

K. 贝克尔 著

固体剂量学

GUTIJILIANGXUE

原子能出版社

固 体 剂 量 学

K. 贝克尔 著

曾庆祥 刘孟彝 译

陈丽姝 张永兴 冯仰华 校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书是介绍新近发展起来的一门学科——固体剂量学的一本专著。它比较全面地论述了固体剂量学领域中热释光、受激外逸电子发射、辐射光致发光、径迹蚀刻法等的发展史、工作原理、探测元件的材料和特性、读数仪表的设计和测量技术等问题，并较系统地论述了在医用物理、放射防护、环境监测中的应用问题。书中还列举了大量的参考文献。本书是从事辐射剂量学研究和辐射防护工作人员等的一本较好的参考书。

Solid State Dosimetry

Klaus Becker

CRC PRESS, 1973

固 体 剂 量 学

K. 贝克尔 著

曾庆祥 刘玉鼎 译

陈丽姝 张永兴 冯仰华 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆市枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ · 印张18 $\frac{3}{8}$ · 字数440千字

1985年4月第一版 · 1985年4月第一次印刷

印数 1—2,500 统一书号: 15175·535

定价: 2.70元

前言

自从发现电离辐射以来,辐射探测器的研制在增进我们对辐射的性质及其和物质的相互作用的了解方面起了关键性的作用。对于大多数工业、医疗或研究工作中使用电离辐射的地方,辐射探测器是必不可少的。并且它还能使我们对使用电离辐射时所得利益及其潜在危害有更深入的认识。

在科罗拉多州、印度和巴西的某些特定地区的居民、铀矿工、宇宙飞行员和高空飞行的飞机乘务员和乘客,是受到高水平天然辐射的人群。更重要的是,在医学诊断和治疗中,在核动力工厂和研究设施附近,或者在工业上使用辐射源时——总之,所有使用辐射,或者作为生产过程的常规或者可能的副产品而产生辐射的地方,越来越多的人群会受到人工辐射源的照射。此外,分布于世界各地的生产和储存核武器的大型兵工厂也必须考虑在发生事故时或者在爆发核战争的情况下,大量武装部队和居民会受到的高水平辐射。

所有工业发达国家,现已在法律上规定了要用个人剂量计对从事辐射工作的人员进行连续监测。用于这方面的剂量计已有数百万只,而且,随着辐射应用的增加,以及对于哪怕是最低辐射剂量的潜在危害的关注,这一数字还在增大。然而,剂量计用于个人剂量测量还只是许多应用领域其中的一个方面。另一个日显重要的领域是医用剂量的测量,如深度剂量分布的测量,放射源的校准,以及“医用物理学”中的体内剂量测量(例如,小至 $\pm 10\%$ 的剂量偏差可以大大影响治疗某些癌症的成功率)等。

积分剂量计还可以广泛应用于生物医学和材料研究、空间辐射研究、食品处理、医疗仪器和药品的辐射消毒,辐射遗传(作物育种)、绘制反应堆和加速器周围的辐射场以及核武器的研究等等方面。另外根据经济上的、生态学方面的和能源政策问题的要求(如核电站的选点)往往需要长期对周围环境小剂量进行精密测量。总而言之,由于技术上的、医疗上的、行政管理的、法律的以及精神因素等的需要,可靠而简单地测量辐射的累积照射量是必不可少的。

在本世纪的前半叶,辐射剂量的测量仪器几乎都是基于气体电离原理的各种探测器,或者是基于使感光乳胶变黑原理的探测器。随着对剂量计的要求愈来愈高(更灵敏、更精确、成本更低),这一情况正在发生巨大的变化。根据测量某些受照固体中发生的微量变化而构成的现代积分式剂量计,在愈来愈多的领域中正迅速地取代“经典的”探测系统。

至今,已有的论述固体剂量学的大量资料(约5000种出版物)几乎是一万个“人-年”的研究和研制工作所积累的成果(其中包括本书作者的12年研究工作,其助手和学生有40“人-年”的工作)。遗憾的是,还未出现过一本内容较完整而新颖的出版物。一个新接触这一科学领域的学生,或一个准备把固体剂量学应用于他所面临的特殊问题的科学家,可能会陷于浩繁的资料丛中而感到无所适从,也可能因只读到某些过时的论文和课本,一知半解地沾沾自喜。因此本书的目的就在于弥补这一缺欠。在编写过程中,显然不宜对所有论文、报告、讲义、专利等都面面俱到地加以重述。那样做会使本书罗列出许多错误的结论、陈旧过时的技术以及一些既没有历史价值而又繁琐累赘的研究结果,还会使本书篇幅过大,难于阅读和理解。与此相反,本书的目的是给出固体剂量学这一学科的内容新颖的入门知识,同时,它也可以作为实验室手册使用。本书内容只是包括一九七三年中期以前作者所能得到的有关资

料。

已经指出(Loevinger, 1972), 基于现在已经知道的辐射对物质的各种效应都至少有过一种“简单”的方法测量辐射剂量, 其所谓简单, 是指研究人员还没有花时间去努力发现它们特有的一些问题。其它一些材料, 如照相乳胶和氟化锂, 都是至今研究得最深入的材料。事实上, 某些探测器无疑比其它探测器更适用于某些特定类型的测量。希望本书对于按某一确定的目的挑选最佳的探测器以及指出需要进一步研究的问题有所帮助。

在编写本书时, 除尽量提供最新的信息外(在此迅速发展的领域中, 这样的信息是起决定作用的因素), 还考虑了某些领域将来的需要, 预见了其发展趋势。参考资料多半是选用那些新近的内容较丰富或较深入, 而且易于接受的那些资料。本书中有些章节的内容与作者以前的文章有联系, 如关于胶片剂量学(Becker, 1966a)*, 辐射光致发光剂量学(Becker, 1967和1969a), 外逸电子剂量学(Becker, 1970和1972)以及固体中的核径迹蚀刻法(Becker, 1972)等方面的文章, 但其内容并非完全重复, 目的也不尽相同。

