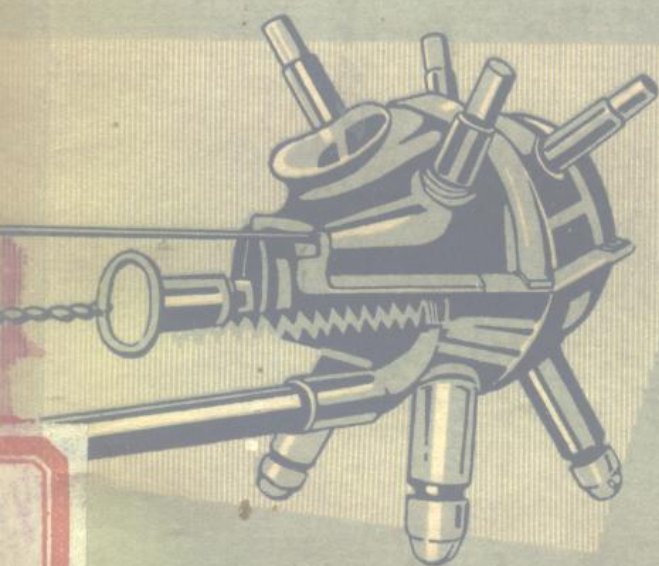


放射性同位素在 技术中的应用

И. Е. 季亚欽科



科学出版社

放射性同位素在技术中的应用

П. Е. 季亚欽科 著

于 木 譯

科学出版社

П. Е. ДЬЯЧЕНКО
ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ
ИЗОТОПОВ В ТЕХНИКЕ

Машгиз, 1958

內 容 簡 介

本书介绍放射性同位素在技术实验研究和工业生产实践中的各种应用方法。

书中以較多的篇幅叙述利用放射性同位素研究机器零件和机构的磨損問題。介绍了产品厚度的測定、金属探伤术以及其他各种技术领域中所常用的各种方法和仪器。

书中也探讨了放射性輻射对金属各种性质的作用。

本书可供工厂和研究部門的工程技术人員閱讀。

放射性同位素在技术中的应用

П. Е. 季亞欽科 著

于 木 譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 1 月第 一 版

书号: 2663 字数: 181,000

1963 年 1 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

(京) 0001—1,950

印张: 7

定价: 1.20 元

序 言

現在放射性同位素在技术中的应用是多种多样的，要完全反映出它在工业各部門中的使用是困难的。本书将叙述放射性同位素在技术实验研究和工业生产实践中应用的一些实例。

前几章(一至四章)叙述放射性同位素的一般知識，記錄它的方法和把它引入研究試件中的一些方法。在各种各样的研究中，如何把放射性同位素引入試件是一件极其重要的事，因为要尽可能使較多的射綫进入記錄裝置。本书将介紹一些为实践証明可用的放射性同位素引入法。

放射性同位素在技术上应用于三个主要方面：a)利用各种材料吸收射綫的不同性能；б)利用在研究过程中从一个地段移向另一地段的放射性粒子的輻射；B)应用放射性物質輻射使材料性能发生改变。

这三个方面包括了在技术上放射性同位素应用所有形式。在以后的几章(五至十一章)将按着这三个方面来叙述放射性同位素应用的具体实例。

利用不同材料对放射性射綫吸收能力的不同，可以解决許多技术上的問題。例如： γ 射綫探伤术就是利用 γ 射綫穿透材料的作用来測定材料内部的缺陷。根据材料吸收射綫的能力可以解决确定产品的厚度的問題，这可从产品的一边也可以从产品两边来測定。应用各种結構的液面高度計来測量密閉容器內液面的高度，測量产品表面上复盖着別种金属层的厚度，确定零件的綫性尺寸等等也都是属于这个領域的。

研究放射性原子的移动情况，可以解决机件和切削刀具的磨損，机件极限磨損的自动报警，金属的扩散和自扩散、热扩散強化处理，金属的可塑性，測定金属中含有的杂质，发动机中气体流动

