

汲长松 编著  
原子能出版社出版

Handbook of  
Nuclear  
Radiation  
Detectors &  
Their Experi-  
ment  
Techniques

核辐射探测器  
及其实验技术手册

Atomic Energy Press

## 内 容 简 介

本书是一本介绍核辐射探测器及其实验技术的工具书。书中概括地介绍了常用的八类共廿几种核辐射探测器的原理、性能参数及相关的核物理实验方法。文中列出了大量常用公式及数据图表。资料来源于近十几年来国内外有关核技术的刊物、专著与标准。全书共三篇：第一篇介绍核辐射探测的物理基础；第二篇介绍气体电离、半导体、闪烁、热释光、径迹、自给能与切伦科夫探测器及中子激活指示器；第三篇介绍各类探测器的实验技术。第二、三篇为本书的重点。

本书选材侧重于商品型探测器；按照手册的特点，不论证、不推导而直接给出结论与实验结果；内容概括而不求详尽；取材全面而不失重点。

本书以从事工业核技术、工程核技术、核医学与放射医学、农业核技术、放射性环境调查、监测、辐射防护与放射卫生、石油测井、水利及考古等领域应用核技术的专业人员为主要读者对象，也可供科研院所技术人员及大专院校有关专业师生参考。

### 核辐射探测器及其实验技术手册

Handbook of nuclear radiation detectors & their experiment techniques

汲长松 编著

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16·印张36.125·字数900千字  
1990年10月北京第一版·1990年10月北京第一次印刷  
印数 1—1650

ISBN7-5022-0205-6  
TP·4 定价：22.80元

## 序 言

核辐射探测器作为实验核物理的技术分支，对核物理的发展具有重要作用。法国物理学家贝可勒尔在1896年借助于径迹探测器——乳胶，首先发现了天然放射性现象；美籍中国物理学家吴剑雄借助于碘化钠、蒽晶体，用实验验证了著名的宇称不守恒定律。

在早期的核物理研究中，气体电离探测器与径迹探测器就已经被广泛采用。40年代末期闪烁探测器问世，60年代初半导体探测器兴起，随后又出现切伦科夫探测器、辐射热释光探测器及自给能探测器等多类核辐射探测器。这些核辐射探测器的研究、试制、生产与应用，使核辐射探测器逐渐发展成为一门独立的核技术领域的新学科。反应堆与核电站工程，核技术在工、农、医及科学研究中的广泛应用，又大大加速与促进了这一新学科的发展。时至今日，在核技术领域内常用与多见的国内外商品核辐射探测器的品种已经相当可观，其增长速度又相当快；而有关这些探测器的实验技术也变得多种多样，仅就几种典型探测器的使用实例介绍已难以收到举一反三的效果。核辐射探测器所形成的这种种类多样、型号繁杂、使用技术又各具特点的局面给上述核技术应用工作的开展带来诸多不便与困难。在实验核物理教科书涉及核辐射探测与探测器的章节中，一般只给出经典或典型核辐射探测器的原理性阐述；而生产、研制厂家的核辐射探测器产品样本或说明书，又只给出某些类型探测器的工作原理、技术参数及部分实用技术资料。有关核辐射探测器的研究成果、实验方法等文献资料也散见于国内外多种期刊或出版物内。根据这种现实情况，编写一本能集中而概括地介绍核辐射探测器分类、原理、性能参数及其核物理实验方法的工具书将是很有意义的。基于此，编者想进行一次尝试，不敢奢望会满足各方面的需要，但希望能起到抛砖引玉的作用。

全书共分三篇。第一篇为核辐射探测的物理基础。通过对核辐射的特性、核辐射与物质相互作用的简要介绍，给出核辐射探测器工作的物理原理。文中列出了常用公式与图表，作为按照探测对象选择核辐射探测器，或在使用核辐射探测器进行辐射探测时作有关参数计算的依据。本书的重点在第二、三篇。第二篇介绍了各类核辐射探测器。本篇按一般的分类方法将核辐射探测器分成气体电离探测器、半导体探测器、闪烁探测器、辐射热释光探测器、径迹探测器、自给能探测器、切伦科夫探测器与中子激活指示器等八类。第三篇是核辐射探测器实验技术。文中收集了常用的商品核辐射探测器使用中经常遇到的实验技术课题。该部分内容的资料来源于国外与国内的有关核技术刊物、出版物、专著、标准、专业会议文集及厂家产品手册，其中还包含了编者参与完成的部分工作；重点介绍涉及闪烁、气体电离与半导体探测器等市场拥有量大、实际应用面广的核辐射探测器的实验技术。

本手册以从事工业核技术、工程核技术、核医学与放射医学、农业核技术、放射性环境调查与监测、辐射防护与放射卫生、石油测井、水利与考古等领域中应用核技术的专业技术人员为主要读者对象。因此，选材时侧重于具有商品性、普及性、现时性与实用性的那些核辐射探测器类别，而对那些试制的、或应用领域狭窄的、或现已基本淘汰的以及那些以理论研究为目的的核辐射探测器品种，出于“手册”系统性的考虑，仅仅有选择地予以扼要介绍。