还用到了其它一些书籍中对有关问题的论述, 特别是Dudley(1966), Becker(1966a), Herz(1969)和McLaughlin(1970)关于胶片剂量学的论述, Spurny(1965), Fowler和Attix(1966), Cameron(1968), Schwarz等关于热释光剂量学的论述, Becker(1967, IAEA(1970a)和Piesch(1972)关于辐射光致发光的论述, 以及Frank和Stolz(1969), Amelinckx(1969)等和Becker(1970b)对固体剂量学的一般性论述。还利用了一系列有关书目资料(Angino等, 1965, IAEA 1966, Becker 1966b和1969b以及1964到1971, Lin和Cameron 1968, Spurny 1967和1969, Spurny和Sulcova, 1973)。此外, 还建议参考几次国际会议的记录, 即第一, 第二, 第三次发光剂量学国际会议(Luminescence Dosimetry, 1967, 1968和1972), 在克勒芒-斐龙(Clermont-Ferrand)召开的径迹蚀刻会议(Isabelle and Monnin, 1969), 国际原子能机构的几次讨论会(IAEA, 1965, 1967, 1969和1972), 以及一些技术报告(IAEA, 1970a和b)。

本书不包括脉冲型(“有源的”)固体辐射探测器和谱仪(闪烁体、半导体探测器等)的内容, 但有对于照相乳胶(应把它看作固体剂量计)的简要叙述。由于过去已着重解决过这方面的问题, 也由于其重要性逐渐下降, 因而甚至在将来也不准备着重讨论它。本书也不包括中子活化, 这是因为由活化感生的放射性大多迅速衰变掉了, 致使这种探测器被排除于累积剂量技术之外。总的说来, 重点不是放在评论一些旧的、众所周知的技术上, 而在于讨论新技术, 特别是那些还没有在书本中讨论过的内容。

有为数众多的读者对辐射效应和辐射剂量学有浓厚兴趣, 并希望得到比在一般的课本、手册和百科全书中能找到的关于固体剂量学的较肤浅、常常是过时的知识更多的知识, 本书是为他们编写的。虽然, 为了较恰当地叙述有关的实用内容, 而对各种探测系统的基本原理讨论得很简单, 但本书对于放射学家、公共卫生官员、实用保健物理学家和研究保健物理学家、医用物理学家、放射生物学家, 甚至对于某些固体物理学家都是有帮助的。

* 前言中的参考资料在第一章末的书目中给出。

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 历史	1
1.2 个人剂量测量和事故剂量测量	5
1.3 医用物理学, 环境监测及其它应用	18
参考文献	23
第二章 热释光	28
2.1 定义和历史	28
2.2 理论	30
2.3 磷光体	35
2.3.1 概述	35
2.3.2 氟化锂	37
2.3.2.1 磷光体的制备	38
2.3.2.2 发光曲线和机理	40
2.3.2.3 一般的剂量学特性	47
2.3.2.4 对中子、带电粒子和电子的响应	52
2.3.3 硼酸锂	56
2.3.4 氧化铍	58
2.3.5 氟化钙	60
2.3.6 硫酸钙	66
2.3.7 其它热释光磷光体	69
2.4 剂量计的设计	72
2.4.1 开放型磷光体, 剂量片和塑料化合物	72
2.4.2 密封式探测器	78
2.5 读数仪器	81
2.6 除了个人剂量测量以外的其它应用	91
参考文献	93
第三章 受激外逸电子发射	112
3.1 原理	112
3.1.1 历史	112
3.1.2 发射机理	113
3.1.3 外逸电子发射的动力学理论	114
3.1.4 光激发	117
3.2 材料及影响其外逸电子发射的一些因素	118
3.2.1 卤化物和硫酸盐	118
3.2.2 金属氧化物和复杂化合物	121
3.2.3 预热效应	123
3.2.4 预辐照效应	124
3.2.5 杂质和其它的一些因素	125
3.3 仪器	127

3.4 剂量计的设计和应用	131
参考文献	136
第四章 辐射光致发光	141
4.1 材料和机理	141
4.1.1 历史和定义	141
4.1.2 原理	142
4.1.3 成分和基本性质	144
4.2 剂量学性质	151
4.2.1 剂量范围和精度	151
4.2.2 传能线密度 (LET), 中子和带电粒子响应	154
4.3 剂量计和读数仪的设计及其应用	159
4.3.1 剂量计	159
4.3.2 读数仪	162
4.3.3 应用	164
参考文献	166
第五章 径迹蚀刻	172
5.1 机理	172
5.2 探测器和蚀刻剂	179
5.3 测值技术	187
5.4 裂变碎片记录的剂量学应用	192
5.5 α 粒子和反冲核记录的应用	199
参考文献	205
第六章 各种其它系统	215
6.1 快中子剂量测量用的硅二极管	215
6.2 照相乳胶	219
6.2.1 照相过程	220
6.2.1.1 乳胶的制备	220
6.2.1.2 照相的基本过程	222
6.2.1.3 胶片的处理过程	224
6.2.1.4 光密度	227
6.2.2 照相胶片的特性	229
6.2.2.1 存放时的稳定性	229
6.2.2.2 对光子的响应	234
6.2.2.3 对重带电粒子和中子的响应	243
6.2.2.4 电子剂量学	248
6.3 光学吸收引起的变化	250
6.3.1 无机玻璃的变化	251
6.3.2 有机物玻璃体、胶片和凝胶	254
6.4 其它固体探测器	260
参考文献	263

第一章 绪 论

1.1 历 史

早在中世纪,炼金术士就知道某些矿物(如萤石)在暗处加热时会出现短暂的发光。1663年10月28日,Robert Boyle向伦敦皇家学会报告,说他在他卧室的暗处将一枚宝石加热时观察到一种奇怪的“微光”。早在1895年,加热以释放所储存的、由辐射引起的发光(热释光)的基本物理方法就已用于探测电离辐射(Wiedemann and Schmidt, 1895)。因此,固体剂量测量法,即利用无机晶体或有机晶体、玻璃以及聚合物中辐射所引起的变化来对直接或间接的电离辐射进行累积测量的方法,决不是什么新课题。

1842年Mosser和1867年de St. Victor就报道了早期对电离辐射感光效应的观测,比Röntgen 1895年开始用感光板对电离辐射进行定量测量早得多。辐射光致发光原理,例如许多无机化合物在受到 β 和 γ 辐照之后经紫外光激发的发光谱的永久性改变,是在1912年(Godstein)发现的。外逸电子发射也是早在1902年(McLennan)就研究过,比首次提出把它作为一种剂量的可能方法(Kramer, 1957; Gourge and Hanle, 1957)早55年。唯有固体中核径迹蚀刻方法是1858年(Young)首次描述的,相对说来它是发展较晚的一个分支。