以及揭露金属裂紋等研究工作中所存在的問題。

利用輻射可以解决金属強化和改变金属机械和化学性能，加速和強化他种金属在产品表面的扩散，利用核反应以便在产品表面上获得別种性質的金属层及其他各种問題。借助中子、氘核、电子和离子的照射来改变各种材料的性能。这种方法可以改变整个产品或是改变产品表层的性質。

本书介紹了苏联科学院机械研究所在作者指导下所做的一些工作成果(在这些研究工作中参加的有,苏联科学院机械研究所工作人員 Н. Н. 托尔卡切娃, В. Э. 瓦因施捷因, К. Н. 高留諾夫和 Д. Н. 克里木金)以及在社会主义协作形式下与其他科学研究所的工作人員——Б. Л. 斯林柯, А. А. 叶麦林, А. И. 尼斯涅維奇, П. Ф. 格里高里也夫, В. К. 沙斯尼和 В. К. 拉祖瓦也木所完成的一些工作。

本书第一,二,三和五章是作者和物理-数学科学副博士 А. Я. 施亚也夫一起編写的。

目 录

序言	v
緒論	1
第一章 放射性同位素的基础知識	3
第二章 放射性同位素和新的研究方法	9
第三章 記錄放射性射綫的方法	14
第四章 放射性同位素引入研究試件中的方法	25
第五章 放射性射綫穿过物質时的吸收和散射,射綫照相术··	38
第六章 測量产品厚度和測量在密閉容器內液体水平面的方 法和仪器	53
第七章 金属探伤术	82
第八章 利用放射性同位素研究机器零件的磨損	92
第九章 金属磨損过程的研究	139
第十章 放射性同位素在技术中的其他几种应用	165
第十一章 放射性輻射对金属各种性能的作用	189
第十二章 采用放射性同位素操作时的安全技术	202
結束語	211
参考文献	213

緒 論

在二十世紀，人類找到了利用原子能的方法。這種新的能源將會補充或代替煤、氣體燃料、泥煤、風能和水能。核“燃料”的熱值是 20×10^9 卡/公斤，比石油、汽油或煤油的發熱能力約大二百萬倍。現在使用的核燃料是由天然鈾和鈾制成的，它們的儲藏量足能供應人類在幾千年中所用的原子能。

在和平利用原子能方面具有現實意義的第一步是由蘇聯在1954年6月27日完成的，從那時起世界上第一座工業用電站¹⁾開始運轉。

蘇聯已把原子能用在冶金、化學、石油工業以及國民經濟其他部門中了。目前在發展我們（指蘇聯——譯者）各項技術中都已廣泛地應用了原子能，例如在探傷術中，在研究和強化金屬擴散過程、研究和降低機器零件磨損、檢驗潤滑材料和燃料，確定在用一般測量方法不能達到的地方的液體和粉狀物體的平面，在金屬學、工藝過程自動化、快速和精確測量綫性尺寸的工作中等等。所有上面提到的這些方面，在今天已是相當普遍的了，而以後將會有更大的發展。

和別的新技術（超聲波、電子衍射術、真空冶金等）一樣，放射性同位素或示蹤原子法在科學和技術中的應用，對技術進步的高速發展起着重大的作用。

在一些場合下用放射性同位素進行研究和檢驗，要比用其他方法來得方便和便宜。在另一些場合下同位素法可查明現象中用別的方法所做不到的某些方面。應用同位素法是否合理，要按每一具體條件來評定。正如其他任何一種研究方法一樣，同位素法

1) 指原子能電站而言——譯者注。

也有它一定的合理应用范围，而在某些場合里应用它还是有很大限制的。

到目前为止，在放射性同位素的技术应用领域内，只不过是才完成了初步工作。但是作为研究、控制和強化生产过程以及生产过程自动化的強有力的工具，現在已能估計出放射性同位素所起的巨大作用。科学工作者和技术人員的合作，就能保証使放射性同位素法在工业上的应用更加完善和普遍。

第一章 放射性同位素的基础知識

現在，大家都知道在門捷列夫元素周期表中的每一种化学元素都有几种同位素，同位素就是一些化学性質相同而原子量不同的物質。同位素是由于原子核构造的特殊性而形成的。

在現在物理学的概念中，原子是由質量集中的帶正电荷的原子核和圍繞原子核的帶負电荷的粒子——电子壳层組成的。組成原子核的基本粒子是質子和中子。核內的質子数决定了它的电荷量和該原子的电子壳层的結構。物質的化学性質主要是由外层价电子所决定的^[1]。

