



Nuclear
Radiation
Dosimetry

核辐射剂量学

钱建复 沈庭云◎编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

核 辐 射 剂 量 学

Nuclear Radiation Dosimetry

钱建复 沈庭云 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

核辐射剂量学 / 钱建复, 沈庭云编著. —北京: 国防工业出版社, 2009.3

ISBN 978-7-118-06339-4

I. 核... II. ①钱...②沈... III. 辐射剂量学
IV. R144.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070401 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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 1/2 字数 333 千字

2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 46.00 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 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 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

本书主审委员 陈冀胜

前 言

核爆炸或核事故放射性物质释放出的电离辐射,在军语中,习惯称做核辐射。核辐射剂量学是以核爆炸早期核辐射与剩余核辐射为对象,战时核辐射监测装备技术要求为特点建立的体系。原子能事业的发展、核试验和核武器在军事上的应用及国际反核与辐射恐怖斗争,拓宽了核辐射剂量学的研究范围。随着计算机技术的发展和应用,现代核辐射剂量学的发展已经形成了实验辐射剂量学和计算辐射剂量学两个分支。剂量学(Dosimetry)这一术语已经不再局限于用剂量计测量吸收剂量了,而仅仅被限制于“吸收剂量”的简称。

本书以军用核爆炸辐射防护剂量学为主要内容,考虑到市场上相关的专业书籍已经很少,因此在内容的选取上尽可能做到兼顾该领域工作者的需要。全书内容共分11章,包括:核辐射剂量学常用的辐射量;核爆炸的辐射场;核辐射对机体和物质的辐射效应;常用的气体、闪烁和半导体等核辐射探测器;核辐射剂量测量的原理和方法;放射性测量的理论和方法;战时放射性污染的空气、粮秣、水的取样和测量等内容。

本书是国防核技术和军队核辐射监测技术的理论与实验基础,如果能对国防核防护工程、军队核辐射监测装备的研制与评价提供测量方法和理论参考,将是莫大的荣幸。对于本书的完成,首先要感谢中国工程院院士毛用泽同志给予的关心和支持,他不辞辛苦地对本书的编辑以及技术等内容提出了详细的修改意见和建议;军事医学科学院郭勇研究员和毛用泽院士对全书的体系给予了充分的肯定和高度的评价,使得本书得以顺利的进行;另外,在编写过程中,防化研究院肖无云博士后、邹士亚博士、周春芝博士

等在资料上给予了支持,作者特此一并致谢。本书是由钱建复、沈庭云编著,参与编写的还有沈春霞、郑永春、吴江峰、何水军、胡海洋等同志。

本书编写中,搜集了该领域的部分新成果、数据、图表和公式及相关参考文献,从而满足技术工作者对于综合性专著的需要。并在以下四个方面给予了关注。

(1) 了解核爆炸早期核辐射与剩余核辐射是核辐射测量工作的前提,因为它们是测量对象,只有掌握了其特点和分布规律,才能对测量方法和仪器提出正确的评价和要求。

(2) 该书内容所涉及的范围非常广泛,与物理学、原子能科学技术等许多领域都有紧密的联系。特别是与原子核物理实验方法关系最为紧密。因此只有详细地研究各种辐射特性与物质的相互作用规律,才能建立核辐射剂量学的实验方法和理论基础。

(3) 核辐射探测器的原理是以射线与物质相互作用产生的各种物理和化学效应为基础进行研制的,这就会涉及到与这些现象有关的许多近代物理学方面的新成就,如气体放电、固体发光、半导体、次级电子发射、超导现象等,它们为核辐射测量技术的发展做出了直接的贡献。

(4) 尽管探测器在核辐射仪器中起着关键作用,但是大多数测量方法还是必须将各种效应转换为电信号,并借助电子学线路实现。因此作为一个仪器整体来说,探测器、测量方法与相对应的电子学线路是相辅相承的。例如,就设计一台反符合测量需要的仪器来说,探测器、电子学线路及测量方法之间是一个不可分割的整体。

本书可作为国防核技术应用领域从事辐射防护剂量学、核辐射监测工程技术人员及研究生的参考书,也可作为国防院校相关学科专业的参考书。

目 录

第 1 章 核辐射剂量学常用辐射量	1
1.1 描述辐射场特征的辐射量	1
1.2 吸收剂量和比释动能	7
1.3 比释动能与能注量和吸收剂量的关系	9
1.4 照射量与空气比释动能	15
1.5 放射防护量与实用量	20
第 2 章 核爆炸的辐射场	40
2.1 辐射场能谱数据的基本处理方法	40
2.2 核爆炸早期中子辐射场典型能谱	43
2.3 核爆炸早期 γ 辐射场典型能谱	48
2.4 核爆炸剩余核辐射场典型能谱	51
第 3 章 核辐射对机体和物质的辐射效应	56
3.1 核辐射作用人体产生的辐射效应	56
3.2 早期核辐射的辐射效应	61
3.3 放射性污染的辐射效应	70
第 4 章 核辐射防护方法和规定	73
4.1 辐射防护规定	73
4.2 战时参战人员的核辐射控制量	77
4.3 核辐射防护方法	79
4.4 核爆炸早期核辐射与放射性污染的防护	92

