Pro 磁力搅拌器, 湖南力辰仪器科技有限公司; SX-B01123 微型节能箱式电炉, 天津市中环实验电炉有限公司; ST-M100 高通量组织研磨机, 北京旭鑫盛科仪器设备有限公司; CRC-55tR 活度计, CAPINTEC 公司; LW400LMDT 金相显微镜, 上海测维光电技术有限公司。

硫酸、氢氧化钠、盐酸、氯化铵、氨水、乙二胺四乙酸二钠 (Na_2EDTA)、水合肼 ($\text{H}_4\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、电镀添加剂 A, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 10% (铑质量分数) 硫酸铑, 上海拓思化学有限公司; 紫铜靶片, 非标加工; 超纯水, 美国 Millipore 纯水仪制备; 0.45 μm PTFE 滤膜, Omnipore 公司; 硫酸氢钾, 分析纯, 麦克林公司; AG-1 X8 树脂, 粒径 0.074~0.149 mm, 美国 Bio-rad 公司。

1.2 制靶

^{103}Pd 通过质子束轰击铑靶获得, 铑靶通过脉冲电镀工艺制备获得, 而为了保证活化率 (图 1^[11]), 铑镀层质量厚度应大于 150 mg/cm^2 。

在以往的工作中, 本研究团队已经实现了厚铑靶的稳定制备^[10]。首先, 为了降低铑金属内部应力, 将硫酸铑溶液进行改性处理, 调节镀液硫酸浓度至 0.5~3.0 mol/L, 加入电镀添加剂 A 使其质量浓度为 6~18 g/L。采用铜作为靶片材料, 靶片面积约 100 $\text{mm} \times 10 \text{ mm}$ 。在反应温度为 20~40 $^\circ\text{C}$ 、

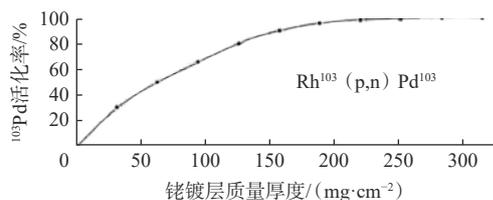


图 1 ^{103}Pd 活化率与铑镀层质量厚度关系^[11]

Fig. 1 The relationship between the activation rate of ^{103}Pd and the mass thickness of the rhodium coating^[11]

电流密度为 8~16 mA/cm^2 、搅拌速率 500~1000 r/min 下进行电镀实验。脉冲电源参数: 正脉宽 100 μs , 周期 1.0 ms, 占空比 10%。

1.3 辐照

将制备的靶片放入 C30 加速器固体靶系统中, 核反应为 $^{103}\text{Rh}(\text{p}, \text{n})^{103}\text{Pd}$ 。文献 [7] 报道, ^{103}Pd 的产额随着质子能量的提高而增高, 当质子能量增加至 18 MeV 以上时, 产额增加趋势开始变得不明显。在 18~20 MeV, ^{103}Pd 实际产量只增加了不到 4%。且当质子能量高于 18 MeV 时, 开始生成半衰期杂质 $^{102}\text{Rh}^{\text{m}}$ 、 $^{102}\text{Rh}^{\text{g}}$, 当质子能量进一步增加至 20 MeV 以上时, 则会有放射性 $^{101}\text{Rh}^{\text{g}}$ 、 ^{101}Pd 和 $^{101}\text{Rh}^{\text{m}}$ 杂质的生成。综合考虑, 适宜的质子能量为 16~18 MeV, 束流强度为 200 μA 。为了获得居里级 ^{103}Pd 核素, 束流积分值应达到 10000 $\mu\text{A} \cdot \text{h}$ 以上。

1.4 分离纯化

(1) 溶靶

将靶片置于专用的切靶装置卡槽内, 使用液压机切下铑镀层。随即将铑镀层转移至烧杯内, 接通尾气处理装置, 加入 9 mol/L 硝酸溶解残余铜基底, 用高纯水冲洗铑镀层 2~3 次, 加热蒸干, 得到干燥的铑镀层。

