

$^{94,95}\text{Sr}$ 快化分离方法的研究

崔春盛, 丁有钱*, 王秀凤, 白 龙, 周子钧

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要:为精确测量 $^{94,95}\text{Sr}$ 的衰变数据,需制备出高活度、高纯度的 $^{94,95}\text{Sr}$ 样品。为去除或降低裂变产物体系中放射性 Sr 的其他同位素,在分析相关衰变链的各核素的累积产额和半衰期基础上采用了“短照快分”的分离模式,并以 P204 萃取色层快速提取和 Sr-Spec 萃取色层快速纯化相结合为手段,建立了快速分离 $^{94,95}\text{Sr}$ 的化学流程,研制了模块化快速化学分离装置。总操作时间不超过 60 s,验证整个流程的化学回收率为 40%,对主要干扰核素的去污因子均可达 10^2 以上,满足衰变数据测量的要求。

关键词: ^{94}Sr ; ^{95}Sr ; 快化分离装置; 萃取色层法

中图分类号:O657.4 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2023)04-0316-07

doi:10.7538/hhx.2023.YX.2022021

Rapid Separation of $^{94,95}\text{Sr}$

CUI Chun-sheng, DING You-qian*, WANG Xiu-feng, BAI Long, ZHOU Zi-jun

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(126), Beijing 102413, China

Abstract: In order to accurately measure the decay data of $^{94,95}\text{Sr}$, it is necessary to prepare $^{94,95}\text{Sr}$ samples with high activity and high purity. To remove or reduce other radioactive isotopes of strontium in the fission product system, based on the analysis of the cumulative yield and half-life of each nuclide in the relevant decay chain, the separation mode of “Short-time irradiation and rapid separation” is adopted, and the chemical process for rapid separation of $^{94,95}\text{Sr}$ is established by combining the rapid extraction of P204 extraction chromatography with the rapid purification of Sr-Spec extraction chromatography, a modular rapid chemical separation device is developed. The total operation time of the device is no more than 60 s, the chemical recovery rate is 40%, and the decontamination factor for the main interfering nuclides can reach more than 10^2 , meeting the requirements of decay data measurement.

Key words: ^{94}Sr ; ^{95}Sr ; rapid separation device; extraction chromatographic

$^{94,95}\text{Sr}$ 是核裂变早期快速测量的重要监测核素,但其衰变数据(如半衰期)文献值差异较大,在 1959—1986 年的报道中, ^{94}Sr 的半衰期数据范围为 $72\sim 84\text{ s}^{[1-12]}$, ^{95}Sr 的半衰期数据范围为 $23.8\sim$

$48\text{ s}^{[1-7,13]}$ 。为精确测量 $^{94,95}\text{Sr}$ 的衰变数据,须先制备出高活度、高丰度的 $^{94,95}\text{Sr}$ 样品。 $^{94,95}\text{Sr}$ 是丰中子核素,只能从新的裂变产物中分离制备。但由于 $^{94,95}\text{Sr}$ 的半衰期极短,新生的裂变产物体系组

成又十分复杂，^{94,95}Sr的制备十分困难。Norris等^[2]利用氢氧化钇沉淀法分离 Sr 和 Y 之后通过^{94,95}Y的独立产额计算了^{94,95}Sr的半衰期，避免了直接制备^{94,95}Sr样品。但由于氢氧化钇沉淀中存在1%左右的Sr无法去除，校正时引入了更多误差，这种方法测得的半衰期等数据精度不高。Tamai等^[4]及Kiso等^[11]利用快速纸上电泳法从裂变产物中分离制备了^{94,95}Sr样品并采用γ直接测定法获得了半衰期和γ分支比等核数据。但纸上电泳法操作较为繁琐，对色层纸进行剪取操作时人员受照剂量大，分离速率比较慢，因此制得的样品活度较低，测量结果有较大误差。Grapengiesser^[5]、Engler^[6]、Okano等^[7,12]使用在线同位素分离装置分离得到了^{94,95}Sr样品。但在线同位素分离装置需较长时间收集才能得到足够量的样品。为此，本工作拟提出采用快速色层柱分离的方法分离制备高丰度、高比活度的^{94,95}Sr，并研制一套快化分离装置。

