

工业中的核测量

[匈]S. 罗萨 著

纪裕盈 尚秀兰 译



原子能出版社

工业中的核测量

[匈] S. 罗萨 著

纪裕盈 译
尚秀兰

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业中的核测量/[匈]S. 罗萨(S. Rózsa)著;纪裕盈,尚秀兰译. —北京:原子能出版社, 1995. 6

ISBN 7-5022-1385-6

I. 工… I. ①S…②纪…③尚… II. 工业-过程控制-放射性-计量-技术 IV. TL84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10915 号

内 容 简 介

本书是匈牙利科学院核专家 S. Rózsa 的一本专著,也是工业核测量领域的第一本专著。书中结合作者几十年的工作经验,结合实际的工业应用成果,集中讨论了核测量技术在工业及其有关领域中的应用。

核测量仪器有很高的准确度和可靠性,能在恶劣的环境条件下运用,并且是非接触的测量方式,这些都使它解决采用其它测量方法难以解决的问题,因而在世界上工业发达国家中获得了广泛的应用。在我国,随着四个现代化建设的快速发展,工业核测量技术也正得到大力的推广应用。

本书内容共分 12 章,包括:辐射源和核辐射的基本概念,辐射探测系统,各种核测量方法和测量仪表,极限值指示和料位测量,厚度测量(包括镀层厚度测量),密度测量,水分含量测量,材料成分分析和测量,核测量技术的其它工业应用以及测量装置的建立、应用的规划和辐射防护等内容。为方便国内读者,译者在本书末尾加了附录,介绍了国内工业应用核仪器的概况。

本书适用于工矿企业采用或打算采用核仪表的技术人员及技术工人,研制核仪表和研究核技术应用的科技人员以及中专、大专院校有关专业的师生。

NUCLEAR MEASUREMENTS IN INDUSTRY

ISBN 963 05 5219 1

© Sándor Rózsa 1989

工业中的核测量

纪裕盈 译
尚秀兰

© 原子能出版社, 1995

责任编辑:袁祖伟

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

中国政法大学出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 12.625 字数 330 千字

1995 年 6 月北京第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1 3000

定价:20.00 元

目 录

前 言	(1)
1 基本概念	(3)
1.1 同位素和放射性	(3)
1.2 放射性的基本定律和单位	(5)
1.3 辐射源	(11)
1.3.1 密封辐射源的特性	(11)
1.3.2 密封性的检验和判断	(12)
1.3.3 辐射源的使用和商品化	(13)
1.4 辐射与物质的相互作用	(14)
1.4.1 α 辐射	(15)
1.4.2 β 辐射	(16)
1.4.3 γ 辐射	(21)
1.4.4 中子辐射	(25)
2 辐射探测系统	(27)
2.1 电离室	(29)
2.2 正比计数管	(32)
2.3 G-M 计数管	(34)
2.4 半导体探测器	(40)
2.5 闪烁计数器	(43)
2.5.1 闪烁体	(45)
2.5.2 光电倍增管	(50)
2.5.3 工作稳定性	(53)
2.5.4 闪烁能谱测量	(56)
2.5.5 带半导体光敏器件的闪烁探测器	(57)
2.6 工业核仪表中的探测器	(58)
3 测量方法和测量仪表	(63)
3.1 同位素测量方法	(63)
3.1.1 直接测量	(63)
3.1.2 差分测量	(64)
3.1.3 补偿测量	(64)
3.1.4 自动校准	(65)
3.2 统计测量误差	(66)
3.3 放射性同位素测量仪表	(67)
3.3.1 用于信号处理的电子学系统	(68)
3.3.2 通用测量系统	(70)

3.3.3	智能测量仪表	(71)
3.3.4	多道测量装置	(72)
3.4	控制系统	(74)
4	极限值指示	(76)
4.1	放射性同位素的极限值指示(γ 继电器).....	(76)
4.2	适用于解决极限值指示问题的几种放射性同位素装置	(78)
4.3	料位指示器 γ 继电器的应用	(84)
4.4	料位指示器在自动控制中的应用	(88)
5	料位测量.....	(93)
5.1	吸收式料位测量仪表	(93)
5.2	跟踪式料位测量仪表	(97)
5.3	γ 定位剖面测量	(100)
5.4	利用放射性同位素探测进行料位控制	(101)
5.5	料位测量和工艺监督	(103)
6	厚度测量	(104)
6.1	利用放射性同位素进行厚度测量	(104)
6.2	放射性同位素厚度测量装置	(107)
6.3	厚度测量装置的应用	(112)
6.4	厚度(表面质量)控制	(117)
6.5	利用厚度测量仪表进行工艺监督	(121)
7	镀层厚度测量	(124)
7.1	基于 β 辐射反射技术的镀层厚度测量	(124)
7.2	基于 β 辐射反射技术的镀层厚度测量装置	(126)
7.3	利用 β 辐射反射原理进行镀层厚度测量的应用	(129)
7.3.1	锡镀层厚度的测定	(129)
7.3.2	锌镀层厚度的测量	(129)
7.3.3	银镀层厚度的测量	(130)
7.3.4	金镀层厚度的测量	(130)
7.3.5	双镀层厚度的测量	(130)
7.3.6	塑料和涂料涂层厚度的测量	(131)
7.3.7	其它涂层厚度的测量	(131)
7.3.8	镀孔电镀层厚度的测量	(131)
7.4	利用X射线荧光测量层厚	(132)
8	密度测量	(135)
8.1	利用 γ 辐射吸收法进行密度测量	(135)
8.2	测量位置的设计	(138)
8.2.1	测量仓的充满度	(138)