如果原子核內的中子数目因某种原因而改变，那么它不会改变原子核的电荷量和原子的电子壳层結構。因此，原子核的这种轉变，不会使原子的化学性質有所改变。但是原子核的能态，原子核的稳定性本質上决定于該原子核內部的中子数目。

从对各种簡單物質的同位素的組成結構最新的研究成果中可看出，元素周期表中的每一种化学元素都有几种稳定的和不稳定的同位素。例如对原子序数为 26 (質子数目)的鉄來說，目前已知有 8 种同位素，它們的原子量从 52 到 59。

自然界的鉄是由几种穩定同位素 Fe^{56} , Fe^{54} , Fe^{57} , Fe^{58} 組成的混合物，其百分比为 91.64:5.81:2.21:0.34。鉄的原子量是 55.85，它是这些同位素的混合物的平均值。其余四种同位素是放射性的，它們是用人工方法制成的。

現在已知鉬有 14 种同位素，其中七种是稳定的，其余的是放射性的。

目前已經知道各种化学元素的同位素在 1100 种以上，其中 800 多种是放射性的。現在已經編制出很完善的同位素表，例如在 A. H. 涅斯米揚諾夫，A. B. 拉皮茨基和 H. П. 茹金柯等

著的“放射性同位素的制取”一书中所列出的（国营化学科技书籍出版社（Госхимиздат）1954年版）。

除了几种天然的放射性同位素（鈾、鐳、釷和錒的同位素）外，所有其他种类的放射性同位素都是用人工方法制成的。最常用的制备人工放射性物质的方法，是在原子反应堆中利用中子进行辐照。也有用高能的带电粒子去照射物质以获得放射性同位素的。这是由于加速粒子和靶体原子核的相互作用而形成了人工放射性物质。

放射性物质的原子核是不稳定的，它能以一定的几率自行衰变，随后就转变为另一种元素的原子核——稳定的或不稳定的状态。对一种放射性物质的衰变来说，它的衰变几率是一个特定的常数。这个常数不因温度、压力、电场和磁场以及其他因素的作用而改变。因此，衰变几率是一个说明某一放射性物质衰变速度的常数，通常都用符号 p 来表示。

当衰变常数为 p 时，根据衰变几率的规律可以求出 N 个放射性的原子在 dt 时间内已衰变的原子数目是：

$$dN = -pN dt.$$

将此式积分，就会得到表示放射性衰变定律的公式：

$$N = N_0 e^{-pt}.$$

在实际应用中，我们采用另一数值来说明放射性物质衰变的速度，那就是时间 T 的数值，它表示在这个时间以后，放射性物质的量衰减了一半。

因此可以得到

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -pT,$$

或是

$$T = \frac{\ln 2}{p} = \frac{0.693}{p}.$$

我们把数值 T 称为半衰期，它是放射性物质表中一项重要的表征。

放射性射线的能量也是衰变的重要表征之一。现在已经能够

极精确地测出各种放射性物质射线的能谱，和能谱中每一部分的射线能量的绝对值。精确地测定射线的能量对于进行放射性同位素的分类工作是具有很大意义的。

知道了某一种射线的能量和半衰期后，就可知道这射线是哪一种同位素放出的。了解射线的能量对于利用放射性同位素以开展研究工作是非常重要的。因为放射性射线的记录、防护和吸收等问题的解决措施在相当大的程度上是由它的能量来决定的。

在衰变过程中放射性同位素或是释放出带电粒子或是发射出电磁辐射。

现在，已经知道有几种不同形式的放射性射线。

α 射线是一种初始速度为 $1.4 \times 10^9 - 2 \times 10^9$ 厘米/秒的带正电荷的粒子流(氦核)。

α 衰变常数 p 和 α 粒子的速度或是它的能量 E 有关，并可用下面公式来表示：

$$\ln p = A \ln E + B,$$

式中的 A 和 B 是常数。

由上式可知 α 粒子能量愈大，则其衰变几率也愈大。

在核反应过程中，可以产生带正电荷的粒子——氦的原子核，这就是我们所说的质子，也可以产生中子——在电性上是中性的，而质量接近于质子。中子在自由状态中存在的时间很短，它很快就被周围物质的原子核所俘获。快中子穿透物质的能力，比具有同等速度和质量的带电粒子的穿透能力要大的多。