在发现X射线和放射性的头几十年间,辐射的研究工作和实际应用(主要是医学应用),由于缺乏足够简单、灵敏、精确的定量测量技术而受到很大局限。这是“铀片剂量”(定义为:使氰亚铂酸铀片的颜色从苹果绿变为棕红色所需的辐射量)或“皮肤红斑剂量”(此剂量使患处皮肤在三星期内有80%变红)时期。从三十年代到六十年代,电离室和照相胶片在累积辐射测量领域占主要地位。许多研究人员从1914年到1926年间开始研究X射线对于照相乳胶的作用,并用之于深度剂量的研究、确定等剂量图和散射辐射场等(一份简短的历史回顾,见Becker, 1966a)。1929年Eggert和Luft设计了第一个有不同厚度金属滤片的胶片佩章剂量计。次年,首次使用了由不同金属制成滤片的胶片剂量计(Bouwers and Van der Tuuk, 1930)。

胶片剂量计设计中的次要细节虽曾经历过多次变化,但其基本设计至今未变,这种型式的佩章剂量计有50多个国家约一百万放射性工作者佩带。其较重要的改进只是增加了一对适当的滤片以便对热中子进行粗略地测量(Dessauer and Liennox, 1944),以及使用细粒“核径迹”乳胶测量快中子剂量(Cheka, 1944)。

第二次世界大战以后,随着民用和军用放射源以及反应堆的增加,人们认识到,作为长期、大量使用的剂量计,胶片的适应能力颇受局限。主要原因是其能量依赖性强,在较高温度和湿度下其潜象衰退大,重复性差,对光、压力和某些化学物质这样一些干扰因素很敏感,储存期短,剂量范围小,灵敏度较差,并要求较复杂的暗室处理技术,而这会引入许多潜在的误差来源。

人们以极大的努力探索固体的新的、足够稳定而灵敏的物理效应,在四十年代末和五十年代初得到了初步成果。银激活磷酸盐玻璃的辐射光致发光(radiophotoluminescence, 英文缩写为RPL)剂量计研制成功(Weyl et al., 1949和Schulman et al., 1951),后来它成

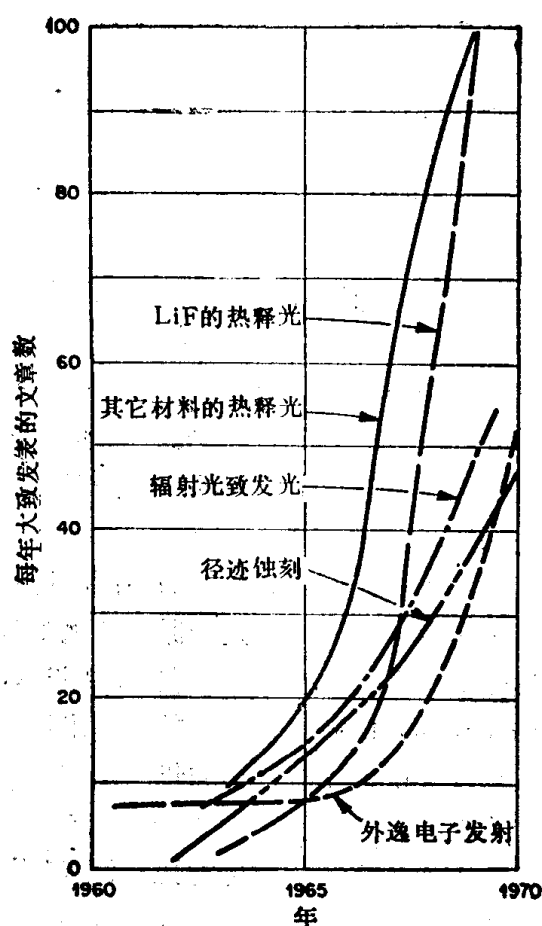


图1.1A 每年发表的关于 LiF 的热释光，其它材料的热释光、辐射光致发光、径迹蚀刻和外逸电子发射的文章的大致数目（根据Attix, Fleischer和Becker所提供的资料绘制）

了第一种大量生产的固体剂量测量系统（在美国海军中使用的数量为百余万只，Schulman et al., 1953）。欧洲和美国各方面的研究人员还研究了利用 LiF (Daniels 1950), CaSO_4 (Kossel et al., 1954) 和 CaF_2 (Ginther and Kirk, 1956) 等材料的热释光 (Thermoluminescence, 英文缩写为 TL) 测量剂量的可能性。

此后，在所有的有关方面，人们又做出了极大的努力，即探索新的探测原理、新的或经改进的探测器材料；更好地了解各种探测系统中辐射效应的机理和动力学；仔细地研究它们的辐射响应特性；研制更可靠、灵敏而简化的读数仪器，以及剂量学在各种不同领域中的应用，其中包括如测定地质年代、鉴别真假古代工艺品这样一些表面上看来无关的领域。

到了六十年代，包括大大改进的辐射光致发光玻璃和热释光磷光体在内的第二代材料和大量的各式各样的测量系统已有商品出售。在此期间，还开拓了外逸电子剂量测量法及径迹蚀刻法的新技术。所有这些领域的论文出版量还在迅速增加，每几年就增涨一倍(图 1.1A)。据估计，仅只个人剂量监测一项，在1975年以前，全部被监测的人员当中大约有一半将配备固体剂量计(Attix, 1972b)。

表 1.1 概括了一些曾考虑过或已用于剂量测量的固体中的辐射效应。其中那些特别重要

表1.1 一些与剂量学有关的固体的辐射效应

固体类别	辐射效应的类别			
	光学的	电学的	化学的	局部的结构损伤
无机晶体、矿物	变色或退色；光活性的变化；热释光；红外受激发光；辐射光致发光	光激外逸电子发射或热激外逸电子发射；（热激电流或热激电导）	卤化银的感光效应	沿重带电粒子径迹的优先蚀刻能力；核径迹照相；沿粒子径迹的银粒子沉积图案
半导体		中子产生的永久性电阻变化		
无机玻璃	变色或退色；热释光；辐射光致发光	光激外逸电子发射或热激外逸电子发射		沿重带电粒子径迹的优先蚀刻能力
有机晶体和聚合物	变色或退色；荧光衰变；（热释光，三重线激子湮灭的荧光变化）	电子自旋共振；（光激外逸电子发射；热激电流）	（体蚀刻速率的增涨）	沿核径迹的优先蚀刻能力；（沿核子径迹的辐射损伤的光学放大）

