



# 同位素电磁分离器及其所生产的浓缩同位素的应用

华明达

自从1912年发现了氦的同位素以来，现在知道周期表上每一个元素都由若干同位素组成，其中有稳定同位素和放射性同位素。元素的同位素在国民经济、国防建设和科学实验中有重要的、广泛的用途，因此自二十年代起，就不断研究将元素的同位素加以分离的方法。由于同位素之间化学性质很相近，因而不能用普通的化学或冶金方法分离它们，需要一些特殊的方法和设备。目前，分离同位素的方法有十多种，如气体扩散法、热扩散法、化学交换法、精馏法、离心法、喷嘴法、电泳法、电解法、激光法和电磁法等，其中许多方法已经从实验室规模发展成工业生产。本文着重介绍电磁分离法及其所生产的浓缩同位素的应用。

## 一、电磁分离法的特点

电磁分离法与其他方法相比有其独特之处。

1. 通用性强。电磁分离器几乎可以分离所有元素的同位素，包括稳定和放射性同位素。而其他方法都有局限性，一个装置一般只能分离一种元素的同位素。电磁分离器从分离一种元素的同位素转换到分离另一种元素的同位素很方便，只需要几天的清洗、调整时间，具有高度的灵活性。还可以同时将元素的几种同位素浓缩并收集起来。

2. 分离系数大。分离系数 $\alpha$ 是指同位素在经过一个分离单元之前和之后它们相对丰度的变化。它表征某种方法的分离能力，因此 $\alpha$ 越大越好。

$$\alpha = \frac{N}{1-N} \bigg/ \frac{N_0}{1-N_0}$$

其中 $\frac{N}{1-N}$ 表示分离后某同位素相对丰度； $\frac{N_0}{1-N_0}$ 表示分离前某同位素相对丰度； $N_0$ 、 $N$ 分别为分离前后某同位素丰度，以克分子（或克原子）百分数表示。

电磁法单级分离系数一般为10—1000，多级装置可达 $10^6$ — $10^7$ 。就是说用一台单级分离器，一次分离就可以得到高纯同位素，而用多级分离器则可以制备超纯同位素。其他方法的分离系数一般仅仅比1略大一些。

3. 可浓缩微量同位素。电磁分离器原料用量可少到若干毫克，适用于分离科学实验用的稀有、珍贵的样品。还可以使丰度极低的同位素浓缩到高丰度。

4. 平衡时间接近于零。一般同位素分离装置从启动到获取产品的平衡时间需几天甚至几个月。电磁分离器中原料可以很快被电离并被分离而接收到。因此，用电磁分离器分离短寿命放射性同位素具有很大优越性。1965年以来发展了“在线”分离器，为研究半衰期只有几分之一秒的远离稳定线的核素提供了有利条件。

5. 产量小, 成本较高, 这是电磁分离方法比其他方法不利的方面。建造电磁分离器投资较大, 运行费用高。一台大型分离器分离重元素年产量也只有百克左右。因此, 电磁法适合于制备科研用的少量高纯同位素样品或其他方法不能生产的同位素。目前周期表上各种元素中, 铀、锂、氢、硼、碳和气体元素的同位素已用某些同位素分离方法进行大量的生产, 例如: 用扩散法、离心法分离铀同位素, 用低温精馏法分离氢和氘, 用热扩散法分离氦同位素、氖同位素等。其他元素的同位素分离主要用电磁分离法(为了特殊的需要, 也常常在电磁分离器上制备上述铀、锂等几种元素的高纯同位素)。

## 二、电磁分离器的原理和结构

电磁分离器基本原理, 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动, 在偏转一定角度后, 不同的离子就分开了(见图1)。

