

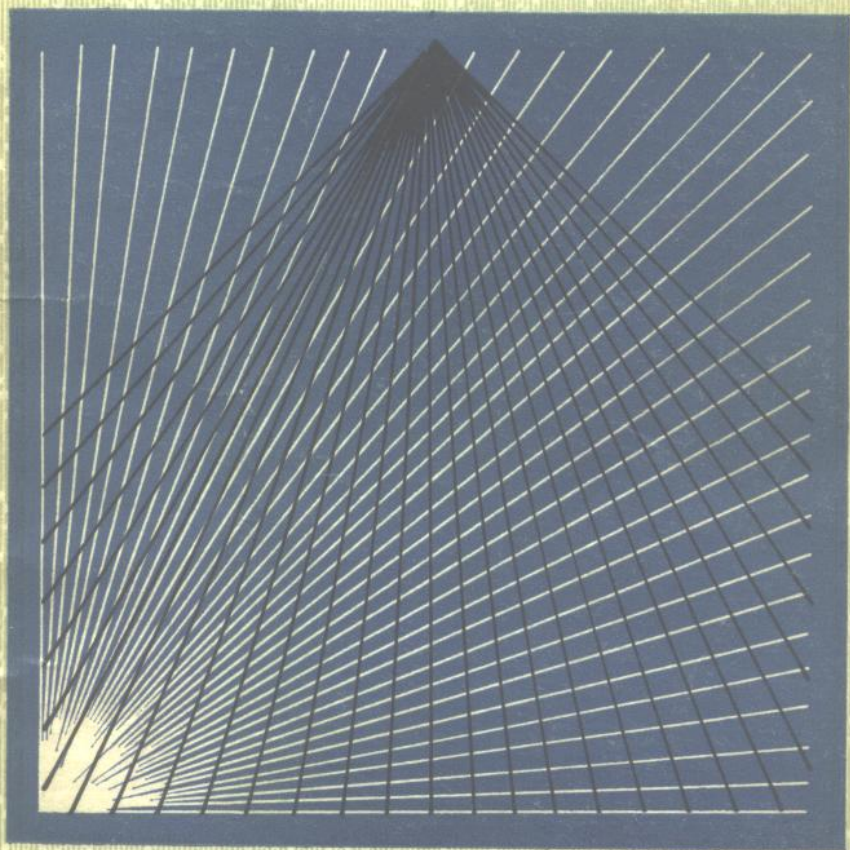
辐射剂量学

〔美〕

F.H.阿蒂克斯

W.C.罗奇

第二卷 仪器



原子能出版社

辐 射 剂 量 学

第二卷 仪 器

〔美〕 F. H. 阿蒂克斯
W. C. 罗 奇

陈常茂 施学勤 于耀明 译
张树强 胡二邦
沈子威 徐海超 校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

《辐射剂量学》，共有四卷：第一卷——基本原理；第二卷——仪器；第三卷——辐射源、辐射场、辐射测量和应用；第四卷——辐射剂量学的补充1。它较系统地论述了辐射剂量学的物理基础、测量仪器和在工业、医疗等领域的实际应用。

本卷主要论述用于辐射剂量测量用的各类仪器和方法：电离室；盖革-弥勒计数器和正比计数器；闪烁计数器；化学剂量计；固体累计剂量计；固体电导性探测器；照相乳胶；量热学等。

本书可供从事原子核物理、辐射防护、放射性同位素应用、放射医学和放射生物学的科技人员以及大专院校有关专业师生参考。

Radiation Dosimetry
Vol. II Instrumentation

FRANK H. ATTIX WILLIAM C. ROESCH
Academic Press, New York and London, 1966

辐 射 剂 量 学

第二卷 仪 器

〔美〕F. H. 阿蒂克斯

W. C. 罗 奇

陈常茂 施学勤 于耀明 译

张树强 胡二邦

沈子威 徐海超 校

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ ·印张15 $\frac{1}{16}$ ·字数 415 千字