本手册简明地给出物理原理，不论证、不推导，直接给出理论结论与实验结果。内容阐述深度上求概括而不求详尽，取材广度上求全面但不失重点。

本手册是在唐兆荣高级工程师建议与协助下编成的，胡遵素、张朝宗、丁洪林、唐兆荣与刘锦华分别审校了手册部分初稿。参加审稿的还有王永昌、彭华寿、郭士伦、蒋汉英、李继源、贺宣庆、刘雨人、张福有、孙惠如、张金新、熊正中、张静懿、周连江、杨志高与石家伟。贺宣庆曾参加本手册酝酿阶段和编写提纲的部分工作。书中引用了北京核仪器厂部分未正式发表的资料，在此一并致谢。

本手册编写过程中，原子能出版社分别于1985、1988年两度组织国内各有关单位的专家50余人次，对手册编写提纲和初稿进行了审阅与讨论。尽管如此，编写这样一本工具书，在国内外乃属初次尝试，没有“蓝本”可供参考与借鉴。限于编者的水平，及资料占有的局限性，错误与不足实所难免。编者诚恳期待来自各方的批评、指正与建议。

编著者

1988.7.4 于北京

# 目 录

## 序言

### 第一篇 核辐射探测的物理基础

概念与术语 .....	( 1 )
第1章 放射性核素的衰变与天然放射性 .....	( 6 )
1.1 放射性与衰变 .....	( 6 )
1.2 衰变规律 .....	( 7 )
1.3 天然放射系 .....	( 12 )
1.4 天然放射系外的天然放射性核素 .....	( 16 )
1.5 主要放射性核素表 .....	( 17 )
第2章 核辐射与物质的相互作用 .....	( 24 )
2.1 重带电粒子与物质的相互作用 .....	( 24 )
2.1.1 电离损失 .....	( 24 )
2.1.2 射程 .....	( 25 )
2.1.3 $\alpha$ 发射体表(按能量排列) .....	( 26 )
2.2 $\beta$ 粒子与物质的相互作用 .....	( 29 )
2.2.1 电离和激发 .....	( 29 )
2.2.2 韧致辐射 .....	( 30 )
2.2.3 弹性散射 .....	( 31 )
2.2.4 $\beta$ 粒子的吸收 .....	( 32 )
2.2.5 $\beta$ 粒子的射程 .....	( 33 )
2.2.6 电子与物质相互作用综合示意图 .....	( 39 )
2.2.7 放射性核素的 $\beta$ 粒子平均能量和最大能量表 .....	( 40 )
2.2.8 放射性核素的 $\beta$ 辐射的特性 .....	( 43 )
2.3 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	( 47 )
2.3.1 相互作用的种类 .....	( 47 )
2.3.2 光电效应 .....	( 48 )
2.3.3 散射效应 .....	( 48 )
2.3.3.1 康普顿效应 .....	( 48 )
2.3.3.2 瑞利散射 .....	( 60 )
2.3.4 电子对产生 .....	( 60 )
2.3.5 其他相互作用效应 .....	( 60 )
2.3.6 衰减与吸收 .....	( 61 )
2.3.7 参数表、图 .....	( 63 )
2.3.7.1 部分 $\gamma$ 辐射体表(按能量排列) .....	( 63 )
2.3.7.2 核素特征X射线表 .....	( 70 )
2.3.7.3 各种能量的X射线源 .....	( 72 )

2.3.7.4	$\gamma$ 射线与物质相互作用截面和元素的质量衰减系数表	( 75 )
2.3.7.5	物质的质量衰减系数表	( 122 )
2.3.7.6	$\gamma$ 射线质能、线能吸收系数表	( 124 )
2.3.7.7	线衰减系数图	( 135 )
2.3.7.8	$\gamma$ 射线吸收、透射列线图	( 138 )
2.3.7.9	几种物质的 $\gamma$ 衰减特性表	( 139 )
<b>第3章</b>	<b>中子物理</b>	<b>( 145 )</b>
3.1	中子	( 145 )
3.2	获得中子的方法	( 147 )
3.2.1	放射性同位素中子源	( 147 )
3.2.1.1	( $\alpha, n$ )反应型中子源	( 147 )
3.2.1.2	( $\gamma, n$ )反应型中子源	( 153 )
3.2.1.3	自发裂变型中子源	( 154 )
3.2.1.4	模拟裂变中子源	( 158 )
3.2.2	加速器中子源	( 158 )
3.2.2.1	( $p, n$ )反应	( 158 )
3.2.2.2	( $d, n$ )反应	( 160 )
3.2.2.3	( $\gamma, n$ )反应	( 162 )
3.2.2.4	中子管	( 163 )
3.2.3	反应堆中子源	( 164 )
3.2.3.1	反应堆的分类	( 164 )
3.2.3.2	反应堆中子源的特性	( 164 )
3.2.3.3	脉冲反应堆	( 167 )
3.3	中子与核的相互作用	( 168 )
3.3.1	中子与核作用的分类	( 168 )
3.3.2	弹性势散射	( 168 )
3.3.3	核反应	( 170 )
3.3.4	中子激活	( 180 )
3.3.5	裂变	( 181 )
3.3.5.1	裂变碎片	( 181 )
3.3.5.2	瞬发中子与 $\gamma$ 量子	( 181 )
3.3.5.3	缓发中子	( 183 )
3.4	中子与物质的相互作用	( 185 )
	参考文献	( 187 )

