

计量测试技术手册

第12卷 电离辐射

《计量测试技术手册》编辑委员会



中国计量出版社

计量测试技术手册

第12卷 电离辐射

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

内 容 提 要

《计量测试技术手册》包括计量测试技术基础、几何量和温度、力学、电磁学、电子学、声学、光学、时间频率、电离辐射、化学等量的测试技术,全套共 13 卷。

本卷为《计量测试技术手册》第 12 卷电离辐射。内容包括放射性核素计量, X, γ 和电子剂量计量和中子计量等三篇。

本书供从事计量工作的广大技术人员、管理人员查阅使用,也可供其他有关人员参考。

Abstract

This《Handbook of Measurement Technology》consists of the basic principle of measurement and measurement technology for geometrical quantity, temperature, mechanics, electromagnetism, electronics, acoustics, optics, time and frequency, ionizing radiation, and chemistry etc. The whole set contains 13 volumes.

The book is 12-th volume of《Handbook of Measurement Technology》Ionization Radiation. The book consists of three chapters for radioactive nuclide, X, gamma and electron dose measurement, neutron metrology.

The book is aimed to serves as refrence for metrologists, verification personneis and metrological admistrative staffs as well as to serves for concered personnels.

图书在版编目(CIP)数据

计量测试技术手册 第 12 卷:电离辐射/《计量测试技术手册》编辑委员会编著. - 北京:中国计量出版社, 1997. 6

ISBN 7-5026-0757-9

I. 计… II. 计… III. ①计量-测试技术-手册②电离辐射-计量-测试技术 IV. ①TB9-62②TB98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10422 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 50.75 字数 1722 千字

1997 年 6 月第 1 版 1997 年 6 月第 1 次印刷

*

印数 1-1500

定价:95.00 元

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需求,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献。为此,谨向所有付出心血的编者们表示敬意。



1995年10月18日

王大珩教授为中国科学院院士、中国工程院院士、中国高科技产业化研究会理事长、何梁何利基金优秀奖获得者。

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员：陈宽基

副主任委员：倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝

委员（按姓氏笔画顺序排列）

于 渤	王朋植	王晓莹	史元明	孙维民
师克宽	刘宝兰	刘瑞清	陈小林	陈艳春
何 贡	何伟仁	林宗虎	林鸿初	金士杰
施昌彦	席德熊	徐 鹁	马凤鸣	窦绪昕
谢 英	潘君骅	潘秀荣		

本卷编辑委员会

主 审：李德平

主 编：史元明

委 员：于凤翹 张之彬 陈常茂 杨文霞 陈艳春

本卷责任编委：倪伟清

本卷责任编辑：陈艳春

版式设计：孙丽英

插图设计：孙丽英

责任校对：刘秀英

撰 稿 人：（以姓氏笔画为序）

于凤翹	卢正永	石志侠	刘锦华	吕延晓
张之彬	张仲伦	杨元弟	杨守礼	李作前
李朝栋	李 泽	李 棻	肖京城	陈常茂
陈景坚	林莲卿	姚历农	姜金岭	彭华寿
梁石强	翁守清	唐贞信	唐桐永	高钧成
夏益华	郝润龙	顾明杰	潘中允	霍俊德
谭益宁	戴贵亮			

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪 50 年代初,经过 40 多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术各专业立卷,共 13 卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经 7 个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

1995 年 9 月

编者的话

电离辐射计量起源于 X 射线的发现和应用,并随着电离辐射在医学、科研、防护、环保、辐射加工各个领域的广泛应用而范围逐渐扩大。电离辐射计量是指上述电离辐射测量领域中的量值统一工作。

本书按照电离辐射计量的技术特点分为:核素计量、剂量计量和中子计量。国际辐射单位与测量委员会(ICRU)定义了电离辐射领域中的物理量和单位。本书比较详细地介绍了复现这些物理量的基准原理、方法、实验技术及复现物理量单位达到的不确定度;一些主要国家基准的结构、特性及近期的国际比对情况;我国电离辐射量的量值传递体系及有关的检定规程。

本书按照电离辐射在医学、环保、防护各个领域应用的特点,分别介绍了在这些领域中的测量技术,各种测量仪器的技术特性,校准方法,以及在具体使用中应注意的问题。

由于电离辐射种类繁多,能量范围相当宽,其应用目的和要求多种多样,因此电离辐射计量往往不能通过仪器的测量结果得到最终所要求的量值,常需将测量数值再进行某些计算,这就需要用到一些有关的参数。这些参数很多,而且随着科学的发展,新的数据不断出现。本书各篇收集了大量的在电离辐射计量中常用到的参数和数据资料。这些数据资料取自国际辐射单位与测量委员会(ICRU)、国际放射防护委员会(ICRP)、联合国原子能机构、联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)、电离辐射计量基准咨询委员会(CCERI)、美国标准技术研究院(NIST)等权威机构的最新资料。

本书第一篇由于凤翹等编写,第二篇由张之彬编写,第三篇由陈常茂等编写。李德平先生审阅了第一、二篇。

限于我们的水平和掌握的资料限制,错误和不当之处望读者指正。

编者

目 录

第 1 篇 放射性核素测量技术

第 1 章 概 论

1 放射性核素测量任务	(1)
1.1 测量任务涉及的领域	(1)
1.2 放射性核素在临床医学中的应用	(1)
1.3 放射性核素在工业中的应用	(2)
1.4 放射性核素在农业领域中的应用	(3)
2 放射性核素计量	(4)
2.1 放射性核素实验室的任务及对 计量基准和测量的要求	(5)
2.2 放射性核素测量图	(5)
参考文献	(11)