1981年7月第一版·1981年7月第一次印刷

印数001—2100·统一书号：15175·268

定价：2.35 元

2671/14

序 言

1956年学术出版社出版了由 G.J.Hine博士和G. L. Brownell博士主编的《辐射剂量学》初版。当时出版该书的目的是为满足医学、工业和研究部门中辐射工作人员在开始应用辐射时了解辐射剂量学的新的、重要知识的需要。编者和作者们很成功地达到了这个目的，这一点可以从下述事实得到证明，即在这一领域中工作的大多数人们的书桌或书架上都有这样一本翻旧了的书。

该书出版十年来，无论在了解辐射剂量学的基础方面还是在建立新的和改进的测量方法方面，都已取得了许多进展。编写第二版再次搜集了当前这一领域中的大部分最新知识，以满足人们对综合性专著的需要。本书主要是作为辐射工作者的参考书而编写的，为此，书中附有许多有用的数据和曲线图表、公式和参考文献。另一方面，本书内容的叙述力求清楚，以至本书对刚刚踏入这一领域的人们也是有用的。

我们特别注意做到全书中所用剂量学术语的一致性。国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 是这一方面的最高权威，第一卷的第一章对这一方面作了广泛的讨论。看来，有些读者最初可能会对近来所建议的一些术语（例如，注量和比释动能）感到有点陌生，但他们很快就会熟悉起来。在本书中，分别用 gm、mg 和 kg 作为 gram、milligram 和 Kilogram 的缩写，这与现时 ICRU 和制定物理学术语的其他权威组织的建议不完全一致。他们喜欢用“g”来作为 gram 的缩写，显然，这与 mg 和 kg 更为一致。但是，学术出版社的长期方针是使 gram 的两个字母缩写最终得到普遍使用。

本书虽然称为第二版，但增添了许多内容。由于有其他的工作，Hine 博士和 Brownell 博士不能再次担任本书的主编工作，因此邀请 F. H. Attix (美国海军科学研究所)、W. C. Roesch (太平洋西北研究所) 和 E. Tochilin (美国海军放射防护研究

所)担任这一版的主编,而 Hine 博士则以编辑顾问的身分予以协助。原书为一卷本共十八章,现在扩充为三卷本共三十三章,内容包括许多新题材;作者们均为本学科方面的著名权威。

第一卷(共八章,由 Attix 和 Roesch 编)的标题是《基本原理》。这一卷论述剂量学的概念和单位;微观范围(例如单个细胞)中能量沉积的一些特殊问题;X 和 γ 射线、带电粒子及中子与物质的相互作用;辐射场的数学理论;电离以及空腔室理论。

第二卷(共八章,由 Attix 和 Roesch 编)的标题是《仪器》。本卷包括电离室的原理和设计;盖革-弥勒计数器和正比计数器、闪烁探测器、化学剂量计、积分型和电导型固体剂量计、胶片剂量计和量热计。

第三卷(共十七章,由 Attix 和 Tochilin 编)的标题是《辐射源、辐射场、辐射的测量和应用》。主要内容包括:X 射线和远距同位素 γ 射线剂量学; α 、 β 和 γ 的分立源和分布源;电子束;重带电粒子束;反应堆;中子和 n - γ 混合场;加速器和放射源产生的中子;核武器产生的初始和剩余电离辐射;天然的和人为的本底辐射;宇宙空间辐射;超高能辐射和不常见类型粒子;保健物理;放射生物学;放射治疗学;植入管和体腔疗法;“过渡区”(特别是在骨-组织的界面处)以及辐射加工。

为了减少各章之间的重复,放手采用了前后参照的方法,从而适当地压缩了整部书的篇幅。第三卷特别依赖于第二卷提供的对仪器的基本论述,它本身则把重点主要放在适合于不同类型辐射场的剂量测量方法和对这些辐射场及其辐射源的描述方面。

F. H. Attix

W. C. Roesch

E. Tochilin

1967 年 10 月

目 录

第九章 电离室	1
I. 引言	1
II. 空腔电离室的设计	2
A. 空腔的大小和形状	2
B. 壁材料和气体	3
C. 壁的厚度	6
D. 保护电极	9
E. 绝缘材料	9
III. 离子的收集	11
A. 饱和曲线	11
B. 初始复合和一般复合	12
C. 平行板电离室中的一般复合	14
D. 推广到圆柱形和球形几何形状	18
E. 脉冲辐射束中的一般复合	24
F. 电容器型电离室中的复合	29
G. 初始复合——Jaffé 理论	33
H. 电离室的有效体积	39
I. 栅式收集电极	40
J. 电离室的极性效应	41
K. 扩散所引起的离子的损失	44
IV. 电荷或电流的测量	45
A. 电容器型电离室中的电荷的测量	45
B. 电容器型电离室所使用的静电计	48
C. 电离室的引线	50
D. 电荷测量的衡消法	52
E. 电流比较器	53
V. 特殊类型的电离室	54
A. 自由空气电离室	55
B. 测量照射量的空腔电离室	59

