



《中国工程物理研究院科技丛书》第014号

放射性核素活度测量 的方法和技术

古当长 著

科学出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第 014 号

**放射性核素活度测量的
方法和技术**

古当长 著

科 学 出 版 社

1 9 9 4

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书主要论述常用放射性核素的活度测量方法。全书共分三章：第一章， β 衰变核素的活度测量；第二章， γ 谱分析的活度测量技术；第三章，气态元素核和气态化合物的活度测量。本书以放射化学实验室高准确度的测量要求为前提，按核素的不同衰变类型和特征，分别论述适用于它们的测量方法、设备、技术和数据处理方法。书中给出了大量的测量实例，所得结果可供各实验室与在相同测量条件下得到的结果进行比较。

本书可供从事放射性核素测量、研究和活度计量的专业人员，以及大专院校有关专业的师生使用与参考。

《中国工程物理研究院科技丛书》第 Q14 号

放射性核素活度测量的方法和技术

古当长 著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

北京朝晖大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994 年 12 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1994 年 12 月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—1 000

字数: 306 000

ISBN 7-03-004317-0 / O · 749

定价: 17.80 元

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院 30 年来,坚持理论研究、科学实验与工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务.通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材.

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 30 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情.

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 多个主要学科.现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中.

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版.我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列.

谨以这套丛书献给 30 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989 年 1 月 25 日

《中国工程物理研究院科技丛书》

第二届编审委员会

主任 杜祥琬

副主任 章冠人 华欣生

委员 (以姓氏笔画为序)

水鸿寿	方乃相	王之康	王铁铮	刘庆兆
汤绍源	陈银亮	吴宏志	汪源浚	张永昌
张寿齐	张仕发	杨成龙	周正朝	姚景华
姜学贤	赵维晋	俞大光	胡在军	徐锡申
徐玉彬	高天祐	高国桐	董海山	赖祖武

丛书编辑部负责人 吴衍斌

本册编辑 郭玉团

《中国工程物理研究院科技丛书》

已出版书目

- | | | | | |
|-----|---------------|-----------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | 董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989年10月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990年2月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991年11月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | 胡家赣著 | 科学出版社 | 1991年12月 |
| 005 | 再入遥测技术(上册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年5月 |
| 006 | 再入遥测技术(下册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 007 | 映象与混沌 | 陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992年7月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993年3月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993年5月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993年5月 |

- | | | | | |
|------------|------------------------|-------|-------|-------------|
| 012 | 炸药热分析 | 楚士晋著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术 | 刘庆兆等著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度的测量方法和技术 | 古当长著 | 科学出版社 | 1994 年 12 月 |

前 言

自然界中物质由 92 种元素组成，有几百种核素。借助现代核技术，可用这些核素生产一些自然界不存在的元素和几千种人工核素。这些人工核素都是具有放射性的，并且其活度值与其产生条件紧密相关。因此，通过测定其活度，可以得到其产生过程中它们的内在联系、相应的参数或实验研究的结果。

每种放射性核素都有其特定的衰变方式、半衰期、辐射类型、射线的能量和强度，以及它们之间的相互关系，这些特征可用衰变纲图表示（见附录），而建立各种核素的衰变纲图又离不开活度测量。

随着科学技术的发展，放射性核技术已经渗透到工、农、医及其它许多学科的科研与应用领域，要达到研究和应用的要求，活度测量是必不可少的。

由此可见，放射性核素的活度测量也是计量学科中的基本量的计量之一。

放射性核素的活度测量尽管有多种方法，但不外是直接（绝对）测量和间接（相对）测量两大类。直接测量无需借助已知活度的标准源，可以直接测定活度；而间接测量则需要与标准源进行比较，或由标准源刻度仪器的探测效率后，才能测定样品的活度。直接测量方法可给间接测量方法提供各种核素的活度标准源。

中国工程物理研究院核物理与化学研究所的放射化学实验室，30 年来先后完成了许多重要的科研课题和国家指令任务。这些课题和任务都和放射性核素的活度测量紧密相关。为开拓各种核素的活度测量方法及提高测量的准确度，研究人员进行了许多辛勤的劳动，在测量方法的研究、设备的更新及技术的改进等方面，取得了丰富的经验和成果。在此特将其总结成文，以便于应用、继承、发展和交流。