β 射线是带负电荷或是正电荷的粒子流——电子或正电子流，它的速度约从 1×10^{10} 到 2.94×10^{10} 厘米/秒(在某些情况下，其速度可达到光速的 99.9%)。

γ 射线是一种波长极短的电磁波，它的波长约为 $0.005 \sim 0.4 \text{ \AA}$ 。

由于原子核从 K 壳层俘获了电子，而后外层电子跃迁到基态，从而释放出 γ 射线和特征伦琴射线(由于能级跃迁)。这种核转变

过程称做K俘获。

α 粒子的特点是穿透物质的能力小而电离作用以及照象作用很强。 γ 射线穿透物质的能力最强而电离作用最弱。

α 射线只能在一些重的天然放射性元素中观察到。同种放射性物质的 α 粒子具有大约相同的能量，该能量是在温度为 15° 和气压为760毫米水银柱时以 α 粒子在空气中的射程所测得的。表1列出了 α 粒子在空气中的射程长度^[2]。

表1 几种放射性同位素的 α 粒子在空气中的射程

放射性同位素	半衰期	射程长度(厘米)	放射性同位素	半衰期	射程长度(厘米)
钋 Po^{210}	138.374 天	—	镭 Ra^{226}	1590 年	3.39
钍 Th^{232}	1.389×10^{10} 年	2.6	镤 Pa^{231}	3.43×10^4 年	3.67
铀 U^{234}	2.475×10^7 年	3.28	氡 Rn^{222}	3.825 天	4.12
铀 U^{238}	4.498×10^9 年	2.73			

α 射线可被各种物质强烈地吸收。为了屏蔽这种射线的作用，只要有很薄的橡皮、纺织品或者纸张、云母片或者厚0.05毫米的铝片就已经足够了。但是，如果 α 粒子进入了皮肤，特别是机体内部，则会引起烧伤和发炎现象，这要比其他种类的射线的破坏程度更为严重。

β 粒子比 α 粒子的穿透能力要强些，它能够通过几个毫米厚的铝片。 β 射线在空气中的射程从十分之几毫米到几米长，在密度大的物质中，其射程长度随密度增大而减小。因此， β 粒子的射程可以不用长度单位（厘米或毫米），而用 β 射线完全被吸收的单位面积内物质的质量来表示，它的射程长度如表2所示^[2]。

表2 几种放射性同位素 β 粒子的射程长度

放射性同位素	半衰期	射程长度(克/厘米 ²)	放射性同位素	半衰期	射程长度(克/厘米 ²)
硫 S^{35}	87.1 天	0.035	磷 P^{32}	14.295 天	0.790
钠 Na^{22}	2.6 年	0.175	溴 Br^{80}	18 分钟	0.950
钼 Mo^{99}	2.8 天	0.524	氯 Cl^{38}	2.4 秒	2.105
锶 Sr^{89}	54.5 天	0.655	铷 Rb^{88}	17.8 分钟	2.610

β 衰变时所释放出的电子，其能量从零連續地变到該种放射性物质所特有的某一最大值即 $E_{\max}$ 。因此 $E_{\max}$ 是說明 β 射綫源的一种最重要的能量特性。

当測量 β 射綫时，必須考虑到周围介质对它所起的頗为显著的散射作用。由于和散射体原子的电子壳层相互作用的结果，部分 β 射綫可相对于原来射綫束以大于 90° 的角度而折回。这种現象随着散射物质的原子序数增高而愈为显著。因为物质的反射能力主要是由原子序数决定的，所以当測量同一射綫源作用于不同物质时，所記錄下来的 β 粒子数目也不相同。