1 技术路线与时间选择

^{94,95}Sr是丰中子短寿命核素，通常从²³⁵U新生的裂变产物中分离获得。未裂变的U和产物中的其他元素可以通过化学分离去除，而Sr同位素有着相同的化学性质，不能通过化学方法分离，因此直接从裂变产物中提取^{94,95}Sr，产品中不可避免地存在同位素干扰。裂变产物中会对^{94,95}Sr产生干扰的Sr同位素主要是^{91,92,93}Sr，其他的放射性Sr同位素要么会在分离前衰变殆尽（如^{96,97}Sr），要么半衰期远远高于^{94,95}Sr，生成的活度极低（如^{89,90}Sr），将^{91,92,93,94,95}Sr的半衰期和产额数据列入表1。图1是质量数(A′)为91、92、93、94、95的核素衰变链。由图1可知：^{94,95}Sr的母体半衰期极短，很快就会衰变为Sr，因此目标核素不能采取“两步法^[15]”或“三步法^[16]”等方法从母体通过化

学性质差异进行分离。

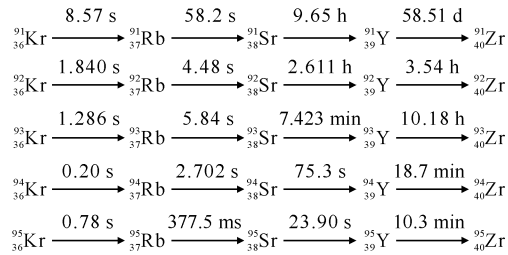


图1 A′=91、92、93、94、95的核素衰变链
Fig. 1 Decay chains of A′=91, 92, 93, 94, 95

在脉冲堆辐照含1 mg ²³⁵U的硝酸铀酰液体靶，取中子注量率为1.0×10¹⁴/(cm²·s)，²³⁵U的反应截面为582 b，^{91,92,93,94,95}Rb的累积产额分别取5.63%、4.83%、3.50%、1.50%、0.66%，^{91,92,93,94,95}Sr的独立产额分别取0.25%、1.08%、2.57%、4.51%、4.54%。活度按照式(1)进行计算。

$$A = \frac{N\sigma\phi\left(\frac{Y_1[\lambda_1(1 - e^{-\lambda_2 T})e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2(1 - e^{-\lambda_1 T})e^{-\lambda_1 t}]}{\lambda_1 - \lambda_2} - Y_2(1 - e^{-\lambda_2 T})e^{-\lambda_2 t}\right)}{(1)}$$

式中:A为核素的活度,Bq;φ为中子注量率,cm⁻²·s⁻¹;Y₁和Y₂分别为核素母体的累积产额和核素的独立产额;σ为靶核的反应截面,b,1 b=10⁻²⁸ m²;λ₁和λ₂分别为核素母体和核素的衰变常数,s⁻¹;T为辐照时长,s;t为冷却时长,s;N为靶核的原子数。

^{94,95}Sr与^{91,92,93}Sr的活度比与辐照时长的关系曲线示于图2。由图2可知，⁹⁴Sr和⁹⁵Sr对^{91,92,93}Sr的活度比均随辐照时长的增加而下降，这是由于⁹⁴Sr和⁹⁵Sr的半衰期明显小于其他同位素。因此，在保证样品中^{94,95}Sr有足够活度的前提下，应选择尽可能短的辐照时间，这样才能降低样品中^{91,92,93}Sr与目标核素^{94,95}Sr的活度比，减少它们对测量的干扰。

从图1可以看出，^{94,95}Sr的母体^{94,95}Rb半衰期非常短，且^{94,95}Sr的独立产额非常高，大量^{94,95}Sr由衰变直接产生而非由^{94,95}Rb衰变而来，因此在辐照结束后的短时间内，产物中就有大量的^{94,95}Sr。相比之下，^{91,92,93}Sr的母体半衰期较长，独立产额也比较低，因此辐照结束后的短时间内在产物中含量较少，随着冷却时间增加才慢慢上升。由于这些特点，辐照后的样品越早进行Sr-Rb分

表1 裂变产物中Sr的放射性同位素 ^[14]			
Table 1 Radioactive isotope of Sr in fission product ^[14]			
核素	热中子诱发 ²³⁵ U裂变的累积产额/%	独立产额/%	半衰期
⁹¹ Sr	5.85	0.25	(9.65±0.06) h
⁹² Sr	6.03	1.08	(2.611±0.017) h
⁹³ Sr	6.25	2.57	(7.423±0.03) min
⁹⁴ Sr	6.11	4.51	(75.3±0.2) s
⁹⁵ Sr	5.44	4.54	(23.90±0.14) s