第 2 章 放射性核素测量基础

1 放射性和核衰变的基本概念	(12)
1.1 放射性	(12)
1.2 原子核衰变的种类	(12)
1.3 放射性活度	(13)
1.4 衰变纲图	(14)
1.5 放射性衰变链	(14)
1.6 放射性平衡	(14)
1.7 带电粒子(α 和 β 射线)和物质的 相互作用	(18)
1.8 带电粒子的射程	(18)
1.9 吸收定律	(18)
1.10 γ 射线和物质的相互作用	(18)
2 核探测器	(19)
2.1 核探测器分类	(19)
2.2 几种常用核探测器性能比较	(21)
2.3 几种常用核探测器的主要性能	(22)
3 电子学仪器与设备	(24)
3.1 电子学系统	(24)
3.2 放大器	(24)

3.3 符合与反符合逻辑电路	(25)
3.4 甄别电路与单道脉冲分析器	(26)
3.5 多道脉冲幅度分析器	(27)
4 照射量率常数	(27)

第 3 章 放射性核素测量方法

1 概述	(33)
2 活度测量的绝对方法	(33)
2.1 α 射线固定立体角计数方法	(34)
2.2 X射线固定立体角方法	(34)
2.3 2π 计数法	(37)
2.4 $4\pi\beta(\text{PC})$ 计数法	(38)
2.5 内气体源 4π 计数方法	(39)
2.6 液体闪烁 4π 方法	(43)
2.7 $4\pi\beta$ 正比计数管(PC)- γ 符合方法	(48)
2.8 $4\pi(\text{LS})$ - γ 符合方法	(53)
2.9 反符合计数方法	(55)
2.10 $4\pi\gamma$ 计数方法	(59)
2.11 量热法测量放射源活度	(60)
3 相对测量方法	(62)
3.1 α 谱仪分析法	(63)
3.2 β 标准立体角相对测量方法	(64)
3.3 γ 谱仪方法	(66)
3.4 液体闪烁相对测量方法	(72)
参考文献	(79)

第 4 章 活度测量的物理修正及放 射性测量样品的制备技术

1 死时间修正	(81)
1.1 基本概念	(81)
1.2 解析方法漏计修正	(81)
1.3 死时间测量	(82)
2 几何效率修正	(83)

2.1	几何效率公式	(83)
2.2	几何效率的误差	(84)
3	散射修正	(84)
3.1	散射规律	(85)
3.2	实际散射处理方法	(85)
4	吸收修正	(85)
4.1	α 粒子吸收修正	(85)
4.2	β 射线(X或 γ 射线)吸收修正	(86)
5	衰变修正	(87)
5.1	衰变修正因数	(87)
5.2	修正方法	(88)
5.3	计数期间的衰变校正误差	(89)
5.4	衰变校正误差	(89)
6	放射性标准源制备中的通用技术	(89)
6.1	定量取样	(89)
6.2	薄膜制备	(91)
6.3	膜源制备	(92)
6.4	电镀源的制备	(93)
7	放射性标准物质	(93)
7.1	标准物质	(93)
7.2	标准溶液	(93)
7.3	液闪标准样品	(95)
7.4	环境测量标准溶液	(96)
8	放射性标准气体	(96)
8.1	放射性标准气体的技术特性及操作技术	(96)
8.2	部分放射性标准气体	(97)
9	放射性固体标准源	(97)
9.1	一般说明	(97)
9.2	α 标准源	(97)
9.3	薄 β 标准源	(98)
9.4	γ 标准源	(98)
9.5	X射线标准源	(99)
9.6	电子标准源	(99)

第5章 核素活度的量值传递和统一

1	概述	(100)
2	核素活度基准	(100)
3	核素活度标准	(101)
3.1	标准物质	(101)
3.2	标准源	(102)
3.3	标准仪器	(103)
4	计量检定系统表	(103)
5	检定规程简介	(108)

6	统一活度计量的几种方式	(109)
7	国际参考系统介绍	(109)
7.1	国际参考系统装置	(109)
7.2	国际参考系统的测量	(110)
7.3	国际参考系统的水平	(111)
	参考文献	(113)

第6章 应用领域测量方法

1	铀勘探测量	(114)
1.1	测量仪表	(114)
1.2	量和单位	(114)
1.3	参考源(模型)	(115)
1.4	校准和测量	(116)
1.5	校准的误差源	(118)
2	放射性表面污染监测	(120)
2.1	监测方法	(120)
2.2	各种表面污染监测仪表	(122)
2.3	表面污染监测仪表的校准	(123)
2.4	表面放射性物质污染监测中的问题	(125)
3	人体计数方法	(127)
3.1	装置基本构成	(127)
3.2	主要技术指标	(127)
3.3	效率校准	(128)
3.4	最小可探测活度	(129)
3.5	解谱	(129)
3.6	人体测量中应注意的问题	(130)
3.7	器官计数	(130)
3.8	内照射剂量估算	(130)
4	放射性药品测量	(130)
4.1	药典规定	(130)
4.2	放射性药品核素种类及活度浓度准确度要求	(130)
4.3	测量方法和仪器	(133)
5	放射免疫分析	(135)
5.1	原理和方法	(135)
5.2	RIA的必要实验条件	(136)
5.3	RIA数据处理和质量控制	(137)
5.4	RIA方法建立带来的影响	(140)
6	核医学功能仪测试	(141)
6.1	常规性能监测	(141)
6.2	操作检查	(143)
7	γ 相机—计算机系统测试	(143)
7.1	性能测试的一般条件	(143)
7.2	验收测试和常规性能监测	(144)

