

## 开启核科学技术时代的钋和镭 ——纪念居里夫妇发现钋和镭 110 周年

蔡善钰

(中国原子能科学研究院 同位素研究所, 北京 102413)

**摘要:** 在天然放射性元素钋和镭发现 110 周年之际, 简要回顾了这两种元素的发现史。鉴于目前镭的应用已显著减少, 因此着重阐述钋的生产途径、放射特性、辐射安全和在现代科学技术中的重要应用, 并以此纪念揭开放射性奥秘的巨人——皮埃尔·居里夫妇。

**关键词:** 钋; 镭; 天然放射性元素;  $\alpha$  放射源; 中子源; 放射性同位素能源; 辐射安全

**中图分类号:**      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7512(2008)04-0241-08

## Polonium and Radium Started up the Era of Nuclear Science and Technology: Commemorating the 110th Anniversary of the Discovery of Po & Ra by M. Curie and P. Curie

CAI Shan-yu

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

**Abstract:** It is the 110 th anniversary of the discovery of natural radioactive elements, Polonium and Radium. This historical event was briefly reviewed. While the application of Radium is obviously decreased nowadays, Polonium is still quite useful in modern science and technology. The production route, radioactive feature, radiation safety and important usage of Polonium were specifically described to commemorate the great couple, M. Curie and P. Curie, who revealed the mysteries of radioactivity.

**Key words:** polonium; radium; natural radioactive element;  $\alpha$  source; neutron source; radioisotope energy source; radiation safety

今年是皮埃尔·居里夫妇发现天然放射性元素钋和镭 110 周年, 在核科学技术取得巨大成就的今天, 回顾这两种元素的发现史和应用状况, 对于我国目前提出的走科技创新之路不无

裨益。

钋是第一个在自然界因自身的放射特征而被找到的元素, 紧接着镭的发现, 震撼了当时的科学界<sup>[1]</sup>, 并因此吸引了众多的化学家和物理学

家通过放射性辐射这一现象,开始向原子核内部的微观世界探索。他们利用钋( $^{210}\text{Po}$ )和镭( $^{226}\text{Ra}$ )释放的射线,展开了广泛的科学实验,获得了一系列激动人心的重大发现,如:1919年卢塞福(E. Rutherford)利用钋源的 $\alpha$ 粒子轰击氮元素 $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ ,发现了带正电荷的质子,第一次实现了人工核转变;1932年查特威克(J. Chadwick)利用钋源的 $\alpha$ 粒子轰击铍块 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 发现了中子;1934年约里奥·居里夫妇(J. Curie & I. Curie)利用钋源的 $\alpha$ 粒子轰击铝箔 $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$ 首先发现了人工放射性同位素;1938年哈恩(O. Hahn)、斯特拉斯曼(F. Strassmann)和梅特纳(L. Meitner)应用 $^{222}\text{Rn}\text{-Be}$ 中子源照射铀获得了钡、镧和铯等周期表上的中间元素,进而发现了“核裂变”现象。之后,“链式反应”的实现,终于打开了原子能这座巨大的宝库。

钋和镭的伟大发现在人类科学思想上曾引起一场真正的革命,从此摆脱了“原子是组成物质的最小单位”和“原子是不可分割的”陈旧观念束缚,极大地促进了经济和科技的发展,并深刻地影响了人们的生活。回顾20世纪上半叶,放射性尤其是镭的研究涉及到了化学、物理学、医学、生物学、地球和宇宙科学等领域。蓬勃兴起的射线应用技术,如癌症的镭疗(开创放疗技术)、夜视仪表用放射性发光涂料制造、 $\gamma$ 射线照相(工业探伤技术)、地质和石油勘探用中子测井技术(使用镭-铍中子源、钋-铍中子源)等等大多与镭的利用有关<sup>[2]</sup>。而20世纪中叶以后开拓的一些尖端技术,如核武器、核潜艇、核电站、人造卫星和月球观察站用核电源,钋在其中均发挥了重要作用。

1932年加速器的发明和1942年反应堆的建成,使可供选择的人工放射性同位素产品种类增多,镭的地位开始下降。由于镭( $^{226}\text{Ra}$ )的半衰期长(1600年)、 $\gamma$ 辐射强、尤其是衰变后会产生有害的氡气( $^{222}\text{Rn}$ ,俗称镭射气),其应用范围逐年缩小。目前除了作为放射性和辐射标准源外,大多数镭的应用已被其他放射性同位素取代。而元素钋,特别是它的重要同位素 $^{210}\text{Po}$ ,属于“纯 $\alpha$ 发射体”,又能用人工方法大量生产,其应用甚为广泛。随着科学技术的发展,有的应用虽然已被一些超铀元素的同位素替代,而有的应用至今仍为比较理想的选择。为此,本文除回顾