本书撰稿始于 1988 年，由于人员变动和任务繁忙，中途几经搁笔，历时 4 年多，于 1992 年 3 月完成初稿六章。遵照审稿人及诸方建议，现将其中三章成书。第一章以 $4\pi(\text{pc})-\gamma$ 符合方法为主，讨论各种核素活度直接测量的方法和技术；第二章以 γ 谱仪的 γ 谱测量分析方法为主，讨论相对测量方法和技术；第三章讨论气态核素或化合物的活度测量方法和技术。

本书承蒙傅依备、陈涵德研究员审稿，并提出了宝贵的修改意见。刘恭良研究员审阅了部分章节，并提了中肯的意见。最后定稿中，金行星和王建中同志提出许多合理建议，并协助完成了文字修饰。在此，特致谢忱。还要感谢对本书的问世曾给以支持、指导和帮助的有关领导和同事们。

本书内容是全室同志集体劳动的结晶，尤其是曾长期从事这些测量和研究的刘蓓蓓、王秀元、黄瑞良、姚继虞、杨晓波等同志，更是为此而付出了辛勤的劳动和全部智慧。但是，由于编者水平所限，恐难以将众多同仁的多年辛劳成果充分体现出来，且书中疏漏在所难免，敬请同道不吝指正。

目 录

第一章 β 衰变核素的活度测量	(1)
§ 1.1 前言	(1)
§ 1.2 $4\pi(\text{pc})-\gamma$ 符合法的原理和装置	(4)
1.2.1 原理	(5)
1.2.2 装置	(7)
1.2.3 符合测量方法的统计误差	(12)
§ 1.3 $4\pi(\text{pc})-\gamma$ 符合方法中的修正	(15)
1.3.1 放射源大小和分布的影响	(16)
1.3.2 设备稳定性的影响	(17)
1.3.3 角关联的影响	(17)
1.3.4 内转换电子的影响和修正	(19)
1.3.5 β 探测器的 γ 灵敏度修正	(20)
1.3.6 分支比修正	(22)
1.3.7 韧致辐射的影响	(26)
1.3.8 偶然符合修正	(27)
1.3.9 死时间的计数损失修正	(29)
1.3.10 本底修正	(32)
1.3.11 应用举例	(33)
§ 1.4 参数法及其应用	(37)
1.4.1 修正因子 K 的一般形式	(38)
1.4.2 修正因子 K 的误差	(43)
1.4.3 应用于“三角形”衰变核素	(44)
1.4.4 应用于 $R_k=1$ 的核素	(46)
1.4.5 应用于 $\tilde{\varepsilon}_\beta = \varepsilon_{\beta T}$ 的核素	(52)
1.4.6 应用于多支 $\beta-\gamma$ 符合的核素	(57)

§ 1.5	K 的数值算法及其应用	(62)
1.5.1	跃迁矩阵的规定和性质	(63)
1.5.2	x 道(β 或 γ 道)和符合道的计数公式	(64)
1.5.3	修正因子 K 的计算	(65)
1.5.4	应用举例	(66)
§ 1.6	$4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合吸收法及其应用	(70)
1.6.1	方法原理	(71)
1.6.2	外推法的误差	(73)
1.6.3	应用	(77)
§ 1.7	效率示踪法	(82)
1.7.1	方法	(83)
1.7.2	示踪核的选择和制源	(86)
1.7.3	应用	(88)
§ 1.8	电子俘获衰变核的活度测量	(93)
1.8.1	探测方法	(94)
1.8.2	探测效率	(95)
1.8.3	$4\pi(\text{ppc})\text{-}\gamma$ 符合装置	(96)
1.8.4	电子俘获核的符合测量技术	(100)
1.8.5	应用举例	(101)
1.8.6	低能 X 射线和俄歇电子的影响	(113)
§ 1.9	$4\pi(\text{pc})\text{-}\gamma(\text{Ge})$ 符合方法	(119)
1.9.1	装置	(120)
1.9.2	原理	(121)
1.9.3	修正	(124)
1.9.4	统计误差	(126)
1.9.5	应用	(128)
§ 1.10	几个特殊衰变核素的活度测量	(130)
1.10.1	^{181}Hf 的活度标定	(130)
1.10.2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的活度测量	(133)
1.10.3	^{109}Cd 的活度测量	(137)

