

四川大学出版社

核辐射装置及其应用

樊程芳 吴茂良 著

内 容 提 要

全书共九章：前三章介绍核辐射的基本概念、基本效应和剂量基础知识；第四～七章讨论核辐射装置的类型、结构、设计建造技术要求、安装调试要点、以及辐射安全等问题；最后两章介绍装置在农业、医疗卫生、环境保护、辐照食品、高分子材料等领域的应用。全书叙述以同位素 γ 装置为重点，对电子辐照加速器和中子辐射源，只作简单介绍。

本书按教学要求编写，可作为核技术应用的教学参考书，也可作为原子能农业、生物医学等专业的数材。本书适合于大、中专学生阅读，也可供具有中等以上文化程度的科技工作者参考。

核辐射装置及其应用

樊程芳 吴茂良 编著

*

四川大学出版社出版

(四川大学校内)

四川省新华书店发行 四川石油管理局印刷厂印刷

*

开本850×1168毫米1/32 印张10.43 字数270千

1988年3月第一版 1988年3月第一次印刷

印数：0001—1400册

ISBN 7-5614-0076-4/O·16 定价：2.05元

序

核辐射技术研究和开发工作近年来受到普遍重视，它涉及多个学科的应用。辐射物理主要研究电离辐射与物质的相互作用（1985年第三届国际辐射物理会议，并成立了国际辐射物理学会）。应用辐射化学用于多种高分子材料的辐射处理，使材料改性并合成新型材料（近些年来举行了多次辐射处理国际会议）。辐射生物学及辐射医学应用到杀虫灭菌，使害虫不育，处理公害、改善环境，以及诊断疾病，治疗癌肿等等。

辐射技术的研究及应用是从实验室进入生产部门和生活实际的各个行业的一门应用学科。辐射处理工艺也作为一门服务行业，接受辐照委托，代用户加工处理。辐射技术开发的广度也是社会现代化程度的标志之一。

辐射技术包括辐射装置及剂量测量，辐射工艺研究、辐射技术在各个交叉学科中的应用（1985年辐射技术研究与开发工作讨论会在苏州举行，讨论了这三方面的课题）。辐射装置的设计、选用、安装、调试，以及维修等是一切辐射技术的先决条件。

伴随着科研面向经济建设，“教育结合生产、结合实际，”怎样在专业人材培养中落实？首先需要适当的教材和供学生使用的参考书（作为教材的补充）。虽然目前已有核辐射技术期刊，有一些专著读物和专题文献译丛，但迄今尚未见到供辐射技术使用的核辐射装置的教材。《核辐射装置及其应用》一书现在出版是符合客观要求的。

樊程芳、吴茂良两位同志多年从事核物理学及核探测等课程的教学工作，参加并完成核辐射技术开发性的一些科研课题，还参加过核辐射装置的设计、安装工作。这本书的编写针对了大专院校有

关专业的学生的实际水平，我认为对大专学生和同等程度的青年参加辐射技术工作，和进一步查阅专题文献都有帮助。

李诗豪 1987年9月

前 言

目前，核技术应用已渗透到科学技术和国民经济的很多方面，其中辐射应用技术又是最活跃的领域之一。为了在教学上适应这种新形势，我们编写了这本教学参考书。

本书内容，包括核辐射装置的工作原理、类型结构、安全防护、剂量测试，以及工农业中的应用。为了照顾不同的读者，前三章专门介绍了核辐射和辐射剂量的基本知识。全书以同位素 γ 装置为主，对电子辐照加速器和中子辐射源，只作简单讨论。

编写过程中，力求理论联系实际。书中尽量不涉及高深的物理知识和数学推导，而以概念阐述为主。这对于要求深入探讨的读者来说，可能是不够的。为此，书末列出了部分文献资料，供读者参考。

本书可作为有关专业核技术应用的教学参考书，或者教材，也可供具有中等以上文化程度的科技工作者参考。

在本书编写过程中，我们引用了许多作者的论著和文章，也得到不少同志的帮助和指教，特别是辐射物理专家李诗豪教授专门为本书写了“序”，四川省农科院李品芳同志在资料收集方面给予了很大帮助。在此，编者向他们表示衷心的感谢。