采用硫酸氢钾-烯酸熔融法溶解铑, 此方法是在一定温度下, 将铑金属与硫酸氢钾熔融反应约 2~3 h, 生成 $\text{Rh}_2(\text{SO}_4)_3$ 与 NaOH 的混合烧结物, 最后用稀盐酸将烧结物溶解, 过滤获得铑溶液, 铑溶液加稀碱中和水解沉淀出 $\text{Rh}(\text{OH})_3$, 沉淀物再用盐酸复溶得到氯酸铑溶液^[12-13]。

铑金属粒径、硫酸氢钾用量以及熔融温度均会对铑溶解率产生影响。因此, 采用研磨机在不同转速 (1600~1800 r/min) 下进行铑金属的研磨, 探究铑粉粒径对铑溶解率的影响。按照铑和硫酸氢钾质量比=1 : X (X=20、30、40、50) 的比例称取硫酸氢钾与铑粉混合均匀, 探究硫酸氢钾用量对铑溶解率的影响。将微型节能箱式电炉设置不同温度进行熔融实验, 探究熔融温度对铑溶解率的影响。

(2) 离子交换分离

取预先装好的 AG1-X8 阴离子交换树脂柱, 用 6 mol/L HCl 清洗, 确保离子交换柱的平衡。将待分离的氯化铑溶液上柱, 分别使用 6 mol/L HCl 和 0.03 mol/L HCl 淋洗 Rh 和 Fe、Cu、Zn 杂质, 最

后用氯化铵-氨水(1 mol/L, 体积比 1 : 1)混合溶液解析¹⁰³Pd, 即可得¹⁰³Pd 产品^[14]。

1.5 质量控制

取¹⁰³Pd 样品, 使用活度计测定放射性活度, HPGe γ 谱仪测定放射性核纯度, pH 试纸测定 pH 值, ICP-MS 测定天然 Pd 含量, 并根据活度值计算¹⁰³Pd 的比活度。

1.6 ¹⁰³Pd 源芯制备

以 ϕ 0.5 mm \times 3.0 mm 碳棒为载体, 使用上述¹⁰³Pd 料液, 制备¹⁰³Pd 密封籽源源芯^[15]。化学沉积条件为: 2 g/L PdCl₂、65 g/L Na₂EDTA、 ϕ =16.9%

NH₃·H₂O、 ϕ =0.5% H₄N₂·H₂O, pH=10, 时间 90 min, 温度 50 $^{\circ}$ C。

2 结果与讨论

2.1 制靶工艺

脉冲电镀工艺制备厚铑靶的条件列入表 1, 得到样品 1、2、3。样品 2 的实物照片示于图 2。由表 1 和图 2 可知: 采用脉冲电镀法可稳定制备厚铑靶, 且铑镀层质量厚度均大于 150 mg/cm², 镀层较厚、平整致密(图 3), 未出现明显裂纹, 与铜靶托基底结合牢固, 可以用于¹⁰³Pd 的生产。

表 1 脉冲电镀法制备厚铑靶条件

Table 1 Preparation conditions of thick rhodium target by pulse electroplating

样品	硫酸浓度/(mol·L ⁻¹)	电镀添加剂A浓度/(g·L ⁻¹)	电流密度/(mA·cm ⁻²)	搅拌速率/(r·min ⁻¹)	电镀温度/ $^{\circ}$ C	镀层质量厚度/(mg·cm ⁻²)
1	1.23	7.02	10.54	1000	20.08	220.46
2	1.50	14.02	9.99	1000	30.00	164.75
3	1.50	14.00	9.99	1000	30.00	157.94



图 2 样品 2 的厚铑靶

Fig. 2 Thick rhodium target of sample 2



图 3 脉冲电镀法制备的厚铑靶(\times 200)

Fig. 3 Metallographic microscope photograph of target(\times 200)

2.2 辐照工艺

辐照实验结果列入表 2。由表 2 可知: 采用质子能量 16.5 MeV, 平均流强 180~210 μ A, 束流积分值可以达到 12 000 μ A·h 以上。在此辐照条件下, 镀层稳定未开裂, 且在镀铑层上可显著观察