表1.2 一些固体剂量学研究小组

国 别	研 究 机 构	主 要 研 究 人 员	主要活动领域*	备 注
奥地利	维也纳, 国际原子能机构	Y. Nishiwaki W. Köhler	TL, RPL, 径迹蚀刻	
比利时	布鲁塞尔, MBLE	R. Schayes M. Lheureux	TL	大约从1962年到1967年
巴 西	圣保罗, 原子能研究所	S. Watanabe M. Mayhugh	TL	大约从1971年起
加拿大	巧克河, 加拿大原子能有限公司	W. G. Cross A. R. Jones	径迹蚀刻, TL	
丹 麦	罗斯基勒, 里索, 丹麦原子能委员会	V. Mejdahl L. Bötter-Jensen P. Christensen	TL	
英 国	伦敦, 哈默史密斯医院	J. F. Fowler D. K. Bewley	TL	
	牛津, 牛津大学考古研究室	M. Aitken S. J. Fleming	TL	
	苏格兰, 格拉斯哥, 国立放射防护局	E. W. Mason, G. S. Linsley	TL	
芬 兰	赫尔辛基, 辐射物理研究所	M. Toivonen	RPL	
法 国	丰特内罗萨, 法国原子能委员会剂量学部	H. François G. Portal D. Blanc	RPL, TL RPL	
	图卢兹大学	E. Piesch H. Kiefer R. Maushart	RPL 径迹蚀刻	大约从1961年起
西 德	卡尔斯鲁厄, 核子研究中心	W. Hanle A. Scharmann G. Burger D. F. Regulla J. Kramer G. Holzapfel	TL TSEE TL, RPL, TSEE 径迹蚀刻 TSEE, OSEE	大约从1956年起 大约从1967年起 大约从1956年起
	吉森大学物理研究所	K. Becker M. Heinzelman	RPL, 径迹蚀刻	
东 德	德累斯顿, 应用放射性同位素研究所	M. Frank W. Stolz	TL, 径迹蚀刻 薄膜退色	
匈牙利	德布勒森, 匈牙利科学院核子研究所	L. Medveczky G. Somogyi	径迹蚀刻	
印 度	孟买, 特朗贝 (巴巴) 原子能研究中心	C. M. Sunta	TL	
以色列	Yavne, Soreq 核 研究中心,	Y. Feige	TL, RPL	
意大利	罗马, 意大利核能全国委员会	G. Scarpa E. Rotondi	TL, TSEE	
日 本	川崎, 东芝研究实验所	R. Yokota	RPL	大约从1960年起
	神奈川县, 大日本涂料公司	H. Sakamoto	TL	
	大阪, 松下电气公司	T. Yamashita	TL	大约从1966年起
	千叶, 国立放射保健研究所物理学部	T. Nakajima	TL	
荷 兰	瓦赫宁根, 欧洲原子能联 营-意大利	K. J. Puite	TL, TSEE	
波 兰	克拉科夫, 核物理研究所	T. Niewiadomski	TL, TSEE	

续表

国 别	研 究 机 构	主 要 研 究 人 员	主 要 活 动 领 域*	备 注
苏 联	莫斯科, 国家核能利用委员会	V. V. Kuzmin A. I. Beskorskii	TL TSEE	
瑞 典	隆德大学放射物理学系	C. Carlsson	TL, TSEE	
瑞 士	日内瓦, 欧洲核研究组织	J. Dutrannois J. W. N. Tuyn	径迹蚀刻	
美 国	华盛顿, 国家标准局 华盛顿, 美国海军研究实验所	M. Ehrlich J. H. Schulman F. H. Attix R. J. Ginther V. H. Ritz	胶片, TL RPL, TL TSEE	从1948年起
	橡树岭, 国立橡树岭实验所保健物理部	J. S. Cheka K. Becker R. B. Gammage	径迹蚀刻, 胶片, RPL, TSEE, TL	从1944年起
	麦迪逊, 威斯康辛大学放射学和物理学系	D. R. Johnson J. R. Cameron N. Suntharalingam P. R. Moran D. W. Zimmerman	TL	从1960年起
	旧金山, 美国海军放射防护实验所	E. Tochilin N. Goldstein E. Benton	TL, 径迹蚀刻	大约从1964年到1968年
	Teledyne/Isotopes, Westwood, N. J.		TL	

*RPL=辐射光致发光

TL=热释光

TSEE=热激外逸电子发射

OSEE=光激外逸电子发射

表1.3 固体剂量计的主要应用领域

应 用	大致的剂量范围 (拉德)	主要的辐射类型	希望达到的最低精度 (±%)
个人剂量测量			
1. 常规监测	10^{-2} — 10^2	X, γ , β , n	10—20
2. 辐射事故	10 — 3×10^3	γ , n	~10
3. 军用、民防	10 — 3×10^3	γ , n(β)	~20
临床剂量测量	10 — 10^4	X, γ , e^- , n	~5
环境监测	10^{-4} —1	γ	5—10
放射生物学	10 — 10^6	X, γ , n	5—10
放射化学和工艺学 (食品处理、材料试验、辐射消毒等)	10^4 — $> 10^7$	X, γ , e	10
反应堆剂量测量	10^3 — 10^9	γ , n, (β)	3—5
	(10^{10} — 10^{19} 个中子/厘米 ²)		

的或已广泛应用的, 在表中以黑体字表示, 并将在本书中作较详细的讨论。而那些迄今较少关注的(虽然将来也许会给予较多的关注)以圆括弧表示。当然, 固体剂量计还有其它各种各样的分类方法。有人根据其灵敏度分类; 也有人根据其俘获现象把它们分为可逆的, 半可

逆的和不可逆的探测器；还可根据其测读原理进行分类（例如，由内在机理或“显影”过程使辐射效应“放大”从而进行单一事件的探测）。表1.2列出了一些先进的固体剂量学研究小组及其所研究的主要领域。表1.3是主要的应用领域。

1.2 个人剂量测量和事故剂量测量

一本论述剂量学的书，其目的并不是要恰当地论证辐射防护计划（个人监测是其重要部分之一）的必要性这样一个复杂的论题。人员配备剂量计，有法律上的、行政管理的、精神的和教育的原因。但是，毫无疑问，主要原因还是要估计佩带者所受的外照射量，而且要有助于将此照射量降至最低*。