第 5 章 气体探测器	96
5.1 气体探测器的理论	96
5.2 电离室	103
5.3 正比计数管	117
5.4 G - M 计数管	128
5.5 气体探测器的应用	149
第 6 章 闪烁探测器	161
6.1 闪烁体探测器的结构和工作原理	161
6.2 闪烁体的发光理论及常用的闪烁体	162
6.3 光电倍增管及工作特性	178
6.4 闪烁计数器	190
6.5 闪烁体探测器的应用	194
第 7 章 半导体探测器	199
7.1 半导体探测器的理论和类型	199
7.2 PIN 型半导体探测器	212
7.3 MOSFETs 场效应管半导体探测器	222
7.4 宽基硅二极管半导体探测器	226
7.5 半导体探测器的应用	228
第 8 章 剂量测量的理论和方法	232
8.1 探测器能量的沉积和测量	232
8.2 脉冲型探测器 γ 剂量率的测量	242
8.3 个人 γ 剂量的测量	256
8.4 β 剂量的测量	268
8.5 剂量仪的能量响应和刻度	271
8.6 核辐射监测实用辐射量的刻度	278

第 9 章 中子及 $n-\gamma$ 混合场的剂量测量	292
9.1 中子的探测方法	293
9.2 中子及 $n-\gamma$ 混合场的剂量测量	297
9.3 个人中子剂量的测量	303
9.4 中子剂量仪的刻度	309
9.5 阈探测器法核爆炸中子能谱和中子剂量测定	312
第 10 章 放射性测量理论和方法	319
10.1 绝对测量和相对测量	319
10.2 核衰变的统计性和计数的统计误差	323
第 11 章 战时环境放射性沾染的测量	334
11.1 概述	334
11.2 空气放射性沾染的取样和测量	337
11.3 粮秣、蔬菜和水放射性沾染样品的采集和测量	346
11.4 放射性核素的 γ 能谱分析	352
附录	366
附录 1 简单核数据表	366
附录 2 不同能量的中子在部分材料中的 比释动能因子 K_f	370
附录 3 点源 γ 射线减弱倍数 K 所需的物质厚度	378
附录 4 核爆炸落下灰当量吸收厚度 $D_{\text{当}}(\text{mg}/\text{cm}^2)$	383
附录 5 γ 能谱分析核素快速检索表	384
附录 6 电离辐射量、单位、名称及符号	392
参考文献	393

Contents

Chapter 1	Radiation quantities in nuclear radiation dose	···	1
1. 1	Radiation quantities in nuclear radiation field	······	1
1. 2	Absorbed dose and kerma	······	7
1. 3	Kerma and energy fluence and absorbed dose	······	9
1. 4	Exposure and air kerma	······	15
1. 5	Radiation protection quantities and practical quantities	······	20
Chapter 2	Radiation field of nuclear explosion	······	40
2. 1	Basic processes of radiation field energy spectrum data	······	40
2. 2	Early neutron radiation special energy spectrum of nuclear explosion	······	43
2. 3	Early γ radiation special energy spectrum of nuclear explosion	······	48
2. 4	Residue radiation special energy spectrum of nuclear explosion	······	51
Chapter 3	Radiation effects of biology and substance caused by nuclear radiation	······	56
3. 1	Personnel radiation effects of caused by nuclear radiation	······	56
3. 2	Radiation effects of early nuclear radiation	······	61

3.3	Radiation effects of radioactive contamination	70
Chapter 4	Nuclear radiation defence specifications and methods	73
4.1	Nuclear radiation protection specifications	73
4.2	Nuclear radiation control quantities of persons in the war	77
4.3	Nuclear radiation protection methods	79
4.4	Early radiation of nuclear explosion and radioation contamination protection	92
Chapter 5	Gas detector	96
5.1	Theories of gas detector	96
5.2	Ionization chamber	103
5.3	Proportional counter tube	117
5.4	Geiger-Müller counter tube	128
5.5	Application of gas detector	149
Chapter 6	Scintillation detector	161
6.1	Configuration and theory of scintillation detector	161
6.2	Luminescence theory of scintillator and in common use of scintillator	162
6.3	Photomultiplier and specificity	178
6.4	Scintillation counter	190
6.5	The use of scintillation detector	194
Chapter 7	Semiconductor detector	199
7.1	Theories and kinds of semiconductor detector	199
7.2	PIN semiconductor detector	212
7.3	MOSFETs field effect tube semiconductor	

detector	222
7.4 Wider radicle Silicon diode semiconductor detector	226
7.5 Application of semiconductor detector	228
Chapter 8 Theories and methods of dose measure	232
8.1 Sediment and measurement of detector energy	232
8.2 Measurement of pulse detector γ – dose rate	242
8.3 Individual γ – dose survey	256
8.4 β – dose survey	268
8.5 Dosimeter energy response and scaling	271
8.6 Nuclear radiation monitoring practical radiation quantities scaling	278
Chapter 9 Dose measurement of neutron and $n - \gamma$ radiation field	292
9.1 Method of neutron detection	293
9.2 Dose measurement of neutron and $n - \gamma$ radiation field	297
9.3 Personal neutron dosimeter and neutron dose survey	303
9.4 Neutron dosimeter scaling	309
9.5 Measure of nuclear explosion neutron spectrum and neutron dose by oxygen	312
Chapter 10 Theories and methods of radiation measure ...	319
10.1 Absolute measurement and and relative measurement	319
10.2 staticality of nuclear decay and statical error of counter	323

