

稳定同位素的电磁分离

林治洲, 李公亮, 王丽琴, 金 凯

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

Electromagnetic Separation of Stable Isotopes

LIN Zhi-zhou, LI Gong-liang, WANG Li-qin, JIN Kai

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract : Electromagnetic method is one of most important methods of isotope separation. For almost 40 years, CIAE has been separating more than 130 isotopes of 28 elements. The principle of electromagnetic separation method and application of enriched isotopes is described.

Key words : electromagnetic isotope separator; stable isotope; ion source collector

中图分类号: O657.63 文献标识码: A 文章编号: 1004-2997 (2007) 增刊-42-04

中国原子能科学研究院从 20 世纪 60 年代初开始进行电磁同位素分离的研究工作, 先后建成了 90° 实验室型电磁分离器 (F-1)、180° 大型电磁分离器 (F-2、F-3) 和 255° 中型电磁分离器 (F-4), 还为国外建造了一台大型电磁分离器 (CI-140)。已经分离生产了 28 种元素的 131 种同位素, 除部分满足了我国军工和有关科研单位的急需, 还有少量的出口。目前只有一台分离器 (F-3) 在运行。

1 基本原理和装置

电磁分离器基本原理示于图 1。能量相同但质量不同的离子在与离子运动方向垂直的磁场中沿不同半径的圆形轨道运行, 在偏转一定角度后, 不同质量的离子就分开了。

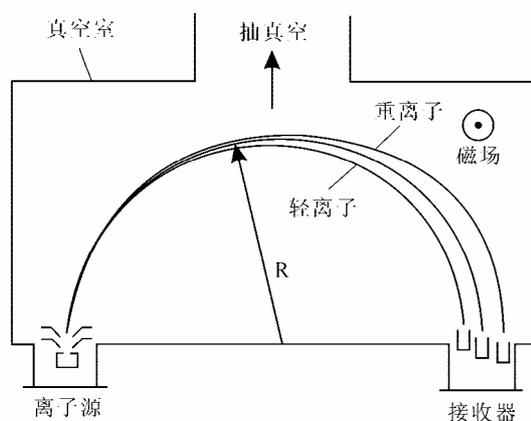


图 1 电磁分离器原理图

在均匀磁场中, 偏转 180° 后同位素的色散 $d=\Delta M/M$ 。式中 ΔM 为两个同位素质量数之差。同位素的色散指经分离后不同离子聚焦点之间的距离。电磁分离器主机部分有: 离子源、接收器、电磁铁和真空室; 辅助系统有: 真空系统、水冷系统、供电控制系统。

(1) 离子源: 用来产生一定能量, 一定形状的稳定的强流离子束, 流强可达几百毫安, 这种离子源称为磁形低压弧放电离子源。需要分离的元素或其化合物装在离子源的坩埚内, 由电炉加热形成蒸汽, 蒸汽进入弧室后受到电子束的轰击而被电离, 形成弧放电等离子体, 离子被引出、加速、进入磁场, 加速电压通常为 $30 \sim 35 \text{ kV}$, 稳定度为 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。

(2) 接收器: 用高纯铜片或石墨片做成口袋形状, 安装在离子束聚焦的位置, 用来同时分别收集各种同位素, 然后经化学处理、提取、纯化, 得到同位素产品。

(3) 电磁铁和真空室: 电磁铁形成的磁场用来分析和聚焦强流离子束, 起磁棱镜作用。为了更好地聚焦离子束, 磁场设计成非均匀场, 磁极隙为 40 cm , 场强可达到 3000 Gs , 可分析铀等重元素同位素, 磁铁电源为 $500 \text{ A} \times 100 \text{ V}$, 稳定度为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。离子运动空间需要抽真空, 真空度可达到 $2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 真空室的体积达 4 m^3 , 采用 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 大型油扩散泵机组。