表1.3所列出的剂量范围、所需精度、尤其是对某一特定用途如何选用最佳的探测器等问题，将在以后各章中较详细地讨论。虽然如此，仍存在若干与所有累积式辐射剂量计的使用有关的因素。作为一个例子，我们打算在此谈谈个人剂量学中的若干因素。但并非要在此对辐射物理学、医用物理学、辐射生物学和剂量学的理论基础再做一次概述，也不是要给辐射单位以及诸如光子能量依赖性、中子通量、自屏蔽、相对生物效应、氧效应和LET等这样一些常用的术语下定义。对这些问题还不熟悉的读者可参阅ICRU（国际辐射单位与测量委员会）和ICRP（国际放射防护委员会）近期发表的一些报告和论述此问题的一些书籍（Fitzgerald et al., 1967; Young, 1967; Morgan and Turner, 1967; Attix and Roesch, 1968; Johns and Cunningham, 1969; Cember, 1969; Fitzgerald, 1969—70; Hendee, 1970; Hurst and Turner, 1970; Nachtigall, 1971; Meredith and Massey, 1972; Attix, 1972a; Selman, 1972; United Nations, 1972; Willis and Handloser, 1973; 等等）。

若任一剂量计附着于某受照样品的表面（或引入到它的内部），充其量不过能提供该剂量计所处位置的剂量，而并非整个样品的剂量。在该照射物的空间剂量分布是比较复杂的时候，就需要使用多个剂量计或采用修正系数或这两种方法一起使用。作为一个特别重要的例子，我们考虑一个个人剂量计佩带于人体躯干前表面的情况。只有在很少的情况下（如一个人受到1—2兆电子伏 γ 辐射的均匀照射），才可以假定该剂量计的指示代表了该关键器官实际所受的剂量或全身平均（中线）剂量，其误差小于 $\pm 50\%$ （最近发表了一些关于体模中深度剂量计算问题的资料，见Johns et al., 1973; ICRU, 1973; Frigerio et al., 1972和1973; Frigerio and Coley, 1973）。但测量个人照射量的多数情况要复杂得多。影响所观察到的剂量和在生物学上有重要意义的骨髓、性腺和眼晶体等的剂量之间关系的两个主要因素，是吸收和积累，以及人体的反散射。

如图1.1B所见，若水箱中10厘米深处的吸收剂量为1拉德，则在其表面处的吸收剂量，对20千电子伏的X射线大约为1000拉德，对30千电子伏的X射线为30拉德，对100千电子伏的X射线为2拉德，对50兆电子伏的光子为170毫拉德。若以窄束几何条件取代宽束几何条件，或缩小源-皮距，其深度剂量分布也会改变（有关高能深度-剂量的详细资料，见Webster and Tsien, 1965）。当光子能量在几兆电子伏以上时，将在体内某一较大深度处观察

* 根据最近研究(Sagan, 1972)，1雷姆的全身照射可能使人的寿命缩短一天。这意味着每“人-雷姆”值30—250美元，取决于一个人的生命的平均金钱价值（目前估计在四十万美元左右变动）而有所不同。在美国，由反应堆引起的剂量不到500“人-雷姆”/年，而由诊断X射线造成的剂量大约为 2×10^7 “人-雷姆”/年。

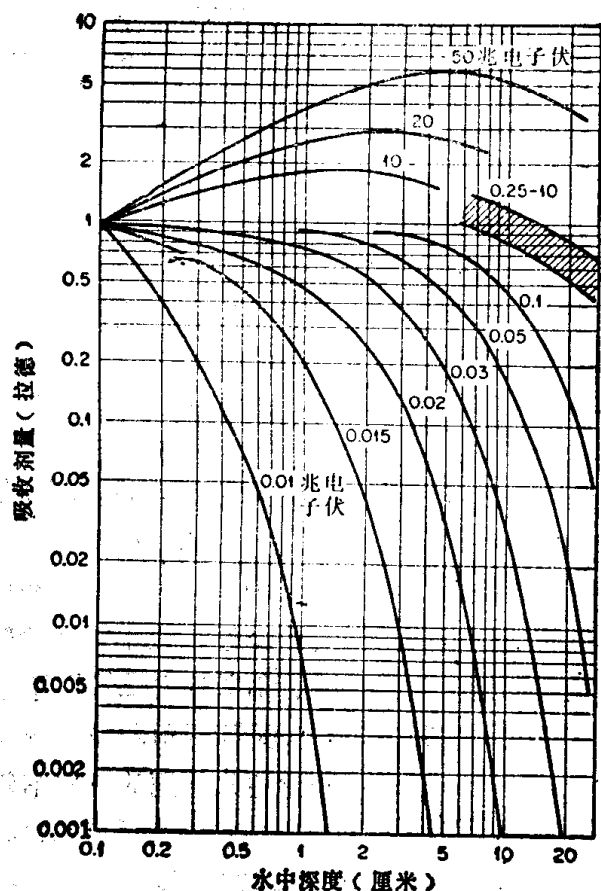


图1.1B 对于不同能量的光子, 经计算得到的相应于每单位表面剂量的吸收剂量与水中深度的关系 (引自Joffre, 1963)

到剂量的最大值(图1.2)。当光子能量约为35兆电子伏, 即相应于约70兆伏的X射线束时(源-皮距为1米), 最大电离发生在离体表10厘米深度处。而对于低能X射线, 在一薄层组织中就会观察到剂量有相当大的降低(图1.3)。

体表处的剂量比无人时同一位置的剂量要高50%(70千电子伏时), 这一数字与光子能量有关(图1.4)。此差值随探测器与人体间的距离的增大而减小, 但当该距离为5厘米时, 仍可能达到20%(图1.5)。

这些因素致使表面(即自由空气)剂量与器官剂量之间有很大的差别。如果人体以某一距离受到50千电子伏X射线源(相当于80千伏的管电压和中等过滤)的宽束正面照射, 且记录到表面剂量为1拉德, 则骨髓和卵巢的实际平均剂量将小于0.4拉德。若从背面照射, 则实际骨髓剂量将为5.5拉德, 卵巢剂量为3拉德, 睾丸剂量为2.5拉德(图1.6)。如果在没有人的情况下测自由空气中的照射量, 则50千电子伏的辐射1伦的照射就相当于从正面照射时睾丸剂量为1.3拉德, 对于各向同性的照射则为0.7拉德, 对于从背后来的照射则为0.25拉

