

中子发生器及其应用

刘林茂 刘雨人 景士伟 编著

ZHONGZIFASHENGQIJIYIYONG

 原子能出版社

ISBN 7-5022-3147-1



9 787502 231477 >

ISBN 7-5022-3147-1 定价:56.00 元

中子发生器及其应用

刘林茂 刘雨人 景士伟 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中子发生器及其应用/刘林茂,刘雨人,景士伟编著. —北京:原子能出版社,2004.6
ISBN 7-5022-3147-1

I. 中… II. ①刘… ②刘… ③景… III. 中子发生器 IV. 0571.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 038438 号

内容简介

本书共分为两篇 14 章。第一篇含五章,重点阐述了中子发生器的基本原理、制造方法及其性能。第二篇含九章,既广泛而又有重点地介绍了中子发生器的应用原理、使用效果和今后在各种科技工业领域中应用的美好发展前景。

中子发生器及其应用

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)
责任编辑 王裕新
责任校对 徐淑惠
责任印制 丁怀兰 刘芳燕
印 刷 保定市印刷厂
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
字 数 480 千字
印 张 17.625
版 次 2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5022-3147-1
定 价 56.00 元

版权所有 侵权必究(如有缺页、倒装,请与出版社联系调换)

网址:<http://www.aep.com.cn>

前 言

本书的撰写以中子发生器的应用为主线。全书分为两篇,第一篇重点介绍中子发生器的原理、制造方法和性能,第二篇重点描述中子发生器的应用。目的是为应用者对中子发生器及其应用有更深刻的了解。对制造者来说了解这些知识还不够,还有更多技术问题和工艺问题需进一步钻研。当然,掌握基础知识是必要的。关于应用中的情况对制造者来说,了解一下做什么用?给谁用?也有必要。因此,全书两个部分是不可分割的。

本书由东北师范大学辐射技术研究所刘林茂教授、刘雨人教授和景士伟博士共同编写完成;同时得到吉林省科仑辐射技术开发有限公司在技术和资金等方面的大力支持。

目前,中子发生器的制造技术和应用技术正在发展着,许多重要方面才刚刚开始。因此,我们掌握的资料还不够全面,也不新颖,再加上水平有限,所以,难免有许多错误和不当之处,希望读者指正。本书出版后会引起更多同行关注,也许会起到抛砖引玉的作用吧!

除三位作者外,还有谷德山、乔双、李文生、严长春、张忠华、桑海峰、宋兆龙和徐军伟等同志提供了他们的研究成果和经验。另有赵新辉、田玉冰、程道文、曹西征、迟艳涛和付晓杰等同志为本书收集和翻译资料,以及提供插图、打字等工作。在这里向他们表示谢意。

本书的基础知识部分和应用原理参照了有关参考书,在这里也向原作者表示敬意。

编著者 2004 年 11 月

目 录

第一篇 中子发生器

1	中子发生器的发展概况	1
2	中子发生器的工作原理和产额特性	1
2.1	D(d,n)和 T(d,n)反应	1
2.1.1	中子源反应	1
2.1.2	D-D 和 D-T 源产额的角度分布	4
2.1.3	D-D 和 D-T 反应的中子能量及能量分布	11
2.1.4	中子能量被测值与理论值的比较	23
2.1.5	D-D 和 D-T 反应产生的中子的偏振	27
2.2	离子的产生和加速	34
2.2.1	高压电源的供应	34
2.2.2	离子源	36
2.2.2.1	连续工作型的离子源	36
2.2.2.2	脉冲离子束	41
2.2.2.3	偏振离子源	45
2.2.2.4	引出的离子的电荷、质量和能量的范围	47
2.2.3	离子束的加速和传输系统	51
2.2.4	离子束几何尺寸和能量的测量	54
2.3	靶和中子产额	58
2.3.1	稳定靶	58
2.3.2	旋转靶	63
2.3.3	特殊的中子源	65
2.4	真空系统	74
2.5	氟洗涤系统	77
2.6	某些 D-T 发生器的设计和操作特性	77
2.7	中子通量和产额测定	81
2.8	中子发生器实验室的设计	90
3	中子发生器的商品化	96
3.1	美国 MF Physics 中子发生器	96
3.2	法国 Sodern 中子发生器	96
3.3	俄罗斯 ALL-RUSSIA INSTITUTE OF AUTOMATICS RF MINATOM 中子发生器	97
3.4	德国 EADS 公司的中子发生器	97
3.5	西安石油勘探仪器总厂中子发生器	97
3.6	东北师范大学中子发生器	98