## 第二篇 核辐射探测器

概念与术语	( 189 )
<b>第4章 气体电离探测器</b>	<b>( 190 )</b>
4.1 基本原理	( 190 )
4.1.1 气体的电离与激发	( 190 )
4.1.2 电子和离子的运动	( 192 )
4.1.3 外加电场与电离粒子的收集	( 193 )

4.1.4	坪、坪长与坪斜	(194)
4.2	气体电离室	(194)
4.2.1	工作原理	(194)
4.2.2	典型结构	(194)
4.2.3	电离室的分类	(195)
4.2.4	脉冲形状	(197)
4.2.5	各种形式的电离室	(197)
4.2.5.1	平行板电离室	(197)
4.2.5.2	圆柱形电离室	(199)
4.2.5.3	球形电离室	(199)
4.2.5.4	空气壁电离室	(200)
4.2.5.5	电容式电离室	(200)
4.2.5.6	屏栅(福里斯)电离室	(203)
4.2.5.7	外推电离室	(204)
4.2.5.8	空气等效壁电离室	(205)
4.2.5.9	自由空气电离室	(205)
4.2.5.10	布喇格-格雷空腔电离室	(205)
4.2.5.11	指形电离室	(205)
4.2.5.12	液体壁电离室	(205)
4.2.5.13	无壁电离室	(205)
4.2.5.14	组织等效电离室	(205)
4.2.5.15	井形电离室	(206)
4.2.5.16	高(气)压电离室	(206)
4.2.5.17	裂变(电离)室	(206)
4.2.5.18	三氟化硼电离室	(208)
4.2.5.19	衬硼电离室	(208)
4.2.5.20	补偿电离室	(208)
4.2.5.21	反冲质子电离室	(209)
4.2.5.22	$\alpha$ 粒子电离室	(210)
4.2.5.23	含放射性气体的电离室	(210)
4.2.5.24	Ohmart室	(210)
4.2.6	商品电离室性能简介	(211)
4.3	正比计数管	(214)
4.3.1	工作原理	(214)
4.3.2	气体放大倍数	(214)
4.3.3	脉冲形状	(214)
4.3.4	正比计数管的特性	(217)
4.3.5	各种特殊用途的正比计数管	(217)
4.3.5.1	BF <sub>3</sub> (三氟化硼)正比计数管	(217)
4.3.5.2	衬硼正比计数管	(219)
4.3.5.3	反冲质子正比计数管	(220)
4.3.5.4	<sup>3</sup> He正比计数管	(220)
4.3.5.5	鼓形正比计数管	(221)

4.3.5.6	X射线和低能 $\gamma$ 射线正比计数管	(222)
4.3.5.7	流气式 $4\pi\beta$ 正比计数器	(222)
4.3.5.8	流气式 $2\pi$ 正比计数器	(222)
4.3.5.9	有限正比计数管	(223)
4.3.5.10	位置灵敏正比计数器	(223)
4.3.5.11	多丝正比室	(224)
4.3.6	商品正比计数管性能简介	(225)
4.4	盖革-弥勒计数管	(234)
4.4.1	工作原理	(234)
4.4.2	输出脉冲形状	(235)
4.4.3	分类与原理结构	(235)
4.4.4	各种特殊用途的盖革-弥勒计数管	(236)
4.4.4.1	端窗(钟罩)计数管	(236)
4.4.4.2	$\gamma$ 计数管	(236)
4.4.4.3	针状盖革-弥勒计数管	(236)
4.4.4.4	大面积收集电极盖革-弥勒计数管	(237)
4.4.4.5	内辐射源计数器	(237)
4.4.4.6	光敏盖革-弥勒计数器	(238)
4.4.4.7	吹气式大面积 $\beta$ 有机盖革-弥勒计数管	(238)
4.4.4.8	强流管	(238)
4.4.5	商品盖革-弥勒计数管性能简介	(238)
4.5	连续放电型探测器	(240)
4.5.1	工作原理	(240)
4.5.2	各种连续放电型探测器	(241)
4.5.2.1	流光室	(241)
4.5.2.2	多丝火花室	(242)
4.5.2.3	多板火花室	(242)
4.5.2.4	闪光室(管)	(242)
4.5.2.5	(慢中子)电晕计数管	(243)
4.5.2.6	自猝灭流光(SQS)探测器	(245)
4.5.3	商品电晕管性能简介	(245)
第5章	半导体探测器	(247)
5.1	基本原理	(247)
5.1.1	半导体与禁带宽度	(247)
5.1.2	本征半导体、P型、N型和补偿半导体	(248)
5.1.3	PN结	(250)
5.1.4	法诺因子	(251)
5.1.5	半导体探测器材料	(251)
5.2	结型半导体探测器	(253)
5.2.1	工作原理	(253)
5.2.2	扩散结半导体探测器	(253)
5.2.3	面垒半导体探测器	(254)
5.2.4	离子注入PN结探测器	(255)