到束斑形状。说明在此条件下镀层稳定。产品产额可达到 3.62 MBq/(μ A·h) 以上, 可满足规模化生产居里级¹⁰³Pd 要求。

表 2 辐照实验结果

Table 2 Irradiation experiment results

质子能量/MeV	平均流强/ μ A	束流积分值/(μ A·h)	产额/(MBq· μ A ⁻¹ ·h ⁻¹)
16.5	210	12 121	4.62
16.5	200	12 017	3.62
16.5	180	12 400	4.89

2.3 分离纯化工艺

(1) 溶靶

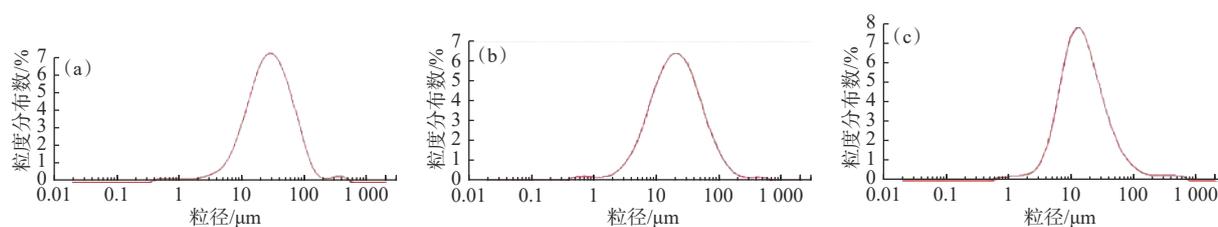
研磨转速将直接影响铑粉粒径分布, 不同研磨条件下所得铑粉粒径分布列入表 3, 图 4 为对应条件下的粒径分布图。由表 3 可知, 随着研磨

表 3 不同研磨条件下所得铑粉粒径分布

Table 3 Particle size distribution of rhodium powder obtained under different grinding conditions

No.	研磨条件	D10	D50	D90
1	1 600 r/min 2 min	8.407 μ m	26.737 μ m	75.398 μ m
2	1 700 r/min 2 min	5.721 μ m	19.782 μ m	65.623 μ m
3	1 800 r/min 2 min	5.409 μ m	14.102 μ m	46.523 μ m

注: D10、D50和D90分别代表一个样品的累计粒度分布数达到10%、50%或90%时所对应的粒径



(a)——1 600 r/min 2 min, (b)——1 700 r/min 2 min, (c)——1 800 r/min 2 min

图4 不同研磨条件下粒径分布图

Fig. 4 Particle size distribution under different grinding conditions

转速的提高, 所得铑粉累计粒度分布数达到 90% 时, 所对应的粒径逐渐下降。不同粒径条件下铑溶解率列入表 4。由表 4 可知: 粒径越小比表面积越大, 有利于铑粉的溶解, 当 $m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4) = 1 : 50$ 时, 在 1800 r/min 下研磨 2 min, 铑溶解率可以达到 98.1%。

表 4 不同研磨条件下铑溶解率

Table 4 Rhodium solubility under different grinding conditions

No.	研磨条件	$m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4)$	温度/°C	铑溶解率/%
1	1 600 r/min 2 min	1 : 50	700	55.1
2	1 700 r/min 2 min	1 : 50	700	83.1
3	1 800 r/min 2 min	1 : 50	700	98.1

硫酸氢钾作为反应物, 用量越多, 铑的溶解越彻底, 但是硫酸氢钾用量过大也会延长后续离子交换分离的时间。探究不同硫酸氢钾用量对铑溶解率的影响, 结果列入表 5。由表 5 可知: 随着硫酸氢钾比例的提高, 铑溶解率不断提高, 当 $m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4) = 1 : 50$ 时, 铑溶解率可达到 99.6%。因此, 后续实验选择 $m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4) = 1 : 50$ 的比例条件。

表 5 不同硫酸氢钾用量下铑溶解率

Table 5 Rhodium solubility under different potassium bisulfate dosage

No.	$m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4)$	温度/°C	铑溶解率/%
1	1 : 20	700	50.5
2	1 : 30	700	72.8
3	1 : 40	700	87.5
4	1 : 50	700	99.6

