

中子探测

NEUTRON DETECTION

汲长松 著

中国原子能出版社

中 子 探 测

NEUTRON DETECTION

汲长松 著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中子探测 / 汲长松著. —北京:中国原子能出版社,

2014.4

ISBN 978-7-5022-6195-5

I. ①中… II. ①汲… III. ①中子探测 IV. ①TL8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 059311 号

内 容 简 介

本书为介绍中子探测、中子探测器与中子物理实验方法的专著。书中着重介绍著作者从事中子探测工作近 50 年的中子探测器研制;中子等剂量当量探测、中子- γ 甄别探测、中子-中子甄别探测及中子- γ 联合探测等实验方法研究;以及光激中子无损测氦含量、中子测水含量等仪器设备设计方面的技术成果。为兼顾学术内容结构的系统性,书中概略叙述了与中子探测密切相关的中子物理基础知识,及相关的其他中子探测器与中子探测实验方法内容,使本书内容更加充实,以提高其系统性、可读性与实用性。

全书分 5 章。第 1 章概述中子特性;第 2 章介绍中子探测器;第 3、4 章介绍中子物理的实验方法与中子探测的实验方法;第 5 章介绍中子探测技术应用的最新进展。第 2、3 与 4 章为本书重点。

本书是作者在 1998 年出版的《中子探测实验方法》一书的扩增版,除补充了著作者后期的研制成果外,对原有内容阐述稍有扩增;同时增加了我国中子物理同行在诸如中子注量测量的锰浴法、中子活化法及飞行时间测谱等经典中子探测实验方法方面的成果介绍。

本书可供从事与中子探测有关的诸如放射性安全检查、中子监测、中子无损检测、中子活化分析、中子测井和中子测水等专业领域的工程技术人员,以及科研院所、高等院校从事实验核物理研究与教学的科研人员与教师,核物理专业的学生参考。

中子探测

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm $\times$ 1092mm 1/16

印 张 29.25

字 数 730 千字

版 次 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6195-5 定 价 110.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

中子不带电,中子的探测必须借助对中子与核相互作用产生的次级带电粒子的探测。现今,中子散射、中子引起的核反应、中子激活与中子诱发的核裂变,是人们熟知的探测中子的四种基本探测机理。基于上述中子探测的基本机理,对中子探测器的探索与研制;对表征中子辐射(或中子辐射场)的,诸如中子注量、中子能谱、中子剂量当量等各种参数,进行测定的中子探测实验方法的研究,构成当代实验中子物理学学科的基础内容。

《中子探测》一书,是作者从事中子探测器、中子探测实验方法研究及中子探测仪器与装置研制近 50 年的研制成果,为基本选题内容的专业书籍。书中汇集了作者获国家发明奖、核工业科技进步奖、国家发明专利的成果;作者撰写的“中国核科技报告”、国际原子能机构(IAEA)研讨会报告、国家与行业标准和国内外文献上发表的文献资料;作者近期完成的,多球中子谱仪、长中子计数器、高能中子剂量当量仪等成果,以及作者作为参与者,完成的部分中子实验技术资料。书中各章、节的撰写与编排,依内容需要、不受文字字数与内容层次对称性的限制,部分章节较长。如“中子探测器”章中,锂玻璃闪烁体、塑料闪烁体、 ^3He 正比计数管与混合型探测器;“中子探测实验方法”章中,中子注量、中子等剂量当量测量方法等涵括作者从事的主要技术课题,篇幅较长、内容层次较多。

为兼顾本书所涉技术领域内容的系统性,书中简略叙述或引用了中子物理的基础知识,及其他相关的中子探测器、中子探测实验方法内容。书中编入了我国与作者同年代,从事中子探测的技术专家所完成的中子探测实验方法领域的部分相关经典实验成果。这部分实验,一方面基础学术性较强;另一方面,这些实验的完成涉及反应堆、加速器等大型实验设备,诸如中子注量测量的锰浴法、中子激活法、中子能谱飞行时间法等中子探测实验。现今,该类费时长、耗资大的大型基础实验已很难有机会被重复。但是,它们又是我国实验中子物理发展进程中不可或缺的组成部分。介绍中保留了实验设计、样品制备、实验几何设置、测量仪器框图、误差与结果分析等深层次的内容。为希望了解相关技术的读者提供较系统、可参照再现的实用资料。