8.2.2	气泡	(138)
8.2.3	测量管中的沉积	(139)
8.2.4	测量管的磨损	(139)
8.2.5	吸收长度的选定	(140)
8.2.6	校准可能性的保证	(140)
8.3	密度测量仪表	(141)
8.4	放射性同位素密度计的应用	(143)
9	水分含量测量	(147)
9.1	利用中子慢化法测量水分含量	(147)
9.2	湿度计的工艺应用	(151)
9.2.1	水分含量不变的混合料的生产	(151)
9.2.2	供给特定量水分	(153)
9.2.3	带质量修正的加料	(154)
10	利用核仪表测定材料成分	(156)
10.1	以辐射吸收原理工作的仪表	(156)
10.1.1	β 辐射吸收的应用	(156)
10.1.2	γ 辐射吸收的应用	(156)
10.2	利用辐射反射(散射)进行测量	(161)
10.2.1	β 辐射反射的应用	(161)
10.2.2	γ 辐射反射的应用	(162)
10.3	次级辐射的测量	(163)
10.3.1	由 β 辐射产生的次级辐射的测量	(164)
10.3.2	由 γ 辐射产生的次级辐射的测量	(165)
10.3.3	荧光辐射的测量	(165)
10.4	中子辐射的应用	(169)
10.4.1	活化分析	(169)
10.4.2	自发核反应的应用	(170)
10.4.3	中子吸收和散射的应用	(170)
10.5	γ 辐射的选择相互作用	(170)
10.6	根据天然放射性测定材料成分	(171)
11	核方法的其它工业应用	(173)
11.1	输送带上的连续测量	(173)
11.2	包裹内装物品的检查	(175)
11.3	利用 γ 辐射吸收探测烟	(176)
11.4	静电荷的消除	(177)
11.5	便携式核仪器	(177)
11.5.1	土壤密度和水分含量的测量	(177)
11.5.2	利用反射技术进行壁厚测量	(181)
11.5.3	料位测定计	(181)

12	工业用放射性同位素测量装置的建立	(182)
12.1	装置的适当选定和数据获取	(182)
12.2	规划应用	(183)
12.3	现场操作	(184)
12.4	辐射防护	(184)
12.4.1	基本原理	(184)
12.4.2	辐射源容器	(186)
参考文献		(189)
附录		(190)

前言

介绍辐射测量方法在工业中最初应用的书发表于本书出版前约 50 年。第一批单行本是一些较短的述评,于 40 年前出版。这些早期出版物有一个有趣的特点,就是多数现今应用于工业同位素测量的基本物理原理在这些书中都已作了介绍。这些方法后来对现代高生产率技术的广泛商品化应用作出了显著的贡献。

自那时以来,决定同位素仪器可靠性的电子设计工作与同位素仪器应用的诸领域互相推动。较早的同位素仪器用电子管制成,只解决测量问题。应用领域的拓宽带来仪器数量的激增,对仪器的可靠性提出了更高的要求。这些要求有幸由于晶体管的出现及其在仪器制造中的应用得到了满足。这些较高质量的同位素仪器在工业自动化中得到了更新的应用。对在自动化过程控制中被当作传感器的同位素仪器也提出了更高的要求。电子器件工业最新研制成功的集成电路使这些要求得到了满足。当今的同位素仪器包括有集成电路和微处理机,它们的准确度和可靠性可满足最严格的期望值的要求。核仪器除应用于复杂的测量中并安装在自动过程控制设备中以外,其最新应用领域是为过程控制计算机提供信息,充作敏感元件。应该强调指出的是,那种不愿将放射性同位素仪器应用于商业单位的想法已改变,如今它们的应用也像设计和安装其它类过程控制设备一样,成了常规工程,这是由于有了有关辐射源的小心管理和安全法规,以及核仪器的可靠性很高,能满足当今最难对付的要求。