钋和镭的发现史外,着重介绍钋的生产途径、放射特性、辐射安全及其重要应用,以纪念揭开放射性奥秘的巨人——皮埃尔·居里夫妇。

## 1 钋和镭的发现

原子能科学技术的起步,核物理和放射化学这两门孪生学科的诞生可追溯到19世纪末叶。1895年德国物理学家伦琴(W. K. Röntgen)发现了X射线。当时人们对这种现象产生了浓厚的兴趣,开始检查与X射线类似的别种射线是否能使荧光性物质发光。1896年法国物理学家贝克勒尔(H. A. Becquerel)在研究硫酸铀酰钾的荧光现象时并未得到意料中的结果,却发现了另外一种完全不同的现象:铀及其化合物能使包裹在黑纸里的照相底片感光,并能将周围的空气电离而使验电器放电。这种神秘的、永不消失的“铀射线”引起了年青女学者玛丽·居里(M. Curie)的极大兴趣,她选定了这一绝佳的博士论文课题,踏进了一个未曾开垦的处女地。当时居里夫人利用静电计和电离室对含铀量不同的各种物质进行测定、比较,结果显示它们的电离能力不受外界环境,如光照、温度、电磁场等的影响,仅和物质的含铀量有关。接着她又检验了几百种物质的电离能力,结果发现钍及其化合物也能自发地放出这种看不见的射线,强度与铀射线相似。她把这种现象命名为“放射性”(该词来源于拉丁文radius,原意是光线)。把铀和钍等具有这种特殊放射性质的元素称为“放射性元素”<sup>[3]</sup>。

此时,放射性几乎迷住了这位化学家。强烈的好奇心驱使她又继续检查了很多含铀和含钍的矿物,结果观察到一个惊人的事实:沥青铀矿、铜铀云母的放射性强度要比按矿物中铀和钍的含量所预计的大得多。试验重复了多次,结果均无偏差。于是她敏锐地觉察到可能存在一种比铀的放射性还要强的元素。当时门捷列夫周期表创立已有20多年,在这一时期,新元素的发现犹如雨后春笋。居里夫人也基于自己观察到的种种异常现象,以极大的勇气,果断地假定:这类矿物中一定含有放射性更强的物质,是至今未知的化学元素,一种新元素!

这一重要的判断促使皮埃尔·居里(P. Curie)中断了自己关于结晶体的研究,而与他的妻子共同从事分离新元素的工作。他们耐心而细

致地检查矿苗,所用方法就是利用放射性的特征,一步一步地跟踪追踪,依照化学元素全分析的常规程序,把组成沥青铀矿的各种元素按组份逐一分开,然后测量所得组份的放射性。经过几次淘汰后,搜索范围逐步缩小,已渐渐能看出那种“反常的放射性”主要集中在两个化学组份里。居里夫妇认为这是两种不同新元素存在的象征。其中一个在铋组份里,当硫化氢通入其酸溶液时,它与铋一起共沉淀下来。这种含有高放射性的硫化物比硫化铋易挥发,可用真空升华法分离。就这样,最后获得了一种放射性比铀大400 倍的物质。

1898 年 7 月,居里夫妇认为已经可以宣布发现了两种元素中的一种元素,它的化学性质与铋十分相似。为了纪念居里夫人的祖国波兰(Poland),他们将此元素命名为 Polonium(钋)。同年 12 月,居里夫妇宣布在沥青铀矿中发现了第二种放射性元素,它浓集在钡组份里,其化学性质与钡十分相似,定名为 Radium(镭)。

居里夫妇的发现引起了当时科学界的震撼,动摇了几个世纪来人们已形成的基本概念和对大自然的认知,即:元素的原子是组成物质的最小单元,而原子则是不可分的。科学家们无法解释这些放射体会自动放出射线,更不能设想存在放射性而肉眼却看不到的具体物质的实体。因此,宣布钋和镭的发现仅仅是初步的。为了进一步确证,必须严格地把它们分离和测定出来。居里夫妇继续向新的高峰攀登。他们在十分简陋的工棚里,在相当艰苦的条件下,处理了从波希米亚运来的两吨多沥青铀矿残渣。开始时他们曾乐观地估计,这两种放射性元素在沥青铀矿里的含量不超过百分之一。然而,事实上要比他们设想的少得多,甚至还不到百万分之一。可以想象到要把这样微量的物质分离出来,需要付出多么艰巨的劳动。受当时实验条件限制,他们每次只能处理 1~2 kg 矿渣。经过无数次溶解、沉淀、结晶、再结晶等繁杂的提取手段,他们日以继夜地工作了整整四年,到 1902 年才制得 0.1 g 纯镭(氯化镭)。通过对镭的相对原子质量的测定和它的发射光谱的测量,得到了被分离出来的新元素的确凿证据,钋和镭的存在终于被人们正式承认了<sup>[1]</sup>。

值得一提的是,X 射线、放射性、钋和镭等伟大发现,表明原子是可以分割的,元素也是可以转化的。这些科学事实雄辩地证实了马克思主义关于运动是物质的存在形式,事物都是一分为二的辩证唯物主义哲学观。

居里夫妇由于研究天然放射性现象的杰出贡献,与发现天然放射性的贝克勒尔共享 1903 年诺贝尔物理学奖;又由于分离镭的成功,居里夫人再获 1911 年诺贝尔化学奖。

