



《中国工程物理研究院科技丛书》第053号

核军备控制核查技术概论

An Introduction of Verification Technology of Nuclear Arms Control

刘成安 伍 钧 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

核军备控制核查技术概论 / 刘成安, 伍钧编著. —北京:
国防工业出版社, 2007. 4

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978-7-118-04963-3

I. 核… II. ①刘…②伍… III. 核武器-控制-军事技
术 IV. E928 D815.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 003105 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 787×1092 1/16 印张 11 字数 224 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 29.00 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

深化軍备控制科学技术
问题研究,为捍卫国家利益,
构建和谐世界作出贡献!

祝贺《核军备控制核查技术
概论》出版

杜祥琬

二〇〇六年八月



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
第五届评审委员会组成人员**

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓名笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 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

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

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防科研任务。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才。

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

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 (以姓名笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李 凡 李泽仁 苏 伟 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 李代斌

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 1991 年 12 月 |
| 005 映象与混沌
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 粘性消去法和差分格式粘性
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 射线与真空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 材料中的氦及氘渗透**
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 01 月
- 039 激光核聚变靶物理基础**
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004 年 11 月
- 040 系统可靠性工程**
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004 年 06 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 2004 年 06 月
- 042 高能激光系统**
苏毅 万敏 编著 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 043 近可积无穷维动力系统**
郭柏灵 高平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004 年 06 月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应**
陈盘训 著 国防工业出版社 2005 年 06 月
- 045 高功率脉冲技术**
刘锡三 编著 国防工业出版社 2005 年 08 月
- 046 热电池**
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2005 年 08 月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论**
方泉玉 颜君 著 国防工业出版社 2006 年 01 月
- 048 非牛顿流动力系统**
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006 年 02 月
- 049 动高压原理与技术**
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006 年 03 月
- 050 直线感应电子加速器**
邓建军 主编 国防工业出版社 2006 年 10 月
- 051 中子核反应激发函数**
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006 年 11 月
- 052 实验冲击波物理导引**
谭华 著 国防工业出版社 2007 年 3 月
- 053 核军备控制核查技术概论**
刘成安 伍钧 编著 国防工业出版社 2007 年 3 月

序 言

军备控制与裁军是当代国际政治中的重大问题之一,它与国家的外交、军事政策密切相关,直接关系到国家的安全和世界的和平与稳定,因此受到国际社会的高度关注和重视。军备控制核查技术是当前蓬勃发展的技术领域之一,它为保障军备控制和裁军条约得到有效实施,从而增强执行条约的信心提供了技术支持,对军备控制和防扩散的进程起着一定的推动作用。它同时也是一门交叉学科,它的研究将会有力促进相关科学技术的发展。

我国是发展中国家,为保证国家安全,维护世界和平,需要掌握国际上有关军控条约与协议的核查技术,重点研究军控核查各主要环节的监测技术,从而保障在军控谈判中维护我国的安全利益。为此,从20世纪80年代开始,我国不少单位和学者逐步开展了这方面的研究,并取得了不少成果。《核军备控制核查技术概论》就是这些成果中的一个。它比较系统地介绍了核军备控制核查技术方面的专业知识,论述和评价了这方面的技术进展,介绍了包括作者自己的研究成果在内的最新成果。本书内容涵盖了核军备控制核查技术的主要方法。如:钚及铀的属性探测原理和技术,符合测量方法及其在核武器、核材料认证中的应用,核裁军中核弹头、核材料以及核弹头拆卸的探测,核爆炸探测,卫星遥感和雷达技术在军备控制核查中的应用等。该书紧密结合我国研究工作的实际,参考国内外发表的最新资讯,将物理分析和数学推导相互结合,具有较高的学术水平。

本书作者长期从事核武器研制及军备控制核查技术研究,多次获得国家级奖励。本书的出版将为从事核军备控制核查技术领域工作的科研人员提供一本有价值的参考书。

宋家树

2007-1-29

前 言

中国作为对国际和平与安全负有重大责任的国家,积极参加了国际军控与裁军工作,对国际和平与安全做出了积极的贡献。随着国际核军备控制的发展,不断提出一些新的研究课题,其中包括军控核查的许多技术问题。为适应军控与裁军条约、协议核查的需要,我国科学工作者在核查技术研究中已取得了很大成绩,并培养出一批高素质的硕士、博士研究生,充实了军控科学技术研究队伍。