C. 测量天然本底辐射的电离室·····	60
D. 具有保护电场的空腔电离室·····	61
E. 高气压电离室·····	62
F. 测量 X 或 γ 射线的电容器型电离室·····	64
G. 外推电离室·····	66
H. 测量快电子剂量的电离室·····	67
I. 适用于软 X 射线的电离室·····	68
J. 无壁电离室·····	69
K. 次级电子电离室·····	70
参考文献·····	72
第十章 盖革-弥勒计数器及正比计数器·····	81
I. 引言·····	81
II. 计数器·····	82
A. 放电·····	82
B. 盖革-弥勒计数器·····	89
C. 正比计数器·····	96
III. 操作细节·····	101
A. 辅助设备·····	101
B. 工作条件·····	104
C. 误差和修正·····	105
IV. γ 和 X 射线计数器·····	111
A. 现有的计数器类型·····	111
B. 灵敏度对光子能量的依赖性·····	112
C. 灵敏度对方向的依赖性·····	115
D. 改进响应均匀性的措施·····	118
E. 软 X 射线·····	119
V. β 射线计数器·····	120
VI. 中子计数器·····	127
A. 三氟化硼计数器·····	127
B. 反冲计数器·····	129
参考文献·····	134
第十一章 闪烁探测器·····	137

I. 闪烁探测器物理学	137
A. 闪烁体及其对辐射的响应	137
B. 闪烁探测	138
II. 闪烁材料和它们的光产额	140
A. 光输出	140
B. 有机晶体和粉末	143
C. 无机晶体和粉末	146
D. 液体闪烁体和塑料闪烁体	147
E. 气体闪烁体	150
F. 玻璃闪烁体	151
III. X射线和 γ 射线的闪烁探测器剂量测定方法	152
A. 每伦琴的响应对X射线量子能量的依赖关系	152
B. 多次散射	154
C. 次级电子平衡	156
D. 典型闪烁体的空气等效	158
E. 脉冲计数和 γ 射线剂量测定方法	163
F. 光电倍增管输出电流对照射量率或吸收剂量率的估算	164
IV. 带电粒子的闪烁探测器剂量测定方法	166
A. 电子和 β 粒子	166
B. 重带电粒子	168
C. 介子和极快粒子	171
V. 中子的闪烁探测器剂量测定方法	172
A. 快中子的剂量测定	172
B. 慢中子的剂量测定	178
参考文献	179
第十二章 化学剂量学	182
I. 引言	182
II. 基本原理	185
A. 射解反应机理	186
B. 化学剂量计的一般特性	191
C. 剂量计中吸收剂量的计算	197
III. 实验方法	198
A. 水的纯化	198

B. 玻璃器皿和照射池的处理·····	200
IV. 含水剂量计·····	203
A. 硫酸亚铁(弗里克剂量计)·····	203
B. 硫酸高铈·····	218
C. 硫酸亚铁-硫酸铜·····	223
D. 草酸·····	227
E. 水的分解·····	229
F. 氯化烃·····	232
G. 其他的含水剂量计·····	239
V. 不含水的剂量计·····	244
A. 一氧化二氮·····	244
B. 聚合物·····	247
VI. 脉冲辐射·····	248
A. 硫酸亚铁和硫酸高铈·····	249
B. 无空气的硫酸和水·····	251
C. 水合作用的电子·····	252
VII. 样品中吸收剂量的计算·····	254
A. 电磁辐射·····	255
B. 电子·····	257
参考文献·····	257
第十三章 固体累计剂量计·····	268
I. 引言·····	268
A. 概论·····	268
B. 固体剂量计的一般原理·····	270
II. 利用读数后中心保持稳定的情况测量剂量·····	275
A. 利用色彩变化的剂量计·····	275
B. 银激活磷酸盐玻璃中的辐射光致发光·····	286
C. 有机材料中发光的衰减·····	297
D. 丙氨酸中的电子自旋共振·····	297
III. 辐射造成的中心在测量后被破坏·····	298
A. 热致发光·····	298
B. 光致发光·····	311
IV. 结论·····	311