单电荷离子轨道半径

$$R(\text{厘米}) = 144.5\sqrt{MV}/B.$$

式中  $B$  为磁感应强度(高斯);  $V$  为离子加速电压(伏特);  $M$  为同位素离子质量数。

在均匀磁场中, 偏转  $180^\circ$  后, 不同同位素的色散(即经分离后不同离子束聚焦点之间的距离)

$$d = R \frac{\Delta M}{M} (\text{厘米}).$$

式中  $\Delta M$  为两个同位素质量数之差。

电磁分离器主要组成部分有: 离子源、接收器、电磁铁和真空室等(图2)。

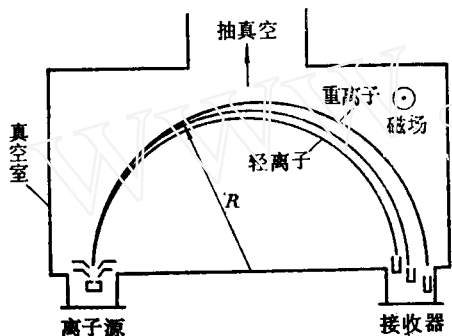


图1 电磁分离器原理图

**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, 在大型分离器中流强可达几百毫安或更大。常用的是磁型弧放电离子源(图3)。需要分离的元素或其化合物放在离子源的坩锅内, 由电炉加热形成蒸气, 蒸气进入弧室, 在等离子体弧放电中变成离子, 离子被高电压引出、加速, 射入磁场。加速电压一般用30—50千伏, 稳定度为  $2 \times 10^{-4}$  或更好。

此外还有表面电离离子源、高温离子源、气体离子源等。

**2. 接收器** 用来同时分别接收分开了的各个同位素。接收器中有用高纯铜片或石墨制成的特殊形状的收集袋, 将袋安放在离子束聚焦位置, 分离了的同位素积聚在各个收集袋中, 然后经化学处理、提取、纯化, 得到同位素产品。

**3. 磁场** 用来分析和聚焦强流离子束, 起磁棱镜的作用。磁场的普遍式可表示为

$$B = B_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^n.$$

式中  $B$  为磁中心平面上任意点的磁感应强度;  $B_0$  为磁中心平面上离子束中心轨道处磁感应强度;  $R_0$  为离子束中心轨道曲率半径;  $R$  为磁中心平面上任意点的位置半径;  $n$  为场指数 ( $0 \leq n \leq 1$ )。



图 2 电磁分离器

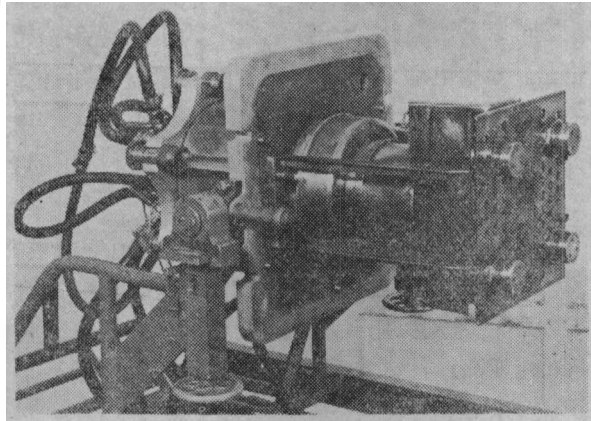


图 3 离子源

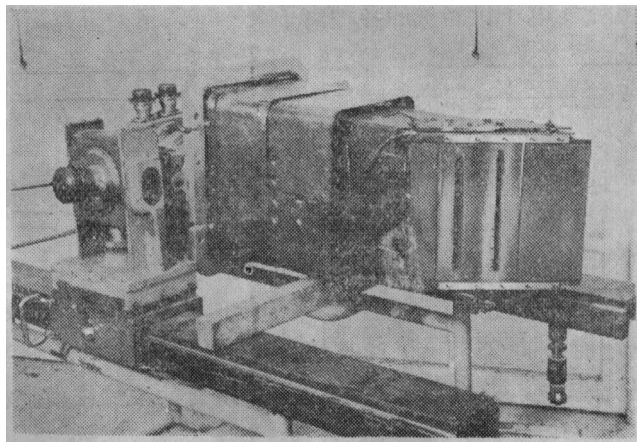


图 4 接收器

当  $n=0$  时就是均匀场, 小型电磁分离器一般采用均匀场作为磁棱镜, 可以利用边缘场进行轴向聚焦。大型分离器在均匀场基础上加条形垫片以改善聚焦性能。

当  $n \neq 0$  时就是非均匀场, 近代中型、大型电磁分离器大多采用非均匀场, 以实现双聚焦, 一般  $n=0.5$ , 也有  $n=0.8$  的。磁场的设计、磁垫片加工要求很高。磁感应强度通常为几千高斯, 稳定度  $10^{-4}$  以上。