作者近年来参加了军备控制科学与技术课题的研究和研究生学位课的授课工作。广泛收集了国内外相关资料和最新研究成果,加上我们个人研究心得,撰成此书。全书内容包括:1. 军控与裁军条约核查的意义和核查技术发展的趋势;2. 用于深度核裁军核查的密封容器中的钚、铀材料的属性探测原理和技术,包括核材料同位素成分、质量、形状、化合物状态、武器用核材料从生产出来算起的年龄等的探测原理和技术;3. 符合测量方法及其在核武器、核材料认证中的应用;4. 深度不可逆核裁军中核武器和核材料的认证,核武器拆卸和裂变材料生产和控制的核查;5. 用于全面禁核试核查的核爆炸探测技术,包括卫星遥感探测、放射性核素探测技术,地震、水声、次声探测技术;6. 主要用于削减部署的核武器核查的卫星遥感和雷达技术。另有附录,简要介绍了核武器的基本知识,武器用核材料生产的知识,防扩散裂变能源持续发展的问題。

在本书撰写过程中,得到宋家树、胡思得两位院士的热情支持,提出了许多宝贵建议。北京应用物理与计算数学研究所军备控制科学与技术研究室为本书的写作提供了多方面的帮助,在此一并表示谢意。

军控与裁军条约核查技术是一门新的综合性很强的学科,而且正处于不断发展和完善之中。限于作者水平,不足之处在所难免,恳请行家和读者不吝赐教。

作 者

2007 年 1 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 军控与裁军条约核查的意义	1
1.2 军控与裁军条约核查的历史演变	2
1.3 军控与裁军条约核查技术简述	3
1.4 核查技术发展的趋势	4
参考文献	5
第 2 章 密封容器中钚的属性及其探测原理	6
2.1 引言	6
2.2 钚同位素成分的测量	7
2.2.1 效率曲线的测量	7
2.2.2 同位素成分的测量原理	8
2.2.3 理论计算	8
2.2.4 实验探测	9
2.3 钚的年龄及其测量	9
2.4 钚的质量测量	10
2.4.1 分析	10
2.4.2 测量方法	11
2.5 钚部件形状的测量	11
2.5.1 辐射场测量法	11
2.5.2 γ 射线的准直测量法	12
2.5.3 γ 射线的被动成像法	12
2.5.4 光激励适配自显影法	13
2.6 是否为 Mox 燃料的测量	14
2.6.1 钚的自发衰变	14
2.6.2 特征 γ 射线测量法	14
2.6.3 单中子测量和复度中子测量的判断方法	14
2.7 密封容器中钚存在的红外线探测方法	14
参考文献	15
第 3 章 密封容器中铀的属性及其探测原理	16
3.1 引言	16
3.2 浓缩铀年龄的探测原理	16
3.3 铀部件形状的测量	18

3.3.1	辐射场强度测量法	18
3.3.2	γ 射线的准直测量法	18
3.3.3	γ 射线的被动成像法	18
3.3.4	光激励适配自显影法	19
3.4	根据热流和中子探测浓缩铀部件的浓缩度和质量	19
3.5	根据 ^{232}U 的特征 γ 射线判断浓缩铀的存在	21
3.6	单能 γ 射线峰法探测铀的浓缩度	22
3.7	γ 射线峰值比法探测铀的浓缩度	23
3.8	其它可能的探测方法及遗留问题	24
	参考文献	25
第4章	符合测量方法及其在核武器、核材料认证中的应用	26
4.1	符合测量方法	26
4.2	核武器认证中符合测量法的物理问题	27
4.3	相关函数的定义及测量	28
4.3.1	源通道的自相关函数	28
4.3.2	探测器通道的自相关函数	29
4.3.3	源通道和探测器通道之间的互相关函数	30
4.3.4	探测器通道之间的互相关函数	30
4.4	复度与功率谱密度	31
4.4.1	复度	31
4.4.2	自功率谱密度	32
4.4.3	互功率谱密度	33
4.4.4	相干性	34
4.4.5	谱密度比	35
4.4.6	粒子产生链及其输运的M·C模拟计算	35
4.5	符合测量方法的应用举例	36
4.5.1	钚的属性测量	36
4.5.2	铀的属性测量	39
4.5.3	高爆炸药的测量	39
4.6	符合测量方法应用的步骤	39
	参考文献	40
第5章	深度核裁军的主要核查环节和核查技术	41
5.1	引言	41
5.2	核弹头特征的认证和鉴别	42
5.2.1	表观物理特征的测量	42
5.2.2	发热功率的测量	42
5.2.3	核部件形状的测量	42
5.2.4	振动分析法	43
5.2.5	中子飞行时间谱测量	43