Ⅶ. 附录	312
参考文献	313
第十四章 固体电导性探测器	322
I. 引言	322
A. 绪论	322
B. 直流方法测量剂量率或照射量率	323
C. 持久的传导性变化	324
D. 用 p-n 结进行脉冲计数	324
II. 半导体结型探测器	324
A. 加反偏压的结型探测器	324
B. 用不加偏压的结作光电压或光电流的探测器件	331
C. 对光子能量的依赖关系	335
III. 利用在硅结中引起的长期损伤测量剂量	337
IV. 在绝缘物质中所产生的传导性	338
A. 理论	338
B. 硫化镉中的传导性	343
C. 塑料中和有机绝缘体中的传导性	350
V. 结论	351
参考文献	351
第十五章 照相乳胶剂量学	356
I. 基本的照相过程	356
A. 乳胶	357
B. 潜象的形成	359
C. 化学处理	359
II. 乳胶对辐射的定量响应	361
A. 基本概念和定义	361
B. 互易定律和衰退	363
C. 灵敏度与 LET 的关系	366
D. 密度与注量的关系	368
III. 电子剂量学	372
A. 电子的能量向乳胶的转移	372
B. 乳胶对电子的响应	377

IV. $\bar{X}$ 和 γ 射线剂量学	381
A. 光子的能量向乳胶的转移	381
B. 乳胶对 $\bar{X}$ 和 γ 射线的响应	383
V. 重带电粒子剂量学	391
A. 重带电粒子的能量向乳胶的转移	391
B. 乳胶对重带电粒子的响应	394
VI. 中子剂量学	397
A. 热中子的能量向乳胶的转移	397
B. 乳胶对热中子的响应	400
C. 快中子的能量向乳胶的转移	403
D. 乳胶对快中子的响应	404
VII. 刻度和标准化技术	409
A. 人为的假象和误差	409
B. 密度测量的标准化	410
C. 径迹分析的标准化	413
VIII. 仪器设备	414
A. 胶片	414
B. 密度计	420
C. 显微镜	421
IX. 应用	422
参考文献	423
第十六章 量热学	430
I. 引言	430
II. 量热学原理	433
A. 传热	433
B. 温度的测量	439
C. 量热法	448
III. 用量热法测定 $\bar{X}$ 或 γ 射线束的能流	466
A. 能流测量的意义和能流量热器的发展	466
B. 测量能流的典型仪器	467
C. 照射量的测量	469
D. 能流和照射量的测量结果撮要	470
IV. 用量热法测定吸收剂量	471

A. 吸收剂量测量的意义和问题	471
B. 用量热法测量吸收剂量时所使用的典型仪器	473
C. 其他类型的剂量量热器及其应用	476
V. 放射源强度的刻度	480
A. 绝热量热器	480
B. 辐射量热秤	482
参考文献	483

第九章 电 离 室

J. W. Boag

I. 引 言

测量剂量的电离方法是以空腔电离室的布喇格-格雷理论为基础的，这一理论已在第八章（第一卷）中充分地研究过。除了牵涉到对电离室的设计的要求条件以外，这里就不打算再讨论这个理论了。

简单的空腔电离室的基本特点如图 1 所示。空腔的材料、大小及形状的选择随电离室的用途（例如，是测量照射量还是测量吸收剂量）与所要测量的辐射的类型、强度及它在空间上和时间上的变化率而定。

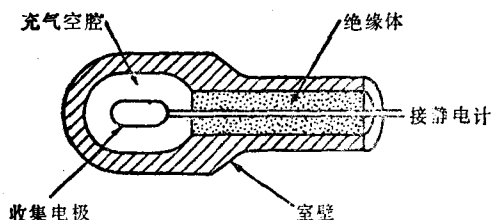


图 1 典型的空腔电离室的剖视图

首先讨论确定电离室的大小和所使用的材料的标准，其次讨论与收集和测量所产生的电离有关的问题，最后讨论典型的电离室的实际结构。在本章中我们只详细地描述测量X射线或电子的