2 同位素分离及应用

中国原子能科学研究院是国内唯一拥有大型电磁同位素分离装置的单位, 从事同位素分离工作 40 多年, 共分离了 28 种元素的 131 种同位素。

普通金属元素的同位素分离, 除个别元素外不存在特殊困难; 碱土元素的同位素分离, 离子源打火严重, 这会造成离子源的损坏和同位素玷污; 稀土元素的同位素分离比较困难, 除了离子源容易打火外, 稀土元素能使离子源阴极激活, 致使弧放电不稳定。对于这些问题的解决和改善, 操作人员的经验是很重要的。表 1 给出了 28 种元素同位素分离条件。每种同位素产品都需要经过丰度测量, 表 2 给出了各同位素产品丰度, 产品的化学纯度一般好于 99%。

表 1 各元素同位素的分离条件

| 元素 | 离子源 工作物质 | 坩埚 温度/ °C | 接收器 材料 | 元素 | 离子源 工作物质 | 坩埚 温度/ °C | 接收器 材料 |
|----|----------------------|-----------------|-----------|----|-----------------------|-----------------|-----------|
| 锂 | LiCl | 550 | 铜 | 银 | AgCl | 650 | 铜 |
| 镁 | Mg | 500 | 铜 | 锡 | SnS, SnS ₂ | 550 | 石墨 |
| 钾 | KCl | 550 | 铜 | 锑 | Sb | 550 | 铜 |
| 钙 | Ca | 650 | 铜 | 钡 | BaCl ₂ | 800 | 铜 |
| 钛 | TiCl ₄ | | 铜 | 铈 | CeCl ₃ | 750 | 铜 |
| 铬 | CrCl ₃ | 550 | 石墨 | 钕 | NdCl ₃ | 800 | 铜 |
| 铁 | FeCl ₂ | 400 | 铜 | 钐 | SmCl ₃ | 800 | 铜 |
| 镍 | NiCl ₂ | 600 | 铜 | 铕 | EuCl ₃ | 850 | 铜 |
| 铜 | CuCl ₂ | 300 | 石墨 | 钆 | GdCl ₃ | 700 | 铜 |
| 锌 | Zn | 400 | 铜 | 镝 | DyCl ₃ | 800 | 铜 |
| 硒 | Se, SeO ₂ | 230~350 | 铜 | 铒 | ErCl ₃ | 600 | 铜 |
| 铷 | RbCl | 550 | 铜 | 镱 | YbCl ₃ | 800 | 铜 |
| 锶 | Sr | 650 | 铜 | 铅 | PbCl ₂ | 400 | 铜 |
| 钼 | MoCl ₅ | 80 | 铜 | 铀 | UCl ₄ | 500 | 石墨 |

稳定同位素早期主要用于核科学技术的研究, 但由于现代科学技术的发展, 现在其应用的领域已经十分广泛。原子能院分离生产的同位素在国内科研和生产诸多领域也发挥了积极的作用。主要应用有以下几个方面:

(1) 铷原子钟：铷原子钟是利用铷-87 原子的超精细跃迁频率 ($\sim 6\,835\text{ MHz}$) 的高度稳定性作为频率标准，其稳定性和准确度都达到 10^{-12} 以上，而且体积小、重量轻，最适宜在卫星、飞机、舰艇上使用。铷-87 作为光抽运系统的工作物质，铷-85 则起滤光作用，所以铷同位素也可以说是一种重要的国防和航天工业的材料。从 20 世纪 70 年代起，中国原子能科学研究院用电磁分离法为国内铷原子钟研制单位分离了几十克的铷同位素。

(2) 放射性同位素制备：用稳定同位素制靶，经加速器、核反应堆粒子束辐照，是一种制备高纯度、高比度放射性同位素的重要方法。

(3) 分析测量：随着质谱分析技术的提高和分析仪器的改进，特别是同位素稀释质谱法的出现和普及，浓缩同位素在地质年代测定、环境保护、食品安全、生命科学等领域的应用中扮演了重要的角色，而在相对原子质量的测定、标准物质研制方面，更是不可缺少。例如：为锂标准物质的研制分离了丰度达到 99.99% 锂-6 同位素，在锑 (Sb)、钕 (Eu)、锌 (Zn) 原子质量的测定过程中，提供了相应的浓缩同位素。