离,得到的样品中^{94,95}Sr的活度比就越高。图 3 为使用式(1)分别计算不同的 Sr-Rb 分离时间下^{94,95}Sr与⁹³Sr的活度比,可以看出,越早进行 Sr-Rb 分离,对^{94,95}Sr与⁹³Sr的活度比越有利,这与前面的分析相符合。

综上,为确保分离后的^{94,95}Sr样品中,^{91,92,93}Sr的相对活度尽可能小,应在保证样品有足够的绝对活度的基础上,尽可能选择短的辐照时间,即“短照”,并在辐照后尽快分离,分离耗时越短越好,即“快分”,由此确定了“短照快分”的分离原则。

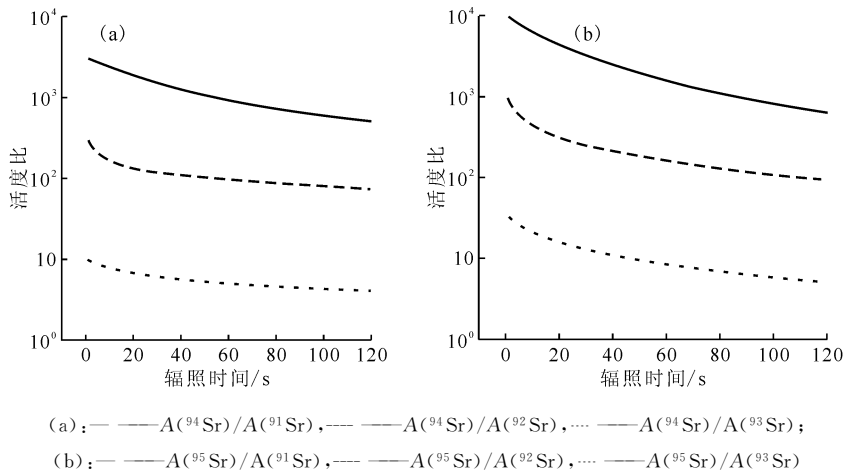


图 2 ⁹⁴Sr(a)、⁹⁵Sr(b)与^{91,92,93}Sr的活度比随辐照时长的变化
Fig. 2 Activity ratio of ⁹⁴Sr(a), ⁹⁵Sr(b) and ^{91,92,93}Sr vs. irradiation time

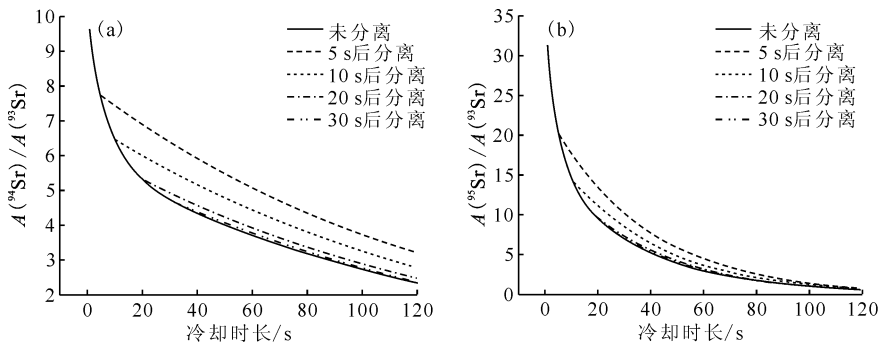


图 3 不同分离时间下⁹⁴Sr(a)、⁹⁵Sr(b)与⁹³Sr的活度比随冷却时长的变化
Fig. 3 Activity ratio of ⁹⁴Sr(a), ⁹⁵Sr(b) and ⁹³Sr vs. cooling time at different separation time

2 化学分离流程

从裂变产物体系中分离^{94,95}Sr时,除了需要降低^{91,92,93}Sr的活度比,还应重点考虑⁹⁵Y、^{107,109}Ru、¹³⁶Te、¹³⁷I、¹⁴⁵La、¹⁴⁷Ce、¹⁵¹Pr、¹⁵³Nd等核素的去污,因为这些核素的部分 γ 射线能量与^{94,95}Sr的相近,会干扰测量。另外,U元素是辐照后样品中占绝大多数的基体,Y是Sr的衰变子体,Ba与Sr的化学性质极为接近,这些元素也要纳入考虑。因此,需要选择快速的化学分离方法,实现Sr与U、Y、Ba、Ru、Te、I、La、Ce、Pr、Nd等元素的分离,去污因子需要达到 10^2 以上,以保证不会影响^{94,95}Sr的 γ 测量。