β 射綫能对照象底片起作用，因此发射 β 射綫的放射性同位素被应用在射綫照象术中。在 β 射綫的作用下，玻璃、陶磁、食盐和其他物质可以变色。

放射性物质发射出的 γ 射綫的能量可以是单一的也可以不是单一的。因为 γ 射綫是一种电磁波，所以它可用一定波长 λ 来表示。如果已知波长，可用下式来算出 γ 量子的能量

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda},$$

式中 h ——普朗克常数，其值为 6.62×10^{-27} 尔格/秒；

c ——光速。

通常用 X 单位 ($X = 10^{-11}$ 厘米) 来測量 γ 射綫的波长。如果注意到 γ 射綫的波长比伦琴射綫的波长小 3—4 个数量級，那么就能从上述公式中算出 γ 射綫的能量也比伦琴射綫的能量高同样的倍数。

因为 γ 射綫的能量很高，所以它具有很強的穿透能力。当穿透物质时， γ 射綫強度的减弱情况是按指数定律变化的，它可用下述公式来表示：

$$J = J_0 e^{-\mu d},$$

式中 J_0 ——沒有屏蔽层时， γ 射綫的強度；

J ——通过厚度为 d 厘米的屏蔽层后， γ 射綫的強度；

μ ——总的吸收系数，它表示在通过 1 厘米的某物质后， γ 射

綫被吸收的成数,通常以厘米⁻¹来表示. 吸收系数的数值决定于吸收体物质的性質以及 γ 射綫的能量,其值如表3所列^[2].

表3 几种放射性同位素 γ 射綫的吸收系数 μ

放射性同位素	γ 射綫能量 (兆电子伏)	吸收系数(厘米 ⁻¹)	
		在 鋁 中	在 鉛 中
鈉 Na ²⁴	1.380	0.142	0.62
鈷 Co ⁶⁰	1.33*	0.153	0.65
銻 Cs ⁵⁶	0.92	1.188	1.10
銻 Ce ¹⁴¹	0.315	0.38	26.15
銻 Po ²¹⁰	0.773	0.18	0.96
鐳 Ra ²²⁶	0.188	0.346	14.8

* 原书是为133——譯者.

γ 射綫对于光敏层的作用和伦琴射綫的作用相似,但由于具有較大的穿透能力,所以 γ 射綫的这种效果表現得要弱一些.

γ 射綫以及其他种类的射綫对光敏层的作用决定于輻射強度,也就是决定于每秒钟落在1平方厘米面积上的粒子或光量子的数目.輻射強度係与射綫源的距离平方成反比.

通常用称做居里的单位来表示 α 射綫源和 β 射綫源的強度.放射性強度为1居里(1Cu)的射綫源每秒钟有 3.7×10^{10} 个原子核衰变.在实际应用中多采用千分之一居里——毫居里(1mCu = 10^{-3} Cu)做单位. γ 射綫源的強度用克镭当量来表示.

第二章 放射性同位素和新的研究方法

当人們对于放射性物质的特性刚刚有了足够的認識之后，就立刻把它应用到新的研究工作中去了。Г. 海威斯在 1913 年指出同种物质的放射性原子和非放射性原子在化学过程中的作用是完全一样的。这就是“示踪原子”法的基础。如果同一种物质的放射性和非放射性的原子在化学反应过程中的作用是完全相同的，那么只需在某种物质中加入少量的放射性物质，就可看出这种物质在任一过程中变化的全部情况。

1913 年 Г. 海威斯和 Ф. 柏聶特应用鉛的放射性同位素来研究鉛的自扩散过程。1917 年苏联学者 В. И. 斯皮金用放射性鈷来确定鈷盐的溶解度。

但是，在那个时候放射性同位素的应用范围还是很有限的，因为只能应用几种天然的放射性同位素^[3]。

只是在 1934 年发现了人工放射性同位素之后，广泛地应用放射性同位素才有了可能。利用中子和加速的带电粒子对物质的辐照作用，人們才能找出制备各种化学元素的人工放射性同位素的方法。

这个发现使利用放射性同位素来进行的各种研究方法得到了广泛的开展。

应用放射性同位素进行的各項研究工作指出，对于以前用其他方法不能解决的一些现象(例如自扩散过程)，提出了新的最能广泛应用的解决方法。放射性同位数的应用就很快地普遍起来，现在在科学和技术领域中已经找不出不使用放射性同位素的地方了。