上面说到的飞速发展不单由于近 40 年来工业技术普遍的加速发展,也是由于同位素测量技术有应急的特点,能解决通常其他方法不能解决的问题。

辐射源发射的辐射穿透大量物质和(或)厚的容器器壁,使人们得以迅速地、连续地进行大量测量而不与被测物质接触。处理来自仪器[包括辐射源(产生输入信号)、辐射探测器和电子信号处理机]的输出信号可以采用模拟方式或数字形式,并按以下不同的复杂程度来完成:

- 探测信号,必要时同时在几个地方探测。
- 记录测得的数值。
- 用作自动控制装置的输入。
- 在有中央计算机的过程控制中起输入信号的作用。

工业核测量的优点之一,是能够保证原材料的最佳利用。由于世界市场上原材料的不断涨价,人们必然要严格坚持与产品有关的标准和规定,而如果不应用连续的精确的测量,这是办不到的。这就是核仪器的重要性得以迅速加强,特别是在没有其他方法可以取代的领域得以迅速加强的唯一原因。这一点将在本书中用一些实例来证明。核测量和控制设备用在工业过程中去提高能源利用也同样重要。

上面说到的 40 年中,最近几年的突出成就是通常所说的工艺控制测量技术的创设。这项技术的意思是,利用工业核仪表并估算其输出,不仅能够测出工艺设备的错误操作,而且能够确定其发生的位置。

本书就工业中的放射性测量连同其有代表性的应用领域作一概述。这样做的目的是为了给工程师、工艺师以及自动化专业人员以有益的帮助。据作者所知,这是集中讨论一个单

独领域的第一本专著,这个领域就是大量应用由辐射源发射的辐射来进行工业测量和控制,将其应用于工业、农业、食品保鲜、消毒、医疗、科学研究、地球科学等等。书中列举的实例取自实际的工业应用结果,也来自作者几十年积累的经验。本书包含的知识对计算机和机器人在工业以及更为广阔的领域的工业应用可能有所帮助,因为它们的输入道可能需要由所述同位素仪器提供的信号。在有些情况下,它们是可为那些被监测或处理的材料提供可靠数据的唯一信号。

作者感谢我的匈牙利科学院同位素研究所的同事们以及那些在匈牙利和国外工作的有关领域的人们,感谢他们提供了宝贵的经验。他们的活动已为辐射测量方法的发展和在其他工业领域中的应用推广作出了显著贡献。作者希望本书总结和发表的结论与经验能够且将会对新的应用领域的发现以及解决一些过程监测和控制中现存的问题作出贡献。

Sándor Rózsa

1 基本概念

现代工业中简单的和复杂的工艺过程的监测和自动化都需要各种各样的测量、控制和调节仪表。这些仪表的基本物理原理、测量方法和工业应用,以及它们在生产线上的装配和长期工作构成了工业测量和控制技术的课题。由于不同的工业领域有许多不同的测量要求,所以需要利用基于各种操作原理的信息源。无需力求完善,最常使用的测量仪表是基于水力的、气动的和电气的原理。

用电进行操作或信号传输的仪器,其检测的物理原理可能涉及到对电容、电感、涡流电流或电阻值变化的测量;还可能涉及到光、超声波或核测量。“工业核仪表”一词用来表示测量或过程自动检测所用的系统,这种系统由辐射源(加适当屏蔽)、辐射探测器和供给必需的工作电压并处理传感器信号电子装置所组成。系统提供的信息涉及到表征工艺过程的状态或状态的变化;该信息是由辐射与被处理、被储存或被运输的物质的材料之间的相互作用决定的。

本书关于基本概念的第1章将概述最主要的工作原理、基础物理知识和实用数据。辐射源、辐射类型以及辐射与物质的相互作用,也将在该章讨论。在其它介绍各类实际工作的章节中将介绍它们的最佳选用、设备的设计和安排。对于测量部分的元件,对辐射探测器将作较为详细的描述,因为以目前的技术发展水平来看,它们工作得当与否,对于测量精度,对于它们不依赖于干扰参数(如环境温度、电源电压起伏等),以及对于它们的长期稳定性均具有极大的影响。