§ 1.11	高效率 4π 薄膜源的制作方法	(139)
1.11.1	薄膜制作和厚度测量	(141)
1.11.2	膜上蒸金和金层厚度测定	(143)
1.11.3	衬垫层喷涂	(144)
1.11.4	活性溶液的要求和制备	(149)
1.11.5	制源溶液的定量方法	(151)
1.11.6	源的干燥方法	(154)
1.11.7	源的质量检查	(154)
§ 1.12	4π LS 和 4π LS- γ 符合方法	(155)
1.12.1	4π LS 及其绝对测量	(156)
1.12.2	用 4π LS 测量 ^3H 和 ^{14}C	(165)
1.12.3	4π LS- γ 符合方法	(169)
§ 1.13	β 活度的相对测量	(171)
1.13.1	沉淀源 $2\pi(\text{pc})$ 方法	(171)
1.13.2	电镀源 $2\pi(\text{pc})$ 方法	(173)
1.13.3	效率差异方法	(175)
	参考文献	(176)
第二章	γ 谱分析的活度测量技术	(181)
§ 2.1	前言	(181)
§ 2.2	γ 射线及其探测技术	(184)
2.2.1	γ 射线的特征	(184)
2.2.2	核衰变中的 γ 和 X 射线辐射	(184)
2.2.3	γ 射线和物质相互作用	(187)
2.2.4	γ 探测介质及其探测器	(193)
2.2.5	γ 谱和 γ 谱仪	(196)
§ 2.3	γ 谱的构成	(198)
2.3.1	全能峰	(198)
2.3.2	康普顿连续谱	(199)
2.3.3	单、双逃逸峰	(200)
2.3.4	KX 射线逃逸峰	(202)

2.3.5	反散射峰	(204)
2.3.6	周围物质的 KX 射线峰	(204)
2.3.7	湮没 γ 峰.....	(205)
2.3.8	韧致辐射谱	(206)
2.3.9	级联加和峰	(206)
2.3.10	偶然符合峰	(207)
§ 2.4	γ 谱仪的基本指标	(208)
2.4.1	探测效率	(209)
2.4.2	能量分辨	(213)
2.4.3	峰形	(214)
2.4.4	峰康比	(215)
2.4.5	高低能峰高比	(216)
2.4.6	时间分辨	(217)
2.4.7	谱仪的能量线性	(218)
2.4.8	稳定性	(219)
2.4.9	允许计数率	(219)
§ 2.5	闪烁 γ 谱仪.....	(220)
2.5.1	NaI(Tl)的闪烁原理	(220)
2.5.2	NaI(Tl)晶体	(222)
2.5.3	光电倍增管	(223)
2.5.4	NaI(Tl) γ 探测器的装配	(225)
2.5.5	NaI(Tl) γ 谱仪	(226)
§ 2.6	半导体 γ 谱仪.....	(227)
2.6.1	现状	(227)
2.6.2	探测原理	(229)
2.6.3	半导体 γ 探测器.....	(234)
2.6.4	半导体 γ 探测器特性.....	(235)
2.6.5	新型半导体 γ 探测器.....	(237)
2.6.6	高计数率 γ 谱仪系统.....	(238)
§ 2.7	峰面积计算.....	(244)

2.7.1	峰面积和本底	(245)
2.7.2	本底扣除技术	(246)
2.7.3	积分计数方法	(248)
2.7.4	函数拟合法	(249)
2.7.5	重峰分解	(251)
2.7.6	干涉峰	(252)
§ 2.8	主要修正和测量条件选择	(252)
2.8.1	级联符合损失修正	(253)
2.8.2	偶然符合损失修正	(255)
2.8.3	死时间损失修正	(257)
2.8.4	吸收和散射的修正	(258)
2.8.5	几何因素修正	(260)
2.8.6	本底修正	(260)
2.8.7	衰变修正	(261)
§ 2.9	γ 谱仪的刻度	(262)
2.9.1	能量刻度	(263)
2.9.2	效率刻度的条件选择	(265)
2.9.3	效率刻度方法	(267)
2.9.4	效率拟合函数	(271)
2.9.5	探测效率的不确定度	(272)
§ 2.10	γ 谱仪测量活度的方法	(273)
2.10.1	绝对测量和相对测量	(273)
2.10.2	级联符合加和峰法	(274)
2.10.3	阱型晶体直接测量方法	(277)
2.10.4	直接比较法	(279)
2.10.5	效率曲线方法	(282)
2.10.6	剥谱法	(283)
2.10.7	解方程组方法	(284)
2.10.8	最小二乘法	(285)
2.10.9	谱光滑和漂移修正	(287)