上述选材思路,使本书维持了专著的特点,弥补了一般专著内容选题面窄、知识零散不够系统的缺憾,改善了本书的系统性、可读性与实用性。

本书的重点为第 2、3、4 章——中子探测器、中子物理的实验方法与中子探测实验方法。

本书面向的读者应该是对核物理及核辐射探测相关的基本原理有一定了解;有兴趣深入了解中子探测、中子探测实验方法;从事中子物理研究、教学及实验工作的专业人员及学生;以及从事中子探测相关放射性环境监测、放射性安全检查、核医学、中子成像与无损探测、中子测井与中子测水等行业的技术人员。关于核物理及核辐射探测相关的基本原理,读者可以很方便地从其他相关教科书中获得。

《中子探测》一书,是作者在1998年出版的《中子探测实验方法》一书的扩增版。本书采用与《中子探测实验方法》一书相同的内容结构,但技术内容大大扩增。

作者水平所限,不当之处望不吝指正。

《中子探测》的出版得到了中核(北京)核仪器厂的大力支持;本书资料整理得到王婷婷与张庆威大力协作,深表感谢。

作 者

2013年12月 于北京

目 录

第 1 章 中子	1
1.1 中子的特性	1
1.1.1 中子质量	1
1.1.2 中子电荷	2
1.1.3 中子的衰变与半衰期	2
1.1.4 中子的自旋	3
1.1.5 中子的磁矩	4
1.2 中子源	5
1.2.1 中子按能量的分组	5
1.2.1.1 慢中子	5
1.2.1.2 中能中子	6
1.2.1.3 快中子	7
1.2.1.4 极快中子	7
1.2.1.5 相对论中子	7
1.2.2 放射性核素中子源	7
1.2.2.1 (α, n)反应型中子源	11
1.2.2.2 (γ, n)反应型中子源	18
1.2.2.3 自发裂变型中子源	21
1.2.3 加速器中子源	23
1.2.3.1 用于产生中子的加速器	23
1.2.3.2 (p, n)反应	24
1.2.3.3 (d, n)反应	27
1.2.3.4 (γ, n)反应	30
1.2.3.5 中子管	30
1.2.4 反应堆中子源	32
1.2.4.1 直接裂变中子谱	32
1.2.4.2 堆内慢化中子谱	33
1.2.4.3 脉冲反应堆	34
1.3 中子与核的相互作用	35
1.3.1 复合核、中子与核作用的分类	35
1.3.1.1 复合核	35

1.3.1.2	中子与核作用的分类	36
1.3.2	中子截面	36
1.3.2.1	截面	36
1.3.2.2	全截面	36
1.3.2.3	分截面	37
1.3.2.4	微分截面	37
1.3.2.5	角截面	37
1.3.2.6	能谱截面	37
1.3.2.7	能谱角截面	38
1.3.3	弹性散射	38
1.3.3.1	弹性散射截面	38
1.3.3.2	弹性散射中的能量关系	41
1.3.4	非弹性散射	42
1.3.5	核反应	43
1.3.5.1	核反应机制	43
1.3.5.2	发射带电粒子的 (n,p) 与 (n,α) 反应	45
1.3.5.3	辐射俘获反应 (n,γ)	47
1.3.5.4	生成两个以上核的反应 $(n,2n)$ 、 (n,np) 、 $(n,3n)$	50
1.3.5.5	核对中子的共振吸收	51
1.3.6	核裂变	51
1.3.6.1	裂变碎片	52
1.3.6.2	瞬发中子与 γ 量子	53
1.3.6.3	缓发中子	54
1.3.7	中子与电子的磁相互作用	56
1.3.8	各截面间的相互关系	57
1.4	中子与物质的相互作用	57
1.4.1	中子慢化	58
1.4.1.1	中子与核碰撞能量、角度关联	58
1.4.1.2	中子碰撞后能量分布	58
1.4.1.3	平均碰撞次数	60
1.4.1.4	平均对数能降	60
1.4.1.5	热化与扩散	61
1.4.2	热中子、超热中子与冷中子	61
1.4.2.1	中子的最概然速度 v_{kj} 与最概然能量 E_{kj}	62
1.4.2.2	中子的平均速度 $\bar{v}$	62
1.4.2.3	中子的平均能量 $\bar{E}$	63
1.4.3	中子扩散与特征参数	63
1.4.3.1	自由程	63
1.4.3.2	穿行距离	64