4 东北师范大学中子发生器的研制及其应用·····	98
4.1 NGW-751 C/O 石油测井中子发生器介绍·····	98
4.1.1 引言·····	98
4.1.2 NGW-751 C/O 石油测井中子发生器主要技术指标(见 3.6)·····	98
4.1.3 自成靶陶瓷中子管的特点·····	98
4.1.4 结构简述·····	99
4.1.5 NGW-751 型中子发生器电路工作原理·····	99
4.1.5.1 地面专用电源·····	100
4.1.5.2 井下中子发生器电路工作原理·····	101
4.1.6 高压绝缘和工作温度·····	104
4.1.6.1 高压绝缘·····	104
4.1.6.2 工作温度·····	105
4.2 关于中子发生器稳定性的研究·····	105
4.3 关于强流中子管用微波离子源的研究·····	105
5 结束语·····	106
参考文献·····	106

第二篇 中子发生器的应用

1 概论·····	116
2 应用技术基础·····	117
2.1 中子物理基础知识·····	117
2.1.1 中子的基本物理属性·····	117
2.1.2 中子与物质的相互作用·····	118
2.1.2.1 截面·····	118
2.1.2.2 中子反应·····	119
2.2 中子和 γ 射线探测技术·····	120
2.2.1 中子探测原理和方法·····	121
2.2.1.1 核反应法·····	121
2.2.1.2 核反冲法·····	121
2.2.1.3 核裂变法·····	122
2.2.1.4 核活化法·····	122
2.2.2 γ 射线的探测·····	122
2.2.3 常用的 γ 射线探测器与中子探测器·····	122
2.2.3.1 气体探测器·····	122
2.2.3.2 闪烁探测器·····	127
2.2.3.3 半导体探测器·····	133
2.3 核电子学方法与多道谱仪·····	136
2.3.1 探测器·····	136
2.3.2 前置放大器·····	136

2.3.3	谱仪放大器	138
2.3.4	模数转换器	142
2.3.5	计算机多道分析器(MCA)	149
2.3.6	Canberra 的 DSA-2000 数字谱分析器与 ORTEC 的 digiDART 可携式 HPGeMCA	150
2.4	中子防护与计量的测量	152
2.4.1	中子与生物组织的相互作用及中子辐射对人体的影响	152
2.4.2	中子辐射剂量	153
2.4.2.1	与中子剂量有关的基本概念	153
2.4.3	中子注量与吸收剂量,剂量当量的关系	155
2.4.4	中子剂量的计算	156
2.4.5	中子剂量的测量	157
2.4.6	中子辐射的防护	158
2.4.6.1	最大允许剂量	158
2.4.6.2	中子辐射的屏蔽	159
3	中子发生器在工业在线元素分析中的应用	161
3.1	中子感生瞬发 γ 射线在线分析技术的进展(1988~2002)	162
3.1.1	概况	162
3.1.2	物理方法方面	163
3.1.2.1	用蒙特卡罗模拟中子通量在整体煤样中的分布	164
3.1.2.2	利用 14 MeV 快中子发生器对煤中元素含量分析的实验研究	164
3.1.2.3	方法实验中的中子慢化体、反射体和防护体	165
3.1.2.4	测量方法	165
3.1.3	中子源和测量仪器方面	165
3.1.3.1	中子源	165
3.1.3.2	测量仪器方面	166
3.1.4	数据处理——分析软件方面	166
3.1.5	结语	167
3.2	煤质分析	168
3.2.1	D-T 中子源皮带式在线煤质分析系统的研制	168
3.2.1.1	引言	168
3.2.1.2	方法原理	169
3.2.1.3	测量装置和数据获取与处理系统	172
3.2.1.4	实验结果	172
3.2.1.5	存在问题与讨论	173
3.2.1.6	结论	174
3.2.2	电站入炉煤成分在线检测装置技术经济分析	174
3.2.2.1	引言	174
3.2.2.2	项目提出的背景	174