5.2.6 铀、钚同位素属性测量	44
5.3 信息屏障和模板	44
5.3.1 探测方式的限制	44
5.3.2 信息屏障	44
5.3.3 模板	45
5.4 标签和封签	45
5.4.1 标签和封签的举例	45
5.4.2 封签和标签的基本特性	47
5.5 库存核弹头的抽查	47
5.6 监护链	48
5.7 核部件转运中的跟踪监测系统	50
5.8 核弹头拆卸的核查	52
5.9 裂变材料生产的控制和核查	52
5.9.1 武器用裂变材料的定义及可能的禁产范围	52
5.9.2 核材料的管理和控制	53
5.9.3 浓缩铀生产的控制和核查	54
5.9.4 钚生产的控制和核查	55
5.9.5 库存核材料的清查和处理	56
5.10 核军备控制核查中的问题	57
参考文献	57
第6章 核爆探测	59
6.1 核爆炸	59
6.1.1 核爆炸	59
6.1.2 核爆炸的方式	59
6.2 大气层和高空核爆炸的探测	60
6.2.1 核爆炸闪光的双峰结构	60
6.2.2 核爆炸地点和时间的监测	61
6.2.3 核爆探测卫星及探测器	61
6.3 放射性核素探测	62
6.3.1 放射性核素在大气中的输运	63
6.3.2 核爆放射性微粒的监测	63
6.4 核爆炸的地震监测技术	66
6.4.1 地震波	66
6.4.2 地震波的传播	68
6.4.3 地震性质的认证	69
6.4.4 震级与核爆当量的关系	70
6.4.5 地震探测器原理	71
6.5 次声监测法	72
6.5.1 次声的性质	72

6.5.2	大气环境	72
6.5.3	次声的噪声源	73
6.5.4	核爆的次声信号	74
6.5.5	次声波探测器原理	74
6.6	水声探测	75
6.6.1	水声的物理性质	75
6.6.2	海洋环境	75
6.6.3	海洋中声音的传播	76
6.6.4	散射和噪声	77
6.6.5	核爆水声信号的识别	78
6.6.6	水声探测器原理	78
6.6.7	国际水声监测系统	78
6.7	国际数据中心与全球通信系统	79
6.7.1	功能	79
6.7.2	工作原理	79
6.7.3	数据的认证	80
	参考文献	80
第7章	卫星遥感和雷达技术及其在军备控制核查中的应用	82
7.1	遥感技术的特点	82
7.1.1	遥感技术	82
7.1.2	目标性质的识别	82
7.1.3	测量精度	82
7.1.4	光学遥感的探测方式	82
7.1.5	卫星遥感	83
7.2	可见光照相	83
7.2.1	摄影光学原理	83
7.2.2	卫星遥感摄像系统分类	85
7.2.3	成像光谱仪	86
7.3	红外光探测与照相	86
7.3.1	红外探测的特点	86
7.3.2	长波红外的窗口	86
7.3.3	红外成像系统	87
7.4	红外探测有关物理量的估算公式	89
7.4.1	探测器的分辨力	89
7.4.2	距离的探测	89
7.4.3	目标特征信息的探测	89
7.5	卫星遥感技术及其在军控核查中的应用	90
7.5.1	卫星系统的构成	90
7.5.2	卫星的运行轨道和周期	90

7.5.3	空间侦察卫星	91
7.5.4	电子侦察卫星	93
7.5.5	海洋监视卫星	94
7.5.6	预警卫星	94
7.6	雷达	94
7.6.1	相控阵雷达	95
7.6.2	超视距雷达(OTH)	97
7.6.3	合成孔径雷达(SAR)	98
7.7	雷达探测有关特征量的估算公式	100
7.7.1	分贝(dB)	100
7.7.2	雷达的基本方程	101
7.7.3	目标的雷达截面(RCS)	102
7.7.4	探测距离	103
7.7.5	角位置的测量和角分辨力	103
7.7.6	距离的测量和距离分辨力	104
7.7.7	径向速度测量和速度分辨力	104
7.7.8	多普勒测量成像	105
7.8	图像处理	105
7.8.1	图像的恢复	106
7.8.2	图像增强	107
7.8.3	雷达图像的处理	110
7.8.4	目标数据库	111
7.8.5	侦察对分辨力的要求	111
	参考文献	115
附录 A	核武器	116
附录 B	武器用裂变材料及其生产	127
附录 C	核不扩散与裂变能源的持续发展问题	136
附录 D	军备控制与裁军条约核查常用的术语	146