根据不同目的设计的分离器, 其磁棱镜采取不同偏转角, 如  $55^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $255^\circ$ , 甚至  $540^\circ$  (转了一圈半)。

实验室规模的电磁分离器磁铁一般重几吨, 用于生产稳定和放射性同位素的中、大型分离器磁铁重达数十或数百吨。为了获得超纯同位素, 已有两个或三个磁棱镜串联的多级分离器。

**4. 真空室** 离子运动的空间需要抽真空, 以避免离子束与空气分子碰撞造成损失。真空度一般在  $10^{-6}$  托以上。大型分离器真空室体积达  $4\text{米}^3$ , 要用大型真空机组抽气。

### 三、电磁分离器的用途

同位素电磁分离器主要用于生产浓缩同位素, 并作为一种实验设备可用于核物理、固体物理、离子化学等研究工作。

1. 生产浓缩同位素。目前世界上有二十多个国家的一百多台各种类型电磁分离器正在生产稳定或放射性同位素。天然稳定核素有 273 种, 其中 250 多种已被分离过。一般产量是毫克和克数量级, 某些同位素产量达公斤数量级。为了制备铀和超铀元素同位素以及分离强放射性同位素, 建造了专用电磁分离器。有的国家建立了“同位素库”, 逐年积累, 扩大库存, 出售或出租浓缩同位素。

2. 小型电磁分离器主要是用来为核物理实验制备研究核反应的各种浓缩核素靶及高纯度的放射源。

3. 近十年来发展了“在线”分离器, 以研究远离稳定线的短寿命核。

4. 同位素电磁分离器作为离子注入器用于半导体掺杂。与热扩散法相比, 优点是工作温度较低, 半导体材料电性能不受影响; 离子能量可调, 因而可以控制掺杂深度, 精确控制掺杂量和分布; 离子束纯度高; 注入杂质无横向扩散, 可以用微离子束作精细掺杂, 也可以用扫描法大面积均匀掺杂等。

5. 电磁分离器产生几十千电子伏能量的各种离子束, 可以用来研究离子与物质的作用, 研究离子与气体的弹性或非弹性碰撞, 研究热原子化学和离子化学。

6. 电磁分离器可作为重离子加速器的离子注入器。

### 四、电磁分离的浓缩核素的应用

经过同位素分离, 取得各种浓缩核素 (即通常说的浓缩同位素), 在国民经济、国防建设、医疗卫生和科学研究等方面已广泛地利用来作为改造自然的有力手段。例如, 在核武器和核能源方面, 大量地使用铀-235、铀-238、钚、锂-6、硼-10 等浓缩核素作为核燃料和结构材料。在核物理研究、核参数测量方面用到几乎所有的浓缩核素。农业、生物和

医疗卫生方面需要氘、碳-13、氮-15、氧-18等三十多种浓缩稳定核素。国防建设、工业技术和科学研究中需要铷-87、铷-85、氦-3、氘、碳-13、氮-15、氧-18、锡-112、铁-57以及各种稀土元素的同位素，品种和质量的要求都很高。地质探矿、地球科学方面也要求提供铷、铯、钾、氙、铅、铀等多种元素的各种同位素。分离同位素已有多种方法，而上述这些浓缩核素中有很多是用电磁分离器生产的。这里仅就电磁分离器生产的浓缩核素的应用作一些简要介绍。

## 1. 核科学技术

核物理研究、反应堆设计、核武器研制、辐射的防护屏蔽和核医学等许多领域都需要某一核素的精确的核参数。用天然元素来测定核参数和研究核性质，因它含有多种同位素，其实验结果是各个同位素的参数的总和，往往极为复杂，难以分析。因此，需要浓缩同位素，以简化实验分析，从而取得每一核素的核数据。