5.2.5 钝化离子注入平面硅(PIPS)探测器	(255)
5.3 锂漂移型半导体探测器 (NIP探测器)	(257)
5.3.1 工作原理	(257)
5.3.2 平面型锂漂移锗[Ge(Li)]探测器	(258)
5.3.3 同轴型锂漂移锗[Ge(Li)]探测器	(259)
5.3.4 井型锂漂移锗[Ge(Li)]探测器	(259)
5.3.5 锂漂移硅[Si(Li)]探测器	(260)
5.4 高纯锗(HPGe)半导体探测器	(261)
5.4.1 工作原理与性能参数	(261)
5.4.2 平面锗探测器	(263)
5.4.3 低能锗(LEGe)探测器	(264)
5.4.4 同轴型锗探测器	(265)
5.4.5 倒置电极锗(REFe)探测器	(266)
5.4.6 井型锗探测器	(266)
5.5 化合物半导体探测器	(267)
5.5.1 CdTe探测器	(268)
5.5.2 GaAs探测器	(269)
5.5.3 HgI <sub>2</sub> 探测器	(270)
5.5.4 CdSe 探测器	(271)
5.5.5 SiC探测器	(271)
5.6 特殊半导体探测器	(271)
5.6.1 全耗尽探测器	(271)
5.6.2 位置灵敏硅探测器	(271)
5.6.3 电流型探测器	(273)
5.6.4 内放大探测器	(274)
5.6.5 半导体夹层中子测谱探测器	(276)
5.6.6 中子测谱半导质子反冲探测器	(279)
5.6.7 中子注量率半导体探测器	(280)
5.7 半导体探测器的主要参量	(280)
5.7.1 窗厚	(280)
5.7.2 灵敏区厚度	(281)
5.7.3 结电容	(281)
5.7.4 反向电流特性	(282)
5.7.5 探测效率	(283)
5.7.6 能量分辨	(283)
5.7.7 脉冲形状	(285)
5.7.8 辐射损伤效应	(285)
5.8 半导体探测器系列表	(286)
<b>第6章 闪烁探测器</b>	<b>(293)</b>
<b>A. 闪烁体</b>	<b>(293)</b>
6.1 基本原理	(293)
6.1.1 闪烁体的分类	(293)
6.1.2 闪烁体发光——无机闪烁体发光机理	(293)

6.1.3	闪烁体发光——有机闪烁体发光机理	(295)
6.1.4	闪烁体的主要特性参数	(296)
6.2	无机晶体闪烁体	(298)
6.2.1	NaI(Tl)	(298)
6.2.2	CsI(Tl)和CsI(Na)	(301)
6.2.3	ZnS(Ag)	(303)
6.2.4	LiI(Eu)	(304)
6.2.5	Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO)	(305)
6.2.6	CdWO <sub>4</sub>	(308)
6.2.7	CaF <sub>2</sub> (Eu)	(308)
6.2.8	CsF	(309)
6.2.9	BaF <sub>2</sub>	(311)
6.3	有机晶体闪烁体	(312)
6.3.1	蒽晶体(C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	(312)
6.3.2	茋晶体(C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> )	(313)
6.3.3	萘(C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )	(314)
6.3.4	二苯乙炔(C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	(314)
6.3.5	三联苯(C <sub>18</sub> H <sub>14</sub> )	(314)
6.3.6	其他	(314)
6.4	塑料闪烁体	(315)
6.4.1	普通塑料闪烁体	(316)
6.4.2	高β/γ塑料闪烁体	(318)
6.4.3	空气等效塑料闪烁体	(320)
6.4.4	α、β双闪烁体	(320)
6.4.5	气流β闪烁球	(320)
6.4.6	高发光效率塑料闪烁体	(321)
6.4.7	塑料切伦科夫闪烁体	(321)
6.4.8	高温塑料闪烁体	(321)
6.4.9	快时间塑料闪烁体	(322)
6.4.10	红光塑料闪烁体	(322)
6.5	玻璃闪烁体	(324)
6.5.1	玻璃闪烁体	(324)
6.5.2	主要性能参数	(324)
6.5.3	部分商品玻璃闪烁体	(327)
6.6	液体闪烁体	(328)
6.6.1	工作原理	(329)
6.6.2	液体闪烁体的组成	(329)
6.6.3	部分常用的液体闪烁体	(335)
6.7	气体闪烁体	(339)
6.8	闪烁体性能表及常用闪烁体表	(339)
B.	光电倍增管	(343)
6.9	工作原理	(345)
6.9.1	光电阴极	(345)