## 2 钋的生产途径

钋被发现后,排列在元素周期表第 84 号空位上,化学符号为 Po。到目前为止已找到了 27 种钋的同位素(质量数自 192 到 218)和 8 种同质异能素。它们均能放射  $\alpha$  射线,只有个别伴随发射少量  $\beta$  和  $\gamma$  射线。Po 的这些放射性同位素的半衰期除  $^{208}\text{Po}$ (3 年)和  $^{209}\text{Po}$ (103 年)较长外,其余的均较短。这些同位素大多可用人工方法制备,其中最重要的是  $^{210}\text{Po}$ 。它的半衰期为 138.4 d,发射的  $\alpha$  粒子能量为 5.304 MeV, $\gamma$  粒子能量为 0.803 MeV,但  $\gamma$  射线强度很弱,因发射几率很低,大约每发射十万个  $\alpha$  粒子才发射一个  $\gamma$  光子( $\gamma/\alpha = 1.21 \times 10^{-5}$ )。因此, $^{210}\text{Po}$  可看作是一个“纯  $\alpha$  放射体”,其衰变产物为稳定同位素  $^{206}\text{Pb}$ 。

在自然界中存在着 3 个天然放射系和一个人工放射系,3 个天然放射系为铀系( $4n+2$  系)、钍系( $4n+3$  系)和锕系( $4n$  系),人工放射系为镎系( $4n+1$  系)。在这些放射系中均可找到钋的同位素踪迹。其中  $^{210}\text{Po}$  是铀系中  $^{210}\text{Bi}$  的衰变产物,与铀、镭共生在一起,因此早期钋的唯一来源是自然界存在的沥青铀矿,但其含量极低,每吨矿石中只有约 0.1 mg  $^{210}\text{Po}$ (居里夫人就是从这种矿石中在 1910 年制得了含有 100  $\mu\text{g}$   $^{210}\text{Po}$  和数毫克杂质的样品)。后来人们大多从生产镭的残渣中,即镭-D( $^{210}\text{Pb}$ )、镭-E( $^{210}\text{Bi}$ )和镭-F( $^{210}\text{Po}$ )的混合物中提取,但产量也极少。在铀系元素中,每克镭在达到放射性平衡时仅含有 0.2 mg  $^{210}\text{Po}$ 。由于镭的平衡体系中  $^{226}\text{Ra}$  及其衰变子体具有很强的  $\gamma$  射线,以及提取成本很昂贵,而限制了该法的应用<sup>[4]</sup>。RaD 的衰变纲图示于图 1。

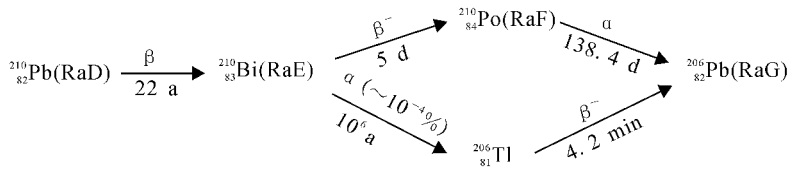


图 1 RaD 的衰变纲图

1936 年列文古德 (Livingood) 用加速器首次生产了钋。采用加速到 5.4 MeV 的氘核轰击铋靶, 获得了  $^{210}\text{Po}$ 。其化学反应式如下:



该方法所生成  $^{210}\text{Po}$  的量极微, 只能用灵敏的辐射探测器才能记录下来。钋的其它同位素也能用加速器生产。如用加速到 150~200 MeV 的氦离子 ( $^{20}\text{Ne}$  或  $^{22}\text{Ne}$ ) 轰击钨靶, 可得到钋的很多同位素(质量数 196~202)。又如用高能  $^{12}\text{C}$  或  $^{13}\text{C}$  离子轰击铂靶, 也可生成钋的同位素(质量数 195~205)。

1942 年出现了原子核反应堆, 为人工方法大量生产钋创造了条件。目前  $^{210}\text{Po}$  几乎都是在反应堆内用中子辐照金属铋或氧化铋生产<sup>[5]</sup>, 其化学反应式如下:



也可从熔融铋或铋合金作载热剂的熔盐堆中以副产品方式获得钋。

从堆照铋靶中分离、提取、纯化和浓集  $^{210}\text{Po}$ , 可采取诸如共沉淀、自镀(自发电沉积)<sup>[6-7]</sup>、电镀<sup>[8]</sup>、离子交换、萃取、色谱、升华和分子蒸馏等多种手段。制得的金属钋具有银灰色光泽, 熔点为 254 °C, 沸点为 962 °C, 密度达 9.4 g/cm<sup>3</sup>。 $^{210}\text{Po}$  的比活度很高, 可达到 166.5 TBq/g。

### 3 $^{210}\text{Po}$ 的放射特性

$^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子能量很高, 因此有能力引发化学反应, 致使钋溶液的处理方法变得复杂。当钋的浓度较高时, 可以观察到水溶液里不断逸出小气泡, 这是由于  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子辐射作用导致了过氧化氢和臭氧的连续产生并分解的结果。同样可以观察到含有  $^{210}\text{Po}$  的有机溶剂也有连续冒泡的情况发生。在进行不溶性钋化物沉淀研究时, 固体还会出现“散裂”现象。这也是由于夹