表 2 同位素产品丰度一览表

| 元素 | 同位素 | 天然丰度 / % | 浓缩丰度 / % | 化学 形态 | 元素 | 同位素 | 天然丰度 / % | 浓缩丰度 / % | 化学 形态 |
|------------------|------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Li | ^6Li | 7.50 | 96~99.8 | Li | Ba | ^{130}Ba | 0.101 | 20~30 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ |
| | ^7Li | 92.50 | 99.996 | Li | | ^{132}Ba | 0.097 | 10~20 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ |
| Mg | ^{24}Mg | 78.99 | 97~99.8 | MgO | | ^{134}Ba | 2.42 | 60~70 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ |
| | ^{25}Mg | 10.00 | 97~98.5 | MgO | | ^{135}Ba | 6.59 | 60~80 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ |
| | ^{26}Mg | 11.01 | 93~99.4 | MgO | | ^{136}Ba | 7.81 | 55~70 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ |
| K | ^{39}K | 93.10 | 99.5~99.9 | KCl | ^{137}Ba | 11.32 | 70~85 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ | |
| | ^{40}K | 0.0118 | 3~15 | KCl | ^{138}Ba | 71.66 | 90~99 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ | |
| | ^{41}K | 6.88 | 91.6~97.8 | KCl | Sb | ^{121}Sb | 57.25 | 90~99 | Sb |
| Ca | ^{40}Ca | 96.97 | 99~99.97 | CaO | | ^{123}Sb | 42.75 | 85~95 | Sb |
| Ti | ^{42}Ca | 0.65 | 64~76.2 | CaO | Ce | ^{136}Ce | 0.193 | 19~26.5 | CeO_2 |
| Cr | ^{43}Ca | 0.41 | 55~65.4 | CaO | | ^{138}Ce | 0.25 | 10~16.1 | CeO_2 |
| | ^{44}Ca | 2.08 | 76~97.2 | CaO | | ^{140}Ce | 88.48 | 95~99.4 | CeO_2 |
| | ^{46}Ca | 0.0033 | 5~10 | CaO | | ^{142}Ce | 11.07 | 65~92.5 | CeO_2 |
| | ^{48}Ca | 0.19 | 60~70 | CaO | | Nd | ^{142}Nd | 27.11 | 85~95 |
| | ^{50}Ti | 5.30 | 61~88 | TiO_2 | ^{143}Nd | | 12.17 | 55~81 | Nd_2O_3 |
| ^{50}Cr | 4.35 | 83.6~94 | Cr_2O_3 | ^{144}Nd | 23.85 | | 80~93 | Nd_2O_3 | |
| ^{52}Cr | 83.79 | 96.2~99.8 | Cr_2O_3 | ^{145}Nd | 8.30 | | 57~74.4 | Nd_2O_3 | |
| ^{53}Cr | 9.05 | 86.2~96.3 | Cr_2O_3 | ^{146}Nd | 17.22 | | 70~91 | Nd_2O_3 | |
| Fe | ^{54}Cr | 2.36 | 85.3~90.8 | Cr_2O_3 | ^{148}Nd | 5.73 | 75~87.6 | Nd_2O_3 | |
| | ^{54}Fe | 5.80 | 75~96.9 | Fe_2O_3 | ^{150}Nd | 5.62 | 88~94 | Nd_2O_3 | |
| | ^{56}Fe | 91.70 | 99~99.94 | Fe_2O_3 | Sm | ^{144}Sm | 3.09 | 75~84.5 | Sm_2O_3 |
| | ^{57}Fe | 2.19 | 75~91.8 | Fe_2O_3 | | ^{147}Sm | 15.00 | 85~98 | Sm_2O_3 |
| ^{58}Fe | 0.31 | 58~71 | Fe_2O_3 | ^{148}Sm | | 11.24 | 80~85 | Sm_2O_3 | |
| Ni | ^{58}Ni | 67.88 | 97~99.9 | NiO | | ^{149}Sm | 13.80 | 85~97.2 | Sm_2O_3 |
| | ^{60}Ni | 26.33 | 83~99.3 | NiO | | ^{150}Sm | 7.40 | 75~82.8 | Sm_2O_3 |
| | ^{61}Ni | 1.19 | 80~91 | NiO | ^{152}Sm | 26.70 | 90~95.8 | Sm_2O_3 | |
| | ^{62}Ni | 3.66 | 83~98.1 | NiO | ^{154}Sm | 22.80 | 90~96.7 | Sm_2O_3 | |
| Cu | ^{64}Ni | 1.08 | 80~93.6 | NiO | Eu | ^{151}Eu | 47.80 | 85~96.6 | Eu_2O_3 |
| | ^{63}Cu | 69.10 | 95~99.8 | CuO | | ^{153}Eu | 52.80 | 90~98.7 | Eu_2O_3 |
| | ^{65}Cu | 30.90 | 79~99.3 | CuO | | | | | |