7.3 操作检查	(148)	9.11 探测下限 L_D	(154)
7.4 软件检验	(148)	9.12 结果表示	(154)
8 单光子发射计算机断层照相机		9.13 精密度与准确度	(155)
测试	(148)	10 低活度水平 γ 放射性测量	(155)
8.1 物理和机械方面的一般检查	(149)	10.1 仪器条件	(155)
8.2 像素大小测定	(149)	10.2 校准	(156)
8.3 旋转中心测量及其校正	(149)	10.3 测量土壤中铀钍镭钾	(158)
8.4 断层均匀性测试及其校正	(150)	10.4 测量系统的测量范围及误差	(159)
8.5 断层分辨率测试	(150)	11 放射性气溶胶测量	(162)
8.6 断层影像 Z 方向的分辨率测试	(151)	11.1 基本概念	(162)
8.7 灵敏度和均匀性随角度的变化	(151)	11.2 测量原理	(164)
8.8 整体性能测试	(151)	11.3 测量步骤	(170)
9 环境样品中总 α 、总 β 放射性测量	(152)	11.4 测量结果与误差分析	(170)
9.1 应用范围	(152)	12 空气中氡浓度的测定	(175)
9.2 原理	(152)	12.1 瞬时采样方法	(175)
9.3 仪器与试剂	(153)	12.2 累积氡测量方法	(177)
9.4 样品采集	(153)	12.3 连续测氡方法	(179)
9.5 样品的制备	(153)	13 农业领域的 β 放射性测量方法	(179)
9.6 掺标物质的制备	(153)	13.1 固态样品活度的测量	(179)
9.7 质量控制	(153)	13.2 农用标记化合物活度的测定	(181)
9.8 测量	(154)	参考文献	(183)
9.9 测量结果计算	(154)		
9.10 标准偏差 S_C	(154)		

第 7 章 核素衰变数据和纲图

1 ^3H	(184)	20 ^{55}Fe	(197)	39 ^{86}Rb	(212)	58 ^{111}In	(227)	77 ^{140}La	(243)
2 ^7Be	(185)	21 ^{56}Mn	(197)	40 $^{87\text{m}}\text{Sr}$	(213)	59 $^{113\text{m}}\text{In}$	(227)	78 ^{141}Ce	(245)
3 ^{14}C	(186)	22 ^{56}Co	(198)	41 ^{88}Y	(214)	60 ^{113}Sn	(228)	79 ^{142}Pr	(245)
4 ^{18}F	(186)	23 ^{57}Co	(199)	42 ^{89}Sr	(215)	61 ^{122}Sb	(229)	80 ^{143}Pr	(246)
5 ^{22}Na	(187)	24 ^{58}Co	(200)	43 ^{90}Sr	(215)	62 ^{123}I	(230)	81 ^{144}Ce	(247)
6 ^{24}Na	(187)	25 ^{59}Fe	(201)	44 ^{90}Y	(216)	63 ^{124}Sb	(230)	82 ^{147}Nd	(248)
7 ^{26}Al	(188)	26 ^{60}Co	(202)	45 ^{91}Y	(217)	64 ^{125}Sb	(232)	83 ^{147}Pm	(248)
8 ^{32}P	(189)	27 ^{63}Ni	(203)	46 ^{93}Y	(217)	65 ^{125}I	(233)	84 ^{152}Eu	(249)
9 ^{35}S	(189)	28 ^{64}Cu	(203)	47 ^{95}Zr	(218)	66 ^{127}Xe	(234)	85 ^{153}Sm	(251)
10 ^{36}Cl	(190)	29 ^{65}Zn	(204)	48 ^{95}Nb	(219)	67 ^{129}I	(234)	86 ^{154}Eu	(251)
11 ^{40}K	(190)	30 ^{67}Ga	(205)	49 ^{99}Mo	(219)	68 ^{131}I	(235)	87 ^{160}Tb	(253)
12 ^{42}K	(191)	31 ^{68}Ga	(205)	50 $^{99\text{m}}\text{Tc}$	(220)	69 ^{131}Cs	(236)	88 $^{166\text{m}}\text{Ho}$	(254)
13 ^{43}K	(191)	32 ^{75}Se	(206)	51 ^{99}Tc	(221)	70 ^{132}I	(237)	89 ^{169}Er	(256)
14 ^{45}Ca	(192)	33 ^{76}As	(207)	52 ^{103}Ru	(222)	71 ^{133}Xe	(238)	90 ^{169}Yb	(256)
15 ^{46}Sc	(193)	34 $^{81\text{m}}\text{Kr}$	(208)	53 ^{106}Ru	(223)	72 ^{133}Ba	(239)	91 ^{170}Tm	(258)
16 ^{47}Ca	(194)	35 ^{81}Rb	(209)	54 ^{109}Pb	(223)	73 ^{134}Cs	(240)	92 ^{175}Hf	(259)
17 ^{47}Sc	(194)	36 ^{82}Br	(210)	55 ^{109}Cd	(224)	74 ^{137}Cs	(241)	93 ^{176}Lu	(260)
18 ^{51}Cr	(195)	37 ^{85}Kr	(211)	56 $^{110\text{m}}\text{Ag}$	(225)	75 ^{139}Ce	(242)	94 ^{177}Lu	(261)
19 ^{54}Mn	(196)	38 ^{85}Sr	(212)	57 ^{111}Ag	(226)	76 ^{140}Ba	(242)	95 ^{182}Ta	(261)