剂量的电离室，但是，只要将“次级电子”改成“次级带电粒子”，并换掉其他诸如此类的词句，下节相当大部分的一般性讨论也能适用于快中子电离室 (Gray, 1944)。

II. 空腔电离室的设计

A. 空腔的大小和形状

如果要想用一个电离室来逐点地测量介质中的吸收剂量，那么这个电离室必须满足空腔理论（第八章）所依据的某些条件。一般来说，我们可以断言，这些条件规定了空腔电离室的大小的上限，特别是限制了气体空腔的大小，但在实际上，对下限却没有限制。后者由机械设计和为了得到适当的电离电流而作出的一些实际考虑来确定。不仅从空腔理论，而且从尽量减小由于引入电离室而造成对辐射场的干扰，也迫使我们把用以逐点地测量吸收剂量的电离室按实际情况做得尽可能地小。

另一方面，如果只想用这种电离室来监测低强度的辐射，或在与实际使用时的条件相类似的条件下，经过更标准的仪器对它进行校准，那么就可以更自由地选择其尺寸，因而可以把它做得稍微大一些，这样就容易解决测量电流的问题。因此，复合所造成的离子的损失就可能是确定其大小的上限的准则，或者至少是确定电极的间距的准则；这个问题将在第三节中加以讨论。

当在点辐射源附近进行测量时，在电离室壁中的初级辐射的强度可能有颇大的变化，因而在这种情形下，电离室的“有效中心”的位置是未知的。Gray (1931), Mayneord 和 Roberts (1937) 以及 G. Failla 和 Marinelli (1937)，讨论了在点源附近所使用的球形电离室的有效中心。在后两篇文献中，通过对电离室的整个体积进行积分而导出了平均距离的修正因数。Spiers (1941) 讨论了球形和圆柱形空腔，并求出了空腔表面的平均强度，因为大多

数次级粒子通常是从这个区域中发射出来的。他的结果与实验值符合得较好。所观测到的电离室中的电离量，稍大于与几何中心处的剂量率相对应的电离量。当源离电离室中心的距离是直径的两倍时，其差异小于2.5%。Clark 和 Brar (1954)、Attix 和 Ritz (1957) 以及 Kondo 和 Randolph (1963) 在这一方面又做了进一步的工作。后来的作者们推广并改进了 Spiers 所使用的理论方法，并使用一个直径为3毫米的 ^{60}Co 源，对线度为5—10厘米的典型的圆柱形和球形电离室进行了一系列的精密测量。实验与表面积分法之间的符合程度是非常满意的。Attix 和 Ritz (1957) 把他们所发现的实验与理论之间的微小偏差，主要归因于初级光子在电离室壁上的吸收。如果在气体中所产生的次级粒子的比例较大，则体积分法就更合适，但这种情形是罕见的。

布喇格·格雷理论对空腔的几何形状没有明确的限制。空腔的几何形状可以是球形的、圆柱形的、硬币形的或针形的。但是，在第八章所讨论的、作了改进的空腔理论中，必须对穿过空腔室的电子能谱假定一个任意的下限，通常使这一下限等于刚能穿过此空腔的电子的能量。显然，对于硬币形或针形电离室，这一能量限值不像密实的准球形体积那样能加以明确地确定，因而对于绝对测量来说，后者可能更好一些。但是，当辐射场的空间梯度大时，硬币形或针形的结构是有用的，因为很容易使这两种电离室的气体体积表面与等剂量率表面相切。

B. 壁材料和气体

材料的选择主要取决于所要测量的量。如果电离室是用来测量照射量（以伦琴为单位）的，那么一定要把它做成空气等效的，也就是说，室壁的有效原子序数必须与空气的有效原子序数严格地匹配。如果电离室是用来测量某一特定介质中的吸收剂量，那么室壁和气体都应当与这一介质相匹配。如果某一特殊类型的辐射在这两种介质中的吸收产生了相同的次级致电离粒子的