6.9.2	电子光学输入系统	(351)
6.9.3	电子倍增器	(351)
6.9.4	阳极	(352)
6.10	光电倍增管的主要参数	(352)
6.10.1	光谱响应 $W$ 与 $S$ ——命名体系	(352)
6.10.2	量子效率 $Q(\lambda)$	(352)
6.10.3	灵敏度	(352)
6.10.4	光阴极灵敏度的均匀性	(354)
6.10.5	第一倍增极光电子收集系数 $f$	(354)
6.10.6	电流放大倍数(增益) $G$	(354)
6.10.7	暗电流	(354)
6.10.8	噪声	(357)
6.10.9	线性电流	(358)
6.10.10	脉冲幅度分辨率	(358)
6.10.11	时间特性	(359)
6.10.12	稳定性	(359)
6.11	通道型光电倍增管	(361)
6.11.1	通道电子倍增器	(361)
6.11.1.1	结构和工作原理	(361)
6.11.1.2	离子反馈	(361)
6.11.1.3	饱和效应	(362)
6.11.1.4	特性	(362)
6.11.1.5	使用	(363)
6.11.2	微通道板(MCP)	(363)
6.11.2.1	特点与应用	(364)
6.11.2.2	电特性	(364)
6.11.3	微通道极光电倍增管	(368)
6.11.3.1	多阳极光电倍增管	(368)
6.11.3.2	快响应光电倍增管	(368)
6.12	部分商品光电倍增管表	(369)
<b>第7章 热释光探测器</b>		<b>(384)</b>
概念与术语		(384)
7.1	基本原理	(385)
7.2	热释光材料	(385)
7.2.1	LiF	(387)
7.2.2	BeO	(388)
7.2.3	Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	(389)
7.2.4	CaF <sub>2</sub>	(390)
7.2.5	CaSO <sub>4</sub>	(390)
7.2.6	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> :Tb	(391)
7.2.7	Mg <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	(392)
7.3	使用技术	(392)
7.3.1	热释光测量仪	(392)

7.3.2	热释光(探测器)材料的选择	(392)
7.3.3	元件筛选	(393)
7.3.4	热释光探测器的刻度	(393)
7.3.5	热释光探测器的热处理	(396)
7.3.6	热释光测量	(397)
7.3.7	热释光照射量测量误差的来源	(398)
7.4	部分商品热释光探测器简介	(399)
<b>第8章 径迹探测器</b>		(402)
8.1	核乳胶	(402)
8.1.1	工作原理	(402)
8.1.2	核乳胶的成分	(402)
8.1.3	核乳胶的特性	(403)
8.1.4	核乳胶的实用技术	(405)
8.1.5	核乳胶的处理	(406)
8.1.5.1	核 <sup>2</sup> 薄乳胶(50 $\mu$ m)的处理方法	(406)
8.1.5.2	溶液配方	(407)
8.1.5.3	玻璃承托薄乳胶的处理方法	(407)
8.1.5.4	高注量 $\alpha$ 、 $\gamma$ 或n辐照核乳胶的特殊处理	(407)
8.1.5.5	温度显影法	(409)
8.1.6	径迹观测	(409)
8.1.7	国产核乳胶表	(409)
8.2	固体径迹探测器	(410)
8.2.1	工作原理	(410)
8.2.2	固体径迹探测器材料	(410)
8.2.3	蚀刻技术	(410)
8.2.4	固体径迹探测器的性质	(411)
8.2.5	固体径迹探测器的使用技术	(413)
8.3	云室	(414)
8.3.1	工作原理	(414)
8.3.2	云室的种类	(415)
8.3.2.1	威尔逊云室(膨胀云室)	(415)
8.3.2.2	扩散云室	(416)
8.3.2.3	威尔逊云室与扩散云室的对比	(416)
8.4	气泡室	(416)
8.4.1	工作原理	(416)
8.4.2	气泡室的工作性能	(417)
8.4.3	气泡室的种类	(419)
<b>第9章 其他类型探测器</b>		(421)
9.1	自给能探测器	(421)
9.1.1	工作原理	(421)
9.1.2	自给能探测器的主要特性	(422)
9.1.3	自给能探测器的分类	(422)
9.1.4	部分商品自给能探测器表	(424)

