



《中国工程物理研究院科技丛书》第 041 号

核材料 γ 特征谱的 探测和分析技术

田东风 龚 健 伍 钧 胡思得 编著

《中国工程物理研究院科技丛书》

核材料 γ 特征谱的探测 和分析技术

The techniques of detecting and analyzing the
Characteristic γ ray from nuclear material

田东风 龚 健 编著
伍 钧 胡思得

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

核材料 γ 特征谱的探测和分析技术/田东风等编著.
北京:国防工业出版社,2005.7

中国工程物理研究院科技丛书

ISBN 7-118-03437-1

I.核... II.田... III.①核燃料- γ 谱-辐射探测
②核燃料- γ 谱-分析方法 IV.TL27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 021685 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{2}$ 157 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国际科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第五届编审委员会名单

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮
(以姓氏笔画为序)

何建国 李 凡 李泽仁 苏 毅 汪小琳

吴志杰 张方晓 张富堂 张 健 罗顺火

孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨 顾 援

唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部

负 责 人 李天惠

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- | | | | | |
|-----|---------------|-----------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | 董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989年11月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990年02月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991年09月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | 胡家赣编著 | 科学出版社 | 1981年12月 |
| 005 | 映像与混沌 | 陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992年06月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年06月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年12月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992年10月 |
| 009 | 粘性消动法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993年03月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993年05月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993年05月 |

- 012 **炸药热分析**
楚士晋编著 科学出版社 1994年12月
- 013 **脉冲辐射场诊断技术**
刘庆兆主编 科学出版社 1994年12月
- 014 **放射性核素活度的测量方法和技术**
古当长编著 科学出版社 1994年12月
- 015 **二维非定常流和激波**
王继海编著 科学出版社 1994年12月
- 016 **抛物型方程差分方法引论**
李德元 陈光南著 科学出版社 1995年12月
- 017 **特种结构分析**
刘新民 韦日演主编 国防工业出版社 1995年12月
- 018 **理论爆轰物理**
孙锦山 朱建士著 国防工业出版社 1995年12月
- 019 **可靠性维修性可用性评估手册**
潘吉安编著 国防工业出版社 1995年12月
- 020 **脉冲辐射场测量数据处理与误差分析**
陈元金编著 国防工业出版社 1997年01月
- 021 **近代成像技术与图像处理**
吴世法著 国防工业出版社 1997年03月
- 022 **一维流体力学差分方法**
水鸿寿著 国防工业出版社 1998年02月
- 023 **抗辐射电子学 辐射效应及加固原理**
赖祖武等著 国防工业出版社 1998年07月
- 024 **金属的环境氢脆及其试验技术**
周德惠 谭云编著 国防工业出版社 1998年12月
- 025 **试验核物理测量中的粒子分辨**
段绍节编著 国防工业出版社 1999年06月
- 026 **实验物态方程导引(第二版)**
经福谦著 科学出版社 1999年09月

- 027 无穷维动力系统
郭柏灵著 国防工业出版社 2000年01月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德编著 国防工业出版社 2000年01月
- 029 再入飞行器天线
金显盛编著 国防工业出版社 2000年03月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬著 国防工业出版社 2000年12月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚等著 国防工业出版社 2000年12月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼著 国防工业出版社 2000年12月
- 033 空气炮理论与实验技术
王金贵著 国防工业出版社 2000年12月
- 034 一维不定常流与激波
李维新著 国防工业出版社 2000年12月
- 035 X射线与超紫外辐射源及其计量技术
孙景文编著 国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集
董海山等编著 国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氚渗透
王佩璇 宋家树著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文编著 国防工业出版社 2003年1月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 国防工业出版社 2004年11月
- 040 复杂系统可靠性工程
金碧辉主编 国防工业出版社 2004年6月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术
田东风等编著 国防工业出版社 2005年7月

序

核军备控制是一门政治性、政策性与科学技术紧密结合、相互交叉的综合学科。无论是核裁军、禁止核试验或禁止生产武器用裂变材料等军控条约的谈判对象本身还是履约的核查,都充分表现着这种结合和交叉的特征。在核查技术中,对于以核材料为对象的探测,是最基本最受关注的技术。除了这个应用背景之外,随着核工业的发展,世界范围内的铀、钚材料的积累越来越多,由此带来的核扩散危险已成为国际社会强烈关注的问题。对核材料的无损探测也是防止核扩散的重要手段之一。