3.2.2.3	项目成果的主要用途及应用领域	175
3.2.2.4	煤成份在线检测装置的主要技术经济指标及其与同类产品的比较	175
3.2.2.5	项目成果的新颖性与先进性	175
3.2.2.6	市场需求与风险分析	176
3.2.2.7	经济效益与社会效益分析	177
3.2.2.8	结语	178
3.2.3	标准煤样系列制备方法——刻度中子感生 γ 射线(电站入炉煤)煤质分析器	178
3.2.3.1	方法说明	178
3.2.3.2	标准煤样系列技术条件	179
3.2.3.3	制备方法	180
3.2.3.4	标准煤样的维护	182
3.2.4	MJA 型电站入炉煤成份在线检测装置介绍	183
3.2.4.1	产品的主要特点	183
3.2.4.2	装置的原理及功能	183
3.2.4.3	装置的组成	186
3.2.4.4	主要技术参数	188
3.2.4.5	软件说明	189
3.2.4.6	系统操作、维护与维修	191
3.2.5	MZ-MKFY-A 型脉冲中子煤质快速分析仪介绍	191
3.2.5.1	用途	191
3.2.5.2	工作原理简介	192
3.2.5.3	主要技术指标	192
3.2.5.4	仪器的成套组成	193
3.2.5.5	仪器的安装和使用	193
3.2.5.6	仪器维修维护及人员培训	194
3.3	水泥生料在线分析	195
3.3.1	XENA 水泥生料分析方法	195
3.3.1.1	中子非弹散射(NIS)和热中子俘获(TNC)技术的联合应用	195
3.3.1.2	新改进的空间一致性的测量方式	196
3.3.2	室内实验	197
3.3.2.1	样品	197
3.3.2.2	装置的设计	197
3.3.2.3	分析程序和结果	197
3.3.3	现场(工厂)实验	199
3.3.3.1	现场实验用的 XENA 的设计	199
3.3.3.2	XENA 的安装和谱的标准化	199
3.3.3.3	逐级变化实验	200
3.3.3.4	取样的精确度	200

3.3.3.5	对于高深度样品的标定程序	201
3.3.3.6	误差分析和高深度数据的讨论	202
3.3.3.7	低生料厚度的校正延伸	202
3.3.3.8	性能评估	203
3.3.4	结论	204
3.4	在铝工业和钢铁工业中铝矿石和铝矿浆,以及烧结铁矿的在线分析	204
3.4.1	概述	204
3.4.2	谱仪系统与测量装置	205
3.4.3	分析软件	206
3.4.4	实验结果	206
3.4.4.1	获取的铁矿石样品的 γ 谱	206
3.4.4.2	分析误差	207
3.4.4.3	I- ρ 关系	217
3.4.4.4	慢化体的作用	217
3.4.4.5	反射体的作用	218
3.4.4.6	PGNAA 铝矿浆分析系统在铝厂的应用	218
3.4.5	结语	221
4	中子发生器在地质勘探与石油测井中的应用	222
4.1	概述	222
4.1.1	非弹性散射	222
4.1.2	弹性散射	223
4.1.3	活化	224
4.1.4	俘获与扩散	225
4.1.5	其他的作用与反应	225
4.2	中子方法在地层勘探中的应用	226
4.2.1	碳氧比测井和氯测井	226
4.2.2	中子寿命测井	228
4.2.3	循环活化测井	230
4.2.4	直接测铀的缓发中子测井和瞬发中子测井	231
4.3	石油中子测井	232
4.3.1	连续中子源测井	233
4.3.1.1	中子平衡方程	233
4.3.1.2	扩散方程和超热中子测井	233
4.3.1.3	分组扩散理论和热中子测井	236
4.3.1.4	中子孔隙度测井的探测深度和环境影响	238
4.3.2	脉冲中子测井	240
4.3.2.1	脉冲中子与地层相互作用过程	240
4.3.2.2	碳氧比伽马能谱测井	241
4.3.2.3	脉冲中子孔隙度测井	249

4.3.2.4 热中子寿命测井	251
5 中子发生器在中子成相技术中的应用	254
5.1 利用中子管的中子照相技术的概述	254
5.2 用密封中子发生器的中子照相装置	255
5.3 中子成相技术的应用	255
5.3.1 大型机件的标记成相	256
5.3.2 混凝土渗水特性的测试	256
5.3.3 腐蚀的检查	256
5.3.4 两相流的研究(管内)	257
5.3.5 爆炸装置的中子照相	258
5.3.6 核燃料元件的检测	258
5.3.7 电子元件的中子照相检测	259
6 中子发生器在爆炸物及毒品检测中的应用	259
6.1 概述	259
6.2 PFTNA 原理	260
6.3 方法	261
6.4 应用	262
6.4.1 装满炸药军火的检测	262
6.4.2 地雷的探测	263
6.5 结语	264
7 中子发生器在农业和水产业中的应用	264
7.1 小剂量刺激农作物或水产的生长、发育的应用	264
7.2 辐照育种中的应用	265
7.3 水分检测中的应用	265
7.4 辐照育种,刺激生物体生长的基本原理	265
7.5 中子和 γ 射线辐照生物体效应比较	266
7.6 讨论和展望	267
8 中子发生器在医学中的应用	267
8.1 概述	267
8.2 硼中子俘获治癌	268
8.3 快中子治瘤	268
8.4 快中子和 BNCT 综合治癌	269
9 中子发生器的应用前景	270
参考文献	271