方法主要包括两部分。第一部分主要是从含有大量U基体的裂变产物体系中快速地分离出Sr,优先保证分离的速度和收率,去除样品中的U和大部分杂质,为下一步的纯化打好基础。根据这些要求,选择使用P204树脂柱萃取色层法^[17];第二部分主要在于将第一步分离后得到的样品进行进一步的纯化,从而快速得到高丰度、高纯度的^{94,95}Sr样品。这一步的关键在于选择性,因此选择使用Sr-Spec树脂萃取色层法^[18-19]。由此设计实验确定分离条件。

2.1 试剂和仪器

硝酸(优级纯)、硝酸锶(分析纯),国药集团

化学试剂有限公司;P204 树脂,0.10~0.15 mm,核工业北京化工冶金研究院;锶标准溶液,1 000 mg/L,国家有色金属及电子材料分析测试中心;锶树脂,0.10~0.15 mm,法国 Eichrome 公司。

BP211D 型电子天平,精度为十万分之一,德国 Sartorius 公司;ZD-85 型气浴恒温振荡器,江苏金坛市金城国胜实验仪器厂;TW-1A 型单级旋片式真空泵,温岭市挺威真空设备有限公司;ICAP-Pro 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),赛默飞世尔科技(中国)有限公司;Tri-Carb2910 型液体闪烁计数器,PerkinElmer 公司。

2.2 实验方法

硝酸浓度实验:取不同硝酸浓度的 Sr 溶液与干树脂在离心管中混合,使用摇床达到吸附平衡,过滤后用 ICP-OES 测量液相中 Sr 浓度。

吸附时间实验:将确定硝酸浓度的 Sr 溶液与干树脂在离心管中混合并振荡,然后使用抽滤装置进行快速固液分离,用 ICP-OES 测量液相中 Sr 浓度。

2.3 吸附分配系数的计算

得到液相中 Sr 的浓度后,按照式(2)计算吸附分配系数。

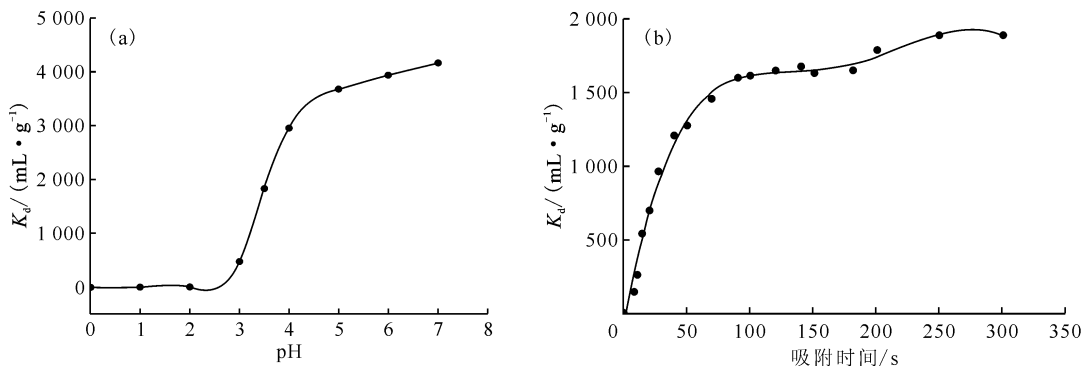
$$K_d = \frac{(\rho_0 - \rho_i)V}{\rho_i m} \quad (2)$$

式中: ρ_0 、 ρ_i 为吸附前后液相中 Sr 的质量浓度, g/L; V 为液相体积, mL; m 为固相质量, g。

3 结果和讨论

3.1 P204 树脂萃取色层柱对 Sr 的分离

P204 树脂对 Sr 的吸附分配系数随溶液 pH 值和吸附时间的变化曲线示于图 4。由图 4 可以看出:随着 pH 值的增加, Sr 在 P204 树脂上的吸附分配系数迅速增加,在 pH=4 时曲线趋于平缓,吸附条件为低酸吸附,高酸洗脱;P204 树脂对 Sr 吸附动力学相当快,在 20 s 左右吸附分配系数就达到近 10^3 mL/g,在 75 s 左右吸附达到平衡。因此,P204 树脂吸附 Sr 时动力学性能优秀,吸附分配系数高,适合从裂变产物中快速提取 Sr。由此确定 P204 树脂对 Sr 的吸附条件为 pH=4,吸附时间为 15 s,解吸液为 3 mol/L 的硝酸,吸附时间为 10 s。