杂在沉淀中的溶剂不断发生辐射分解, 从而给分离沉淀带来困难。

早期的科学家们在利用钋元素进行研究时, 常常出现奇怪的“丢失现象”。后来的研究表明, 低浓度钋在溶液中水解后会形成胶体, 极易吸附在杂质颗粒和玻璃器皿壁上, 甚至在稀酸溶液中也存在此现象。

此外, 盛有居里级的固体或液体  $^{210}\text{Po}$  的玻璃器皿放置日久后, 其表面会产生腐蚀现象, 并在样品周围某些地方出现明显的裂纹。对于更高浓度的放射性溶液(例如 1.48 TBq/mL), 腐蚀过程更加迅速, 几天后, 玻璃器皿底部即出现硅沉积物。操作钋的手套箱, 氯丁橡胶手套在使用一段时间后会变粘、发脆、甚至开裂, 过早地产生了“老化”现象。

国外曾多次报道, 装有  $^{210}\text{Po}$  的 X 射线毛细管发生爆炸的现象。这是由于  $^{210}\text{Po}$  在  $\alpha$  衰变过程中释放出的氦气与日俱增, 加之产生的衰变热又被隔绝, 从而造成压力进一步增加之故。在一次偶然事件中, 有人注意到装有 18.5 GBq(500 mCi) 金属钋的毛细管, 在爆炸后使放置其周围的棉花产生了严重的“炭化”现象。在实验室中还经常可观察到与镀有  $^{210}\text{Po}$  的金片或铂片接触的滤纸, 数天后会变黄、变脆、直至焦化<sup>[9]</sup>。

$^{210}\text{Po}$  的稀溶液放置在黑暗处可见到微弱的萤光,  $^{210}\text{Po}$  的浓溶液发出的萤光更强。至于居里级的金属钋萤光更是惊人, 犹如夜明珠那样闪闪发出浅蓝色的光芒。

前面所述的一些现象还只是  $^{210}\text{Po}$  浓度为毫居里级或居里级时观察到的。若放射性活度达到几百居里乃至千居里级时, 可观察到极为明显的“自热现象”。它能使载带的有机溶剂或水溶液迅速蒸发至干, 并能使装有  $^{210}\text{Po}$  的玻璃管灼热成熔融状态。将千居里的  $^{210}\text{Po}$  密封在一个金属包壳内(称源盒或燃料盒), 则其表面会强烈地发热, 温升可达到五、六百摄氏度。使用端头上焊有锡的金属镊子夹取时, 可见到焊锡迅速熔化

并徐徐滴下;若将其投入水中,则引起强烈的飞溅,并发出吱吱声,接着其周围的水迅即冒出一股股小气泡而顿时沸腾起来<sup>[10]</sup>。

种种奇异现象,如溶剂的分解、毛细管的爆炸、玻璃器皿的腐蚀、橡胶制品的老化、固体沉淀的散裂、有机物质的炭化、光发射、热效应等等,绝大多数是由<sup>210</sup>Po放射的高能 $\alpha$ 粒子所引起的。正是通过对钋的 $\alpha$ 粒子和镭的 $\gamma$ 光子与物质作用的研究,开创了“辐射化学”这门交叉学科,并在日后出现了“辐射加工”和“无损探伤技术”等行业。

#### 4 <sup>210</sup>Po 的辐射安全

早期从事<sup>210</sup>Po的工作者可以说是吃了不少苦头。在<sup>210</sup>Po的工作场所,稍不注意就会发生放射性污染,因为常温下<sup>210</sup>Po具有较高的蒸汽压,极易形成气溶胶,并且还具扩散、渗透、反冲等特性。特别是后者,<sup>210</sup>Po发射 $\alpha$ 粒子时,其衰变产物的反冲能量使邻近的<sup>210</sup>Po原子团从表面逸出,从而增加了污染的危险性。由于<sup>210</sup>Po具有适中的半衰期和生物半排期(可溶性及不溶性钋化物的生物半排期分别为 57 天和 40 天),使其在机体内有一定的滞留时间,加之<sup>210</sup>Po的 $\alpha$ 辐射很强以及在机体内分布的特点,得<sup>210</sup>Po被列为极毒类放射性元素<sup>[11]</sup>。在各种化学毒品等量的情况下,<sup>210</sup>Po属于最毒化学品之列。例如在相等质量时,<sup>210</sup>Po的毒性是极毒化学品氢氰酸的 $2.5 \times 10^{11}$ 倍<sup>[12]</sup>。

为了确保操作人员的安全,世界各国都制订了“最高允许剂量标准”,即在此剂量照射下工作,人体不会受到显著危害。根据国际放射防护委员会(ICRP)推荐的标准(1958年制定,1977年和1990年进行了两次修改),可溶性<sup>210</sup>Po化合物在空气中最大允许浓度为 $0.74 \text{ mBq/L}$ ( $2 \text{ aCi/cm}^3$ ),水中最大允许浓度为 $25.9 \text{ Bq/L}$ ( $0.7 \text{ pCi/cm}^3$ )。人体对<sup>210</sup>Po的一次最大允许摄入量为 $0.74 \text{ kBq}$ ( $0.02 \mu\text{Ci}$ ),大约 $4.5 \times 10^{-12} \text{ g}$ 。据最近有关报道,<sup>210</sup>Po的致死量为 $1.85 \text{ kBq}$ ( $0.05 \mu\text{Ci}$ )。