9.2 切伦科夫探测器 .....	( 424 )
9.2.1 工作原理 .....	( 424 )
9.2.2 切伦科夫探测器的分类 .....	( 426 )
9.2.2.1 切伦科夫电磁簇射探测器 .....	( 426 )
9.2.2.2 铅-有机玻璃簇射探测器 .....	( 427 )
9.2.2.3 切伦科夫粒子鉴别探测器 .....	( 427 )
9.2.3 部分切伦科夫探测器表 .....	( 429 )
9.3 中子激活指示器 .....	( 430 )
9.3.1 工作原理 .....	( 430 )
9.3.2 部分中子激活指示器 .....	( 431 )
核辐射探测器总表 .....	( 436 )
参考文献 .....	( 439 )

### 第三篇 核辐射探测器实验技术

概念与术语 .....	( 443 )
第10章 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 与 n 辐射探测器 .....	( 446 )
10.1 $\alpha$ 辐射探测器 .....	( 446 )
10.2 $\beta$ 辐射探测器 .....	( 448 )
10.3 $\gamma$ 辐射探测器 .....	( 452 )
10.3.1 $\gamma$ 辐射探测原理 .....	( 452 )
10.3.1.1 气体电离探测器 .....	( 452 )
10.3.1.2 半导体探测器 .....	( 453 )
10.3.1.3 闪烁探测器 .....	( 454 )
10.3.2 $\nu$ 辐射探测器 .....	( 456 )
10.4 中子探测和中子探测器 .....	( 457 )
10.4.1 中子探测原理 .....	( 457 )
10.4.1.1 核反应法 .....	( 457 )
10.4.1.2 核反冲法 .....	( 459 )
10.4.1.3 核裂变法 .....	( 459 )
10.4.1.4 核激活法 .....	( 461 )
10.4.2 中子探测器 .....	( 461 )
10.4.2.1 慢中子探测器 .....	( 461 )
10.4.2.2 快中子探测器 .....	( 462 )
10.4.2.3 特殊中子探测器 .....	( 463 )
10.5 核辐射探测器汇总表 .....	( 466 )
第11章 实验技术 .....	( 468 )
11.1 闪烁探测器的实验技术 .....	( 468 )
A. 闪烁体 .....	( 468 )
11.1.1 闪烁体尺寸的选取 .....	( 468 )
11.1.2 光导 .....	( 468 )
11.1.2.1 弯光导 .....	( 470 )
11.1.2.2 集光器 .....	( 470 )
11.1.2.3 锥台形光导 .....	( 471 )

11.1.2.4	光导纤维光导 .....	( 472 )
11.1.3	光反射剂.....	( 472 )
11.1.4	液体闪烁体的淬灭校正 .....	( 473 )
11.1.5	液体闪烁计数瓶的优选尺寸 .....	( 476 )
11.1.6	闪烁探测器输出电压脉冲的形状与参数的选取 .....	( 477 )
11.1.7	闪烁探测器的幅度线性 .....	( 478 )
11.1.8	闪烁探测器输出电流脉冲的形状 .....	( 480 )
11.1.9	使用要点 .....	( 481 )
B.	光电倍增管 .....	( 482 )
11.1.10	光电倍增管的选择 .....	( 482 )
11.1.11	光电阴极的稳定性 .....	( 484 )
11.1.12	光电阴极的均匀性 .....	( 484 )
11.1.13	增益(电流放大)与电压 .....	( 486 )
11.1.14	环境温度的影响与耐热特性 .....	( 486 )
11.1.15	窗材料的透射率 .....	( 489 )
11.1.16	外磁场与外电场屏蔽 .....	( 490 )
11.1.17	高压连接 .....	( 491 )
11.1.18	高压分压器 .....	( 491 )
11.1.19	滤波电容与负载电阻 .....	( 494 )
11.1.20	信号输出 .....	( 494 )
11.1.21	倍增极链的设计步骤 .....	( 495 )
11.2	气体电离探测器的实验技术 .....	( 504 )
11.2.1	脉冲电离室输出回路与输出脉冲 .....	( 504 )
11.2.2	盖革-弥勒计数管的输入回路 .....	( 505 )
11.2.3	盖革-弥勒计数管的探测效率 .....	( 506 )
11.2.4	盖革-弥勒计数管的温度效应 .....	( 508 )
11.2.5	使用要点 .....	( 509 )
11.3	半导体探测器的实验技术 .....	( 509 )
11.3.1	面垒型探测器的实用技术 .....	( 509 )
11.3.2	带电粒子半导体探测器辐射探测性能的测试方法 .....	( 513 )
11.3.3	锗 $\gamma$ 射线探测器辐射探测性能的测试方法 .....	( 515 )
11.3.4	使用要点 .....	( 516 )
11.4	核辐射探测器的分辨特性 .....	( 516 )
11.4.1	能量分辨 .....	( 517 )
11.4.2	时间分辨 .....	( 519 )
11.4.2.1	探测器的分辨时间校正 .....	( 519 )
11.4.2.2	闪烁探测器的时间分辨 .....	( 519 )
11.4.3	位置分辨 .....	( 521 )
11.5	核辐射探测器的坪特性 .....	( 521 )
11.5.1	气体电离探测器的坪 .....	( 522 )
11.5.2	闪烁探测器的坪特性 .....	( 523 )
11.5.3	闪烁探测器的导出坪 .....	( 523 )
11.6	核辐射探测器的本底 .....	( 525 )