(a)——吸附时间 3 h, ρ_0 (Sr)=1 mg/L, 10 mL 溶液, 0.2 g 树脂; (b)——pH=4, ρ_0 (Sr)=1 mg/L, 10 mL 溶液, 0.2 g 树脂

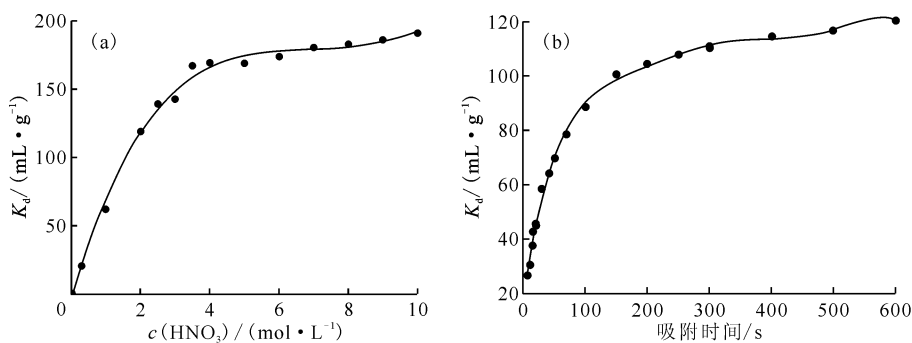
图 4 P204 树脂对 Sr 的吸附分配系数曲线

Fig. 4 Adsorption distribution coefficient curve of P204 resin for strontium

3.2 Sr-Spec 树脂萃取色层柱对 Sr 的分离

Sr-Spec 树脂对 Sr 的吸附分配系数随溶液酸度和吸附时间的变化曲线示于图 5。由图 5 可以看出: Sr 在 Sr-Spec 树脂上的吸附分配系数随着水相中硝酸浓度($c(\text{HNO}_3)$)的增加呈上升趋势,在硝酸浓度达到 3 mol/L 后曲线趋于平缓,吸附条件为高酸吸附,低酸洗脱;而 Sr-Spec 树脂对 Sr 的吸附在吸附 200 s 后才达到平衡,动力学性能并不优秀,平衡后吸附分配系数不

足 120 mL/g。虽然 Sr-Spec 树脂在动力学性能和吸附分配系数两方面不如 P204 树脂,但其作为吸附 Sr 的特效型材料,对 Sr 具有极高的选择性,因此可以作为快速纯化 Sr 的手段。且 Sr-Spec 树脂对 Sr 的吸附、洗脱条件与 P204 相反,若将两者相结合,可以在流程中避免分离与纯化之间的调酸步骤,缩短分离时间。Sr-Spec 树脂对 Sr 的吸附条件为 3 mol/L 的硝酸介质,吸附时间为 20 s。



(a)——吸附时间 3 h, $\rho_0(\text{Sr})=1 \text{ mg/L}$, 10 mL 溶液, 0.2 g 树脂;

(b)——水相硝酸浓度 3 mol/L, $\rho_0(\text{Sr})=1 \text{ mg/L}$, 10 mL 溶液, 0.2 g 树脂

图 5 Sr-Spec 树脂对 Sr 的吸附分配系数曲线

Fig. 5 Adsorption distribution coefficient of Sr-Spec resin for strontium

3.3 分离流程优化

根据上述分析,这两种树脂的结合使用可以满足分离流程的要求,由此设计从裂变产物中快速放化分离^{94,95}Sr的流程如下:

(1) 将含有 1 mg ²³⁵U 的硝酸铀酰溶液送入反应堆堆芯,辐照 0.014 s;

(2) 使用快速液体双针取样器从“跑兔”装置管道中提取产物溶液,调节 pH=4,体积为 5 mL,进入分离装置,传输与取样耗时 20 s;

(3) 样品在 P204 树脂柱上停留 15 s 后快速通过,用 5 mL pH=4 的硝酸溶液淋洗 5 s 后,再用 5 mL 3 mol/L 的硝酸溶液洗脱,停留时间为 10 s, P204 树脂分离耗时共 30 s;

(4) 洗脱后的样品在 Sr-Spec 树脂柱上停留 20 s 后快速通过,用 5 mL 7 mol/L 的硝酸溶液淋洗 5 s, Sr-Spec 树脂分离耗时共 25 s;