96	¹⁸⁵ W…	(263)	102	²⁰¹ Tl…	(268)	108	²²² Rn…	(274)	114	²³⁷ U…	(278)	120	²⁴⁰ U…	(285)
97	¹⁹² Ir…	(264)	103	²⁰³ Hg…	(270)	109	²²⁶ Ra…	(274)	115	²³⁷ Np…	(280)	121	²⁴⁰ Np…	(286)
98	¹⁹⁵ Au…	(265)	104	²⁰³ Pb…	(270)	110	²²⁸ Th…	(275)	116	²³⁸ U…	(281)	122	²⁴⁰ Pu…	(287)
99	¹⁹⁷ Hg…	(266)	105	²⁰⁴ Tl…	(271)	111	²³² U…	(276)	117	²³⁸ Pu…	(281)	123	²⁴¹ Am…	(288)
100	¹⁹⁸ Au…	(267)	106	²⁰⁷ Bi…	(272)	112	²³³ U…	(277)	118	²³⁹ Np…	(282)	124	²⁴² Pu…	(289)
101	¹⁹⁹ Au…	(267)	107	²¹⁰ Po…	(273)	113	²³⁵ U…	(277)	119	²³⁹ Pu…	(284)	125	²⁴⁴ Cm…	(289)

第 2 篇 X, γ 电子辐射剂量测量

第 8 章 一般问题

1	引言	(291)
2	相互作用系数	(291)
3	辐射学和剂量学的有关物理量 和单位	(354)
4	剂量学中的常用原理	(356)
4.1	剂量互易原理	(356)
4.2	空腔电离理论	(356)
4.3	Fano 定理	(358)
4.4	比例定度原理(Scaling Theorem)	(358)
5	X, γ 剂量计量的范围	(358)
5.1	X, γ 电子剂量涉及的辐射	(358)
5.2	剂量计量工作所需检定的测量 器具	(359)
	参考文献	(361)

2.2	常用测量仪器的性能	(385)
2.3	照射量仪表的检定	(387)
2.4	仪器的使用与维护注意事项	(388)
3	放射治疗设备	(388)
3.1	远距治疗设备	(388)
3.2	近距离治疗设备	(393)
4	远距治疗机的射束和机械特性	(394)
4.1	与治疗剂量有关的术语	(394)
4.2	射束的稳定性	(394)
4.3	射线束的准直	(394)
4.4	射束的均匀性及半影	(395)
4.5	终端误差	(395)
4.6	辐射质及其测定方法	(395)
5	放射治疗剂量的测量方法	(397)
5.1	测量条件	(397)
5.2	测量方法	(397)
5.3	空气中测量照射量转换成水模体 中吸收剂量的方法	(409)
6	放射治疗剂量测量方法的补充 规定	(411)
6.1	在水模体中测量的参考条件	(411)
6.2	电离室的校准	(411)
6.3	水中校准点吸收剂量的测定	(412)
7	放疗外照射辐射剂量测量规范 的国际情况	(416)
	参考文献	(418)

第 9 章 辐射剂量的基标准及传递系统

1	引言	(362)
2	照射量基标准及传递系统	(362)
2.1	X 射线照射量基准	(362)
2.2	γ 射线照射量基准	(366)
2.3	照射量计的检定系统	(369)
3	吸收剂量基准及传递系统	(372)
3.1	基准方法	(372)
3.2	量热法	(372)
3.3	电离室法	(377)
4	比释动能的测量	(378)
	参考文献	(380)

第 10 章 放射治疗级剂量测量

1	引言	(381)
2	测量仪器	(382)
2.1	一般要求	(382)

第 11 章 辐射防护级的剂量测量

1	引言	(419)
2	用于 X、γ 线外照射剂量当量 限值及转换系数	(420)
2.1	照射的几何条件	(420)
2.2	转换系数	(420)
3	外照射辐射防护仪表	(425)
3.1	对仪表的性能要求	(425)

3.2 校准辐射防护仪表能量响应用的 参考辐射	(431)
3.3 辐射防护仪表的校准方法	(437)
3.4 常用辐射防护仪表	(443)
4 个人防护剂量计	(446)
4.1 胶片剂量计	(446)
4.2 热释光剂量计	(449)
5 辐射防护中新的实用量	(459)
5.1 新实用量的定义	(459)
5.2 用新的实用量对防护监测仪器的 校准	(460)
5.3 实用量与限值量的关系	(465)
5.4 实用量的绝对测量	(467)
参考文献	(470)