放射性同位素法比較其他方法有着以下一些最重要的优点：

1. 高的測量灵敏度 測量混杂在純金屬中无关的杂质时，同

位数法比光谱分析法测得的灵敏度要高的多。例如,用放射性同位素法可测出在金属中夹杂铈的数量达 10^{-20} 克,可测出钠的夹杂量达 4×10^{-19} 克。

放射性同位素法的高灵敏度是这种方法的最为显著的特点。如果用手力使机器的轴与轴承的活化表面稍加磨擦,则用盖革-缪勒计数管测量时,在轴的表面上就可以发现有从轴承上转移过来的金属。这样微不足道的金属转移量用普通仪器和方法是不可能发现的。

再介绍一个例子,如果在发动机活塞环的摩擦面上钻一个孔,并压入直径 0.5—1.0 毫米的放射性金属短丝,那么因这种细丝磨损而落入润滑油中的放射性磨损产物所引起的脉冲就足能被放在润滑油管道中的盖革-缪勒计数管所记录下来。

2. 能获得示踪原子 这能连续观察到我们所感兴趣的那些原子的运行路程(如测定轴承合金中结构组成成分的磨损情况,研究金属自扩散过程,研究发动机中汽体流动情况等等)。

3. 温度和压力对放射性同位素的性质都没有影响 这一点对于在高温或低温中进行研究工作来说是非常重要的,因为它可使研究工作简化和研究范围扩大。

4. 能在工作进行过程中实现测量 例如在研究机件磨损,确定产品厚度及液面高度和解决其他问题中都可在开动的机器上进行测量,而不需使它停车。

5. 可以很快的得到测定的结果 因为脉冲数可以直接从仪表上读出,也可用自动记录仪记录下来。

放射性同位素法比用其他试验方法测量各种进行中的过程要快得多。

6. 在技术研究中应用最广的那些种放射性同位素的价格低 因为放射性同位素种类很多,所以对于各种技术研究或测量操作,可选用最合适的同位素。

在选用放射性同位素时,应注意下列事项:

1. 放射性物质的化学性质 这些化学性质决定着把它们引

入被研究对象中的可能性及方法。例如,在研究机器零件磨损时,引入的同位素与摩擦机件某一组成元素的化学性质要没有区别,能均匀地分布到离表面足够深的部位并不与摩擦零件的金属形成不良的化合物,这些都是很重要的。

2. 半衰期 T 它是一个重要的特征,表示放射性物质原有的全部原子衰变一半所经历的时间。必须考虑到能够在指定的时间内,使用某种同位素做完试验。最好使用半衰期为几天的同位素,因为利用短半衰期的同位素在长的试验中需作衰变修正。利用放射性衰变定律,可以求出在任何时刻内存在的放射性原子的数目。

3. 射线的类型与能量 它们在选用同位素时有着很重要的意义。如果同位素放出的是软辐射,则必须考虑例如围绕射线源的管壁或其他零件的吸收作用,因而要选择具有能量足够大的射线源。例如,同位素硫 S^{35} 的半衰期为 88 天,放出能量为 0.1 兆电子伏的 β 射线。在研究机件磨损时, β 射线会全部被油管壁所吸收(如果计数管放置在油管外面*)。因此,在这种情况下,同位素硫不适于用来研究磨损。

对于能够放出 γ 射线的同位素来说,管道壁的吸收不大要紧,但是也应考虑这个问题。许多同位素可放出混合的(β 和 γ)射线,这样就可以根据实验条件来测量这种或那种射线。

除了上述的一些优点外,还必须注意到使放射性同位素应用的可能性受到限制的下述几点:

1. 应用放射性同位素时,并不是在所有情况下都能得到所要求的测量精度。进行试验时计数管放置的几何条件,容器壁的吸收作用,放射性物质的大量分散稀释以及进行研究时的其他复杂条件等都会使得难以得到高的测量精度。

2. 某些元素没有合用的放射性同位素(铝、砂、钛),而有些放射性同位素的半衰期很短(锰 Mn^{52} , 钼 Mo^{99}),这样在需要很长时

* 原书是(“放置在油管内”)——译者。