核材料所释放的 γ 射线能谱,具有鲜明的特征性,可以认为是核材料的“指纹”。因此,对 γ 射线能谱及其强度的测量是无损探测核材料的主要技术方法。

在军控核查和防核扩散的探测技术手段中,为了体现探测结果的明确性和普遍接受性,对于所采用的技术方法有一条挑选原则,即必须采用成熟的技术方法。众所周知, γ 射线测量已经是一门较为成熟的技术,国内也有不少教科书作了介绍。但是把这种成熟技术应用于军控核查和防核扩散探测的具体场景时,会遇到许多特殊的问题、特殊的要求和技术困难,从而牵引出许多独特的科技课题。

在中国工程物理研究院,有一批长期从事 γ 射线探测的理论和实验研究的科技工作者,本书的作者们就是其中的一部分,近年来他们又涉足军控核查技术的研究。他们在研究工作中积累了不少宝贵的实践经验,取得了丰富的科研成果,其中有许多颇具独到的创意和巧妙的精彩。

几年来,随着军控核查技术研究的逐步深入,我一直期望着有

一系列这方面的技术性专著出版。这样不仅可以满足相关科技人员更系统、更全面学习专业知识,而且也有利于推动军控核查技术研究的进一步深化。现在,我的同事们通力合作,完成了《核材料 γ 特征谱的探测和分析技术》一书的撰写,这在军控核查技术界是一个大好消息,他们成功地迈出了可喜的一步。书中对相关的基础知识、核材料 γ 特征谱的探测技术、分析反演技术以及应用中的一些关键技术问题做了系统的阐述,这里既有他们自己多年工作的成果,也收集了国内外最新的研究进展。

我本人与本书的作者们一起工作多年,特别是对其中的几位年轻学者,亲眼目睹了他们的成长,他们在工作中所显露出的开拓精神和才能,给我留下深刻的印象,使我倍感欣慰,倍受鼓舞。在他们的新作出版之际,特写序言,以誌祝贺。

胡思得

2003年岁末于北京

前 言

随着核能的利用和相关工业的发展,全球现已累积生产、储存了大量的裂变核材料——铀和钚材料,而且还在逐年大量地增加。由于众所周知的原因,铀、钚核材料(尤其是高纯度的)所具有的潜在核扩散危险一直被国际社会所关注。国际原子能机构(IAEA)多年来也在逐步加强其监督体系的建设和有关监控核查技术的研究与开发,核材料的安全保障技术便是其中之一。为此,研发简便快速的无损探测技术和核材料识别技术很有实际意义,甚至在一些特殊应用领域,还需要针对核材料或相关核装置中的核材料进行“标记”。

所谓的无损(nondestructive)是指不影响或改变所测核材料的物理或化学状态。核材料的无损探测与识别技术是通过测量核材料的自发辐射来甄别所测核材料(或相关核装置)的某些特征信息。在许多情况下,核材料的自发辐射特征谱是“独一无二”的,可称其为“基因特征”,其辐射强度与所含原子核的数量(或质量)有关。其它技术在应用时往往需首先“摄取”样品,然后再进行样品的化学处理和分析。然而,无损探测技术则避免了这一点,而且远比化学分析手段快,但其精度则不及化学分析方法。

核材料的无损探测与识别技术原则上可分为三大类:γ分析、中子分析和量热分析技术。在核材料的生产、加工、处理和应用(甚至包括储存和运输)过程中核材料所处的状态和形态是很不一样的,必须针对其不同情况下的不同特点或不同目的来确定采用何种技术手段。美、俄(包括前苏联)的核材料生产部门和核武器研制部门均已做过大量的研究开发工作,已成熟的专用技术就有十几种之多。有关核材料生产、应用等方面的信息向来都被认为