1.4.3.3	迁移长度 λ_t	64
1.4.3.4	减速长度 L_s	64
1.4.3.5	扩散长度 L	65
1.4.3.6	徙动长度 M	66
参考文献		66
第2章 中子探测与中子探测器		68
2.1	中子探测原理	68
2.1.1	核反应法	68
2.1.2	核反冲法	69
2.1.2.1	微分测量方法	71
2.1.2.2	积分测量方法	73
2.1.3	核裂变法	75
2.1.4	核激活法	76
2.2	中子探测器特性	78
2.2.1	中子探测器的主要技术特性	78
2.2.1.1	探测器效率	78
2.2.1.2	时间分辨	79
2.2.1.3	n - γ 甄别	79
2.2.1.4	脉冲幅度分辨与能量分辨	79
2.2.1.5	灵敏度	80
2.2.2	中子探测器的分类	80
2.2.3	中子探测器的设计	80
2.3	核反应型中子探测器	81
2.3.1	用于中子探测的核反应	81
2.3.1.1	选择核反应的因素	81
2.3.1.2	几种常用的核反应	82
2.3.2	基于 ^{10}B 反应的探测器	82
2.3.2.1	硼电离室(衬硼电离室、 BF_3 电离室)	82
2.3.2.2	BF_3 正比计数管	85
2.3.2.3	衬硼正比计数管	91
2.3.2.4	载 ^{10}B - $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 慢中子屏与中子杯	95
2.3.2.5	载硼核乳胶	96
2.3.2.6	^{10}B - $\text{NaI}(\text{Tl})$ 中子探测器	97
2.3.3	基于锂反应的探测器	98
2.3.3.1	碘化锂(铈)闪烁体	98
2.3.3.2	锂玻璃(铈)闪烁体	102
2.3.3.3	载 ^6Li - $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 中子闪烁探测器	117
2.3.4	基于氦反应的探测器	119
2.3.4.1	^3He 正比计数管	119

2.3.4.2	电晕管	123
2.3.5	载 ^{11}B -ZnS(Ag)核反应型快中子屏	125
2.4	核反冲型中子探测器	126
2.4.1	反冲质子正比计数器	126
2.4.2	反冲质子电离室	127
2.4.3	有机晶体闪烁体、液体闪烁体与反冲质子核乳胶	128
2.4.3.1	蒽晶体	129
2.4.3.2	茈萸晶体	130
2.4.3.3	液体闪烁体	131
2.4.3.4	反冲质子核乳胶	132
2.4.4	塑料闪烁体	133
2.4.4.1	塑料闪烁体组成	133
2.4.4.2	发光机理	134
2.4.4.3	光输出	136
2.4.4.4	闪烁衰减时间	137
2.4.4.5	光传输与闪烁衰减长度	138
2.4.4.6	温度效应	143
2.4.4.7	耐辐照性能	144
2.4.4.8	掺杂塑料闪烁体	149
2.4.5	有机玻璃-ZnS(Ag)反冲核型快中子屏	151
2.5	核裂变型中子探测器	152
2.5.1	中子诱发的裂变反应	152
2.5.2	裂变室	153
2.5.2.1	裂变室的工作原理	153
2.5.2.2	裂变室的特性	154
2.6	核激活型中子探测器	160
2.6.1	中子激活指示器	160
2.6.1.1	工作原理	160
2.6.1.2	中子激活指示器材料的选择与制作	161
2.6.1.3	中子激活指示器的特点	162
2.6.1.4	部分中子激活指示器	162
2.6.1.5	中子阈探测器	168
2.6.1.6	中子激活箔	170
2.6.2	自给能中子探测器	172
2.6.2.1	工作原理	173
2.6.2.2	自给能中子探测器的主要特性	174
2.6.2.3	自给能中子探测器的分类	175
2.6.2.4	自给能中子探测器的优缺点	177
2.6.2.5	俄罗斯 ДПЗ—1М型自给能中子探测器	178