由于编者知识水平有限，实践经验也不丰富，书中错漏不妥之处，恳请读者批评、指正。

樊程芳 吴茂良

1987年10月

目 录

序

前 言

绪 论..... (1)

第一章 核辐射物理基础

1.1 原子核..... (5)

1.1.1 电荷数与质量数..... (5)

1.1.2 原子核的组成..... (7)

1.1.3 原子核的结合能..... (8)

1.1.4 核自旋与磁矩..... (9)

1.2 放射性 α 衰变..... (11)

1.2.1 衰变规律..... (12)

1.2.2 递次衰变..... (13)

1.2.3 衰变能..... (14)

1.2.4 α 衰变..... (15)

1.3 β 衰变 γ 跃迁..... (17)

1.3.1 β 衰变..... (17)

1.3.2 衰变纲图..... (18)

1.3.3 γ 跃迁..... (20)

1.3.4 ^{60}Co 与 ^{137}Cs (21)

1.4 核 反 应..... (25)

1.4.1 核反应过程..... (25)

1.4.2 核反应能量..... (26)

1.4.3 核反应截面..... (29)

1.5 误差与数据处 理..... (31)

1.5.1 误差..... (31)

1.5.2 误差的表示..... (33)

1.5.3	放射性测量的统计性	(36)
1.5.4	放射性测量的误差	(41)

第二章 电离辐射的物理效应和生物效应

2.1	γ 射线与物质相互作用	(45)
2.1.1	光电效应	(45)
2.1.2	康普顿效应	(51)
2.1.3	电子对效应	(56)
2.1.4	γ 射线的吸收	(57)
2.2	带电粒子与物质相互作用	(59)
2.2.1	α 粒子与物质相互作用	(59)
2.2.2	β 粒子与物质相互作用	(62)
2.3	中子与物质相互作用	(66)
2.3.1	弹性散射	(67)
2.3.2	非弹性散射	(71)
2.3.3	辐射俘获	(71)
2.3.4	截面	(72)
2.3.5	中子束强度的衰减	(74)
2.4	电离辐射的生物效应	(74)
2.4.1	生物效应的过程	(75)
2.4.2	直接作用	(77)
2.4.3	水分子的电离	(77)
2.4.4	间接作用	(79)
2.4.5	辐射原发作用的学说	(80)
2.4.6	影响辐射生物效应的因素	(85)

第三章 辐射剂量基础

3.1	照射量与放射性活度	(91)
3.1.1	照射量 X	(91)
3.1.2	放射性活度 A	(92)
3.1.3	活度 A 与照射率 $\dot{X}$ 的关系	(93)
3.2	吸收剂量与比释动能	(95)
3.2.1	吸收剂量 D	(95)

3.2.2	比释动能 K	(96)
3.2.3	剂量当量 H	(97)
3.2.4	相互关系	(98)
3.3	空腔电离理论	(100)
3.3.1	基本假定	(100)
3.3.2	Bragg-Gray公式	(101)
3.3.3	介质的吸收剂量	(103)
3.4	γ 剂量测定	(106)
3.4.1	电离室	(107)
3.4.2	化学剂量计	(108)
3.4.3	固体剂量计	(110)
3.4.4	量热法	(111)
3.4.5	光声剂量计	(112)
第四章 同位素γ辐射源		
4.1	同位素 γ 源的一般特性	(114)
4.1.1	γ 源应满足的条件	(114)
4.1.2	半衰期 $T_{1/2}$	(116)
4.1.3	总活度和比活度	(119)
4.1.4	γ 能量和能谱	(122)
4.2	γ 源的结构	(125)
4.2.1	源元件	(125)
4.2.2	环状源	(127)
4.2.3	平板源	(130)
4.3	γ 源的倒装	(134)
4.3.1	倒源准备工作	(134)
4.3.2	倒装程序	(135)
4.4	γ 源的贮藏和升降	(136)
4.4.1	屏蔽水层厚度的确定	(136)
4.4.2	贮源水井的技术要求	(139)
4.4.3	γ 源的提升系统	(143)
第五章 γ辐射装置系统		