注: 1 800 r/min 研磨 2 min

称取 1 g 铑镀层碎片, 在 1800 r/min 条件下研磨 2 min 后, 称取 30 g 硫酸氢钾与铑粉混合均匀, 分别在 550、700、900 °C 下反应, 铑溶解率列入表 6。

由表 6 可知: 随着反应温度从 550 °C 增加到 700 °C, 铑溶解率由 65.4% 提高到 72.8%, 随着温度进一步增加到 900 °C, 由于硫酸氢钾在高温环境下分解为焦硫酸钾, 导致铑粉溶解率为 0, 因此后续采用 700 °C 作为反应温度。

表 6 不同温度下铑溶解率

Table 6 Rhodium solubility at different temperatures

No.	$m(\text{Rh}) : m(\text{KHSO}_4)$	温度/°C	铑溶解率/%
1	1 : 30	550	65.4
2	1 : 30	700	72.8
3	1 : 30	900	0.0

注: 1 800 r/min 研磨 2 min

(2) 离子交换分离

根据 Pd^{2+} 和 Rh^{3+} 在 AG-1 X8 树脂上的亲和力不同, 用离子交换法分离钯和铑离子, 结果示于图 5。由图 5 可知: 样品在 6 mol/L HCl 上柱后, 继续以该酸度盐酸淋洗对 Rh 的去除效果较好, 铑的去除率可达到 99.99%, 随后使用 0.03 mol/L HCl 淋洗去除 Fe 等杂质, 便于后续 Pd 的解吸。使用 10 mL 氨水-氯化铵溶液解吸 Pd, 回收率可稳定达

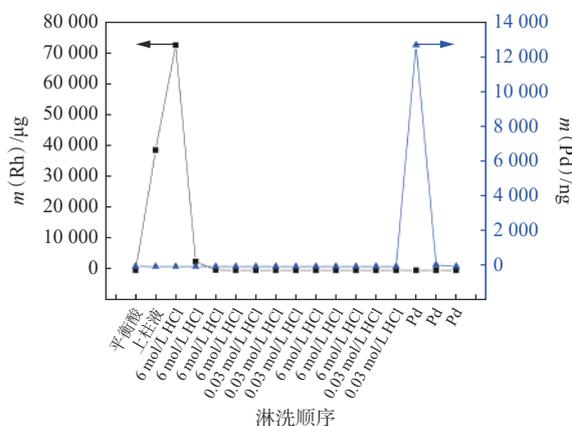


图 5 AG-1 X8 树脂 Rh、Pd 淋洗曲线

Fig. 5 Elution profile of Rh, Pd in AG-1 X8 resin

到95%以上。

2.4 ¹⁰³Pd 制备

制备的¹⁰³Pd 相关数据列于表7。由表7可知:单批产量均达37 GBq 以上,产额较高,可达3.6 MBq/($\mu\text{A}\cdot\text{h}$)以上。图6为¹⁰³Pd 溶液的 γ 图谱,¹⁰³Pd 特征 γ 光子能量为39.74 keV 和357.40 keV,放射性核纯度大于99.9%,比活度大于875 GBq/mg,活度浓度大于6.2 GBq/mL。

表7 ¹⁰³Pd 的制备
Table 7 Preparation of ¹⁰³Pd

序号	产量/ GBq	产额/ (MBq· $\mu\text{A}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	比活度/ (GBq·mg ⁻¹)	活度浓度/ (GBq·mL ⁻¹)	放射性 核纯度/%	pH
1	55.94	4.625	1093	7.992	>99.9	9.3
2	43.51	3.626	932	6.216	>99.9	9.3
3	60.61	4.884	875	8.658	>99.9	9.3

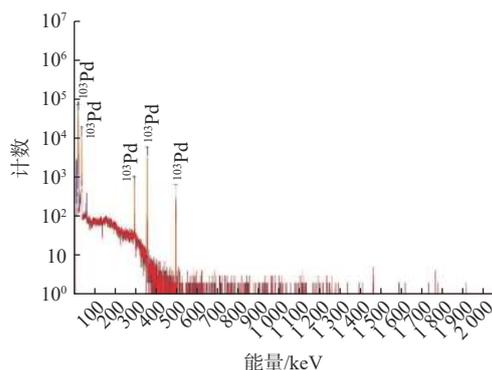


图6 ¹⁰³Pd 溶液的 γ 图谱

Fig. 6 Gamma spectrum of ¹⁰³Pd solution

2.5 ¹⁰³Pd 源芯制备

使用制备的¹⁰³Pd 料液,制备密封籽源源芯反应率分别为95.6%、92.3%、97.5%,均大于90%,本工艺制备的¹⁰³Pd 料液可以满足¹⁰³Pd 密封籽源制备的要求。