通量密度和能量分布，那么就可以说，对这种类型的辐射而言，这两种物质是匹配的 (Boag, 1958)。严格地说，只有当两种物质对初级辐射具有相同的吸收系数，并且对次级粒子还具有相同的原子阻止本领时，这两种物质才是真正匹配的。后面一种判断标准对 Z 的依赖性不如初级辐射的吸收系数对 Z 的依赖性那样密切。但是，对于相对论速度的粒子，阻止本领是随密度而变化的（密度效应或极化效应），甚至当室壁与气体的原子组成成分相同时，也应当考虑到这一效应（参阅第一卷第四章和第八章）。尽管如此，实际上除了使用同一种分子类型的气体和固体壁材料（例如乙烯与聚乙烯）外，我们不可能实现严格的匹配，而且就连这样的匹配也是很少有可能的。实际的考虑限制了这种选择。固体必须是坚固的、耐用的、有适当的导电性和不透气的（因而不受气体的化学腐蚀）；在有辐射存在时，气体必须是稳定的。H. H. Rossi 和 Failla (1956) 及 Shonka 等 (1958) 研制了与空气、组织及骨严格匹配的特殊塑料，并且配制了与这些塑料相匹配的稳定气体的混合物。对于所选择的特殊的混合气体来说，当然必须知道 W 值（亦即致电离粒子在气体中每形成一对离子对所消耗的平均能量）（参阅第一卷第七章）。

因为 X 射线的吸收截面以及带电粒子的阻止本领都是物质的原子特性，这一特性很少受到分子键的影响（布喇格定则，参阅第一卷第四章和第八章），因此，只要气体与室壁材料具有同等比例的同种原子就够了，而不必考虑它们的化学组合。甚至连这一点也很少能严格地做到，因而当已经作出了暂定的选择时，通常可凭经验加入少量原子序数高一些或低一些的物质，来改善匹配的程度。因此，当选择空气作为气体，并选择电木-石墨作为暂定的室壁材料时，业已发现，把原子序数更高的一些物质加入壁内，实际上就有利于实现空气等效。如图 33 (a) 和 (b) 所示的电容器型电离室，在铸模粉末中加入百分之几的二氧化钛，就可以使这种电离室对中等能量的 X 射线来说是完全空气等效的。此外，中心电极或外壁部分可以用不同的物质（例如铝）来制作，

并通过实验来调节受照射的面积，以便给出最佳的匹配。

对于像电木之类的合成物，有时引用它的有效原子序数 $\bar{Z}$ 。这类计算依赖于与起主要作用的吸收方式有关的知识，因为康普顿吸收、光电吸收及电子对生成，随 Z 的不同方式而变化。如果已经知道主要的吸收方式，那么，通过调节原子组成成分，使成分十分不同的两种混合物的 $\bar{Z}$ 的计算值相同，就可以使这两种混合物（按单位质量而言），对一定波长范围的X射线具有相同的能量吸收（Joyet等，1961）。但是，对于这两种混合物，次级电子的通量密度和能量分布一般是不相同的。由经验可知，这种类型的计算不能正确地告诉我们，应当如何修改任何一种暂定的空气等效混合物中的各种物质的比例；最佳的比例只能通过实验来获得。

实验上对电离室的空气等效性的最直接的检验，或更一般地说，对电离室的气体-壁等效性，是测定当辐射强度保持不变时每单位质量气体中的电离与气体压力的关系。气体的压力必须在足够高与足够低的值之间改变。足够高的压力，可以保证大多数电离是由气体中的电子所产生的；足够低的压力，可以保证大多数电离是由壁中的电子所产生的。如果电离室很小，那么所必需的气体压力的上限可能是若干个大气压。因此，在这样的压力下，正确的测量就必须考虑到离子的复合。Whyte (1954) 曾经证明，在非常有限的压力范围内每单位质量空气的电离值来检验室壁的空气等效性，是很不灵敏的。

当然，重要的是确定在所使用的各种压力时的实际的饱和电流，因此，这不仅涉及到对离子的种种复合的修正，而且还涉及到要采取预防措施，以避免发生碰撞电离；否则，就要有误差的补偿。在进行这样的检验时，不应当把压力减少到几厘米汞柱以下；如果出现这种情况，电极之间就可能发生迁移现象（Greening, 1954; Wilson, 1954）。

对于利用空腔电离室所进行的绝对测量，Whyte (1957) 提出了一个检验空气等效性的更灵敏的方法，但在应用这一方法来进