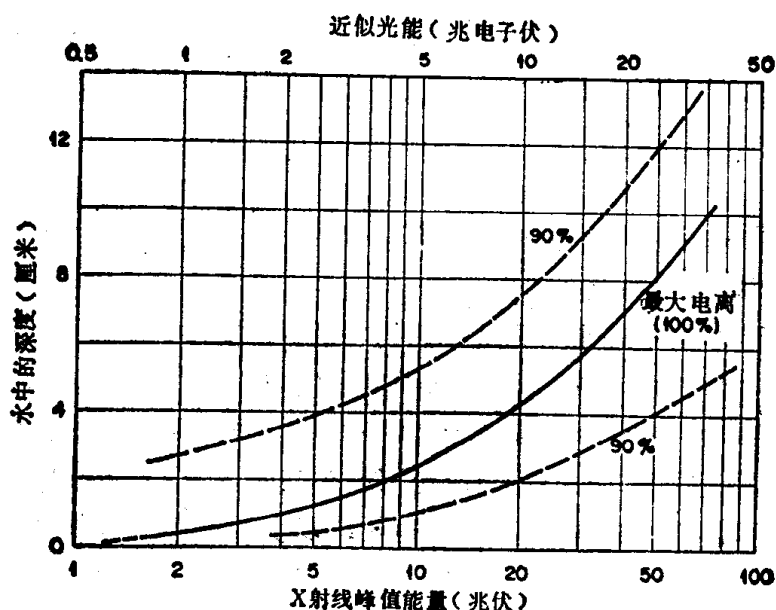


图1.2 估算的水体模中最大电离(100%的剂量)和90%电离位置与X射线的峰值电压(下面的座标)和大致的光子能量之间的关系 (引自Webster and Tsien, 1965)