2.7 中子探测器概要	180
参考文献	184
第3章 中子物理的实验技术	189
3.1 探测器效率的测量	189
3.1.1 单探头快中子谱仪的刻度	189
3.1.2 玻璃闪烁体热中子探测器效率测定	191
3.1.2.1 闪烁体的探测器效率	191
3.1.2.2 探测原理	192
3.1.2.3 实验装置	192
3.1.2.4 测量方法	193
3.1.2.5 ST-602、NE-905 型锂玻璃闪烁体探测器效率	193
3.1.3 液体闪烁体快中子探测器效率刻度	194
3.1.3.1 ST-451 型液体闪烁体	194
3.1.3.2 快中子源	195
3.1.3.3 ST-451 型液体闪烁体探测器效率的测定	195
3.1.3.4 NE-213 型液体闪烁体快中子探测器效率测定	196
3.1.4 塑料闪烁体快中子探测器效率测量	199
3.1.5 壁效应与 BF_3 正比计数管探测器效率	200
3.1.5.1 壁效应	200
3.1.5.2 与平面界面相交的粒子径迹	204
3.1.5.3 与球面及圆柱面相交的粒子径迹	204
3.1.5.4 BF_3 正比计数管的脉冲幅度谱	205
3.1.5.5 BF_3 正比计数管的探测器效率	206
3.1.6 镅、镅比与钷	207
3.1.7 配慢化体的 $\text{LiI}(\text{Eu})$ 中子灵敏度响应	209
3.1.8 球形 ^3He 正比计数管热中子探测器效率计算与测量	211
3.1.8.1 中子探测器效率能量响应	212
3.1.8.2 中子探测器效率几何响应	214
3.1.8.3 热中子探测器效率	215
3.2 中子截面测量	216
3.2.1 全截面	216
3.2.1.1 测量方法	216
3.2.1.2 统计误差	216
3.2.2 散射截面	217
3.2.2.1 测量方法	217
3.2.2.2 几何设置	218
3.2.2.3 屏蔽	218
3.2.2.4 结果修正	219
3.2.3 去弹截面	219

3.2.3.1	测量方法	219
3.2.3.2	探测器	220
3.2.4	核反应截面	221
3.2.4.1	(n,p)反应全截面测量方法	221
3.2.4.2	(n, α)反应全截面测量方法	221
3.2.4.3	(n,2n)反应全截面的测量方法	221
3.2.5	辐射俘获截面	221
3.2.6	裂变截面	222
3.3	中子激活	222
3.3.1	薄样品	223
3.3.2	厚样品	223
3.3.3	扩散中子束	224
3.3.4	放射性累积与饱和放射性	224
3.3.5	衰变修正	225
3.4	中子屏蔽	225
3.4.1	中子屏蔽的类型	226
3.4.1.1	影屏蔽	226
3.4.1.2	全屏蔽	227
3.4.2	典型设置	227
3.4.2.1	中子进入探测器的可能途径	227
3.4.2.2	源中子直接射入探测器的屏蔽	227
3.4.3	屏蔽中子源或探测器的选择	229
3.4.4	中子屏蔽的机理	229
3.4.5	Bethe 互换性定理	230
3.4.6	中子屏蔽的计算方法	230
3.4.7	中子屏蔽材料	233
3.4.8	中子屏蔽实例	235
3.5	中子反射与中子极化	236
3.5.1	中子反射	236
3.5.2	透射中子的极化	237
3.5.3	反射中子的极化	239
	参考文献	240
第 4 章	中子探测的实验方法	242
4.1	中子注量(率)测量方法	242
4.1.1	标准截面法——反冲质子法	242
4.1.1.1	含氢正比计数器	244
4.1.1.2	计数器望远镜系统	246
4.1.1.3	核乳胶	247
4.1.1.4	有机闪烁计数器	248