第12章 环境辐射剂量测量

1 环境辐射	(471)
2 环境监测用 γ 吸收剂量或剂量 率仪	(473)
2.1 基本技术要求	(473)
2.2 标准检验条件	(474)
2.3 环境水平测量仪表的校准	(474)
2.4 检定项目和检定方法	(476)
2.5 电离室型仪表	(476)
2.6 闪烁探测器	(478)
2.7 就地 γ 谱仪	(479)
3 累积 γ 剂量监测方法	(482)

3.1 性能要求	(482)
3.2 热释光剂量测量系统的检验规则	(484)
3.3 监测使用时应注意的问题	(486)
参考文献	(488)

第13章 辐射加工级剂量测量

1 引言	(489)
2 辐射加工用的辐射源	(489)
2.1 概述	(489)
2.2 放射性同位素 γ 辐射装置	(490)
2.3 加速器辐射装置	(490)
3 辐射加工中的剂量测量	(492)
3.1 辐射加工所需的剂量范围	(492)
3.2 剂量计的选择与使用	(492)
4 剂量测量方法及传递系统	(492)
4.1 ^{60}Co 辐射加工级水吸收剂量传递 系统	(492)
4.2 基准装置	(493)
4.3 液体化学剂量计标准	(496)
4.4 丙氨酸剂量计标准	(498)
4.5 辐射加工工作剂量计	(499)
4.6 测电子束剂量用的水量热计	(504)
5 辐射加工剂量的标准化和比对	(504)
5.1 国际比对情况	(504)
5.2 国际剂量保证服务(IDAS)	(505)
6 辐射加工中的剂量测量	(505)
参考文献	(508)

第3篇 中子计量测试技术

第14章 一般问题

1 范围	(509)
2 中子的性质	(509)
2.1 中子的基本特性	(509)
2.2 中子的结合能	(509)
2.3 中子的分类	(512)
2.4 热中子密度分布	(512)
2.5 中子辐射场的特征	(513)
3 中子与物质相互作用	(513)
3.1 相互作用的类型	(513)
3.2 中子与生物组织相互作用	(514)
4 中子源	(514)
4.1 中子源的强度	(514)

4.2 中子的能量	(515)
4.3 放射性核素中子源	(515)
4.4 加速器中子源	(523)
4.5 反应堆中子源	(533)
4.6 参考中子源	(537)
附录 医用加速器中子源	(544)
参考文献	(550)

第15章 中子源强度、注量和能谱

1 热中子测量	(551)
1.1 热中子注量率的表述	(551)
1.2 中子温度	(552)
1.3 超麦克斯韦成分	(552)
1.4 测量技术	(552)

1.5	热中子注量率测量中的修正	(556)
2	中能中子与快中子测量技术	(556)
2.1	概述	(556)
2.2	反冲质子探测器	(557)
2.3	阈探测器	(558)
2.4	共振探测器	(559)
2.5	基于 ^3He , ^6Li , ^{10}B 反应与 ^{235}U , ^{239}Pu 裂变的探测器	(560)
2.6	慢化型探测器	(561)
2.7	伴随粒子法	(562)
3	单能快中子注量率测量	(563)
3.1	闪烁望远镜与伴随粒子法	(564)
3.2	半导体望远镜与半导体反冲计数器法	(565)
3.3	含氢正比计数器法	(565)
3.4	^7Be 放射性活度法	(566)
3.5	长计数器	(566)
4	中子源强度测量	(568)
4.1	锰浴法	(568)
4.2	其他浴技术	(572)
4.3	浴技术在加速器中子源发射率测量中的应用	(573)
5	中子能谱测量	(573)
5.1	中子谱仪	(573)
5.2	解谱程序	(579)
5.3	中子谱的比较	(579)
附录	中子阈反应截面数据	(584)
参考文献		(606)

第 16 章 中子比释动能

1	概述	(607)
2	中子比释动能的计算	(607)
2.1	基本公式	(607)
2.2	0.025 3eV~30MeV 中子比释动能系数	(608)
2.3	20~60MeV 中子比释动能系数	(628)
2.4	^{252}Cf 瞬发裂变中子的平均比释动能系数	(629)
3	大块介质内比释动能的分布	(630)
4	比释动能概念的应用	(631)
4.1	仪器理论	(631)
4.2	骨骼内的剂量	(632)
4.3	辐射场量的计算	(633)
4.4	自由空间内某点处的比释动能	(633)

6

4.5	中子源输出额的表述	(633)
5	比释动能的测量	(633)
5.1	组织等效电离室在测量比释动能中的应用	(633)
5.2	其他方法	(635)
5.3	比释动能测量中的限制	(635)
附录	身体组织及其替代物的中子比释动能系数	(636)
参考文献		(678)

第 17 章 中子吸收剂量

1	概述	(679)
2	测量仪器和方法	(679)
2.1	气体探测器	(679)
2.2	活化法和裂变法	(700)
2.3	硫酸亚铁剂量计	(702)
2.4	水合发光剂量计	(703)
3	吸收剂量与辐射质的监测	(703)
3.1	用途与要求	(703)
3.2	总吸收剂量或中子吸收剂量的监测	(703)
3.3	γ 射线吸收剂量的监测	(704)
3.4	辐射质的监测	(704)
3.5	监测装置的实例	(705)
4	体内剂量测量	(706)
4.1	必要性与分类	(706)
4.2	体内剂量测量技术	(706)
4.3	不确定度的估计	(706)
5	患者体内吸收剂量的分布	(707)
5.1	影响吸收剂量分布的因素	(707)
5.2	治疗计划	(711)
6	中子剂量学比对与建议	(716)
6.1	中子剂量学比对	(716)
6.2	关于中子吸收剂量测量的建议	(717)
附录	医用加速器中子束的特性	(719)
参考文献		(726)