3 结论

基于C30 加速器建立了一套稳定的核素¹⁰³Pd 规模化制备工艺,解决了制靶、溶靶以及分离纯化关键技术,制备的¹⁰³Pd 单批产量可以达到37 GBq 以上,放射性核纯度大于99.9%,比活度大于875 GBq/mg,活度浓度大于6.2 GBq/mL。产品质量稳定可控,可用于密封籽源研究,实现了国内核素¹⁰³Pd 的规模化制备,为国内¹⁰³Pd 相关药物

开发与转化提供了稳定的核素来源。

参考文献:

- [1] Sadeghi M, Afarideh H, Raisali G, et al. Electroplating/electrodissolution/recovery cycle for rhodium target used for an industrial scale cyclotron production of palladium-103[J]. *Radiochim Acta*, 2006, 94(4): 217-221.
- [2] Jensen A I, Zhuravlev F, Severin G, et al. A solid support generator of the Auger electron emitter rhodium-103m from [¹⁰³Pd]palladium[J]. *Appl Radiat Isot*, 2020, 156: 108985.
- [3] Sadeghi M, Enferadi M, Shirazi A. External and internal radiation therapy: past and future directions[J]. *J Cancer Res Ther*, 2010, 6(3): 239-248.
- [4] Saidi P, Sadeghi M, Shirazi A, et al. Monte Carlo calculation of dosimetry parameters for the IR08-brachytherapy source[J]. *Med Phys*, 2010, 37: 2509-2515.
- [5] Tárkányi F, Hermanne A, Király B, et al. New cross-sections for production of ¹⁰³Pd: review of charged particle production routes[J]. *Appl Radiat Isot*, 2009, 67(9): 1574-1581.
- [6] Saidi P, Sadeghi M, Enferadi M, et al. Investigation of palladium-103 production and IR07-¹⁰³Pd brachytherapy seed preparation[J]. *Ann Nucl Energy*, 2011, 38(10): 2168-2173.
- [7] Hermanne A, Sonck M, Fenyvesi A, et al. Study on production of ¹⁰³Pd and characterisation of possible contaminants in the proton irradiation of ¹⁰³Rh up to 28 MeV[J]. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect B Beam Interact Mater At*, 2000, 170(3-4): 281-292.
- [8] 张春富,汪勇先,张秀利,等.无载体¹⁰³Pd 的加速器制备[J]. *核化学与放射化学*, 2001, 23(3): 163-167.
- [9] 邓雪松,李大康,解向前,等. Cyclone-30 加速器照射用铑靶的研制[J]. *原子能科学技术*, 2002, 36(增刊 1): 403-405.
- [10] 马承伟,段菲,褚浩森,等.加速器生产¹⁰³Pd 的厚铑靶制备工艺研究[J]. *同位素*, 2024, 37(1): 55-63.
- [11] Butler T A, Pinajian J J. Cyclotron-produced radioisotopes(I): ORNL-TM663 [R]. Washington: Union Carbide Corporation, 1963.
- [12] 刘时杰. 铂族金属矿冶学[M].北京:冶金工业出版社, 2001.
- [13] 杨春吉.从废铑催化剂中提取铑粉[J]. *贵金属*, 2002, 23(4): 6.
- [14] 王晓明,段菲,马承伟,等.¹⁰³Pd 核素分离纯化方法研究及质量控制[J]. *同位素*, 2023, 36(6): 612-619.
- [15] Li Z Y, Gao H B, Deng X S, et al. Preparation of ¹⁰³Pd brachytherapy seeds by electroless plating of ¹⁰³Pd onto carbon bars[J]. *Appl Radiat Isot*, 2015, 103: 128-30.