5.1	核辐射装置建造的全过程	(146)
5.1.1	申报程序	(146)
5.1.2	设计、施工基本要求	(148)
5.1.3	建设投资概算	(149)
5.1.4	装置的调试验收	(150)
5.2	封闭式辐射装置的基本结构	(151)
5.2.1	辐照室	(151)
5.2.2	迷道	(157)
5.2.3	控制系统	(160)
5.3	小型 γ 室内装置	(164)
5.3.1	室内装置的平面布局	(164)
5.3.2	辐照室照射率分布	(166)
5.3.3	样品照射系统	(170)
5.4	田间 γ 辐射装置	(171)
5.4.1	γ 圃的结构特点	(171)
5.4.2	圃外剂量的估计	(173)
5.4.3	圃区剂量的测定	(176)
5.5	生产性辐射装置	(178)
5.5.1	基本技术要求	(179)
5.5.2	装置的结构特点	(180)
5.5.3	生产能力的设计和估算	(183)
5.6	移动式辐射装置	(185)
5.6.1	全移动式辐射装置	(185)
5.6.2	半移动式辐射装置	(187)
5.6.3	移动式小型辐射装置	(188)
第六章 电子和中子辐射装置		
6.1	电子加速器与同位素 γ 源的比较	(190)
6.2	电子辐照加速器	(193)
6.2.1	倍压加速原理	(193)
6.2.2	高频高压加速器	(196)
6.2.3	变压器型加速器	(197)

6.2.4	静电加速器	(198)
6.2.5	电子直线加速器	(201)
6.2.6	电子束扫描系统	(205)
6.3	中子辐射源.....	(206)
6.3.1	同位素中子源	(206)
6.3.2	加速器中子源	(209)
6.3.3	反应堆中子源	(213)
6.4	电子和中子的屏蔽.....	(215)
6.4.1	电子加速器的屏蔽	(215)
6.4.2	快中子屏蔽的计算方法	(218)
6.4.3	中子辐照室的屏蔽设计	(221)

第七章 核辐射装置的辐射安全

7.1	辐射防护的基本概念	(224)
7.1.1	剂量当量限制制度	(224)
7.1.2	辐射防护三原则	(226)
7.1.3	辐射的致害作用	(229)
7.1.4	辐射防护的基本方法	(231)
7.2	同位素 γ 装置的安全问题.....	(232)
7.2.1	辐射安全管理的重要性	(233)
7.2.2	贮源井水的监测	(235)
7.2.3	个人剂量和环境剂量的监测	(236)
7.2.4	辐照室的进排风	(238)
7.3	辐射事故的防止和处理.....	(241)
7.3.1	辐射源泄漏的预防和处理	(241)
7.3.2	源架的迫降	(245)
7.3.3	人员误入事故的处理	(247)
7.4	电子加速器的辐射安全.....	(249)
7.4.1	误入事故的预防	(249)
7.4.2	电子吸收剂量的测量	(249)
7.5	中子源的辐射安全.....	(252)
7.5.1	中子剂量当量测量的特点	(252)

	7.5.2 辐射危害因素的预防措施	(256)
第八章	核辐射装置应用 (一)	
8.1	辐射育种	(258)
8.1.1	辐射育种机理	(258)
8.1.2	辐射育种方法	(261)
8.1.3	辐射育种举例	(264)
8.2	辐射不育	(268)
8.2.1	辐射不育基本原理	(268)
8.2.2	辐射不育技术要点	(270)
8.2.3	辐射不育应用简介	(273)
8.3	环境保护中的辐射技术	(274)
8.3.1	废水的辐射处理	(275)
8.3.2	废气 废物的辐射处理	(277)
8.4	中子源的非辐照应用	(278)
8.4.1	中子水分计	(278)
8.4.2	中子活化分析	(281)
第九章	核辐射装置应用 (二)	
9.1	食品辐射处理	(286)
9.1.1	辐射抑制发芽	(287)
9.1.2	辐射灭菌	(289)
9.1.3	辐射杀虫	(291)
9.1.4	辐射改进品质	(293)
9.2	高分子材料的辐射聚合	(293)
9.2.1	丙烯酰胺等的辐射聚合	(294)
9.2.2	辐射共聚合	(296)
9.2.3	复合材料的辐射制备	(297)
9.3	高分子材料的辐射改性	(299)
9.3.1	辐射交联	(299)
9.3.2	辐射交联聚乙烯热收缩材料	(303)
9.3.3	辐射接枝	(305)
9.3.4	辐射裂解	(306)