续表 2

| 元素 | 同位素 | 天然丰度 /% | 浓缩丰度 /% | 化学 形态 | 元素 | 同位素 | 天然丰度 /% | 浓缩丰度 /% | 化学 形态 |
|-------------------|-------------------|------------|------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Zn | ⁶⁴ Zn | 48.90 | 75~93 | Zn, ZnO | Gd | ¹⁵⁶ Gd | 20.60 | 70~90 | Gd ₂ O ₃ |
| | ⁶⁶ Zn | 27.80 | 75~90 | Zn, ZnO | | ¹⁵⁷ Gd | 15.70 | 60~80.6 | Gd ₂ O ₃ |
| | ⁶⁷ Zn | 4.10 | 50~62 | Zn, ZnO | | ¹⁵⁸ Gd | 24.70 | 75~97.2 | Gd ₂ O ₃ |
| | ⁶⁸ Zn | 18.60 | 74~98.3 | Zn, ZnO | | ¹⁶⁰ Gd | 21.70 | 85~98.1 | Gd ₂ O ₃ |
| | ⁷⁰ Zn | 0.62 | 34~80.0 | Zn, ZnO | | Dy | ¹⁵⁶ Dy | 0.06 | 5~15 |
| Rb | ⁸⁵ Rb | 72.17 | 95~99.7 | RbCl | ¹⁵⁶ Dy | | 0.10 | 5~15 | Dy ₂ O ₃ |
| | ⁸⁷ Rb | 27.83 | 86~99.6 | RbCl | ¹⁵⁶ Dy | | 2.30 | 70~84.3 | Dy ₂ O ₃ |
| Sr | ⁸⁴ Sr | 0.56 | 31~47.8 | Sr(NO ₃) ₂ | ¹⁵⁶ Dy | | 18.90 | 75~86.2 | Dy ₂ O ₃ |
| | ⁸⁶ Sr | 9.90 | 75~87.3 | Sr(NO ₃) ₂ | ¹⁵⁶ Dy | | 25.50 | 75~86.2 | Dy ₂ O ₃ |
| | ⁸⁷ Sr | 7.00 | 61~68.9 | Sr(NO ₃) ₂ | ¹⁵⁶ Dy | 24.90 | 75~88 | Dy ₂ O ₃ | |
| Mo | ⁸⁸ Sr | 82.60 | 97~99.9 | Sr(NO ₃) ₂ | ¹⁵⁶ Dy | 28.20 | 85~95 | Dy ₂ O ₃ | |
| | ⁹² Mo | 15.84 | 84~94.8 | MoO ₃ | Er | ¹⁶² Er | 0.14 | 15~21 | Er ₂ O ₃ |
| | ⁹⁴ Mo | 9.04 | 85~92 | MoO ₃ | | ¹⁶⁴ Er | 1.60 | 65~71.5 | Er ₂ O ₃ |
| | ⁹⁵ Mo | 15.72 | 75~85 | MoO ₃ | | ¹⁶⁶ Er | 33.40 | 85~93.8 | Er ₂ O ₃ |
| | ⁹⁶ Mo | 16.53 | 83~95.5 | MoO ₃ | | ¹⁶⁷ Er | 22.90 | 83~93.1 | Er ₂ O ₃ |