六十年代以前，电磁分离器生产的各种浓缩稳定核素有75%用于测定核参数，研究核性质。例如，测定中子、带电粒子和光核反应截面，研究单一的核的能级，测定衰变纲图、半衰期、核磁矩和自旋，以及探索新的同位素等。一般样品用量几十到几百毫克，特别精密的测量需要几十克甚至公斤量的浓缩同位素。六十年代以来，仍有大量浓缩稳定核素样品用于核参数测量等核物理研究工作，每年需要量有增无减，但由于其他方面的应用骤增，因此样品分配的相对比例有所下降。

五十年代中期以后，由于研制核武器及反应堆的需要，对铀和超铀元素同位素的核参数给予高度重视，各国相继建立了强放重元素同位素分离器，制备浓缩的铀-240、铀-241和铀-242，以及镅-242m等。

由于对核参数测量精度的要求越来越高，相应需要的同位素样品纯度也越来越高。

## 2. 新技术

**原子钟** 导弹制导、船舰和飞机定位与导航、大地测量、对空观察、深空通讯以及电台报时等都需要精确的时间标准（即频率标准）。原子钟是目前能达到的最精确的时间标准。用得最多的是用铷-87和铷-85同位素的铷原子钟。它利用铷-87原子的超精细跃迁频率（ $\sim 6835$ 兆赫）的高度稳定性作为频率标准。铷-87作为光抽运系统的工作物质，铷-85则起滤光作用。铷钟比氢钟、铯钟体积小、重量轻，短期稳定度最好，日稳定度达 $10^{-13}$ ，准确度达 $10^{-12}$ 以上。商品生产的已有1立升大小、重1.3公斤的，适宜在导弹、卫星、飞机、舰艇上使用。

**磁力仪** 用浓缩铷同位素做的磁力仪利用核磁共振频率与外磁场强度成正比的关系，可以精确测出地磁场的微小变化，是探矿和地震预报的一种工具，还可以用于侦察敌军战车集结和潜艇活动。

**激光器** 激光器中应用浓缩同位素，可提高单色性和增益。例如，氦-镉激光器中采用浓缩镉-114，激光管长度只需原来的1/4，就可以达到同样的功率。激光器中添加某种同位素，可以改变激光的波长范围，以适应特殊需要，或提高激光的稳定性。

**$\gamma$ -激射器** 最近正在研究一种 $\gamma$ -激射器（ $\gamma$ -激光），它利用激光压缩核燃料，使它产生临界质量很小的微爆炸，核爆炸产生大量中子使某种同位素激发到高能态，然后跃迁，

发出强大的 $\gamma$ 射线。由于 $\gamma$ 射线的贯穿能力强，军事上可以用来破坏飞机、舰艇、导弹中的电子仪器；可以模拟核武器，使空中、地下核试验变成实验室里的核试验；还可以利用它的 $\gamma$ 射线细束作为一种“探针”，研究物质结构。据报道， $\gamma$ -激射器需要用铜-63、镉-114等稳定同位素。

**穆斯鲍尔谱学** 这是最近发展起来的一种新技术。它利用无反冲 $\gamma$ 射线的共振吸收效应来研究化学键、晶体结构、电子密度、离子态、晶格振动、相变以及验证相对论等，是一种重要的分析手段。在固体物理、晶格动力学、铁电学、磁学、化学和生物科学等方面得到广泛应用。穆斯鲍尔谱学的发展与制备浓缩的铁-57等特殊的核素是分不开的。至今已有40多种元素的70多个核素能观察到穆斯鲍尔效应。除大量需要铁-57外，还需要浓缩的锡-118、碲-128等。

### 3. 同位素稀释分析

同位素稀释分析技术可以用放射性同位素或稳定同位素作稀释剂。稳定同位素稀释分析没有放射性，不需要防护，也不受时间限制。其灵敏度为 $10^{-6}$ — $10^{-13}$ 克/克，甚至更高。如，用这种方法测定了自然界中微量铀-244，为 $10^{-18}$ 克/克。近几年来，它已经成为工业分析、核科学技术、地球和宇宙科学、医疗诊断、环境监测和生物化学等许多领域中进行微量和痕量分析的一种新技术。例如：确定机械磨损率、测定地下水流量、监测空气和水中的污染物质、测定岩层或陨石的地质年龄及核武器试验和反应堆运行中测定核燃料的损耗情况等。其灵敏度可以和中子活化分析相匹敌，并且互补长短。各种元素中80%可以用这种方法来分析，因此需要各种浓缩核素作为稀释剂。稀释法分析的误差与稀释剂的同位素丰度直接有关，稀释剂的同位素比与样品里同位素比的差别越大，分析的精度越高。例如，作为稀释剂的铷，要求铷-87的丰度在99.9%以上。