11.6.1	本底	( 525 )
11.6.1.1	辐射本底	( 525 )
11.6.1.2	噪声本底	( 526 )
11.6.1.3	探测器中的杂质放射性	( 527 )
11.6.2	降低本底的典型措施	( 530 )
11.6.2.1	物质屏蔽	( 530 )
11.6.2.2	反符合屏蔽	( 531 )
11.6.2.3	探测器结构材料与附属部件材料的选择与纯化	( 531 )
11.6.2.4	脉冲形状甄别技术	( 531 )
11.6.2.5	噪声本底的消除	( 531 )
11.6.2.6	降低串光本底的光学方法	( 531 )
11.6.3	样品与本底测量时间的最佳分配	( 532 )
11.7	准直器	( 532 )
11.8	前置放大器	( 533 )
11.9	核辐射探测器件的常用图形符号	( 535 )
第12章	核辐射探测的数据统计处理	( 537 )
12.1	核辐射探测的误差	( 537 )
12.1.1	误差的定义	( 537 )
12.1.2	误差的分类	( 537 )
12.1.3	精度	( 538 )
12.2	核辐射探测的统计分布	( 538 )
12.2.1	二项式分布(伯努利分布)	( 538 )
12.2.2	泊松分布	( 538 )
12.2.3	高斯分布(正态分布)	( 539 )
12.2.4	t分布[学生(student)分布]	( 539 )
12.3	置信度	( 540 )
12.4	测量数据的检验	( 544 )
12.5	可疑数据的舍弃	( 545 )
参考文献		( 547 )
附录1	化学元素周期表	( 549 )
附录2	天然核素表	( 550 )
附录3	天然核素丰度表	( 552 )
附录4	法定计量单位表	( 555 )
附录5	常用物理常数表	( 557 )
附录6	基本粒子表	( 557 )
附录7	密度表	( 558 )
附录8	几种合成物质的等效原子序数 $Z$	( 559 )
附录9	希腊字母及其读音	( 559 )
附录10	部分常用量的国际单位制单位与非国际单位制单位换算关系表	( 560 )
附录11	英制长度单位与法定单位换算表	( 560 )
附录12	品质因数 $Q$	( 561 )
附录13	我国现行的剂量限值标准	( 561 )
附录14	$\beta$ 粒子和中子注量(率)限值	( 561 )
附录15	中子注量率-剂量当量率换算表	( 562 )

# 第一篇 核辐射探测的物理基础

## 概念与术语

**原子** 由带正电的原子核，及绕核旋转带负电的电子组成。电子负电荷的总和等于原子核的正电荷，因而原子不显电性。原子直径为  $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}$ 。原子的化学性质取决于原子核的正电荷。

**原子核** 由质子和中子（统称核子）组成。原子核的直径约为  $10^{-14} \text{m}$ 。

**原子序数与等效原子序数** 原子核中的质子数目，以符号  $Z$  表示。它等于核的带电量（以质子电量为单位计算）。等效原子序数由化合物或混合物的组成比份及它们的原子序数计算得出。该化合物或混合物与  $\gamma$  辐射（或光子）的作用，跟原子序数等于等效原子序数值的元素的一样。

**质量数** 原子核中的核子数目，即核中质子与中子的总数，以符号  $A$  表示， $A = Z + N$ 。

**【统一的】原子质量单位** 一个统一的原子质量单位等于一个处于基态的  $^{12}\text{C}$  中性原子的静止质量的  $1/12$ ，用符号  $u$  表示。

$$1u = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{kg}$$

一个  $^{12}\text{C}$  中性原子处于基态的静止质量的  $1/12$ ，称为[统一的]原子质量常数，用符号  $m_u$  表示，

$$m_u = (1.6605655 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg}$$

$\frac{m_a}{m_n}$  称为相对原子质量，式中  $m_a$  为原子质量。

**核的结合能** 核的质量，比组成核的质子和中子的质量之和要小。该质量差是由组成核的粒子结合成原子核时放出能量而引起的。为了使核分离成初始的粒子，必须给核一定的能量，它正好等于这一质量差。该能量就是结合能，用符号  $E_B$  表示。大多数核中，一个核子的结合能大体相等，约为  $8 \text{MeV}$ 。 $E_B = [Zm(^1\text{H}) + Nm_n - m_a]c^2$ 。