第 18 章 辐射防护中子剂量学

1	概述	(728)
1.1	辐射防护中使用的剂量学量	(728)
1.2	个人剂量监测中的若干问题	(735)
1.3	现有中子防护仪器的适用性	(737)
2	辐射防护相关的中子场	(739)
2.1	中子场的一般特性	(739)

2.2	中子场的类型	(739)	5.3	裂变探测器	(756)
2.3	定度中子场	(742)	5.4	蚀刻径迹探测器	(757)
2.4	中子场的能量分布	(743)	5.5	热释光探测器	(760)
3	用于中子探测的动态方法	(743)	5.6	热激外逸电子发射剂量计	(765)
3.1	电离室	(744)	5.7	辐射光致发光玻璃探测器	(765)
3.2	复合电离室	(744)	5.8	其他类型的中子剂量计	(767)
3.3	裂变室	(745)	5.9	被动探测器的现场应用	(767)
3.4	正比计数器	(745)	6	个人剂量计	(770)
3.5	半导体探测器	(745)	6.1	核乳胶剂量计	(770)
3.6	闪烁探测器	(747)	6.2	TLD反照率剂量计	(770)
4	现场仪器	(747)	6.3	其他型式的反照率剂量计	(776)
4.1	用于中子剂量当量测量的巡测仪	(747)	6.4	裂变箔剂量计	(776)
4.2	简便的现场谱仪	(750)	6.5	反冲型蚀刻径迹探测器	(778)
4.3	实验室谱仪及其应用	(751)	6.6	个人报警中子剂量计	(780)
5	用于中子探测的被动方法	(752)	6.7	核事故剂量学系统	(786)
5.1	核乳胶	(752)	参考文献	(787)	
5.2	活化探测器	(754)			

第 1 章 概 论

1 放射性核素测量任务

1.1 测量任务涉及的领域^[1]

随着核工业和核技术应用的发展,放射性核素的测量任务日趋繁重,它涉及放射性核素的生产、交换、科研、环境及其在工、农、医等应用部门,都要对放射性核素的基本参数、用量及防护等问题进行准确计量,以保证有效地、安全地使用。例如在一切操作开放性放射性核素的地方,都可能造成核扩散,必须要有严格的辐射防护监测;用放射性核素进行医学诊断和治疗,必须准确地确立其量(含量或剂量),否则将危及患者安全。又如对环境土壤中、水、空气以及食品中的放射性核素的含量监测已引起世界各国重视。测量的准确度视各种要求而定。下面将介绍几个重要应用领域。

1.2 放射性核素在临床医学中的应用^[2]

利用开放性放射性核素进行疾病诊断和治疗的学科称为核医学。40多年来,核医学经历了扫描机时代, γ 照相时代和断层显像时代,到现在已成为体系完备、特点卓著、内容丰富、功效明显的现代医学主要分枝之一。

核医学分为诊断和治疗两部分,至今,诊断部分是核医学的主体。

(1) 诊断核医学

又分为体内(in vivo)核医学和体外(in vitro)核医学。体内核医学是将放射性药物引入体内,利用十分灵敏的放射性探测仪器在体表测量和显示放射性药物在体内的吸收、代谢、运转和排泄,根据这些信息对疾病作出诊断,对脏器功能作出判断。所获得的这些信息是脏器的血流、代谢和功能等方面的信息,与X线CT,超声波检查和磁共振显影(MRI)所获得的以脏器形态结构为主的信息不同,二者可以相互补充。核医学方法往往可以较XCT等更早期地发现和诊断疾病。体外核医学是将放射性核素加入取自人体的血液、尿、唾液或其他体液中,参与某些反应,如抗原抗体结合反应(称放射免疫分析)和受体结合反应(称放射受体分析)等,利用十分简便而灵敏的放射性测量技术来定量记录反应的结果,用以诊断疾病。这种技术有极高的灵敏度和特异性,也是超微量分析体内生命物质的简易方法。至今已可测定微量生命物质300余种。它已不限于在核医学学科应用,而是广泛地在各基础医学和临床医学学科的一般实验室内使用。

(2) 治疗核医学

它是一种将放射性药物选择性地引入病变进行局部内照射的治疗方法。适用本法的病种不多,主要有 ^{131}I 治疗甲状腺机能亢进和甲状腺功能性转移灶, ^{32}P 治疗真性红细胞增多症和原发性血小板增多症, ^{131}I -MIBG治疗恶性嗜铬细胞瘤及神经母细胞瘤转移灶,放射免疫治疗肿瘤、介入性治疗肿瘤、 ^{89}Sr 和 ^{153}Sm -EDTMP治疗骨转移疼痛等,多有较肯定的疗效。