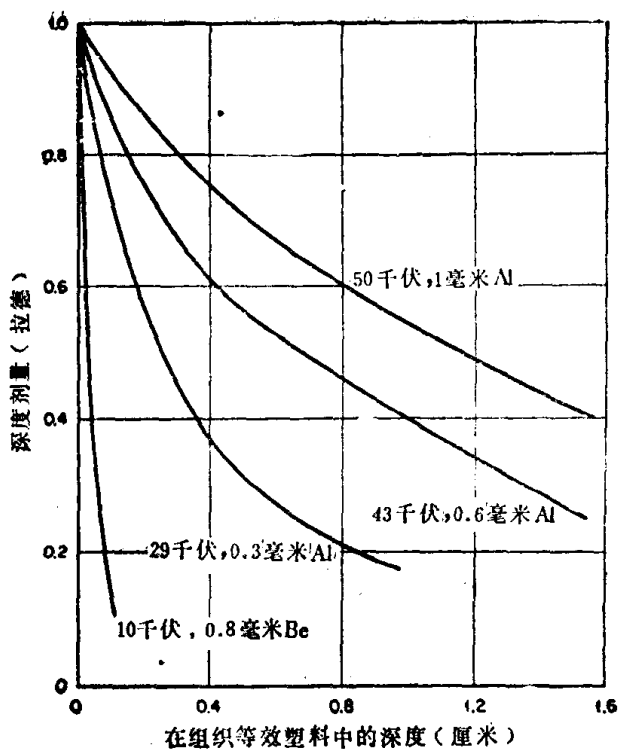


图1.3 当X射线电压为10—50千伏（有效光子能量大致为6—30千电子伏）时，所测得的组织等效塑料中的深度剂量分布（引自Markus, 1967）

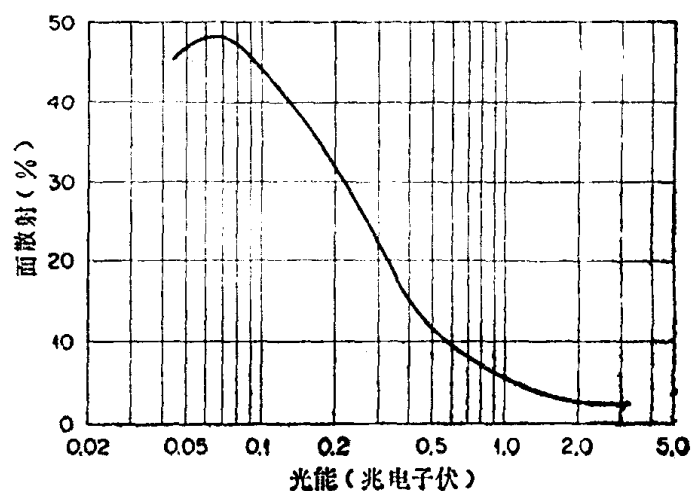


图1.4 以无体模时所测剂量的百分数表示的，在体模表面测得的反散射（引自Delafield, 1963）

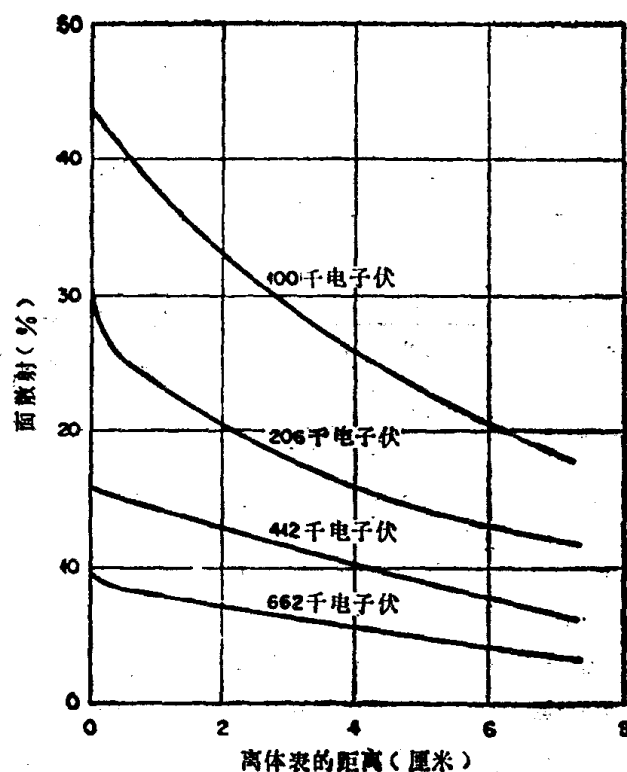


图1.5 当光子能量不同时，表面反散射与离体模距离的关系（引自Delafield, 1963）

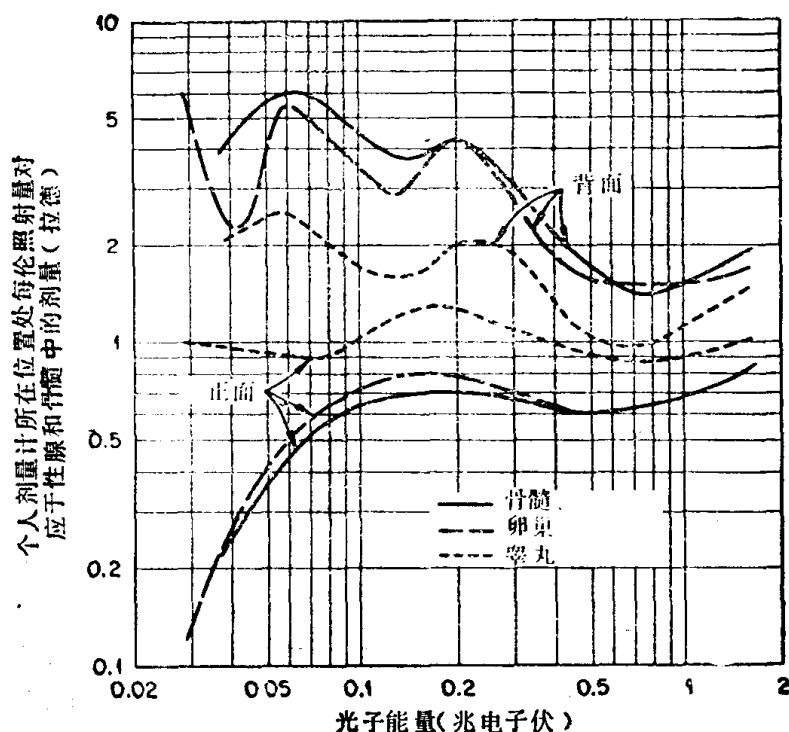


图1.6 当个人剂量计放在躯干前面, 在其所处位置的照射量为1伦时, 男性和女性生殖腺中和骨髓中的剂量(拉德)与光子能量的关系(引自Jones, 1966)

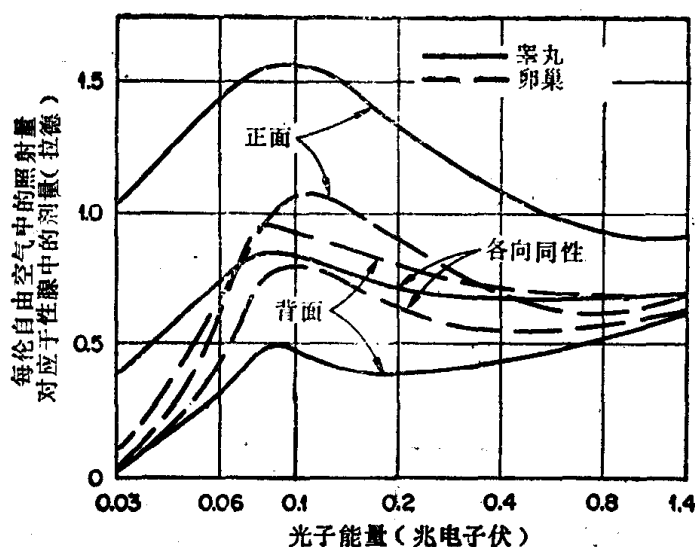


图1.7 当在正面照射、各向同性照射和背面照射时, 每伦自由空气中的照射量对应于人的睾丸和卵巢中的剂量(单位为拉德)与光子能量的关系(引自Jones, 1966)

1972a 和 1972b), 或者使用两个剂量计(一个佩戴在胸前, 另一个佩戴在背后), 以便更好地估计器官(多数为生殖腺)的有效剂量(图1.9B)。

对于中子, 情况也是复杂的。图1.10是在直径为20厘米、高为60厘米的圆柱形体模的中心部分, 以雷姆为单位的快中子剂量当量计算值(根据国际放射防护委员会所给的品质因数的数值), 与沿平行于宽束中子入射方向的直线深度的关系。考虑了由于(n, γ)反应而产生的剂量贡献。这些数值有可能用于估计自由场的(即表面的)中子剂量测量值与实际的器

德(图1.7)。对不同能量的单能光子外照射的计算结果(Bennett, 1970; Jones et al., 1973)与实验数据符合得很好。图1.8表示从侧面照射一侧胸部的不同高度时得到的典型深度剂量分布。

为了对其中的某些误差进行补偿, 已提出了对各种不同类型仪器的修正系数(图1.9A)。对于很高的事故辐射水平(以造血器官和肠粘膜作为关键器官), 其修正系数与可能有遗传意义的低剂量水平所需的修正系数不同。在一定范围内, 有可能设计出其能量依赖性与某特定关键器官的能量依赖性相一致的个人剂量计(Piesch,