1.1 同位素和放射性

仍具有其所有特性的给定化学元素的最小部分称为原子。不同元素的原子由相同的基本粒子组成,并具有相同的结构。原子的中心有一个原子核,在其周围有原子壳层。原子核包括带正电荷的质子和电中性的中子。在一个电中性的原子中其质子和电子的数目相同,其数值等于元素在门捷列夫周期表中的原子序数。原子核周围壳层中电子的电荷为负电荷。它们可以占据对应于分立能级的轨道。各化学元素之间的差异是由原子核中不同的质子数决定的。原子中的电子数可以改变(后面讨论的多数情况归因于物理过程);下述过程称为电离:在这个过程中,原子失去或拾取电子。质子数 Z (即原子序数)和中子数 N 的总和给出元素的质量数 A :

$$A = Z + N \quad (1.1)$$

原子核中正电荷(质子)数相同而中子数不同的同一元素的变种称为同位素,它们不能用化学方法分开。此名称起源于古希腊文[isos=same(同样的), topos=place(位置)],是由于它们的化学不可分性,因而在元素周期表中占据同一位置。它们的国际通行的表示法是元素的化学符号加一个左上标,表示同位素的质量数(质子+中子)。例如, ^{137}Cs 表示铯的同位素,质量数为137。化学符号加一个左下标表示元素的原子序数,例如 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 。元素的总质量

数 A 不总是整数,这是因为一个具有原子序数 Z 的某种元素可能包含有几种不可分的同位素,而总质量数是由几种单个同位素的比值确定的。

不稳定同位素的原子核要经历自发的变化,与此同时发射辐射。这种现象称为放射性。天然放射性主要发生于高原子序数的元素。目前已鉴别出 800 种放射性的和约 300 种非放射性的同位素。大多数放射性同位素是人工生产的。

放射性衰变与化学变化不同,化学变化涉及到原子中的电子轨道,而衰变是在原子核中发生的。因此,放射性衰变与环境变化如温度、压力、湿度等无关。正是由于放射性同位素的这一特性,使它的应用在现代化工业仪表中占了优势。工业装置中使用的放射性同位素称为辐射源¹⁾。

给放射性同位素发射的辐射加一个电场,则辐射可以分成三个组分: α 、 β 和 γ 辐射。

α 辐射由带正电荷的粒子组成,质量数等于氦核,即 $A = 4$ 。含有二个质子和二个中子,因此它的电荷是基本电荷的两倍。 α 粒子的速度可以高达 20 000 km/s,这一性质将它和二价氦离子(He^{2+})区别开来。 α 粒子几乎毫无例外地均由重放射性同位素($Z > 82$)发射。

经过 α 衰变的同位素在粒子发射过程中失去二个质子和二个中子。所产生的子体元素在周期表中占据的位置变化为向前移动二个单位的位置,其原子质量数减少了 4 个单位的位置。例如,假如一个原子序数为 88($^{226}_{88}\text{Ra}$)的镭同位素经过 α 衰变,它就会转变为惰性气体,原子序数为 86($^{222}_{86}\text{Rn}$);它也是放射性的。

β 辐射被吸引到电场的正极,由带负电荷的粒子组成,质量与电子的相同。正带电 β 粒子称为正电子。不过正电子辐射至今尚未被应用,我们只能始终把 β 辐射当作负带电 β 粒子来讨论。 β 辐射的动能非常大,粒子脱离原子核时的速度为 100 000 至 250 000 km $\cdot$ s⁻¹。 β 粒子的静止质量为 $m_0 = 9.107 \times 10^{-28}$ g,为质子的 1/1836.57,其电荷与基本电荷相等,即 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ As。 β 辐射亦称为电子辐射,因为其量子的性质与电子相同。

γ 辐射是一种电磁波,因此它不受电场影响,它与 X 射线或可见光相似,只是波长比它们的短。它的速度等于光速。 γ 辐射产生于原子核,而 X 射线由电子壳层发射。它携带的能量高,因此它穿透物质的能力比前面提到的另两种辐射要强。像电子在轨道里一样,原子核(中子、质子)的基本组分可能也具有特殊的能级。 γ 辐射总是靠两个分散能级之间的差而产生的;因此一个给定的放射性同位素不可能发射任何能量的 γ 射线;只有那些与母核能级相应的能量值才是可能的。因此, γ 辐射有一个分立的(线)能谱。

当只发射一个量子时,只要没有基本粒子相伴发射,放射性同位素就不会转变为另一种元素。不过这种情况很少发生,只有在同核异能素转换时才如此。多数放射性同位素也发射 γ 光子和别的粒子,不过后一种粒子较易被吸收,从实用观点来看,可以把同位素看成是纯粹的 γ 发射体。

作为工业应用辐射源的一个种类也需要有发射中子的“中子源”。中子是中性子,其质量略大于质子。中子源通常是 α 发射体放射性同位素,如镭和铍粉末的人工混合源。当 α 粒子碰撞铍核时,核反应产生中子。工业实际应用中的中子源主要是镭-铍、钋-铍、镭-铍和钋-铍($^{241}\text{Am}-\text{Be}$, $^{239}\text{Pu}-\text{Be}$, $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$, $^{210}\text{Po}-\text{Be}$)源。应该指出,有一种叫做镅-252(^{252}Cf)的人工超