第一篇 中子发生器

1 中子发生器的发展概况

第一个加速带电粒子的装置是由 Cockcroft 和 Walton^[1] 于 1932 年建造的。同年 Chadwick^[2] 发现了中子。

起初,许多实验是用 D_2O 冰作靶,在 $D(d,n)$ 反应中产生的 3 MeV 中子下进行的^[3]。在 Penning 和 Moubis^[4] 的工作基础上,Graves 和他的助手^[5] 于 1949 年研制了金属氟化合物靶。后来,氟同位素变成利用 D-T 反应产生 14 MeV 的高能中子的靶材料。结果进一步研制成了能产生中子的小型加速器。似乎这就是中子发生器的雏形。

Barschall 和他的合作者利用这种装置进行了由氘核和氟核反应产生中子散射的角分布的测量;并测量了由 H 到 U 元素的总截面^[6-9]。大的 $^3H(d,n)^4He$ 反应截面,可得到高产额的快中子。甚至在低能段也可得到,如在 150 到 200 keV。

在最近的 30 年中,D-T 中子显著的贡献在于发展了快中子物理学。利用它取得了大量的快中子与物质相互作用的核数据,对核结构和核反应机制的研究作出了贡献。

随着中子物理的发展,小型的 D-D 型和 D-T 型中子发生器也逐步完善,并商品化。除了应用于核物理之外,小型的 D-D 和 D-T 中子发生器还可用于放射性示踪剂的生产工艺研究、活化分析、瞬发辐射分析、中子物理、反应堆物理以及中子照相等。

最近,D-T 中子发生器成为一种便宜的高能中子源,即能提供足够强的中子束用于治癌。又能在短的辐照时间情况下,分析 O, N, Na, Mg, P, Si, Cl, K, Ca 和 S 等的含量。

脉冲 D-T 中子发生器能在 μs 级范围,应用于中子气体物理、反应堆实验和钻井测量。这样一来中子发生器的独到应用开始了。

2 中子发生器的工作原理和产额特性

2.1 D(d,n)和 T(d,n)反应

2.1.1 中子源反应

在过去 50 年当中,已研制出了各种类型的中子源,它们所涵盖的能量和强度范围都很广。对于可用中子源当前现状的细节问题可参阅参考文献[10]。以轻粒子反应为基础的实验型中子源在快中子物理学中发挥着非常重要的作用。应用低能加速器,常常可通过表 1.1 所示的“big-4”反应(四大中子反应)产生单能中子。探测单能中子的能量范围时,应考虑入射粒子的能量和前后散射角度。若 $E_p \geq 2.37$ MeV,就 $^7Li(p,n)^7Be$ 反应而言,由于 7Be 在 0.43 MeV 时处于第一激发态,所以会有大量低能中子产生。D-D 和 D-T 反应有几个优势特性。在低于 D

停止能量的很广范围内, 仅仅产生单能中子群, 也就是说对于 D-D 和 D-T 反应, D 能量应分别为 $E_d < 4.45 \text{ MeV}$ 和 $E_d < 3.71 \text{ MeV}$ 时才产生单能中子群。即使低能量入射, 高 Q 值和低原子数目也能使生产高产额快中子成为可能。

表 1.1 “big-4”中子源反应的数据

反 应	Q 值(MeV)	裂变反应	裂变阈 (MeV)	单能中子能量范围 (MeV)
$^2\text{H}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$	+3.270	$\text{D}(\text{d}, \text{np})\text{D}$	4.45	1.65~7.75
$^3\text{H}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$	+17.590	$\text{T}(\text{d}, \text{np})\text{T}$ $\text{T}(\text{d}, 2\text{n})^3\text{He}$	3.71 4.92	11.75~20.5
$^3\text{H}(\text{p}, \text{n})^3\text{He}$	-0.763	$\text{T}(\text{p}, \text{np})\text{D}$	8.35	0.3~7.6
$^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})^7\text{Be}$	-1.644	$^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})^7\text{Be}^*$	2.37	0.12~0.6