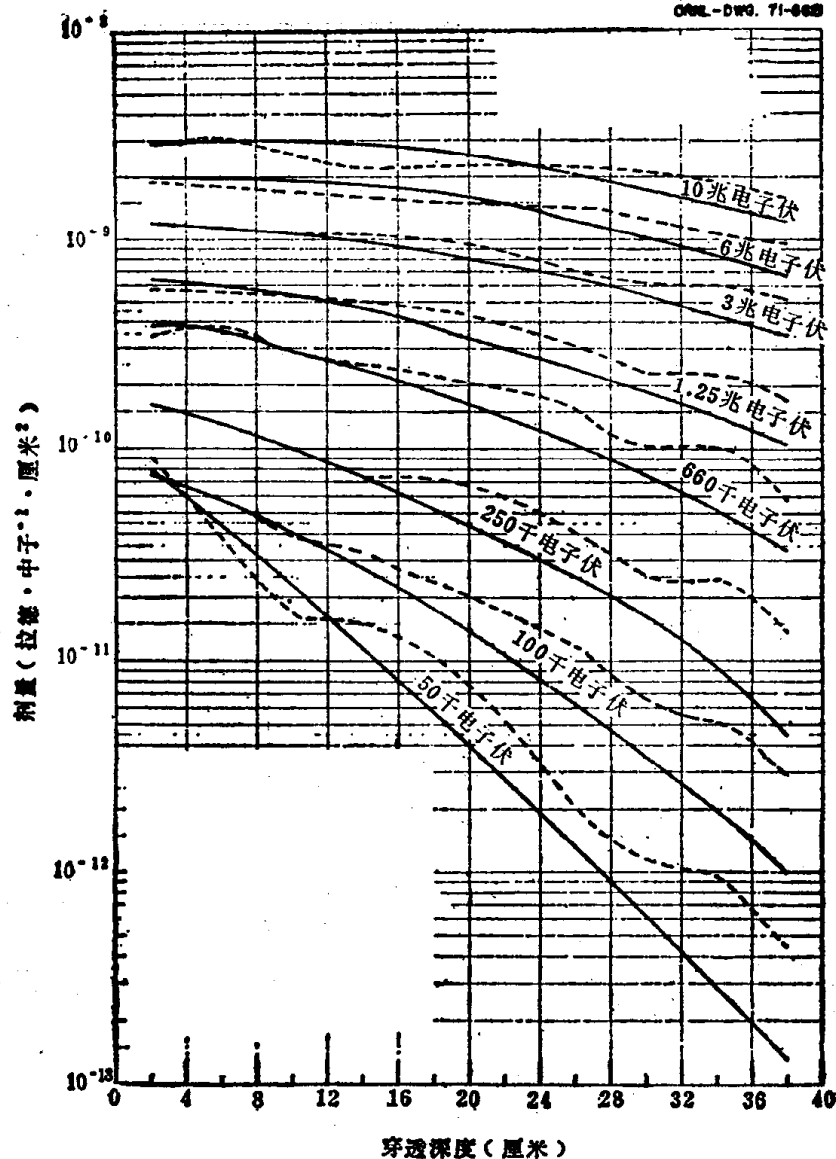


图1.8 当单能平行光束从侧面照射70公斤标准人的躯干时，经计算得到的骨盆剂量（实线）和肺中部剂量（虚线）（引自Jones, 1973）

官剂量或全身剂量之间的比率（Attix and Roesch, 1968 所编的书中 Auxier 等人所写的一章）。

由于种种原因，如若中子源到人体的距离减小，以窄束中子取代宽束中子，或当中子束不是垂直入射到体表时，这些数值可能产生偏离。作为一个例子，图1.11表示当中子入射角不同时，中子束通过厚聚乙烯板或水时，由于多次碰撞而造成的吸收剂量的降低。（关于更详细的数据和参考资料，见 NCRP Report No. 38 (1971) 以及论述中子屏蔽的最新文献）。当做了某些简化假设之后，对于法向入射的，各向同性入射的，和部分法向部分各向同性入射的宽束中子，人体中的最大吸收剂量与中子能量的关系可用一条“带”来表示，如图1.12所示。

关于个人监测站的组织工作，在此只能提出微不足道的一般性建议，下面这种对被监测单位中人员的分组方法看来是合理的：

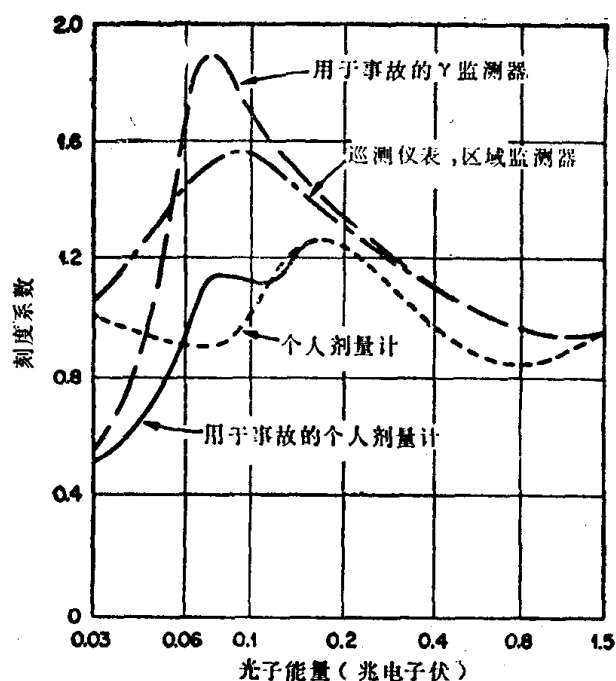


图1.9A 对于不同类型的剂量计, 和对于“常规”剂量水平以及“事故”剂量水平(分别以性腺和骨髓作为关键器官)所提出的刻度系数与光子能量的关系(引自Jones, 1966)

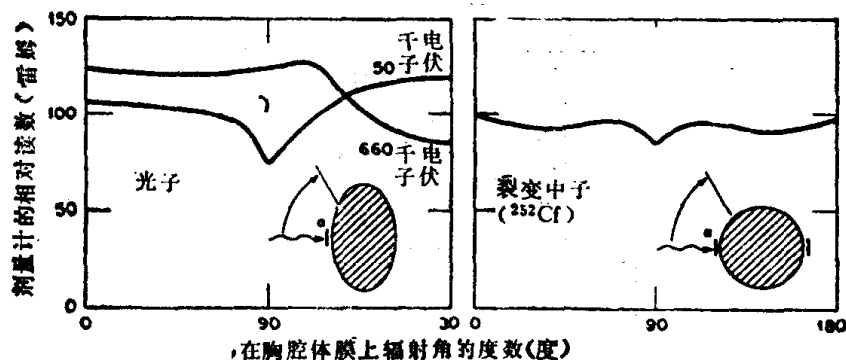


图1.9B 左图——用于测量光子的非对称屏蔽的磷酸盐玻璃剂量计(见图4.28)的方向性响应; 右图——用于测量裂变中子而戴在胸前和背后的一对硼屏蔽的 $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ 反照率剂量计的方向性响应(引自Picsch, 1972b)

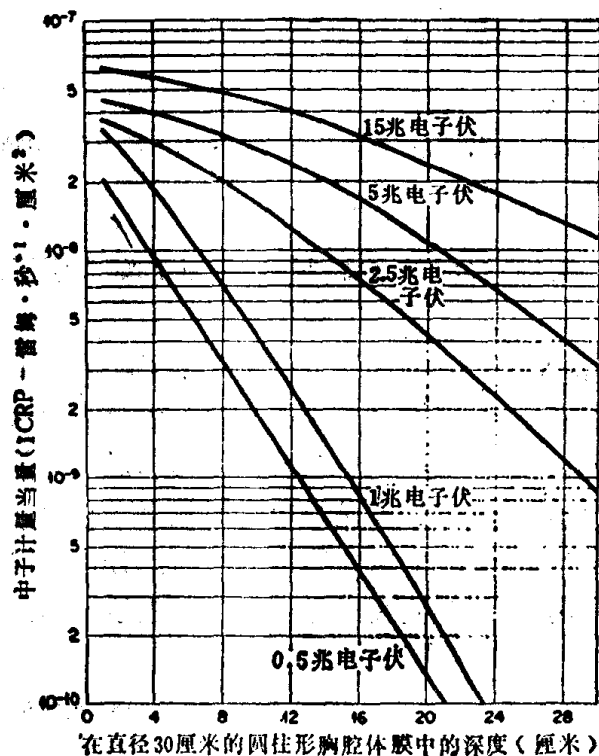


图1.10 对于不同能量的中子, 剂量当量的计算值与圆柱形胸腔体模中深度的关系(引自Attix and Roesch, 1968中Auxier等人所写的一章)