1)原文如此。——译者

铀元素,在其自发裂变中除发射 α 粒子外,也发射中子。与含铀的辐射源相比其半衰期短(只有2.65a),它的推广应用因而受到局限。脱离中子源的中子被核吸收,或转变为质子,并同时发射半衰期为16.9s的 β 粒子。

1.2 放射性的基本定律和单位

放射性同位素发射辐射(当它被当作辐射源时)能力可由它们的活度来作量值表示。活度的国际单位制单位为贝可勒尔(Bq)。

假定在辐射源中每秒发生一次衰变,即一秒钟发射一个粒子,该辐射源的活度为1贝可勒尔(Bq)。贝可勒尔的倍数单位可以是千贝可($1\text{kBq}=10^3\text{Bq}$),兆贝可($1\text{MBq}=10^6\text{Bq}$)和吉贝可($1\text{GBq}=10^9\text{Bq}$)。过去惯用的活度单位是居里(Ci)。当辐射源每秒衰变次数为 3.7×10^{10} 时,其活度即为1Ci。较小的单位有

毫居 $\text{mCi}=3.7\times 10^7$ 衰变每秒(dps)

微居 $\mu\text{Ci}=3.7\times 10^4$ dps

纳居 $\text{nCi}=3.7\times 10$ dps

皮居 $\text{pCi}=3.7\times 10^{-2}$ dps

$1\text{Ci}=10^3\text{mCi}=10^6\mu\text{Ci}=10^9\text{nCi}=10^{12}\text{pCi}$

两种单位之间可利用关系式 $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}=37\text{GBq}$ 进行换算。 $1\text{Bq}=2.7\times 10^{-11}\text{Ci}=27\text{pCi}$ 。利用表1.1可以简化换算关系。为了迅速查出数据,两种单位制的一些活度值均列于表中。

表 1.1 活度单位居里与贝可勒尔的快速换算

μCi	kBq	μCi	MBq
mCi	MBq	mCi	GBq
Ci	GBq	Ci	TBq
0.1	3.7	30	1.11
0.2	7.4	40	1.48
0.25	9.25	50	1.85
0.3	11.1	60	2.22
0.4	14.8	70	2.59
0.5	18.5	80	2.96
1	37	90	3.33
2	74	100	3.7
2.5	92.5	125	4.625
3	111	150	5.55
4	148	200	7.4
5	185	250	9.25
6	222	300	11.1
7	259	400	14.8
8	296	500	18.5
9	333	600	22.2
10	70	700	25.9
12	444	750	27.75
15	555	800	29.6
20	740	900	33.3
25	925	1000	37

例:

$0.5\mu\text{Ci}=18.5\text{kBq}$ $150\mu\text{Ci}=5.55\text{MBq}$ $2\text{mCi}=74\text{MBq}$ $360\text{mCi}=13.1\text{GBq}$ $10\text{Ci}=370\text{GBq}$
 $250\text{Ci}=9.25\text{TBq}$

在给定同位素制备中能进行放射性衰变的原子数是不断减少的,因此,活度随时间而减少。该衰变的性质为指数式:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

式中: A_0 是初始活度;

A 为时间 t 后的活度;

λ 为衰变常数, s^{-1} 。

放射性同位素在技术应用中的一个重要性质是它们的半衰期 $T_{1/2}$, 即其活度减少到一半的时间。将等式(1.2)代入 $t = T_{1/2}$, 得

$$A = \frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (1.3)$$

将上式移项,得

$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2$$

两边取自然对数,得

$$\begin{aligned} \lambda T_{1/2} &= \ln 2 \\ T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.6931/\lambda \end{aligned} \quad (1.4)$$

等式(1.4)给出半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 λ 之间的关系,衰变速度快的放射性同位素,其半衰期短;衰变速度慢的半衰期长。实用的放射性同位素的半衰期在零点几秒至万年以上。天然放射性同位素的半衰期达数百万年。不难看出,可实际应用的只是衰变速率相对较低的同位素,即半衰期为数年的同位素。

在衰变定律内, λ 是给定同位素特有的不变特性。该同位素既不会在进行放射性转变之前受到物质处理的影响,也不会受任何后处理的影响,包括周围条件如温度、压力、湿度、化学键等的变化。因此,在测量中使用的放射性同位素的辐射应是具有以下性质的信号源:

- 信号发射是永恒的自然过程,不需要能量供给和维护保养。
- 信号发射不受环境条件影响(虽然辐射本身可能受影响)。
- 虽然信号发射随时间变化不是不变值,它的数值却是任何时候都可知道的。