由于<sup>210</sup>Po对机体具有很大的危害性,操作该同位素时必须特别小心谨慎。当操作总量低于 $4.625 \text{ TBq}$ ( $125 \text{ Ci}$ )时,一般认为“外照射”问题不大,相当于 $37 \text{ MBq}$ ( $1 \text{ mCi}$ )放射性物质能量为 $0.8 \text{ MeV}$  $\gamma$ 辐射的照射),主要是防止“内

照射”。故而所有<sup>210</sup>Po的化学操作,即使在毫居里级甚至微居里级,均应在具有负压的密闭手套箱中进行;当操作量增大时需在带有负压的双层密闭手套箱中进行,工作场所同时还应有良好的通风系统。工作人员必须穿戴过滤布口罩、医用手套、工作服等防护用品,有些特殊工作还需穿上气衣背心或全套气衣,以防止放射性物质由呼吸道、消化道或皮肤(伤口)等途径进入体内造成内照射危害。

可溶性或不溶性<sup>210</sup>Po的化合物进入人体后,主要分布在肾脏、肝脏、脾脏、肠系膜淋巴结和胃壁等。一旦摄入<sup>210</sup>Po,必须予以“促排”。即设法使<sup>210</sup>Po形成一种可溶性络合物,加速其从体内排出。早期的研究认为二巯基丙烷磺酸钠有明显的促排效果和解毒作用。近年来又有新的研究认为乙二胺四醋酸钙钠盐(EDTA-Ca-Na<sub>2</sub>)和二亚乙基三胺五醋酸钙钠盐(DTPA-Ca-Na<sub>3</sub>)(又名促排灵)的促排和解毒效果更好<sup>[13]</sup>。

最后还需指出,当<sup>210</sup>Po操作总量在数百居里至数千居里时,需考虑外照射问题,主要是对 $\gamma$ 射线进行防护。因为<sup>210</sup>Po放射的 $\alpha$ 粒子会与其周围轻元素(如氧、氟等)的原子核发生( $\alpha, n$ )反应,产生中子。为了屏蔽中子,通常是将中子慢化剂和 $\gamma$ 吸收剂混在一起使用。如用含硼砂的石蜡砖或内充有硼酸水溶液的有机玻璃水箱堆置而成。

由于<sup>210</sup>Po在 $\alpha$ 衰变过程中产生的 $\gamma$ 射线是十分微弱的,即使是千瓦级<sup>210</sup>Po热源在 $1 \text{ m}$ 处也仅仅只有 $200 \text{ mR/h}$ 的 $\gamma$ 辐射,故可不考虑对 $\gamma$ 进行屏蔽。

由于对钋、镭等放射性元素的辐射安全研究,建立起了“辐射剂量学”、“辐射防护学”等边缘学科。为适应核科学技术的发展,后来还形成了诸如“辐射监测仪器”和“辐射屏蔽材料生产”等行业。

#### 5 <sup>210</sup>Po 的重要应用

钋的发现为放射化学这门学科的诞生奠定了基础。钋化学是放射化学中一个重要的研究内容。钋的重要同位素<sup>210</sup>Po在原子能工业和其它工业中都有着广泛的用途<sup>[14]</sup>。

前已述及,<sup>210</sup>Po是一个纯 $\alpha$ 放射体,其比活度在现有的 $\alpha$ 放射体中是最高的,故可用于制造高比活度的<sup>210</sup>Po $\alpha$ 源。还可制造高强度、小尺

寸、低  $\gamma$  辐射的 ( $\alpha$ , n) 中子源。此外, 由于其衰变时能产生 27.4 Cal/(h · Ci) 的热量, 比热功率高达 140 W/g, 因此  $^{210}\text{Po}$  也能制造高功率密度的放射性同位素能源(包括热源和电源)。

### 5.1 高比活度的 $\alpha$ 源

已知,  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子能量为 5.304 MeV。在空气中的射程可达 3.93 cm。测试表明, 每个  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  粒子在其发射途径上可产生  $1.5 \times 10^5$  个离子对。

利用  $^{210}\text{Po}$  的强  $\alpha$  放射性, 可制成多种用途的  $\alpha$  源。如制成参考源, 可用来刻度半导体  $\alpha$  谱仪和其它一些核物理仪器。利用其  $\alpha$  粒子能使空气电离的特点, 尚可制成“静电消除器”和“阴离子发生器”。放射性同位素制作的静电消除器可用于印刷、造纸、胶片、塑料、卫生材料和纺织等行业<sup>[15]</sup>。至于阴离子发生器的功能, 主要是消除空气中有害的阳离子, 增加对人体有益的阴离子, 从而达到空气离子化调节的目的。此外, 在造纸工业中也可利用  $\alpha$  粒子监测单位面积内纸张质量的变化。试验表明, 当纸张厚度低于 34 g/m<sup>2</sup> 时, 用  $^{210}\text{Po}$  源测厚度是可行的。