(3) 用放射性核素诊断和治疗疾病

活度计放免分析仪、功能测定仪、 γ 照相机、单光子发射计算机断层照相机(SPECT)和正电子发射计算机断层照相机(PET)等核医学仪器,用以测定和比较血、尿等样品中的放射性计数,测定和显示放射性核素在体内的分布和动态变化。为保证引入体内放射性核素量的准确性,以此控制诊断所需的给药量和内照射辐射吸收剂量;也为保证核医学诊断数据的可靠性和影像的高质量,对所用仪器的性能必须进行计量检定和质量控制。

随着应用领域的扩大和技术的特殊化,近10几年核医学又逐步形成按人体系统区分的许多分枝,以下是其中最主要的几个:

(4) 神经核医学(Nuclear Neurology)

主要内容有①局部脑血流显像。可以显示大小脑皮层各区、基底神经节和丘脑的局部血流量，间接反映这些部位神经核团的功能。能发现脑梗塞前的脑血流异常，灵敏地诊断和定位癫痫病灶。②脑局部葡萄糖代谢率显像。可以显示脑各部位神经核团的能量代谢，直接反映各部位的功能。现也利用这种显像观察到了抑郁症、精神分裂症、老年性痴呆（含 Alzheimer 氏病）、巴金森氏病等的脑功能特征，有利于研究和早期诊断这些疾病。③脑神经受体显像。神经受体是神经信息传递的重要环节，很多精神神经疾病及其药物疗效皆与神经受体的数量和功能有关。脑神经受体显像已成功地显示了人脑内各类神经受体的数量和分布，包括多巴胺 D₁ 和 D₂ 受体、五羟色胺受体、肾上腺素能受体、乙酰胆碱受体、γ 氨基丁酸受体、阿片受体等，将大大推进神经精神生理病理和药理学的深入研究。

(5) 心脏核医学 (Nuclear Cardiology)

主要内容有①²⁰¹Tl 心肌显像。不仅可以有效地诊断冠心病，并且可以鉴别心肌缺血和梗塞，显示病变的部位和大小，提示那一支冠状动脉狭窄或闭塞。其诊断的灵敏度和准确性明显高于心电图检查。②心功能测定。由计算机全息记录和显示室壁每个节段收缩和舒张的全过程，所得结果重复性好，客观准确，公认优于超声心动等其他检查。③相位分析，是一种较精细显示心肌各个部位收缩力度和收缩顺序的方法，能有效地诊断定位室壁瘤和各种心肌神经传导异常。

(6) 肿瘤核医学 (Nuclear Oncology)

主要内容有①血、尿内肿瘤标志物测定。利用放射免疫分析等体外核医学技术测定肿瘤分泌的特异性抗原，如甲胎蛋白 (AFP)、癌胚抗原 (CEA) 等，可以对肝癌、结肠癌和绒毛膜上皮癌等进行普查、早期诊断、及时根治和疗效追踪。②放射免疫显像。将放射性核素标记在某些肿瘤抗原的特异抗体上，注入体内后，放射性核素乃由特异性抗体导向结合于肿瘤抗原部位，根据探测到的放射性核素结合的部位，可以诊断肿瘤和定位。这种导向技术不仅是重要的肿瘤特异诊断方法，并可能成为肿瘤的导向内照射治疗方法。目前已在肝癌、消化道肿瘤和卵巢肿瘤等方面取得进展。③全身骨显像。由于是一种与局部血流量和骨盐代谢密切有关的功能显像，能提前 3~6 个月发现骨转移灶，对制定正确的治疗方案和及时治疗有重要价值。

1.3 放射性核素在工业中的应用^[3]

放射性核素的工业应用大致可归纳为三个主要方面：即信息功能的应用如示踪技术，检测仪表等；制作功能的应用如辐射加工；以及其他功能如光源，能源，静电消除等的应用。

1.3.1 信息功能的应用

(1) 放射性核素的工业示踪

放射性核素可以作为一种灵敏的示踪物质对工业过程的物料运动进行动态跟踪，取得它们的空间、时间与数量分布信息，对于提高工厂的生产效率，保证运行安全，防止事故发生都具有重要意义。在环境保护方面用以追踪污染物；在水利水文方面用以探测堤坝和病险水库的隐患，查明水工建筑的渗流，以及河流与港区的泥沙冲淤等；在冶金工业中，利用放射性核素⁴⁵Ca、⁵⁴Mn、⁹⁵Zr 等作为示踪剂投放于钢水中，可查明连续铸钢中连续夹杂质的来源。

此外在测定内燃机机件（如活塞、活塞环、气缸、曲轴颈），滚动轴承，机床设备以及切削刀具的磨损等方面具有特殊功效。

(2) 工业同位素检测仪表

工业同位素检测仪表具有其他工业仪表所不具备的特点：如，不接触被测对象；可进行非破坏性检测；可在高温、高压、高粘度、高腐蚀和高毒性下对非密封和密封容器和物料进行检测和控制；可连续在线进行测量，并易于实现生产过程闭环自动控制等。工业同位素检测仪表一般体积小、重量轻、便于安装和携带。根据仪表的工作原理和作用方式可分为强度测量型、能谱分析型、数字图象处理型以及其他同位素仪表等 4 类。

强度测量型仪表包括料位计、密度计、厚度计、浓度计、泥沙量计、中子水分计和核子秤等。主要是利用物质对放射性核素发出的射线产生吸收，散射与中子慢化等作用，使射线强度发生变化，反映出被测对象某些宏观物理参数。如用发射 β 射线的放射性核素²⁰⁴Tl、⁹⁰Sr、¹⁴C、¹⁴⁷Pm、⁸⁵Kr 等测量 5~600mg/cm² 较薄材料的厚度；发射 γ 射线的核素，如¹³⁷Cs、⁶⁰Co、²⁴¹Am 等多用于较厚材料的测量。