**质子** 电量为  $+1.60219 \times 10^{-19} \text{C}$ 、静止质量为

$$\begin{aligned} m_p &= (1.6726485 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= (1.007276470 \pm 0.000000011)u \end{aligned}$$

的稳定的基本粒子，常用符号  $p$  表示。质子是氢原子核。

**中子** 不带电、静止质量为

$$\begin{aligned} m_n &= (1.6749543 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= (1.008665012 \pm 0.000000037)u \end{aligned}$$

平均寿命为  $1000 \text{s}$  左右的基本粒子，常用符号  $n$  表示。

**核子** 原子核的成分，即质子和中子的统称。

**电子** 电量为  $e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}$ 、静止质量为

$$m_e = (0.9109534 \pm 0.0000047) \times 10^{-30} \text{kg}$$



$$= (5.4858026 \pm 0.0000021) \times 10^{-4} \text{u}$$

的稳定的基本粒子。不加说明时，此术语表示带负电的电子，又称为阴电子或负电子。它的反粒子是带正电的电子，又称为阳电子或正电子。

**核素** 具有确定的质子数、中子数以及特定的能态的一类原子或原子核。如：

$^{104}_{44}\text{Ru}$  与  $^{105}_{45}\text{Rh}$  因质子数不同而为两种核素；

$^{100}_{44}\text{Ru}$  与  $^{100}_{45}\text{Rh}$  因质子数、中子数皆不同而为两种核素；

$^{60}_{27}\text{Co}$  与  $^{59}_{27}\text{Co}$  因中子数不同而为两种核素；

$^{60}_{27}\text{Co}$  与  $^{60\text{m}}_{27}\text{Co}$  因核所处的能态不同而为两种核素。

**同位素** 具有相同的  $Z$  值、不同的  $A$  值的核素。同一种元素的几种同位素的原子核的稳定性差别很大。大部分化学元素都有两种或两种以上的同位素。超铀元素的同位素数目更多。同位素具有相同的化学性质。

**同位素丰度** 一种元素的同位素混合物中某种核素含量的百分比。存在于自然界的一种元素中，某种指定的同位素在该元素中的丰度，称为该同位素的天然丰度。

**同质异能素** 半衰期较长的激发态原子核，称为基态原子核的同质异能素。它们的质量数  $A$  和原子序数  $Z$  均相同，只是能量状态不同。如半衰期为 2.81h 的  $^{87\text{m}}_{38}\text{Sr}$ ，称为  $^{87}_{38}\text{Sr}$  的同质异能素。

**同中子素** 中子数  $N$  相同，而原子序数  $Z$  不同的核素。如  $^{30}_{14}\text{Si}_{16}$ 、 $^{31}_{15}\text{P}_{16}$  与  $^{32}_{16}\text{S}_{16}$ ； $^{14}_{6}\text{C}_8$  与  $^{16}_{8}\text{O}_8$  等。

**同量异位素** 质量数  $A$  相同，而原子序数  $Z$  不同（属于不同的化学元素）的核素。如  $^{90}_{38}\text{Sr}$  与  $^{90}_{39}\text{Y}$ ； $^{95}_{40}\text{Zr}$  与  $^{95}_{41}\text{Nb}$  等。

**放射性衰变** 一种自发的核转变的过程。在这种转变过程中放出粒子或  $\gamma$  辐射，或在发生轨道电子俘获之后放出 X 射线，或发生自发裂变。

放射性衰变的方式： $\alpha$  衰变、 $\beta$  衰变（包括  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和轨道电子俘获）、 $\gamma$  衰变（包括  $\gamma$  跃迁和同质异能跃迁）、内转换和自发核裂变。

一种核素能以两种或多种方式进行的放射性衰变，称为分支衰变。原子核中以某种指定方式衰变的份额，称为分支份额。分支份额通常以百分数表示。

**半衰期与衰变常数** 特定能态的放射性核素的核数目衰减一半所需时间的期望值，称为半衰期，用符号  $T_{1/2}$  表示。

某种放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率，称为衰变常数，用符号  $\lambda$  表示。衰变常数  $\lambda$  由下式给出：

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

式中  $N$  是在时间  $t$  时存在的该核素核的数目。

平均寿命是指处于特定能态的一定量放射性核素平均生存的时间，即放射性原子核的数目减少到原来数目的  $1/e$  所需时间的期望值，用符号  $\tau$  表示。

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = \tau \ln 2$$

**$\alpha$  衰变** 指不稳定的原子核发射一个  $\alpha$  粒子转变为另一种原子核的过程。

原子核  $^A_Z X$  经  $\alpha$  衰变后转变为子核  $^{A-4}_{Z-2} X$ 。

$\alpha$  粒子和  $^4\text{He}$  核一样，是由两个中子和两个质子结合成的束缚态的稳定粒子，是在核衰变时发射出来的。

$\alpha$  粒子组成的辐射称为  $\alpha$  辐射。