在放射化学领域, 借助于  $^{210}\text{Po}$  可观察  $\alpha$  粒子对水、有机溶剂及离子交换树脂等物质的辐照效应。在分析领域内, 则可利用  $^{210}\text{Po}$  的 ( $\alpha$ , n) 核反应产生的中子数或  $\alpha$  活化分析方法, 定量地控制铍、硼、氟、铝等产品。基于  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子能引起辐射发光的特性, 还可用来对金刚石进行鉴别(假钻石发出的磷光极为微弱), 并对一些矿石或矿物进行分析。曾经采用过 66.6 GBq (1.8 Ci) 的  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  源成功地观察到萤石、方介石、白云石、绿柱石和白钨矿的辐射发光。另外  $^{210}\text{Po}$  也可用于进行  $\alpha$  射线诱导气体发光的光谱研究。

在生物物理学领域,  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  射线通过小孔形成微束, 或将  $^{210}\text{Po}$  安装在微针上直接照射细胞组织(照射直径可小于 5  $\mu\text{m}$ ), 对辐射的生物效应进行更深入的研究。此外, 利用  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  源的自射线照相术还可观察鸡、鼠、狗的松质骨和密质骨。

除上述用途外,  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  源还有一些特殊应用, 如进行气体流量的测定, 研究超导的  $\alpha$  辐照效应(将样品放在 4.2 K 温度下辐照, 以测定晶格缺陷对超导性能的影响)。在倾斜仪上作为视孔偏移探测; 还可制成  $\alpha$  伏特计, 测量高达  $10^5$

$\sim 10^6$  V 电压, 并能高真空中操作。

近年来研究表明, 用  $\alpha$  粒子轰击低原子序数 ( $Z < 15$ ) 的元素时, 能产生特征 X 射线。根据这一原理可利用  $^{210}\text{Po}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242}\text{Cm}$  的  $\alpha$  粒子制作便携式 X 射线荧光分析仪, 以分析重元素中所含的轻元素。该类仪器已用于研究地球外的物质表面, 如月球、陨石等样品。另外, 也可利用  $\alpha$  激发的 X 射线进行测厚。如在氦气氛中用 185 MBq (5 mCi) 的  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$  源照射低原子序数的样品 ( $Z = 6 \sim 14$ ), 借助于流气式正比计数管和聚丙烯薄窗 ( $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 测量  $\alpha$  粒子激发的 X 射线产额, 用于确定物质表层薄膜, 如硅表面的二氧化硅、铝表面的氧化铝和碳氢化合物的厚度。当然, 由于这种激发的能量范围仅仅为 0.28 ~ 1.74 keV, 因此适用于几百毫微米厚度的测定<sup>[16]</sup>。

### 5.2 高强度的中子源

利用  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子轰击轻元素靶核, 产生 ( $\alpha$ , n) 核反应以获得大量中子的特性, 可制成钋-锂、钋-硼、钋-铍和钋模拟 ( $^{235}\text{U}$ ) 裂变中子源<sup>[17-18]</sup>。其中钋-铍中子源的中子产额最高(理论产额为  $2.85 \times 10^6$  n/(Ci · s), 实际产额为  $2.5 \times 10^6$  n/(Ci · s))。

钋-铍中子源的用途相当广泛, 在原子能工业中主要用于核武器试验以及核潜艇和核电站。据公开资料报道, 美国和前苏联在早期的核武器中使用了构造复杂的钋-铍中子源作点火源<sup>[19]</sup>。

在反应堆设计和研究中, 可用于反应堆指数装置和亚临界装置的实验, 启动零功率堆、微型堆和动力堆(包括压水堆、沸水堆、重水堆、气冷堆和增殖堆核电站)。对于压水堆电站启动中子源棒(又称“点火中子棒”), 现在用得最多的是  $^{210}\text{Po}$ -Be 源和  $^{252}\text{Cf}$  源。为了确保反应堆安全启动, 需要在初始点火时提供大量中子以引发核燃料的链式反应, 并将堆中子注量增长的全过程置于源量程核测量仪器的监督之下。由于启动时间短, 使用钋-铍源甚为合适, 因为它既能提供高中子发射率, 价格又较  $^{252}\text{Cf}$  源便宜<sup>[20-21]</sup>。

钋-铍中子源在中子物理研究中常用于测定核反应截面, 研究中子在各种介质中的慢化、扩散和衍射等现象。

“中子活化分析”技术受到普遍的重视。因为它对于超纯物质的测定具有独特的优点, 特别是对于中子俘获截面大的一些元素的分析, 其灵

敏度超过比色法和光谱法。如有人利用含 1.85 TBq (50 Ci) 的钋-铍中子源照射土壤、矿物、植物等样品 30 min, 各种元素的分析灵敏度为: 钠,  $1 \times 10^{-5}$ ; 铝, 0.1%; 氮,  $2 \times 10^{-4}$ ; 锰,  $1 \times 10^{-6}$ ; 砷,  $1 \times 10^{-6}$ ; 锑,  $1 \times 10^{-7}$ ; 金,  $1 \times 10^{-5}$ 。利用含 0.37 TBq (10 Ci) 的钋-铍中子源可以迅速测定磷灰岩中的铁和铝, 以及分析岩石的组份。