4.1.1.5	其他反冲质子探测器	249
4.1.2	伴随粒子法	249
4.1.2.1	伴随粒子法的特点	249
4.1.2.2	$T(d,n)^4\text{He}$ 反应	251
4.1.2.3	实验装置及方法	255
4.1.3	锰浴法	257
4.1.3.1	原理	257
4.1.3.2	实验装置	258
4.1.3.3	锰浴系统 γ 射线计数的探测效率标定	259
4.1.3.4	修正	259
4.1.3.5	附注	261
4.1.3.6	中国原子能科学研究院锰浴装置	262
4.1.4	中子激活法	263
4.1.4.1	基本原理	263
4.1.4.2	中子激活指示器放射性活度与中子注量率的关联	263
4.1.4.3	测量结果修正	265
4.1.4.4	中子激活法测中子注量率工作公式	266
4.1.4.5	激活法测量中子注量适用的中子能区	266
4.1.5	相对测量法	267
4.1.5.1	石墨柱法	267
4.1.5.2	伯吉·韦斯考分布法	268
4.1.5.3	标准中子源法	270
4.1.5.4	标准探测器法——长中子计数器法	270
4.1.6	中子发生器 14 MeV 中子注量标准测量方法——“得克萨斯约定”	271
4.1.7	反应堆热柱热中子注量测量方法—— ^{197}Au 中子激活指示器法	272
4.1.7.1	^{197}Au 中子激活指示器	272
4.1.7.2	^{197}Au 中子激活指示器实验方法	273
4.1.7.3	激活指示器放射性活度测量方法 I—— γ 测量法	276
4.1.7.4	激活指示器放射性活度测量方法 II—— β - γ 符合测量法	277
4.1.8	脉冲中子注量测量方法	279
4.1.8.1	脉冲中子注量测量银计数器	280
4.1.8.2	工作原理	280
4.1.8.3	刻度	281
4.1.9	$1/v$ 慢中子探测器	284
4.2	中子能谱测量方法	285
4.2.1	中子速度选择器	286
4.2.1.1	机械选择器	286
4.2.1.2	调制中子源速度选择器	287
4.2.1.3	热中子能谱仪	287