(5) 使用高纯锗 γ 谱仪直接对吸附在柱上的样品进行测量。

4 快速放化分离装置

从裂变产物中快速放化分离^{94,95}Sr 的流程要求极高的分离速率,且新生的裂变产物放射性很强,采用手动方法进行分离是不现实的。为此研制了快速放化分离装置,其实物图和原理示意图示于图 6。

装置的主体由快速液体双针取样器(A)、贮液槽(S_1-S_5)、P204 萃取色层分离单元(F_1)、Sr-Spec 萃取色层分离单元(F_2)、气动单元(泵)、收集单元(收集瓶和收集管)及控制系统组成。该装置具有以下优点:装置整体采用模块化设计,各单元之间的连接使用标准化卡套,密封性良好且可

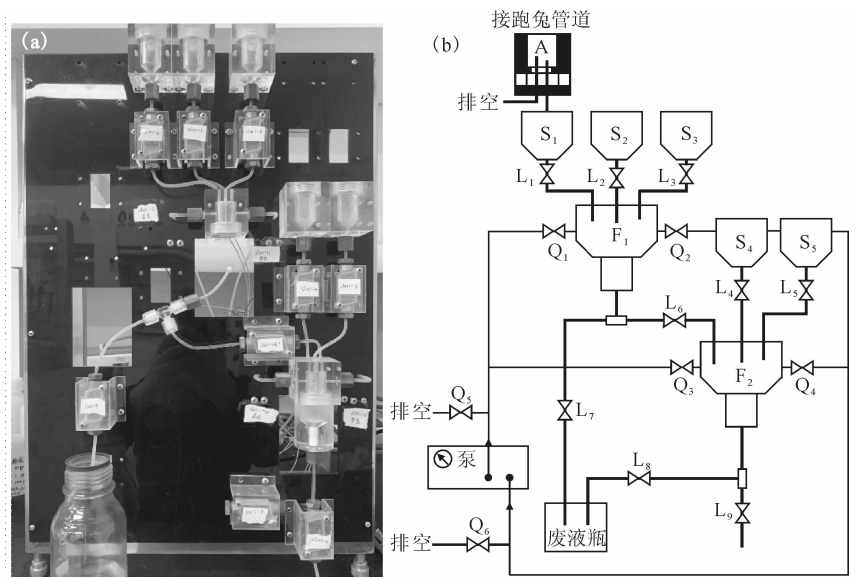
根据流程进行调整;各单元的主体部件使用有机玻璃材料,易加工、耐腐蚀、便于观察;以无油真空泵提供正负压作为动力,简单安全;各单元之间的连接使用直径 3 mm 的聚四氟乙烯硬管,微型电磁阀控制各单元的连通,耐腐蚀、死体积小;使用集成控制箱实现远程自动化控制,操作速率快,并极大地降低了操作人员受照剂量。

液体双针取样器上端与气动样品传输系统相连,底部安装有 2 个高低不同的 0.8 mm 医用针头,较低的针头可从靶盒中抽取液体,较高的针头则起到进气减压的作用。装置底部的侧面开孔以排掉管路中多余的气体。针头可借助跑兔系统自身的动力直接刺入聚乙烯靶盒中。该取样器密封性好,安全性高,无料液飞溅,可多次重复使用。液体取样可在 20 s 内完成。

萃取色层分离单元(F_1 、 F_2)上部带有过渡室,过渡室两侧开有进气口与抽气口,分别连接正负压管路。当抽气口连通,过渡室内形成负压,贮液槽内的溶液进入过渡室;当进气口连通,过渡室内产生正压,室内的液体可快速流过萃取色层柱。此方法利用了“柱排空”原理,即过渡室内的溶液完全经萃取色层柱排空后,后续的溶液再进入过渡室,而后再排空。这种方式避免了液面位置的监测,大幅节省了操作时间。萃取色层柱上下两端均放有玻璃棉过滤片,防止在抽气和加压的过程中对色层柱的破坏。

5 方法检验

配制模拟料液:介质为 pH=4 的硝酸,含 1 g/L 的 Sr、Y、Ba、Mo、La、Ce、Pr、Nd、I、Zr、Te、Ru 和 2 g/L 的 U;配制⁹⁰Sr放射性示踪剂溶液:



(b): A——液体双针取样器, S——贮液槽, F——分离单元, L——液体电磁阀, Q——气体电磁阀
图 6 ^{94,95}Sr快速化分离装置实物图(a)及原理图(b)