| | ⁹⁷ Mo | 9.46 | 75~85 | MoO ₃ | | ¹⁶⁸ Er | 27.00 | 92~99 | Er ₂ O ₃ |
| | ⁹⁸ Mo | 23.78 | 89~97.4 | MoO ₃ | ¹⁷⁰ Er | 15.00 | 95~97.7 | Er ₂ O ₃ | |
| | ¹⁰⁰ Mo | 9.63 | 85~93.3 | MoO ₃ | Yb | ¹⁶⁸ Yb | 0.14 | 10~16.6 | Yb ₂ O ₃ |
| Ag | ¹⁰⁷ Ag | 51.82 | 85~98.4 | Ag | | ¹⁷⁰ Yb | 3.00 | 50~57.7 | Yb ₂ O ₃ |
| | ¹⁰⁹ Ag | 48.18 | 85~99.6 | Ag | | ¹⁷¹ Yb | 14.30 | 80~92.8 | Yb ₂ O ₃ |
| Sn | ¹¹² Sn | 0.96 | 74~94.7 | SnO ₂ | | ¹⁷² Yb | 21.90 | 66~90.7 | Yb ₂ O ₃ |
| | ¹¹⁴ Sn | 0.66 | 50~65 | SnO ₂ | | ¹⁷³ Yb | 16.20 | 80~85 | Yb ₂ O ₃ |
| | ¹¹⁵ Sn | 0.35 | 25~54.8 | SnO ₂ | ¹⁷⁴ Yb | 31.80 | 90~96.9 | Yb ₂ O ₃ | |
| | ¹¹⁶ Sn | 14.30 | 80~93 | SnO ₂ | ¹⁷⁶ Yb | 12.70 | 86~94 | Yb ₂ O ₃ | |
| | ¹¹⁷ Sn | 7.61 | 50~79.5 | SnO ₂ | Pb | ²⁰⁴ Pb | 1.40 | 45~58.8 | Pb(NO ₃) ₂ |
| | ¹¹⁸ Sn | 24.03 | 65~88.9 | SnO ₂ | | ²⁰⁶ Pb | 24.10 | 65~80 | Pb(NO ₃) ₂ |
| | ¹¹⁹ Sn | 8.58 | 75~89.6 | SnO ₂ | | ²⁰⁷ Pb | 22.10 | 55~83.3 | Pb(NO ₃) ₂ |
| | ¹²⁰ Sn | 32.85 | 75~97 | SnO ₂ | | ²⁰⁸ Pb | 52.40 | 83~94 | Pb(NO ₃) ₂ |
| | ¹²² Sn | 4.72 | 75~92.4 | SnO ₂ | U | ²³⁵ U | 0.27 | 36.5 | UO ₃ |
| ¹²⁴ Sn | 5.94 | 80~95.7 | SnO ₂ | ²³⁸ U | | 99.27 | 99.99 | UO ₃ | |
| Gd | ¹⁵² Gd | 0.20 | 15~30 | Gd ₂ O ₃ | | | | | |
| | ¹⁵⁴ Gd | 2.20 | 35~70 | Gd ₂ O ₃ | | | | | |
| | ¹⁵⁵ Gd | 14.90 | 65~85.8 | Gd ₂ O ₃ | | | | | |