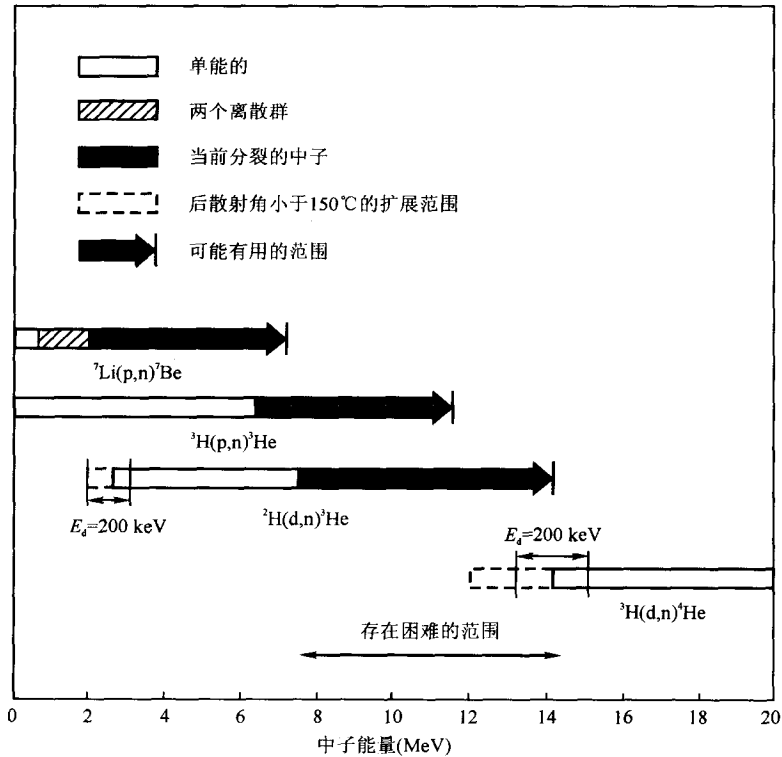
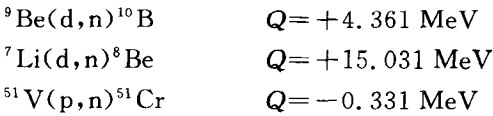


图 1.1 “big-4”中子源反应可利用的能量范围

(After Meadows, J. W. and Smith, D. C. , IAEA INDC(NDS)-114/GT, IAEA, Vienna, 1980, 317.)

除“big-4”中子源反应外, 还有产生快中子的另外几种可能的反应, 其典型反应如下:



值得一提的是中子源反应仅仅在一些有限的中子能量间隔内才是单值的,其中包括由 T 和 α 粒子引发的中子源反应。“big-4”中子源反应的能量适用范围如图 1.1 所示。由于在 D-D 和 D-T 反应中 D 的停止能量高于 4 MeV,那么在单能中子的能量从 8 MeV 到 12 MeV 这个范围内就会存在一个间隙。

在本篇文章中,由于 D 以低的轰击能量就能产生中子,因此 $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 和 $^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ 反应将被详细讨论。

在能量由 15 keV 到 10 MeV 这个范围内, $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 和 $^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ 反应的激发函数已被多个研究组测出。最近,对于高于 5 MeV 的入射 D 粒子,Drosg^[11] 编辑了这两个反应的微分截面与积分截面的测量方法。根据这一方法,对于高于 10 MeV 的 D 粒子在 0° 时反应的微分截面和总截面的测量而言,几乎没有实验数据可以利用。通过对能量为 6~17 MeV 的 D 粒子的数据分析可得出以下结论:D-D 反应的积分截面同 D 能量成指数关系,公式如下

$$\sigma = \exp(4.727 - 0.03154E_d) \quad (1.1)$$

E_d 单位:MeV, σ 单位:mb。这一关系式与 3 至 83 MeV 之间的实验数据符合的很好。对于两个高 Q 值反应,总截面与 D 粒子能量间的关系如图 2 所示,D 粒子轰击能量达到了 20 MeV。在低能区,在 1 MeV 以内,D-D 反应的总截面随着 D 轰击能量的增加而单调增加。截面曲线在能量大约为 1.5 MeV 时有最大值,其峰值为 106 mb。