Fig. 6 Actual picture(a) and schematic diagram(b) of equipment for fast chemical separation of ^{94,95}Sr

移取库存的⁹⁰Sr-⁹⁰Y样品 1 mL 于烧杯中,置于电热板上,150 ℃蒸至近干,然后分别加入 1 mL 去离子水,再次蒸至近干并重复一次,共计 3 次蒸至近干以去除原介质中的硝酸。第三次蒸至近干后使用 pH=4 的硝酸溶解得到⁹⁰Sr放射性示踪剂溶液。

分别使用稳定的模拟料液和⁹⁰Sr放射性示踪剂溶液验证装置的可行性,将模拟料液或放射性示踪剂装入 S₁ 贮液槽, S₂—S₅ 贮液槽依次分别放入 pH=4 的硝酸、3 mol/L 的硝酸、7 mol/L 的硝酸、7 mol/L 的硝酸,然后按照操作流程进行分离。稳定模拟料液实验中,需要对 P204 树脂的洗脱液与 Sr-Spec 树脂的流出液取样,使用 ICP-OES 测量其中各元素的浓度,相减后得到吸附在 Sr-Spec 树脂柱上各元素的量,从而得到流程的收率与去污因子。放射性示踪剂实验中,对分离前后的⁹⁰Sr示踪剂洗脱后使用液体闪烁计数器进行测量,由此计算装置的收率。

结果显示,装置的运行时间为 60 s,在稳定模拟料液验证实验中 Sr 的化学回收率约为 45%,模拟料液中除 Ba 以外的各元素在分离后浓度均低于 ICP-OES 的检出限,去污因子均达到了 10³ 以上(由 ICP-OES 检出限计算得出),对于难分离的 Ba 元素去污因子也达到了 10² 以上(表 2)。在⁹⁰Sr示踪剂验证实验中,⁹⁰Sr在 P204 树脂和 Sr-Spec 树脂分离后的回收率分别为 56.3% 和

71.6%,总收率为 40.3%(表 3)。⁹⁰Sr在 P204 树脂单元损失较大。

表 2 模拟料液实验中各元素的去污因子
Table 2 Decontamination factor of elements in simulated liquid experiment

元素	分离前元素的质量/ μg	分离后元素的质量/ μg	去污因子
Sr	50.4	22.5	-
Y	50.1	<0.001	>5.0 $\times 10^4$
Ba	50.7	0.423	1.2 $\times 10^2$
U	104.6	<0.08	>1.3 $\times 10^3$
Mo	49.8	<0.004	>1.2 $\times 10^4$
La	51.6	<0.002	>2.6 $\times 10^4$
Ce	50.7	<0.02	>2.5 $\times 10^3$
Pr	49.0	<0.02	>2.5 $\times 10^3$
Nd	50.7	<0.03	>1.7 $\times 10^3$
I	50.1	<0.008	>6.3 $\times 10^3$
Zr	51.1	<0.002	>2.6 $\times 10^4$
Te	50.2	<0.04	>1.6 $\times 10^3$
Ru	50.0	<0.02	>2.5 $\times 10^3$

注:-表示此数据无意义

6 结 论

(1) 为降低产品中同位素的干扰,根据衰变链中各核素的累积产额差异以及母子体衰变关系,提出了基于“短照快分”原则的制备高丰度

表 3 放射性示踪剂实验中⁹⁰Sr的收率
Table 3 Yield of ⁹⁰Sr in radioactive tracer experiment

核素	分离前 计数率/s ⁻¹	P204 树脂分离后 计数率/s ⁻¹	P204 树脂 分离回收率	Sr-Spec 树脂 分离后计数率/s ⁻¹	Sr-Spec 树脂 分离回收率	总收率
⁹⁰ Sr	2.03×10 ⁴	1.14×10 ⁴	56.3%	8.17×10 ³	71.6%	40.3%

^{94,95}Sr的技术路线,建立了以 P204 萃取色层快速提取和 Sr-Spec 萃取色层快速纯化相结合为主要手段的^{94,95}Sr的化学分离流程,该流程分离速率快,去污能力强,对示踪剂级的 Sr 收率可达 40% 以上;

(2) 建立了^{94,95}Sr的快速批式分离装置,操作简洁,可实现半自动化,安全系数高。结合实验和计算表明,辐照 1 mg ²³⁵U,使用“短照快分”技术分离制备的^{94,95}Sr活度比较高,对主要 γ 干扰核素的去污因子均达到了 10² 以上,为后续核参数测量提供了基础。

参考文献:

[1] Fritze K, Kennett T J, Prestwich W V. Half-lives of ⁹⁴Rb, ⁹⁴Sr, ⁹⁴Y, ⁹³Rb, ⁹⁵Sr, ⁹⁵Y[J]. Can J Chem, 1961, 39(3): 675-680.