4.2.2	中子衍射测谱	288
4.2.2.1	原理——布喇格公式	288
4.2.2.2	中子衍射测谱方法	289
4.2.2.3	中子衍射能谱仪的能量分辨率	290
4.2.2.4	中子衍射谱仪实例	291
4.2.3	氢反冲快中子测谱	292
4.2.3.1	计数器望远镜	293
4.2.3.2	薄辐射体望远镜	294
4.2.3.3	平面膜半导体反冲质子快中子谱仪	297
4.2.3.4	厚辐射体望远镜	299
4.2.3.5	球形阴极含氢正比计数管	302
4.2.3.6	蒽晶体闪烁谱仪测快中子能谱	304
4.2.4	核反应法中子测谱	310
4.2.4.1	^3He 快中子谱仪	311
4.2.4.2	$^6\text{LiI}(\text{Eu})$ 快中子闪烁谱仪	315
4.2.4.3	^6Li 夹层半导体快中子谱仪	319
4.2.5	飞行时间法测量中子能谱	322
4.2.5.1	工作原理	322
4.2.5.2	飞行时间中子能谱测量方法	323
4.2.5.3	快中子飞行时间谱仪的能量分辨率或分辨时间	329
4.2.5.4	1 eV~10 keV 能区中子飞行时间谱仪	330
4.2.5.5	快中子飞行时间谱仪	330
4.2.5.6	高压氦闪烁探测器 TOF 测谱	330
4.2.6	多探测器中子测谱——多球中子谱仪	332
4.2.6.1	工作原理	332
4.2.6.2	NEMUS 多球中子谱仪	334
4.2.6.3	LUDLUM 42-5 型多球中子谱仪	334
4.2.6.4	ROSPEC 多探测器中子谱仪	335
4.2.6.5	应用实例	335
4.2.7	气泡探测器中子谱仪	336
4.3	中子等探测器效率探测方法——长中子计数器	336
4.3.1	Hanson 长中子计数器	337
4.3.1.1	工作原理	338
4.3.1.2	长中子计数器的参考点	339
4.3.1.3	长中子计数器刻度	339
4.3.2	East 长中子计数器	344
4.3.2.1	结构	344
4.3.2.2	特点	345
4.3.2.3	探测器效率的能量响应	345

4.3.2.4	参考点的确定	345
4.3.3	East 板式长中子计数器	346
4.3.3.1	结构	346
4.3.3.2	探测器效率的能量响应	346
4.3.3.3	参考点的确定	347
4.4	n- γ 甄别探测方法	347
4.4.1	n- γ 甄别探测的原则及方法	348
4.4.2	n- γ 脉冲幅度甄别阈法	348
4.4.3	n- γ 脉冲形状甄别	351
4.4.3.1	饱和法	351
4.4.3.2	比较法	354
4.4.3.3	上升时间法	356
4.4.3.4	过零时间法	358
4.4.3.5	零交叉法	359
4.4.3.6	脉冲形状甄别的品质因数 M	363
4.4.4	γ 补偿法	364
4.4.4.1	^6Li 、 ^7Li 玻璃闪烁体对 γ 补偿法	364
4.4.4.2	$^6\text{LiI}(\text{Eu})$ 、 $^7\text{LiI}(\text{Eu})$ 双闪烁体 γ 补偿法测中子谱	371
4.4.4.3	补偿电离室法	372
4.4.4.4	^6LiF 、 ^7LiF γ 补偿热释光中子剂量计	375
4.4.5	薄膜与多丝闪烁体法 n- γ 甄别法	375
4.4.5.1	薄膜闪烁体法 n- γ 甄别探测器	375
4.4.5.2	多丝闪烁体法 n- γ 甄别	378
4.5	中子等剂量当量探测方法——中子剂量当量仪	379
4.5.1	中子注量—剂量当量转换	379
4.5.1.1	当量剂量	379
4.5.1.2	中子剂量的生物效应	380
4.5.1.3	中子等剂量当量探测的相关术语	382
4.5.2	吸收筛法	382
4.5.2.1	原理	382
4.5.2.2	吸收筛类中子剂量当量仪	383
4.5.3	多探测器法	387
4.5.3.1	原理	387
4.5.3.2	多探测器类中子剂量当量率仪	388
4.5.4	吸收棒法	388
4.5.4.1	原理	388
4.5.4.2	吸收棒类中子剂量当量率仪	389
4.5.5	中子剂量当量率仪的基本特性	389
4.5.5.1	能量响应	390