### 4. 生物、医学和环境保护

生物学、医学研究中过去常用放射性同位素作示踪剂，但它的射线对生物机体有一定损伤，射线的作用使标记化合物与生物体发生化学反应时具有不确定性，造成研究结果畸变，而且应用短寿命放射性示踪剂时，测量工作受时间限制。近年来生物医学研究逐渐倾向于用稳定同位素。除了大量应用氘、氮-15、氧-18、碳-13外，还开始应用电磁分离的其他浓缩稳定核素。例如，用铁-56、铁-57、硒-77、硒-80标记化合物研究蛋白质的结构、合成、功能和代谢。

“核医学”正在我国蓬勃发展起来。它需要几十种放射性核素。为了得到适合医用的纯净的、比放射性较高的放射性同位素，其中有一些需要用稳定核素作原料。例如，用于胎盘、血、肝、肾和肺扫描的铟-113m，要用浓缩锡-112制备；研究和诊断血液病用的铁-59，需要浓缩的铁-58；特别适合于肾扫描的汞-197，要以浓缩的汞-196为原料；具有亲肿瘤特性的镱-169-枸橼酸，需要浓缩的镱-168。此外，还要钙-44、钙-46、铬-50、铜-63、硒-74、铷-85、钼-98、镉-108、碲-122、钡-132、汞-202等约三十种稳定核素。

对于婴儿、青少年和孕妇必须尽可能避免用放射性核素来诊断，因此倾向于用稳定核素作示踪剂。随着“多标记方法”的出现及“色谱-质谱-计算机系统”、“大气压电离质谱-计算机系统”、“核磁共振技术”和“活化分析”等一系列简便的检测技术的发展，稳定核素临

床诊断受到普遍重视。

利用高度浓缩稳定核素锂-6、硼-10等的中子俘获反应治疗癌症是核医学的又一新成就，该反应放出 $\alpha$ 粒子，没有或很少 $\gamma$ 射线，而且半衰期短，因此可以做到只杀死癌细胞而不损伤人体正常组织。

带有电子俘获检测器的气相色谱仪是测定环境、食物中微量污染物的重要工具，在100多种有害物质中有40多种可以用它来进行快速、准确的分析。例如，肉、鸡蛋中有没有残留农药“六六六”，水中含不含致癌的亚硝胺，植物油中是否有过量的苯等。电子俘获检测器中用镍-63低能 $\beta$ 放射源，就是用浓缩的镍-62制成的。

据认为，环境中某些微量元素和化合物含量超过一定的值会导致癌症。我国医疗卫生部门在河南林县的调查研究证实了当地食道癌与自然环境有一定的关系。用稳定同位素稀释法可以精确测定钡、铅、汞等的环境分布。

## 5. 地球科学和宇宙科学

测定地质年代，编制全国地质年代表，对于探矿、研究地球演化史和生物发展史等有重要意义。“同位素地质年代学”是一门新兴的科学，利用天然放射性核素衰变规律作为“地质时钟”，能精确测定岩层、矿床是什么年代形成的。可以作为“地质时钟”的“核素对”有：铀-238-铅-206、铀-235-铅-207、钍-232-铅-208、钾-40-钙-40、钾-40-氩-40、铷-87-锶-87、铯-137-钡-137、镭-226-钡-226、钍-232-铍-9-铍-10、铀-238-钍-234-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226、钍-232-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226、钍-232-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226、钍-232-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226、钍-232-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226、钍-232-铀-234-钍-230-钍-230-镭-226-钡-226等。我国地质工作者根据登山队从珠穆朗玛峰地区采集的全岩和长石样品，用铷-锶法精确测定了珠峰的年龄，取得了第一手资料，证实了她是世界上最年轻的山峰。1975年在贵阳召开的《全国同位素地质工作经验交流会》上，对这方面工作给予十分重视，从品种、数量和质量上对浓缩稳定核素提出了要求。