[2] Norris A E, Wahl A C. Nuclear charge distribution in fission: ⁹²Y, ⁹³Y, ⁹⁴Y, and ⁹⁵Y independent yields[J]. Phys Rev, 1966, 146(3): 926.

[3] Amarel I, Bernas R, Foucher R, et al. Half life determination of some short-lived isotopes of Rb, Sr, Cs, Ba, La and identification of ^{93,94,95,96}Rb as delayed neutron precursors by on-line mass-spectrometry[J]. Phys Lett B, 1967, 24(8): 402-404.

[4] Tamai T, Takada J, Matsushita R, et al. Gamma-ray energies of ⁹⁵Sr and ⁹⁴Sr[J]. Inorg Nucl Chem Lett, 1973, 9(2): 245-251.

[5] Grapengiesser B, Lund E, Rudstam G. Survey of short-lived fission products obtained using the isotope-separator-on-line facility at studsvik[J]. J Inorg Nucl Chem, 1974, 36(11): 2409-2431.

[6] Engler G, Nir-El Y, Shmid M, et al. Half-life measurements of Rb, Sr, Y, Cs, Ba, La and Ce isotopes with A=91-98 and A=142-149[J]. Phys Rev C, 1979, 19(5): 1948.

[7] Okano K, Kawase Y, Funakoshi Y, et al. Half-life measurements of ⁹³Sr, ⁹⁴Sr, ⁹⁵Sr, ¹³⁹Cs, ¹⁴¹Cs and

¹⁴³Ba mass-separated by KUR-ISOL[J]. Appl Radiat Isotopes, 1986, 37(6): 521-525.

[8] Knight J D, Hoffman D C, Dropesky B J, et al. Radiations of ⁹³Y and ⁹⁴Y and half-lives of ⁹³Sr and ⁹⁴Sr[J]. J Inorg Nucl Chem, 1959, 10(3-4): 183-197.

[9] Hovestadt D, Armbruster P, Eidens J. Der zerfall des Sr-94[J]. Z Med Phys, 1964, 178(3): 226-230.

[10] Grimm W, Herzog W. Der zerfall des ⁹⁴Sr[J]. Z Med Phys, 1973, 259(1): 67-73.

[11] Kiso Y, Takemi H, Matsushita R, et al. Rapid paper electrophoretic separation of short-lived fission products and the determination of their gamma-ray and half-lives[J]. Annu Rep Res React Inst, Kyoto Univ, 1976, 9.

[12] Okano K, Funakoshi Y, Kawase Y. A β - γ spectroscopic method for determination of delayed neutron emission probability by using an on-line isotope separator[J]. Annu Rep Res React Inst, Kyoto Univ, 1983, 16.

[13] Herzog W, Grimm W. Der zerfall des ⁹⁵Sr[J]. Z Med Phys, 1974, 266(5): 397-404.

[14] Pavla Chlubná-Elιάšovά, Tian Yuyang, Pinar A B, et al. JNDC FP decay and yield data[J]. Angew Chem Int Edit, 1981, 53(27): 7048-7052.

[15] 丁有钱,崔安智,杨志红,等. HDEHP 萃取法从裂变产物中分离¹⁴²La[J]. 核化学与放射化学, 2003, 25(4):219-222.

[16] 丁有钱,杨志红,张生栋,等. 三步分离法制备高丰度的¹⁴²La[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10):1739-1745.

[17] 周丽彬,刘扬,吴文斌. 土壤中⁹⁰Sr和⁹⁰Y的分离与富集[J]. 湿法冶金, 2014, 33(3):236-238.

[18] Zhang Anyun, Xiao Chengliang, Liu Yunhai, et al. Preparation of macroporous silica-based crown ether materials for strontium separation[J]. J Porous Mater, 2010(17): 153-161.

[19] 杨志红,丁有钱,张生栋,等. ⁹¹Sr亚快化分离方法的研究[J]. 核化学与放射化学, 2007, 29(1):1-7.