“中子测井”技术在石油和地质等部门广泛用于勘探和开发石油、天然气和一些矿产资源(如铍、硼、铜、锡、钨、锰、汞、稀土元素、萤石、磷灰石和磷灰岩等矿藏)。尤其在石油工业中该技术使用最为普遍。测定时通常是将中子源(如  $^{210}\text{Po}$ -Be 源、 $^{241}\text{Am}$ -Po 源、 $^{252}\text{Cf}$  源或中子管)和探测器组成的测井仪沿钻孔下到井内, 然后以一定速度提升, 在中子源照射井壁的同时, 探测器即可测出岩层周围的放射性(使用“中子-中子”或“中子- $\gamma$ ”测井法)。该技术能正确地划分油气和油-水界面(当层间水含有盐时), 找出油层和气层的位置, 以便进行射孔和开采。

“中子测水”技术也应用甚广。利用钋-铍源制成的“中子湿度计”(或称“中子水分计”), 能快速测定土壤、岩层以及各种物料(如焦炭、烧结料、水泥、肥料、混凝土拌合料等)的水分, 检查建筑物中硬化混凝土的含水量, 测定飞机跑道地基的压实程度等。这里需要指出, 土壤中水分含量的测定对于农作物生长具有重要意义, 如能做到土壤中所含的水分正好是农作物生长过程中所需要的水分, 就能大大提高产量。利用中子湿度计可方便而准确地测量土壤中的水分以达到合理用水的目的<sup>[22]</sup>。

其它如中子照相技术、中子育种技术和中子治癌技术近年来也发展甚快, 它们均可借助高强度的  $^{210}\text{Po}$ -Be 中子源或  $^{252}\text{Cf}$  中子源进行工作。

### 5.3 高功率密度的能源

放射性同位素在衰变时释放出高速带电粒子, 如  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和/或  $\gamma$  光子, 在与周围物质相互作用时最终被阻止或吸收, 射线的动能转变成热能。这种利用放射性同位素的衰变能制成的热源称为放射性同位素热源。由  $^{210}\text{Po}$  制成的同位素热源, 其最大优点是热功率密度高(金属钋为  $1\ 355\ \text{W}/\text{cm}^3$ ), 位居同位素热源之首。由于金属钋的熔点低( $254\ ^\circ\text{C}$ ), 不适合用作大功率热源的燃料形式。然而稀土钋化物, 如钋化钷( $\text{GdPo}$ )熔点高达  $1\ 675\ ^\circ\text{C}$ , 功率密度为  $824\ \text{W}/$

$\text{cm}^3$ , 是  $^{210}\text{Po}$  热源燃料形式的最佳选择<sup>[23]</sup>。

在 20 世纪, 放射性同位素电池的研制和应用已取得了令人瞩目的成就, 为放射性同位素的大规模应用开辟了广阔的前景。放射性同位素电池是利用放射性同位素的衰变热, 通过热电转换机构, 使热能转变成电能的一种装置。利用温差发电原理制成的放射性同位素电池又称为放射性同位素温差发电器(TIG)。它与化学电池、太阳能电池相比, 具有结构紧凑、运行可靠、不受周围环境影响, 且能长期工作而无须看管的特点。用  $^{210}\text{Po}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{242}\text{Cm}$  和  $^{244}\text{Cm}$  等  $\alpha$  热源制成的放射性同位素发电机与  $\beta$  热源(如  $^{90}\text{Sr}$ )、 $\gamma$  热源(如  $^{60}\text{Co}$ )制成的放射性同位素发电机相比, 又具有体积小、质量轻、功率密度高、辐射屏蔽容易等优点, 尤其适用于航天技术中, 为人造卫星、月球科学试验站和星际探测器等提供动力<sup>[19]</sup>。

美国于 1959 年开始实施“空间核动力辅助计划”(SNAP), 曾制造了 3 台  $^{210}\text{Po}$  原型电池(SNAP-3B<sub>1</sub>, SNAP-3B<sub>2</sub> 和 SNAP-3B<sub>4</sub>), 用于示范试验, 在以后的空间发射中均使用了  $^{238}\text{Pu}$  电池。前苏联在 1965 年也曾制造了 3 台  $^{210}\text{Po}$  电池(原型 V、VI、VII), 并在同年发射了载有  $^{210}\text{Po}$  电池的军事通信卫星“宇宙-84”号和“宇宙-90”号。此外在 1969 年和 1971 年还制造了 2 台热功率各为 800 W 的  $^{210}\text{Po}$  加热器, 作为“月球车-1 号”和“月球车-2 号”的加热部件<sup>[24-25]</sup>。

$^{210}\text{Po}$  电池的不足之处是使用期限较短, 一般只能连续工作 90 天左右, 故与  $^{242}\text{Cm}$ (半衰期为 162.8 天)电池一样, 适宜于短期、特定任务的航天使命。 $^{238}\text{Pu}$  电池虽然功率密度较  $^{210}\text{Po}$  电池低, 但使用寿命长(半衰期为 87.7 年), 因而适宜于长期任务的航天使命。