陨石是天体演化的信使，1976年3月8日在我国吉林省发生的罕见的巨大陨石雨，给我们提供了大量珍贵的样品。利用同位素地质年代学方法可以测定其年龄，利用同位素稀释法可以分析其中微量元素的含量，从而研究元素的宇宙丰度。随着宇宙飞行技术的发展，我们可以直接得到宇宙中其他天体的样品，从而探索太阳系的起源、天体演化的过程等，在这方面需要多种浓缩稳定核素，除上述已经提到的外，还需要汞、铂、钨、钽的同位素。

上面列举了一些重要的应用。此外，浓缩稳定核素还用来配制质谱分析标准样品，研究冶金中的扩散现象、超导电性，制作标准波长的光源等。

我国自大跃进时期开始了同位素电磁分离工作，制备过一些同位素靶。在无产阶级文化大革命中，广大革命群众在伟大领袖毛主席“独立自主，自力更生”方针指引下，克服了苏修设置的重重困难和刘少奇反革命修正主义路线的干扰，使一台大型电磁分离器正式投产，文化大革命以来已经生产了二十种元素的七十多种浓缩稳定核素，提供我国核科学技术、国防科研、化工冶金、地质探矿、医疗卫生等许多部门使用。另一台大型电磁分离器F-3磁场改建工作已经完毕，不久也将投入生产。随着我国社会主义革命和建设事业的迅速发展，国民经济、国防建设和科学实验各方面对浓缩稳定核素的需要也不断增长，因而

(下转370页)

距离(见图1)。单位均用厘米。上式对  $p$  微分可得,

$$\frac{d\theta}{dI} \propto \frac{d\theta}{dp} = -1.81 \times 10^7 d_1.$$

因此, 调节引出参数  $d_1$ , 就可以实现选择工作区域及减小  $d\theta/dI$  的目的。

## 五、结 论

初步测试结果证明, 更换垫片后, 分离器的聚焦性能有了明显的改善, 说明垫片修改工作是成功的。

在新垫片的场形下, 空间电荷力使谱线高压侧变宽比低压侧变宽更容易些和明显些。但空间电荷力较大时, 这种特征就被掩盖了。

为了充分利用更换垫片后分离器的磁聚焦性能, 提高分离器的分离运行水平, 还需要进一步研究和改善离子源的离子光学系统等, 特别是要解决强流离子束的空间电荷中和问题。

## 参 考 文 献

- [1] 吕洪猷等, 原子能科学技术, 4, 303 (1976).  
茅乃丰等, 原子能科学技术, 4, 312 (1976).
- [2] M. B. Незлин, ЖТФ, 30, 168 (1960).
- [3] M. J. Bigatsberger et al., (Ed.), Electromagnetic Separation of Radioactive Isotopes, Vienna, p. 40, 1960.
- [4] H. Wagner et al., (Ed.), Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and the Techniques of their Applications, Marburg, p. 331, 1970.
- [5] M. Menat, Can. J. Phys., 42, 164 (1964).
- [6] M. Menat, Vacuum, 19, 547 (1969).
- [7] M. B. Незлин, Plasma Phys., 10, 337 (1968).
- [8] В. И. Райко, Kernenergie, 16, 3, 85 (1967).
- [9] H. Wagner et al., (Ed.), Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and the Techniques of their Applications, Marburg, p. 303, 1970.
- [10] D. Bollinger et al., Phys. Rev. Lett., 28, 723 (1972).
- [11] М. Д. 葛波维奇, 等离子体离子源物理和技术, 科学出版社, 1976年, 300页.
- [12] T. S. Green, Rep. Progr. Phys., 37, 1257 (1974).

(上接377页)

对电磁分离浓缩同位素生产和电磁分离技术的研究改进提出了更高的要求。我国从事电磁分离浓缩同位素生产的广大工人和科技人员决心认真贯彻执行毛主席的无产阶级革命路线, 继续以阶级斗争为纲, 以抓革命、促生产的更大成绩为社会主义革命和社会主义建设事业作出贡献。