在使用同位素装置时间较长后,应考虑活度的减少,以及精度要求和给定同位素实际的半衰期。目前可靠性问题已解决;对仪器的要求着重放在精度上。由于仪器所用辐射源的活度逐渐减弱,要提高精度就需要定期校准。

让我们来研究衰变方程,以便估算校准的有效周期。假定方程(1.4)中 λ 随半衰期 $T_{1/2}$ 而变:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (1.5)$$

将 λ 值代入方程(1.2)并引入粒子数(N)或辐射强度(I)的值,两者都与活度 A 成正比。现在 I 在这里不论是表示辐射源发射的总辐射强度,还是用于测量的分数都已无关重要。

$$I = I_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}}} \quad (1.6)$$

方程(1.6)表明,仪器校准的有效周期与半衰期 $T_{1/2}$ 之间有着密切的关系。随着校准之后时间的消逝,半衰期越长,指数越可以被视为零或接近于零。指数为零就是 $I = I_0$, 因为 e^0

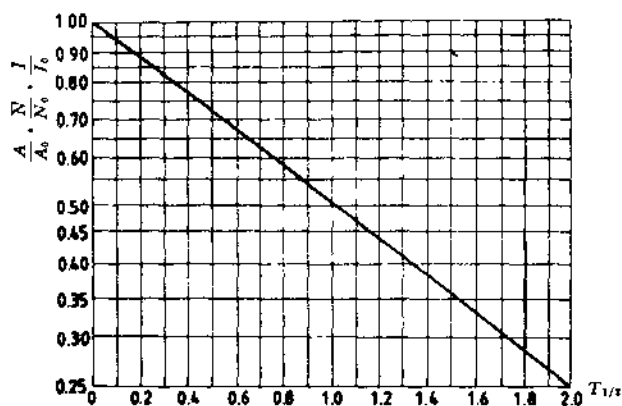


图 1.1 放射性活度减少与半衰期的关系

= 1。

$T_{1/2}$ 的值可以从有关参考书上查到。让我们规定 $T_{1/2}$ 的大小为自变量 t ，并以两个半衰期值作为方程的图解(图 1.1)。从表 1.2 我们可以得到更准确的信息，表中列出了将 48 个不

表 1.2 辐射强度减少与相对时间 $t/T_{1/2}$ 的关系

$\frac{t}{T_{1/2}}$	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{t}{T_{1/2}}$	$\frac{I}{I_0}$
0.00	1.0000	1.25	0.4204
0.01	0.9931	1.50	0.3536
0.02	0.9862	1.75	0.2973
0.03	0.9794	2.00	0.2500
0.04	0.9727	2.25	0.2102
0.05	0.9659	2.50	0.1768
0.06	0.9593	2.75	0.1487
0.07	0.9526	3.00	0.1250
0.08	0.9461	3.25	0.1051
0.09	0.9395	3.50	0.0884
0.10	0.9330	3.75	0.0743
0.15	0.9013	4.00	0.0625
0.20	0.8706	4.50	0.0442
0.25	0.8409	5.00	0.0312
0.30	0.8123	5.50	0.0221
0.35	0.7846	6.00	0.0156
0.40	0.7579	6.50	0.0110
0.45	0.7320	7.00	0.0078
0.50	0.7071	7.50	0.0055
0.60	0.6598	8.00	0.0039
0.70	0.6156	8.50	0.0028
0.80	0.5743	9.00	0.0020
0.90	0.5359	9.50	0.0014
1.00	0.5000	10.00	0.0010

同的时间值代入方程(1.6)所得的数值。表的前半部分为短半衰期的数据(为了简化精确度评估),后半部表示高达10个半衰期的数据;这样就能计算早已封装的半衰期较短的辐射源的现有活度了。

表1.2的用途可用许多事例来说明。一个初始活度为3.7GBq(100mCi),半衰期为1.5a的辐射源,其10a(=约6.5半衰期)后的活度为 $3.7 \times 0.11 \text{GBq} = 40.7 \text{MBq}$ (1.1mCi)。同一个源在11d(0.02半衰期)后,其活度将减少1.5%。半年(≈ 0.35 半衰期)后,其辐射活度减为其校准值的0.78,即活度损失约22%。

如果精度要求很高,即使是对长寿命源(半衰期约30a)的衰变也应加以考虑。表中第一个数据,即 $0.01 T_{1/2}$,相当于3.5个月,确切地说,为109.5d。在校准之后过去的这一段时间里,辐射活度减少0.7%(几乎是1%),该变化也反映到仪器的输出。