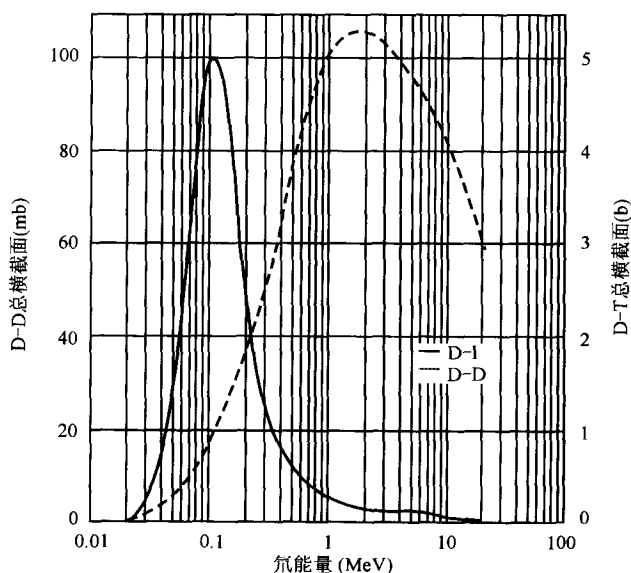


图 1.2 $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 和 $^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ 反应中能量与总截面的依赖关系

$^3\text{H}(\text{d},\text{n})^4\text{He}$ 反应的总截面的能量关系曲线在 $E_d = 107 \text{ keV}$ 有一个宽共振态,最大值为 5 b,这时可产生高产额的快中子,即使用小型加速器就能做到这一点。通过分析 2 至 19 MeV 的数据可证明在 5 MeV 左右激发函数中存在另一个共振态,在 0° 的微分截面中表现尤为显著。在 15 至 25 keV 这一间隔中,D-T 反应的总截面可近似表示为

$$\sigma = 7.589 \times 10^{-5} E_d^{9/2} \quad (1.2)$$

σ 单位: mb, E_d 单位: keV。设计聚变反应堆需要低于 10 keV 的 D-D 和 D-T 反应的微分截面与总截面的精确数据。

有许多方法可用于测量 D-D 和 D-T 反应的微分截面, 微分截面为 D 能量的一个函数。其测量可通过以下方法来进行: 协同粒子法 (APM), 中子计数器望远镜法 (NCT), 飞行时间法 (TOF), 活化箔探测器法 (AFD), 二苯乙烯内烁探测器法 (SSD), 长计数器法 (LC), 裂变碎片探测器法 (FFD)。这些技术的原理及各种方法的比较将在参考文献 [11] 和 [12] 中讲解。这些方法中也存在着技术困难, 特别是 APM 法在探测大角度的中子时很困难。这个问题可通过交换入射粒子和靶核的位置, 利用其逆反应来解决。在这种情况下, 前后角度也发生了改变, 因此, 入射粒子的能量应做相应调整以保证同样的质心系能量, 例如, 就最常使用的反应 $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 而言, T 能量必须是 D 能量的 1.5 倍。

2.1.2 D-D 和 D-T 源产额的角度分布

许多实验者已指出所测角度分布数据与勒让德多项式符合得很好。根据可利用的薄靶实验数据, Liskien 和 Paulsen^[13] 计算了 D-D 和 D-T 反应实验室系统的微分截面和总截面, 它们都是 D 能量的函数, D 能量的变化范围为 20 keV 至 10 MeV。对微分质心截面进行参数化后, 下面的公式可被使用

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(E, \theta) = \sum_i C_i P_i(\cos\theta) \quad (1.3)$$

E 为实验的 D 能量, θ 为中子发射角度。

有两种方法被应用于推导能量关系式的系数。Liskien 和 Paulsen 凭借 0° 的微分截面规范了系数

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(E, \theta) = \frac{d\sigma}{d\omega}(E, 0^\circ) * \sum_i A_i P_i(\cos\theta) \quad (1.4)$$

而 Drosg 用 D 的波数 k 的平方去除, 也就是

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(E, \theta) = \left(\frac{1}{k}\right)^2 \sum_i B_i P_i(\cos\theta) \quad (1.5)$$

对于 $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ 和 $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 反应, Drosg 还给出了勒让德系数 A_i 的可取质心值, 以及能量间隔分别为 $3.0 \leq E_d \leq 25.3$ MeV 和 $5.0 \leq E_d \leq 19$ MeV 时的 0° 和 180° 的微分截面和总截面。

Drosg 对参考文献 [10] 中的各向异性值 $\sigma(90^\circ)/\sigma(0^\circ)$ 的新评价表明, D-D 反应在 $0.1 \leq E_d \leq 0.4$ MeV 间隔内勒让德系数发生了改变, 这些 c. m. 角度分布的异性值是在能量范围为 $70 \text{ keV} \leq E_d \leq 1.0$ MeV 的间隔内测定的。各向异性值的最大偏差出现在 0.2 MeV, 大约比先前获得的测定数据大 4%。

精确测量对于解释 $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ 反应的微分截面误差非常必要, 而小型中子发生器使精确测量成为可能。