能谱分析型仪表是对一类物质在放射性核素的作用下发射出的射线能谱进行分析，从而确定物质的成分和结构

的仪表。例如，X射线荧光分析仪、核测井及在线活化分析仪表等。X射线荧光分析仪是利用放射性核素，如 ^{55}Fe 、 ^{238}Pu 、 ^{109}Cd 、 ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 $^3\text{H}/\text{Zr}$ 、 $^3\text{H}/\text{Ti}$ 、 $^{147}\text{Pm}/\text{Al}$ 、 $^{147}\text{Pm}/\text{Zr}-\text{Al}$ 等作为激发源，再对样品的特征X射线进行分析，从而确定样品元素的成分与含量。其优点是：分析范围广泛，从硅到铀范围内的元素均能分析；分析速度快（数分钟）、不破坏分析样品；灵敏度和准确度高，探测极限可高达 10^{-6}g ，最佳准确度在 $0.1\% \sim 0.01\%$ 之间。核测井包括天然 γ 能谱测井、岩性密度测井与中子测井等现已成为油田测井的有效手段。

数字图象型仪表包括X、 γ 射线工业探伤装置中子照相以及工业断层显像（即工业CT）等。一般是利用放射性核素射线穿透工件实现胶片照相、二维或三维阵列探测，数字图象重建与处理等，以确定射线在工件中的空间与平面分布，从而反映被测对象的有关信息。

感烟式火灾报警器是利用放射性核素 α 粒子对空气的电离作用，在火灾发展初期阴燃生烟阶段烟雾对电离室中电离收集过程的干扰，实现自动报警。

表 1-1 γ 射线工业探伤用主要放射性核素

放射性核素	^{60}Co	^{137}Cs	^{192}Ir	^{170}Tm	^{169}Yb
射线类型能量 (MeV)	$\beta-\gamma$ 1.33, 1.17	$\beta-\gamma$ 0.66	γ 0.30~0.61	γ 0.052, 0.084;	γ 0.063, 0.198
探伤厚度 (mm)	30~200 (钢材)	15~70 (钢材) 30~120 (铝材)	10~100 (钢材) 30~200 (铝材)	1~10 (钢材) 5~50 (铝材)	1~20 (铝材)

1.3.2 加工处理功能的应用

用高活度放射性核素做成的大型辐射源可对某些物料进行有效的加工处理，已成为新材料开发，如医疗用品消毒、食品保藏、三废治理、电子学器件的微细加工等，成为一种新兴的手段，并发展成为高技术产业的重要内容。

1.3.3 其他功能的应用

放射性核素可作为一种特殊的光源、热源和能源在工业上加以应用。例如氚、钷 147 与氩 85 等放射性核素可与磷光物质相结合制成“永不熄灭”的自发光微光源，广泛用于一切要求微光照明或指示的地方。

放射性核素的核衰变能经物质吸收后可转变为热能，制成同位素热源。若进一步将热能转变为电能就称“同位素电池”。在宇宙飞行、空间探索、海洋工程与极地开发等方面取得了独特的应用。

放射性核素可用作静电消除器即利用其发射的 α 射线与 β 射线可与空气作用引起工件周围空气的电离，以中和带电工件上的静电，从而消除工业设备的静电。

放射性核素的工业应用是多方面的，而且取得了显著成效。今后放射性核素不仅拓宽延伸工业的应用范围，并且还将开发新的应用领域。

1.4 放射性核素在农业领域中的应用

放射性核素在我国农业上的应用有同位素示踪和辐射应用两个方面。

1.4.1 同位素示踪

同位素示踪方法具有更简便、快速、准确和灵敏度高等优点，在农业科研领域中广为应用于下列几方面。

①研究植物对营养元素的吸收规律，探明肥料配方、施用方法等优化模式，直接为农作物增产服务。常用的示踪核素有 ^{15}N 、 ^{32}P 、 ^{42}K 、(或 ^{86}Rb)和 ^{99}Mo 、 ^{65}Zn 、 $^{55+59}\text{Fe}$ 、 ^{54}Mn 、 ^{64}Cu 等。

②研究有害物质在农业环境生态系中的沉积、迁移和被作物吸附、吸收、运转以及残留降解，为保护农业环境、生态平衡和人民健康服务。常用的示踪核素有 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{36}Cl 、 ^{54}Mn 、 ^{76}As 、 ^{109}Cd 、 ^{203}Hg 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 、 131 、 ^{125}I 等。

③研究作物光合作用的物质同化与积累过程， ^{14}C 是主要的示踪核素。

④测定谷物脱粒机轴流滚筒内物料的运动参数。如利用 ^{60}Co 丝状源，活度 $30 \sim 50\mu\text{Ci}$ ，制作成秸秆模拟物，随秸秆喂入。在滚筒外表的适当部位布置钟罩计数管，将计数信号输入放大器和动态自动描图装置上，将获取的间断脉冲同计数管的方位联系起来分析，构成示踪源在滚筒中的运动轨迹。借助时间和距离座的数据处