属于涉及国家安全的“敏感信息”,更何况相关技术本身还存在着不同程度的“入侵性”问题。

本书旨在提供与此相关的科学技术基础知识,并系统地反映了国内有关研究单位在核军备控制核查技术领域多年积累的部分基础性研究成果。全书共分七部分,前三章简要介绍了相关的基础知识,即原子核的自发辐射、核材料自发辐射的典型 γ 特征谱,以及 γ 与物质的相互作用等,由刘成安研究员(北京应用物理与计算数学研究所)和田东风研究员(中国工程物理研究院)负责编写。第四章详细介绍了 γ 射线的探测和分析技术,由龚建研究员和古当长研究员(西南核物理与化学研究所)负责编写。第五章和第六章重点介绍了有关核材料 γ 特征谱的分析反演技术和分析反演技术应用中的一些关键技术问题,分别由龚建研究员和田东风研究员负责编写。附录 A 收集了与本书内容相关的铀、钚核材料生产的有关知识简介,由伍钧研究员(北京应用物理与计算数学研究所)和田东风研究员负责编写。胡思得院士作为本书编写的指导人,给予了年轻学者以悉心指导和严格要求,并欣然提笔作序,为本书编写的顺利完成起到了关键作用。

另外,在本书稿的编写过程中还得到了宋家树院士、吕敏院士的热情鼓励和精心指导,他们的建议使作者受益匪浅。解东研究员(北京应用物理与计算数学研究所)、陆向东(博士研究生,中国工程物理研究院研究生院)也为本书的编写给予了帮助。吴衍斌研究员(中国工程物理研究院科技信息中心)和竺家亨研究员(北京应用物理与计算数学研究所)为本书的出版也给予了热情支持,在此一并表示感谢。

由于本书涉猎领域相当广泛,限于作者水平、时间仓促,错误和不妥之处在所难免,诚恳欢迎广大读者和同行专家不吝赐教。

编 者

目 录

第一章 核材料的自发辐射 γ	1
1.1 原子核的衰变	1
1.2 原子核衰变的特征量	3
1.3 原子核衰变与 γ 射线	4
1.4 X 射线的产生	5
1.5 其它产生 γ 射线的反应	7
1.6 γ 射线的背景噪声	12
参考文献	12
第二章 核材料自发辐射的典型 γ 特征谱	14
2.1 核材料的典型 γ 特征谱	14
2.2 用于核材料分析的主要 γ 特征线	20
2.3 用于核材料无损分析的中子辐射特征	22
参考文献	23
第三章 γ 射线与物质的相互作用	25
3.1 γ 射线与物质相互作用的过程	25
3.2 γ 射线通过物质时的衰减	33
3.3 过滤作用	37
3.4 屏蔽作用	38
参考文献	39
第四章 γ 射线的探测和分析技术	40
4.1 γ 射线及其探测技术	40
4.2 γ 谱的构成	44
4.3 γ 谱仪的基本指标	52

4.4 半导体 γ 谱仪	63
4.5 峰面积计算	80
4.6 主要修正和测量条件选择	91
4.7 γ 谱仪的刻度和活度测量	101
4.8 相对探测效率和相对活度测量	109
4.9 低水平 γ 测量	112
参考文献	118
第五章 铀、钚材料 γ 特征谱的分析反演技术	121
5.1 同位素丰度分析	121
5.2 铀和钚发射的 γ 射线	122
5.3 γ 峰数据的获取技术	138
5.4 分析方法	140
5.5 实验比较	147
参考文献	150
第六章 γ 谱分析反演技术的应用	152
6.1 求解核材料的核素成份信息的方法	152
6.2 源区 γ 自吸收修正	155
6.3 由 γ 特征谱直接获取 $C(E)$ 的“原始”信息	160
6.4 不均匀样品的自吸收修正	163
6.5 由出射 γ 特征谱反解相关核装置信息的方法	165
6.6 钚材料年龄的反演	169
6.7 核爆零时的反推	169
6.8 核材料出射 γ 谱的数值模拟计算	170
参考文献	172
附录 A 铀、钚材料生产的知识简介	174
A1. 铀材料的生产	174
A1.1 铀的性质	174
A1.2 铀矿的加工和精炼	175
A1.3 四氟化铀的生产	176
A1.4 六氟化铀的生产	177