对于 $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 反应, 在 0 到 300 keV 这个范围内由于共振截面宽, 所以 0° 的微分质心截面与 Breit-Wigner-Eisenbud^[13] 公式相符合。若假设 $J=3/2^+$, 且在 D 和 T 间是次波相互作用的话, 截面也能符合得很好。

就商用中子发生器而言, 电压大约是几百千伏, 被辐照的样品通常放置在前方。因此, 为了估计预期反应产额, 可以使用 D-D 和 D-T 反应在实验室系统中的全截面和 0° 微分截面 (图

1.3 和图 1.4 中已给出), 它们均为 D 能量的函数, 反应中 D 的轰击能量可达 500 keV。在 $E_d=107$ keV 时, D-T 反应的 0° 微分截面为 400 mb/sr, 而 D-D 反应的 0° 微分截面为 2.6 mb/sr。因此, 在达到几百千电子伏特时, D-T 反应的中子产额要远远高于 D-D 反应的产额。

实验室系统中 D-D 和 D-T 反应在 E_d 分别为 50, 100, 200, 300, 400 和 500 keV 时的发射中子的角度分布相对于 90° 时的角度分布的曲线已在图 1.5 和图 1.6 中给出, 此曲线是用参考文献 [15] 中的公式 1.6 给出的数据用最小二乘法拟合的。

$$R(\theta) = Y(\theta)/Y(90^\circ) = \frac{(A_0 + \sum_{i=1}^n P_i \cos^i \theta)/A_0}{1 + \sum_{i=1}^n A_i \cos^i \theta} \quad (1.6)$$

公式 1.6 中, n 值取决于反应类型和中子能量, 中子能量为要求拟合优度试验的对应能量值。

如图 1.3 和图 1.4 所示, D-D 反应的中子生成截面主要取决于发射角度, 而对 D-T 反应, 在 $E_d < 400$ keV 且 $0 \leq \theta \leq \pi$ 的情况下, 其各向异性度要比 D-D 反应小 20%。公式 1.6 中, 参数 A_i 在 $i > 0$ 时, 指的是中子产额的各向异性度。这两个反应的各向异性度都是随着 D 能量的增加而单调增加。图 1.5 的插图部分显示了把 D 轰击能量作为一个变量的 A 值。尽管在 D-D 中子发射中各向异性度很大, 但若 $n=5$ 的多项式可以接受的话, 则在 $E_d \leq 500$ keV 时, 公式 1.6 还是能很好地描绘其角度分布的。