Chapter 11	The measure of radioactive contamination in the war	334
11.1	Summary	334
11.2	Sample and measurement of air radiative contamination	337
11.3	Collection and measurement of grain hay , vegetable and water radioativity specimen	346
11.4	γ – spectrum analysis of radioactive nuclide	352
Appendix		366
Appendix 1	Simple nuclear database	366
Appendix 2	K_f of vary energy neutron in part materials	370
Appendix 3	Demanded substance thickness weaken coefficient K of γ – ray for spot source	378
Appendix 4	Absorb equipment shickness D of nuclear explosion fallout(mg/cm^2)	383
Appendix 5	Nuclide quickly searches table of γ – spectrum analysis	384
Appendix 6	Ionization radioactive quantities ,units , denomination and symbol	392
References		393

第 1 章 核辐射剂量学常用辐射量

1.1 描述辐射场特征的辐射量

1. 辐射场

辐射是电离辐射和非电离辐射的统称。电离辐射是由直接或间接电离粒子,或由两者混合组成的任何辐射,通常以激发和电离物质(与其相互作用的物质)原子的能力来表示其特征。可以说,能使物质电离的一切辐射称为电离辐射。核爆炸或核事故或放射性物质释放出的电离辐射,在军语中习惯称做核辐射。

核辐射粒子在真空或介质中通过和传播的时、空分布称做辐射场。辐射场是由辐射源产生的,辐射源通常可划分为稳态和脉冲态两种形式,前者又可分为稳态辐射源和准稳态辐射源。单位时间内发出的辐射粒子在统计范围内不随时间改变的物质、器件或装置,定义为稳态辐射源,如恒流加速器;单位时间内发出的辐射粒子的数目按确定规律变化的物质或材料,定义为准稳态辐射源,如放射性同位素、核爆炸剩余核辐射。它们构成的辐射场分别称做稳态辐射场或准稳态辐射场。

在有限持续时间内单位时间间隔产生,且发出辐射粒子的数目,随时间急剧变化的器件或装置定义为脉冲辐射源,如核爆炸后十几秒释放出的早期核辐射,既含有 γ 光子(量子),又含有中子。辐射出的粒子在真空或介质中通过和传播的时、空分布称为脉冲辐射场。由一种以上粒子或辐射组成辐射场,称之为“混合场”,如核爆炸早期核辐射或剩余核辐射,是由 α 、 β 、 X 、 γ 和中子等粒子和辐射组成的辐射场。

2. 粒子注量和注量率

电离辐射量和单位在历史上经历了不少的演变,一个量的名称在不同时期也有不同的含义。ICRU 认为概念和量的定义是根本问题,而单位的选择是次要的,并在其第 19、25 号报告中,对引入的一些新的辐射量给予了明确地表述。ICRU 第 33 号报告定义了包括:粒子数、辐射能、粒子通量、能通量、粒子注量、能注量、粒子注量率、能注量率、粒子辐射度及能量辐射度等辐射场特征量。下面叙述主要是核辐射剂量学中常用的基本电离辐射场量。

1) 粒子注量(Particle Fluence) Φ

粒子注量是根据入射粒子数目来描述辐射场的特征量,定义为:在空间一给定点处,射入以该点为中心的小球体的粒子数 dN 除以该球体的截面积 da ,即

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (1-1)$$

其单位为 m^{-2} 。可见,粒子注量就是进入(不包括从小球体内流出的粒子数)单位截面积小球体的粒子数,如图 1-1(b)所示。定义中采用小球体,表明每个入射方向必然有截面积 da 与其垂直;只有单向平行辐射场的粒子注量等于通过垂直方向的单位面积的粒子数,否则单位面积所截粒子数与平行粒子束运动方向和截面积 da 法线夹角余弦的绝对值成正比,如图 1-1(a)所示,当该角 θ 为零时,便是垂直于粒子束运动方向的情况。

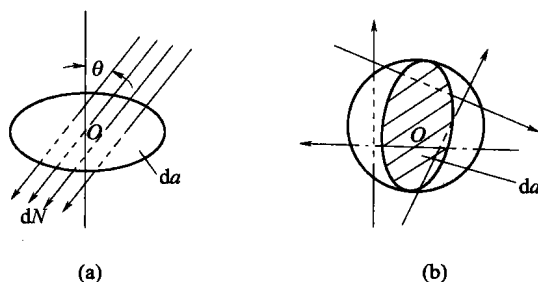


图 1-1 表述粒子注量概念示意图

(a) 平行辐射束; (b) 非平行辐射束。