在需要对处理极大量材料的现代高技术进行监测或计算机控制的时候,可以不要求0.1%的精度。为了确定校准的周期时间,让我们颠倒方程(1.6)并计算对应于前述允许的强度减少所需的时间:

$$I = I_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_{1/2}}}$$

将方程移项并两边取对数,得

$$\frac{t}{T_{1/2}} = \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{-\ln 2} \quad (1.7)$$

及

$$t = T_{1/2} \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{-\ln 2} = 1.4427 T_{1/2} \left| \ln \frac{I}{I_0} \right| \quad (1.8)$$

表1.3给出方程(1.7)和(1.8)以d为时间单位,多至10%强度减少的数值。表的自变量为 I/I_0 ,或由该比值表示的强度的百分比损失。已用五个不同的半衰期解了方程式(1.8)。这些半衰期相等或者接近于常用辐射源的实际半衰期值。令人惊讶的是,经过较短的时间(15.8d)就足以将半衰期长达30a的同位素(如 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr)的放射性强度减少0.1%或者精度要求较低一些,减少1%(159d ≈ 5 个月)。由于强度变化(如果没有其他理由证明应该重新校准的话),备有半衰期约为10a的放射源的仪器,若精度为0.1%,应每5天重新校准一次;若精度为1%,则应每52天重新校准一次。

经常的重新校准可以利用安装在机内的由开关操作的衰变校准器来完成,也可以利用补偿电路(参见3.1节),在那里测得的或显示的值与辐射的强度无关。

由于上述问题,在800种已知的放射性同位素中,只有20~30种在工业测量中得到应用。其中10种的一些重要数据列于表1.4。

中子源以其中子产额为特征。与产生中子的初级过程的强度相比,它的中子产额是比较低的。例如含有活度为3.7GBq(100mCi)的 ^{241}Am 的Am-Be辐射源,其中子产额为 $2.2 \times 10^5 \text{n/s}$,而 α 衰变数为 $3.7 \times 10^9 \alpha/\text{s}$ 。这些数字表明,中子产生的效率低到0.0059%。

表 1.3 达到一定活度减少所需的时间

$\frac{I}{I_0}$	强度减少 %	相对时间 $t/T_{1/2}$	绝对时间 /d($T_{1/2}$ 有 5 个不同值)				
			2.5 a	5 a	10 a	20 a	30 a
1.0000	0	0	0	0	0	0	0
0.9995	0.05	0.00072	0.66	1.32	2.63	5.26	7.9
0.9990	0.10	0.00144	1.31	2.63	5.26	10.53	15.8
0.9985	0.15	0.00217	1.98	3.95	7.90	15.80	23.7
0.9980	0.20	0.00288	2.64	5.27	10.54	21.08	31.6
0.9975	0.25	0.00361	3.30	6.59	13.18	26.36	39.5
0.9970	0.30	0.00433	3.96	7.91	15.82	31.64	47.5
0.9965	0.35	0.00505	4.61	9.23	18.46	36.92	55.4
0.9960	0.40	0.00578	5.28	10.55	21.10	42.21	63.3
0.9955	0.45	0.00650	5.94	11.87	23.75	47.50	71.2
0.9950	0.50	0.00723	6.60	13.20	26.40	52.79	79.2
0.994	0.60	0.00868	7.92	15.85	31.69	63.38	95.1
0.993	0.70	0.01013	9.25	18.50	36.99	73.89	111
0.992	0.80	0.01159	10.57	21.15	42.30	84.59	127
0.991	0.90	0.01304	11.90	23.80	47.61	95.21	143
0.990	1	0.01450	13.23	26.46	52.92	105.8	159
0.985	1.5	0.02180	19.90	39.79	79.59	159.2	239
0.980	2	0.02915	26.60	53.19	106.4	212.8	319
0.975	2.5	0.03653	33.33	66.66	133.3	266.6	400
0.970	3	0.04394	40.10	80.20	160.4	320.8	481
0.965	3.5	0.05140	46.90	93.80	187.6	375.2	563
0.960	4	0.05889	53.74	107.5	215.0	429.9	645
0.955	4.5	0.06643	60.61	121.2	242.5	484.9	727
0.950	5	0.07400	67.53	135.0	270.1	540.2	810
0.925	7.5	0.11247	102.6	205.3	410.5	821.1	1232
0.900	10	0.15200	138.7	277.4	554.8	1110	1664