公式 1.6 中的角度分布常数总结于表 1.2 和表 1.3 中, 这些数据是通过以不同轰击能量轰击薄靶获得的数据进行

最小二乘法拟合得到的。为了计算 $\sigma(\theta)$ 的绝对值, 90° 的微分截面也给出了。为了便于比较,

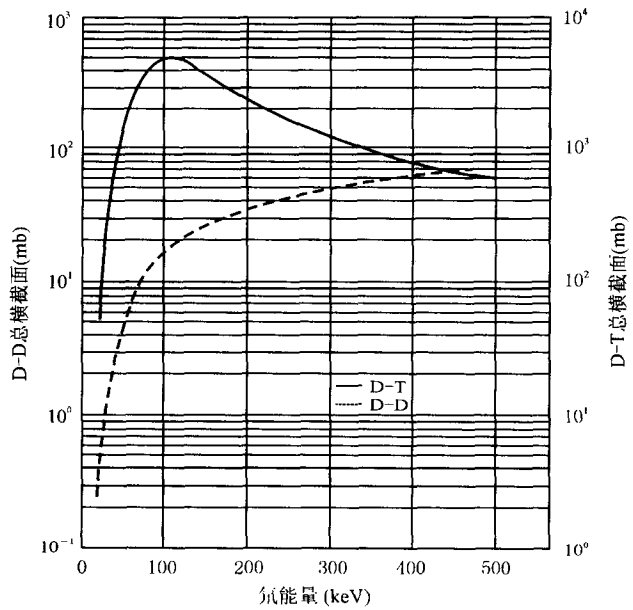


图 1.3 D-D 和 D-T 反应的总的实验室截面与氘能量的关系

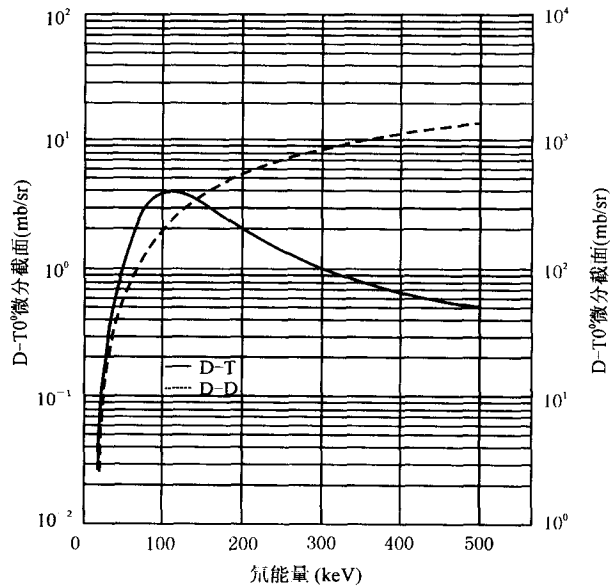


图 1.4 D-D 和 D-T 反应 0° 的微分实验室截面与氘能量的关系

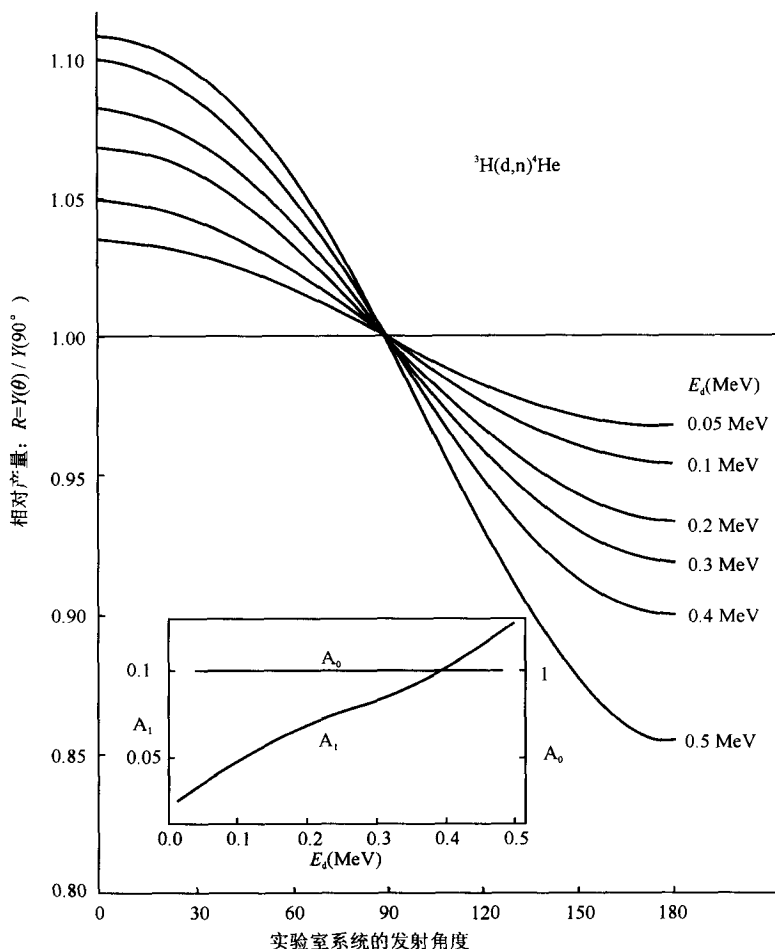


图 1.5 D-T 中子相对角分布与氘能量的关系

对应于厚的 TiT 靶的公式 1.6 中的系数值列在表 1.4 中, 系数值是以不同的 D 轰击能量轰击 TiT 靶获得的。厚靶对产额-角度函数的影响将与 D 的截止一起讨论。

Preston et al.^[14]测得了低轰击能量时 D-D 反应产生的中子的薄靶角度分布, 他应用的是气体靶工艺。使用微分抽运系统可获得 500 keV 以下时的较好能量分辨率。但不能通过应用薄固体 TiD 靶而取代此种工艺, 因为轰击到底层衬板中的 D 形成了靶自身。通过研究 D-T 反应, 发现应用气体靶和 T 束也是不可取的, 因为它们会污染整个加速系统。因此, 实践当中, 最常使用氚标记的锆或钛的固体靶来产生中子。

D 在厚固体靶中的截止与散射能在中子角度分布方面引起显著的畸变, 中子的能量及其能量分布也是如此。这些变量还受到靶的底层衬板材料和其他结构材料的影响。尽管大量中子数据是用 14 MeV 左右的中子来测定的, 但靶底座的影响还没有被详细的研究过。直到最近, Takahashi et al.^[15]才在该领域发表了一些结果。