9.4	其他应用.....	(307)
9.4.1	医疗用品辐射消毒	(308)
9.4.2	中成药辐射灭菌	(309)
9.4.3	图书档案辐射杀虫	(310)
参考文献		(312)
附录 1	有关常数.....	(315)
附录 2	单位及换算.....	(316)

绪 论

1. 核辐射装置的类型

所谓核辐射装置，是指以辐照为目的，由辐射源和各种功能设备所组成的统一系统。通常简称为辐射场，或辐照站。目前，不同用途、不同结构的辐射装置，种类繁多。为了便于问题的讨论，有必要对它们进行分类。虽然现在还没有统一的分类方法，但根据各种资料对装置的习惯叫法，可以按以下几种方法分类：

(1) 按射线分类 目前主要有光子、电子和中子三种。每种射线均可采用不同类型的辐射源产生，因而有各种各样的名称。对 γ 射线而言，采用不同核素时，有 ^{60}Co 装置、 ^{137}Cs 装置等；根据源的几何形状，又可分为点源、线源、柱面源和板源等装置。对电子而言，有高压倍加器、高频高压加速器和直线加速器等电子源装置。对中子而言，有同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源等。

(2) 按用途分 有医用装置、农用装置和工业用装置等，或分成试验研究装置和生产加工装置两大类。其中，生产装置可以是专用的，也可以是多用途的。为了获得最好的经济效益，生产装置都有专用的产品传送系统。目前，生产加工装置一般都按产品传送方式分类定型，如 γ 装置就可分为气动传送、悬挂传送和传送带传送等等。

(3) 按结构分类 由于辐射装置结构的多样性，故一般按不同的结构特点来分类。根据结构的灵活程度，可分为固定式、移动式 and 半移动式三类。在农业研究中，固定式装置除封闭式的室内装置外，还有开放式（或半封闭式）的田间装置。根据辐照室和迷道的平面布局，又可分为圆形、矩形、Z形、单通道、双通道等结

构。

2. 核辐射装置的发展和现状

核辐射装置的发展，总是和它的应用紧密联系在一起。发展过程可概括为：小型装置——中间规模装置——工业规模装置三个阶段。

早期的辐射装置多数是同位素 γ 源，而且装源量小，结构比较简单，采用铅罐或地坑贮源。为了减小屏蔽措施，还出现过水下辐射装置，由于水对射线的吸收，水下装置的辐射场，剂量分布复杂，计算被照样品的吸收剂量很麻烦，很快就被淘汰了。小型装置主要作试验研究用，对剂量场分布，要求有很高的均匀度。因此，现代的大多数小型研究装置，都采用圆形辐照室、中空圆柱型源或高强度单棒源。

研究成果的长期积累，射线的应用领域随之扩大，辐射装置由研究设备逐渐向生产设备发展。为了验证辐射研究成果转化成工业生产规模的可能性，提出了中间试验的要求，相应地出现了中间规模的辐射装置。与小型装置相比，中间规模装置的结构复杂一些，因为它应具有一定的生产能力。为了探索工业规模生产中的技术问题和工艺措施，中间规模装置又必须具有研究开发的功能，因而对自动化程度和射线能量利用率的要求不很高。

为了促进射线技术在工业上的应用，1961年加拿大研制成世界上第一台车载式 γ 辐射装置。该装置采用 ^{60}Co 源，活度为48KCi，卧式圆柱形源架。这以后，美国、法国、英国、联邦德国等相继建造车载式移动装置，整个六十年代，移动装置非常活跃，积累了大量的技术、经济资料。七十年代中期以后，由于大型多用途的固定装置的发展，移动式装置作为生产手段已不合适，目前，移动式装置多用于试验研究，向小型化，轻量化方向发展。

在已建成的工业规模辐射装置中，农付产品和食品的辐射加工，大多数采用 γ 装置。不过，对于蔬菜、瓜果等只需作表面辐射处理的食物，采用电子束装置更为有利，因为电子的穿透能力小。根据

1982年的统计^{*}，全世界约有300多台电子束装置，100多座钴源装置和几十座铯源装置用于辐射加工工业，总功率分别为14MW、1MW（ $\sim 70\text{MCi}$ ）和60KW（ $\sim 20\text{MCi}$ ）左右。