4.5.5.2	γ 抑制性能	392
4.5.5.3	中子灵敏度	392
4.5.5.4	方向性响应	394
4.5.5.5	量程范围	395
4.5.6	高能(>14 MeV)中子当量剂量测量	395
4.5.6.1	高能中子剂量当量监测	395
4.5.6.2	环境高能中子源	396
4.5.6.3	热中子至 100 MeV 中子等剂量当量探测原理	397
4.5.6.4	高能(>14 MeV)中子剂量当量仪	399
4.5.7	脉冲中子剂量当量测量方法	402
4.5.7.1	脉冲中子剂量当量测量的特点	402
4.5.7.2	脉冲中子希沃特计数器	402
4.5.8	^6LiF 热释光反照中子个人剂量计	405
4.5.8.1	反照中子与反照中子剂量计	405
4.5.8.2	快中子 ^6LiF 、 ^7LiF 热释光反照中子剂量计	406
4.5.8.3	JR-1104 型快中子 ^6LiF 、 ^7LiF 热释光反照中子剂量计组合	407
4.5.9	生物等效中子计数管	410
4.5.9.1	工作原理	410
4.5.9.2	生物等效探测器中子剂量当量仪	411
4.6	n、 γ 联合探测方法	411
4.6.1	中子探测	412
4.6.2	γ 探测	412
4.6.3	中子、 γ 联合探测	412
4.6.4	中子、 γ 联合探测器	412
4.6.4.1	透射型	412
4.6.4.2	散射型	413
4.6.5	n、 γ 联合探测方法的应用	414
4.7	中子-中子甄别探测方法	414
4.7.1	伯吉·韦斯考分布用于 n-n 甄别探测方法原理	415
4.7.2	中子源	415
4.7.2.1	^{226}Ra D(γ ,n) 光激中子源	415
4.7.2.2	^{226}Ra 本底中子	416
4.7.3	中子-中子甄别探测器	416
4.7.3.1	中子探测	416
4.7.3.2	中子-中子甄别探测器	416
4.7.3.3	提高强 γ 场测弱中子效果的措施	417
参考文献		418
第 5 章 中子探测技术应用进展		423
5.1	中子水分与 γ 密度联合测定	423

5.1.1	散射式水分密度联合计	424
5.1.1.1	工作原理	424
5.1.1.2	标定	425
5.1.2	透射式水分密度联合计——幅度甄别法	426
5.1.2.1	热中子透射法测含水量	426
5.1.2.2	γ 透射法密度测量	426
5.1.2.3	中子水分、 γ 密度的联合测量	426
5.1.3	透射式水分密度联合测定——PSD法	428
5.1.3.1	测定水分与密度的公式	428
5.1.3.2	快中子衰减系数	429
5.1.3.3	^{252}Cf 自发裂变中子源	429
5.1.3.4	探测器	430
5.2	稳定同位素硼示踪技术	432
5.2.1	地下水流研究	432
5.2.1.1	中子测硼仪	432
5.2.1.2	地下水流测定	433
5.2.2	预加负荷地基下沉的测定	433
5.3	无损测氚含量的光激中子法	436
5.3.1	方法原理	436
5.3.2	中子-中子甄别探测器	436
5.3.3	实验效果	437
5.4	中子慢化测氢含量方法	438
5.4.1	基本原理	438
5.4.1.1	三组理论扩散方程的解	438
5.4.1.2	双组理论扩散方程的解	440
5.4.1.3	单组理论扩散方程的解	440
5.4.2	正源距、负源距与零源距	441
5.4.3	方法应用	442
5.4.3.1	中子测水含量方法	442
5.4.3.2	热中子测井方法	442
5.4.3.3	补偿中子测井方法	443
5.4.3.4	新型补偿中子测井探头	443
5.5	稳定同位素氘示踪技术	444
5.5.1	方法原理	444
5.5.2	应用方法	444
5.6	反应堆燃料元件破损缓发中子监测法	444
5.6.1	方法原理	445
5.6.2	元件破损监测装置	445
5.6.2.1	缓发中子源与采样延迟	446

5.6.2.2 物理设计特点 446

5.6.3 元件破损监测效果 446

5.7 快中子无损测量油罐与底座间隙分布 447

5.7.1 测量原理 447

5.7.2 修正项 449

5.7.3 油罐与底座间隙分布测量 449

参考文献..... 450