此外,  $^{210}\text{Po}$ 、 $^{238}\text{Pu}$  和  $^{244}\text{Cm}$  也可作为空间低推力推进的一种同位素热源, 如加热火箭的推进剂(液氢或联氨等), 以升高喷管中燃料气体的温度。还可作为宇宙飞船进入空间后的辅助推进, 如校正射入轨道误差、控制飞船姿态、消除阻力和进行操纵等<sup>[16]</sup>。

## 6 结 语

追溯现代核科学技术的发展史, 我们深切地感受到居里夫妇把铀射线和钷射线的现象命名为“放射性”的科学性及发现钋和镭所具有的划时代意义。历史上许多事例有着惊人的相似, 一

种元素的发现及应用会导致整个人类生活的巨大变化。正如铁元素的发现及用铁制成各种工具,使人类从“石器时代”进入到“铁器时代”那样,钋和镭两种元素的发现和应用则开启了核科学技术的新时代,并给人类带来了新能源——原子能以及新技术——核技术和同位素技术。

#### 参考文献:

- [1] 艾芙·居里著,左明彻译.居里夫人传[M].北京:商务印书馆,1957.
- [2] 汪志远.国外镭生产及应用概况[R].北京:原子出版社,1978.
- [3] 钱三强,何泽慧.原子能发现史话[M].钱三强论文集.北京:科学出版社,1993:219.
- [4] 蔡善钰.特殊用途放射性核素的生产及工艺示例,<sup>210</sup>Po[M]//肖伦主编.放射性同位素技术.北京:原子能出版社,2000:35.
- [5] MAYER HV. Polonium, TID-5221 [R]. USA: TID,1956.
- [6] 郭高品,曹盘年,乐俊楚.钋在铋粉上的电化学置换[R].北京:中国科学院原子能研究所,1965.
- [7] 崔海平,张海燕,许荣旺,等.从大量照射 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 靶中分离<sup>210</sup>Po[J].同位素,1996,9(4):237.
- [8] 孙树正,柳蕴刚,徐长林,等.用电化学方法分离和纯化 Po-210 的研究[M].核化学与放射化学,1982,4(2):104.
- [9] BAGNALL KW. Chemistry of the Rare Radioelements[M]. London: Butterworths Scientific Publications,1957.
- [10] CAI Shanyu, ZHO Aju, CAO Ponnien, et al. Encapsulation of Kilocuries Polonium-210 Heat Source, CONF-900109 [C]//Proceedings of 7th Symposium on Space Nuclear Power Systems. USA; Albuquerque,1990:695.
- [11] 钋-210 的毒性及钋中毒的诊断[R].北京:原子能出版社,1964.
- [12] WEAST RC. Handbook of Chemistry and Physics; 55th edition[M]. USA: CRC Press Inc, 1974; B25.
- [14] 北京 59172 部队. 防原医学与放射卫生学基础 [M]. 北京:原子能出版社,1978.
- [14] 蔡善钰.钋在今日科技中[J].现代化,1981,2:14-16.
- [15] CAI Shanyu, ZHOU Zhenghe, MAO Shiqi, et al. Po-210 Static Eliminator and Its Industrial Application [C]//Proceedings of International Conference as Modern Electrostatics. Beijing: [s. n.], 1988.
- [16] GREENE RE, PRESSLY RS, CASE FN. A Review of Alpha Radiation Source Preparation Method and Applications, ORNL-4819 [R]. USA: ORNL, 1972.
- [17] 曹盘年,蔡善钰.<sup>210</sup>Po-Li,<sup>210</sup>Po-LiF 中子源的制备 [M]//中国科学院原子能研究所年报.北京:中国科学院原子能科学研究所,1980:163.
- [18] 蔡善钰,曹盘年.高温挥发法制备<sup>210</sup>Po 模拟裂变中子源 [M]//中国科学院原子能研究所年报,1980:164.
- [19] 蔡善钰.人造元素[M].上海:上海科学普及出版社,2006.
- [20] CAI Shanyu, ZHANG Pinyuan, GAO Wanshan, et al. <sup>210</sup>Po-Be Start-up Source Rods for 300 MW Qinshan Nuclear Power Plant, CNIC-00904, IAEA-0139 [R]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994.
- [21] 蔡善钰.秦山 300 MW 核电站<sup>210</sup>Po-Be 启动源的设计和安全性分析[J].同位素,1995,8(4):1.
- [22] KERSHNER CJ, LONADIER FD. Polonium-210 Isotopic Fuels, MLM-1228 [R]. USA: MLM, 1965.
- [23] 黛莽祖. Po-210 放射性同位素电池[J].核技术,1980,5:8.
- [24] 蔡善钰.空间同位素发电系统的应用现状和展望[J].核科学与工程,1994,14(4):373.
- [25] 蔡善钰,何舜尧.空间放射性同位素电池发展回顾和新世纪应用前景[J].核科学与工程,2004,24(2):97.