目前，先进工业国家都建有大型工业辐射装置，有的装置源活度已达4MCi。对MCi级的工业装置，如加拿大、美国、法国、瑞士等国家，已有了标准化设计。加拿大AECL公司还声称能设计10MCi的钴源装置。我国现有的几座较大型钴源装置，都未达到工业规模，属于中试装置。为满足日益增长的辐射应用要求，我国已开始着手进行研究，工业规模装置已有3MCi级的定型设计。

作为辐射加工的主要射线源—— ^{60}Co ，随着大型装置的发展，产量逐年增加。80年代初期，全世界的生产能力已达100MCi/y。加拿大长期独占钴源市场，达销售量的80%，美国、联邦德国、苏联等也有出口。据估计，到2000年， ^{60}Co 生产能力将达到 $5.5 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^4 \text{MCi}$ 。 ^{137}Cs 则以美国出口最多，英、法、苏联，加拿大等国次之。我国已能生产各种规格的 ^{60}Co 源，并已向标准化、系列化发展。

由于钴源和铯源价格较高，国外从50年代就开始研究利用反应堆废燃料作射线源的可能性，美国阿贡国立实验室就曾建过这种实验性装置。废燃料冷却后，各种裂变产物放出的 γ 射线，平均能量在1MeV左右，作辐射源是合适的，但由于发射 γ 射线的各种核素，半衰期很短，能量成份变化也大，装置运行过程中，需要不断修正辐照的工艺参数，频繁更换新源。而且，废燃料中，钚同位素和超钚元素的存在，防止污染和感生放射性等问题，亦需要解决。这一系列技术问题，都有待进一步解决。

3. 核辐射应用的广阔前景

射线技术在农业、工业、医疗卫生、环境治理等许多方面，已

^{*} 第四届国际辐射加工会议资料，数据包括化工、医疗器械消毒等辐射处理。

得到广泛应用，而且已变成一种特殊的加工技术，相应地发展了一门新兴学科——辐射工艺学。辐射加工技术，具有节约能源、工艺简单、产品质优、污染很小等优点，经济率益和社会效益都十分明显。

在众多的核技术应用领域中，目前辐射加工最为活跃。国际上辐射加工技术已经从导入期到成长期，某些先进国家的辐射产品已纳入商品化工业化生产。例如，美国辐射加工的年产值，达20亿美元，年增长率为15~20%。我国的射辐加工技术，还处于试验研究阶段，只有少数品种进入中试阶段。但是，我国有比较雄厚的核科技队伍，只要脚踏实地，认真苦干，定能赶超世界先进水平。

1983年，国际原子能机构发表的公报指出：以同位素辐射为基础的技术，对于工业现代化是必不可少的。当前，核辐射技术的应用，已经给人类社会带来莫大好处，而且还在不断开发新的应用领域，核辐射技术方兴末艾，前景广阔。

第一章 核辐射物理基础

原子核物理是近代物理学的重要分支学科，也是原子能科学技术、核技术应用以及辐射加工的重要基础。为了说明电离辐射的性质，也为以后各章打下基础，本章介绍原子核物理基本知识，包括原子核的组成和性质；放射性衰变规律、 α 衰变、 β 衰变、 γ 跃进；原子核反应；核物理实验数据处理等内容。

1.1 原子核

物质是由分子组成，而分子则由原子组成，所以原子是物质组成的基本单元。现在知道的原子有109种（一般的元素周期表列出103种）。原子本身又由原子核和核外电子组成。例如，氢原子由氢核和1个电子组成，氧原子由氧核和8个电子组成，铀原子由铀核和92个电子组成，等等。

原子核是原子的中心体。原子核的大小为 10^{-15} 米的数量级，它只有原子大小（ 10^{-10} 米）的十万分之一。原子核的质量却占了原子质量的99.9%以上。可见，处于原子内部的原子核虽然十分微小，但它却非常重要。本节讨论原子核的静态性质：电荷数与质量数、核的组成、结合能、自旋与磁矩。

1.1.1 电荷数与质量数

实验证明，原子是电中性的，而电子是带负电的，所以原子核带正电。其数值等于基本电荷（电子电荷） e 的整数倍。这个倍数和元素的原子序数 Z 是相同的，故原子核的电荷为

$$q = +Ze \quad (1.1-1)$$