表 1.4 工业测量中常用的放射性同位素的一些特性

放射性 同位素	辐射能量/MeV		半衰期 $T_{1/2}$	半厚度 /g/cm ²		测量范围	恒定 γ 剂量 K_γ	
	β	γ		外部	内部		fAm ² /(kgBq [*])	Rm ² /(Cih)
				准直		g/cm ²		
⁶⁰ Co	1.17							
	0.3	1.33	5.26 a	19	16	20~80	2.518	1.30
¹³³ Ba	—	0.302	10.8 a	—	—	5~20	0.465	0.24
		0.356						
¹³⁷ Cs	(0.53)	0.661	30.3 a	13	10	10~30	0.659	0.34
¹⁷⁰ Tm	(0.98)							
	(0.97)	0.084	129 d	1.2	1	1~10	0.0064	0.0033
²⁴¹ Am	—	0.026						
		0.033						
		0.060	433 a	0.64	0.50	0.5~5	0.116	0.06
⁸⁵ Kr	0.7	(0.54)	10.7 a	0.03	0.02	0.002~0.1	—	—
⁹⁰ Sr	2.18	—	28.9 a	0.135	0.08	0.005~0.6	—	—
¹⁰⁶ Ru	3.5	0.6	1 a	0.27	—	0.01~1	—	—
¹⁴⁷ Pm	0.22	—	2.62 a	0.0045	—	0.001~0.012	—	—
²⁰⁴ Tl	0.76	—	3.8 a	0.035	0.025	0.003~0.12	—	—

* fA—fermo A=10⁻¹⁸A.

照射量的国际单位制单位为 C/kg, 惯用单位为伦琴(R)。后者只限于 X 射线和 γ 射线用, 1C/kg 相当于同样电荷在 1kg 空气中产生 1C 离子的辐照量。两种单位制换算如下:

$$1\text{C/kg} = 3876\text{R}$$

$$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$$

辐射吸收剂量即从辐射转移到单位质量吸收介质的能量, 其 SI 单位为戈瑞(Gy)。1Gy = 1J/kg。其惯用单位为拉德(rad); 1 拉德为 100erg/g。换算很简单: 1Gy = 100rad, 1rad = 0.01Gy。

单位时间的照射量称为照射量率。因为照射量率的单位为 $1 \frac{\text{As/kg}}{\text{s}} = 1\text{A/kg}$ 。惯用的且仍然经常使用的单位为 R/s, mR/s, R/h 和 mR/h。1C/kg = 3876R, 1As/kg = 3876R, 两边除以单位时间, 得

$$1\text{A/kg} = 3876\text{R/s}$$

考虑到: 1R/s = 3600R/h, 故

$$\text{A/kg} = 13.95 \times 10^6 \text{R/h}$$

更小的单位是

$$1\mu\text{A/kg} = 13.95\text{R/h}$$

$$1\text{nA/kg} = 13.95\text{mR/h}$$

$$1\text{pA/kg} = 13.95\mu\text{R/h}$$

惯用照射量率单位换算为 SI 单位如下:

$$1\text{mR/h} = 7.167 \times 10^{-11}\text{A/kg} = 71.67\text{pA/kg}$$

$$1\text{R/h} = 7.167 \times 10^{-8}\text{A/kg} = 71.67\text{nA/kg}$$

$$1\text{kR/h} = 7.167 \times 10^{-5}\text{A/kg} = 71.67\mu\text{A/kg}$$

在与活度为 A 的点 γ 辐射源距离 r 处产生的照射量率可用方程(1.9)计算:

$$L = K_r \frac{A}{r^2} \quad (1.9)$$

式中: A 为活度, 以 Bq 为单位;

r 为距离, m;

K_r 称为剂量常数, $\text{Am}^2/(\text{kg} \cdot \text{Bq})$ 或 $\text{Rm}^2/(\text{Ci} \cdot \text{h})$ 。

剂量常数值 K_r 相等于暴露物到类似点源距离上的放射性比率。 K_r 常数值编在表 1.4 中, 用了惯用单位和 SI 单位。两个单位制间的互换系数如下所述:

$$1\text{Rm}^2/(\text{hCi}) = 1.937 \times 10^{-18}\text{Am}^2/(\text{kgBq})$$

$$1\text{Am}^2/(\text{kgBq}) = 5.163 \times 10^{17}\text{Rm}^2/(\text{hCi})$$

在一些同位素表中, 人们还能看到克或毫克镭当量的表示法。1 毫克镭当量为其 γ 辐射与含 1mg ^{226}Ra 同位素的点源在相同距离上产生相同照射量率的放射性同位素的量; ^{226}Ra 通过 0.5mm 厚的铅过滤片与其衰变产物平衡。

发射强电离辐射(α 和 β 粒子)的放射性同位素也可用比电离来表征。比电离或线粒子密度的意思是在电离粒子径迹单位长度上的离子数。

辐射的性质主要由其能量确定。当所需离子能量(量子)较高时, 该辐射的穿透能力就较大。辐射和物质的相互作用也依赖于辐射能量。辐射能量用电子伏特(eV)单位量度; 原子物