2.10.10 几个特殊 γ 辐射核素的活度测量	(291)
2.10.11 活度测量的总不确定度	(294)
§ 2.11 低水平 γ 活度测量	(296)
2.11.1 探测极限	(296)
2.11.2 反康普顿 γ 谱仪	(303)
§ 2.12 γ 谱仪测量分析的其他应用	(309)
2.12.1 纯度监测	(309)
2.12.2 化学流程示踪	(311)
2.12.3 非破坏性分析测量	(313)
2.12.4 中子活化分析	(316)
参考文献	(321)
第三章 气态元素核和气态化合物的活度测量	(324)
§ 3.1 前言	(324)
§ 3.2 内充气正比计数管及其活度测量方法	(325)
3.2.1 计数管的结构和性能	(325)
3.2.2 空间体积和灵敏体积	(326)
3.2.3 充气排气系统	(328)
3.2.4 计数管中的样品活度测定	(329)
3.2.5 几个效应的损失实验	(329)
3.2.6 杂质气体对计数管性能的影响	(332)
§ 3.3 气体样品的比活度测定	(332)
3.3.1 气体样品和主要测量的核素	(332)
3.3.2 样品的定量和处理	(334)
3.3.3 比活度测定	(335)
§ 3.4 氚水的比活度测量	(336)
3.4.1 氚水样品	(336)
3.4.2 氚气样品的制备	(336)
3.4.3 测量和比活度的计算	(338)
§ 3.5 碳酸钡比活度测定	(340)
3.5.1 碳酸钡($\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$)的制备	(340)

3.5.2	样品气化和分析方法	(340)
3.5.3	碳酸钡的比活度	(341)
§ 3.6	混合核素的样品测量	(342)
3.6.1	气体裂变产物的样品	(342)
3.6.2	相对活度的变化规律	(343)
3.6.3	测量和计算方法	(346)
§ 3.7	气体裂变产物的 γ 谱分析测量技术	(349)
3.7.1	气体裂变产物的 γ 谱	(349)
3.7.2	^{88}Rb 标准源的制备和 γ 探测效率刻度	(351)
3.7.3	^{88}Kr 刻度源制备和 γ 探测效率刻度	(356)
3.7.4	$^{85\text{m}}\text{Kr}$ 的活度标定和 γ 探测效率刻度	(357)
3.7.5	^{87}Kr 的 γ 探测效率刻度	(359)
3.7.6	^{133}Xe 和 ^{135}Xe 的 γ 探测效率刻度	(359)
3.7.7	方法评价	(360)
参考文献		(362)
附录	核衰变纲图的表示和意义	(362)

第一章 β 衰变核素的活度测量

§ 1.1 前言

β 衰变核包括正负 β 衰变和电子俘获衰变的核素，迄今，已发现的 β 衰变核有 600—700 种之多，遍及原子序数从 1 到 92 及超铀元素等 100 多种元素。其中天然的 β 衰变核为数不多，绝大多数是人工放射性核素。这些核素在工、农、医、环保和国防等领域得到越来越广泛的应用。

β 衰变核素的放射性活度测量有相对法和绝对法两种。相对法的测量方法比较多，按照活度大小的范围、环境和测量要求的准确度不同，来选定测量的方法和设备。但是相对测量必须用具有标准活度的参考源进行比较，或对测量装置的探测效率进行刻度。绝对测量是一种具有高准确度的直接测量活度的方法。目前有多种绝对测量方法，并用于提供各种核素的活度标准源。但是，绝对测量必须根据欲测核素的衰变形式及其射线的特征，来选择测量的方法和设备。一般说来，绝对测量的设备比较复杂，并且对测量的条件、制源的技术及活性溶液的质量都有比较苛刻的要求，测量计算也比较费时费力。由绝对测量方法标定过的放射源，或用该方法标定过的活性溶液制作的放射源，都可以作为相对测量所需要的标准源。 β 相对测量的仪表及各种 γ 测量装置和 γ 谱仪，都需要一系列的 β 活度标准源来进行效率刻度。

由于放射性核素的种类繁多，绝对活度测量的方法比较复杂，为了统一放射性计量的标准，在国际计量局、国家计量局及各省市的计量局都有相应的组织机构专门研究放射性活度的标准及其管理和传递。它们在 β 放射性核素的活度绝对测量方面做了