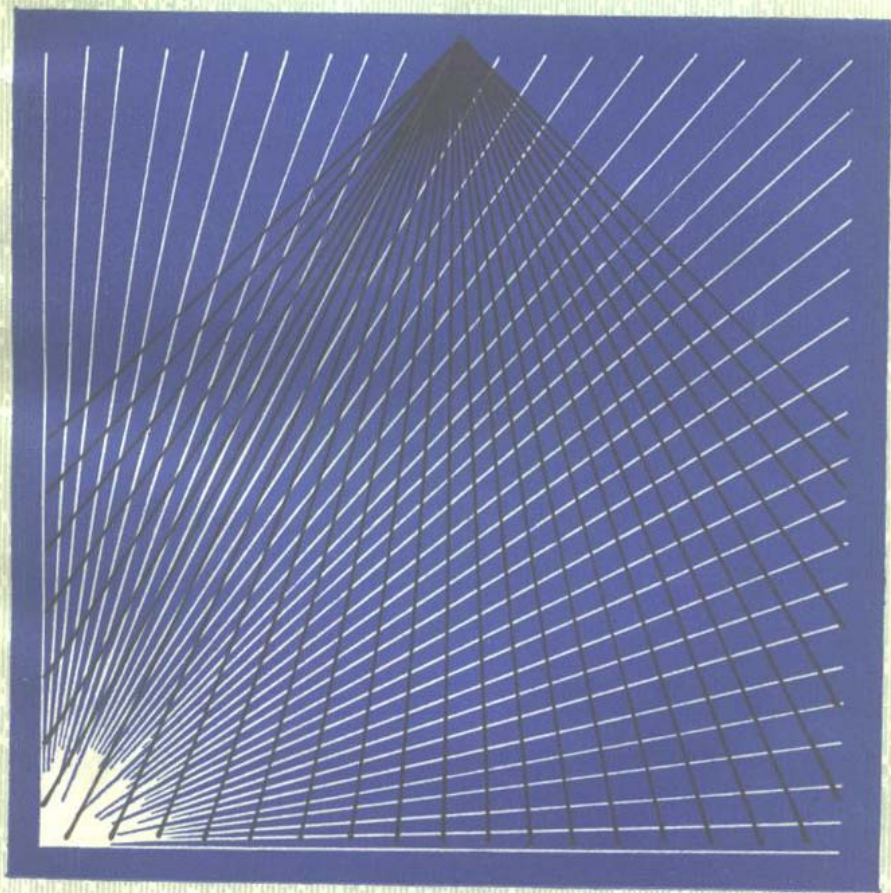


辐射剂量学

〔美〕

F.H.阿蒂克斯 主编

补编 第一卷



原子能出版社

辐 射 剂 量 学

补 编 第 一 卷

〔美〕 F.H. 阿蒂克斯 主编

施学勤 于耀明 等译

陈丽姝 张永兴 校

原 子 能 出 版 社

Topics in Radiation Dosimetry

Radiation Dosimetry

Supplement 1

Frank H. Attix

Academic Press, New York and London, 1972

辐射剂量学

补编第一卷

〔美〕F.H.阿蒂克斯 主编

施学勤 于耀明 等译

陈丽姝 张永兴 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $18^{3/4}$ ·字数496千字

1985年4月 第一版·1985年4月 第一次印刷

印数1—2500·统一书号: 15175·520

定价: 3.20元

内 容 简 介

本书是《辐射剂量学》的补编第一卷，主编仍是F.H.阿蒂克斯。主要论述：考古学测定年代中的热释光剂量学；低能X射线剂量学；测定中子场中剂量当量的慢化剂方法；核径迹蚀刻法；真空电离室；无壁正比计数器；微剂量学等内容。

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。

2-67/14

序 言

《辐射剂量学》补编第一卷是第二版三卷本《辐射剂量学》的补编，目的是介绍辐射剂量学的最新仪器和方法，详细论述某些特殊的剂量学问题，以及用最新的资料更新某些章节中已经过时的内容。为实现上述目的，增补的各卷将按照要求不定期出版，在以后出版的补编中，将要慎重地考虑关于剂量学和放射物理学领域里的一般题材和作者的建议。

本书的主要读者是辐射剂量学领域中那些需要获得实用而又有权权威性参考资料的人。当然，作者在写作时也尽力考虑到那些希望阅读专门论述特定课题的读者。每一章的内容取决于该课题本身的特点和作者的专长，在一定程度上还包括了一些综述性的材料。

《辐射剂量学》补编第一卷中有三章论述特殊的剂量学问题，即热释光剂量测量技术在测定古陶瓷年代中的应用，软X射线(<50千电子伏)的剂量测量方法以及中子场中剂量当量测定的慢化技术。其他四章主要论述剂量仪表，即核径迹的记录，真空电离室，无壁正比计数器以及银激活的磷酸盐玻璃辐射光致发光剂量计的最新论述。

最后，书中有一章是根据 δ 射线理论的观点论述微剂量学。

《辐射剂量学》补编各卷不象《辐射剂量学》第二版那样需要在各学科间取得平衡，也不想对某个较大的学科用几章的篇幅作完整介绍。只是当论题成为明显需要时才加以论述，而当各章积成一卷时即予出版。目的是使《辐射剂量学》第二版及其补编各卷一起构成本领域中最完整、最有用的参考资料。

编者对鲁思·马拉凯夫人在本书编写过程中认真而勤奋地做了许多秘书性工作表示深切的谢意。

F.H.阿蒂克斯 1972年9月

目 录

第一章 考古学测定年代中的热释光剂量学	1
I. 引言	1
A. 基本概念	1
B. 放射性基质中热释光灵敏颗粒的微剂量学	5
C. 剂量率的估算	10
D. 热释光的测量	15
II. 有关热释光的某些特性	18
A. 稳定性	18
B. 最小可探测剂量	26
C. 超线性和灵敏度的增长	31
D. 对电离密度的依赖性	39
E. 对剂量率的依赖性	40
III. 矿物颗粒的微剂量学: 实际实现	41
A. 一般考虑	41
B. 细颗粒方法	43
C. 夹杂物法	48
D. 测量结果的讨论	53
IV. 发光体剂量学	54
A. β 剂量率	54
B. γ 剂量率	60
C. 宇宙射线的剂量率	62
V. 前剂量剂量学: 石英的110℃峰	63
A. 热释光特性	63
B. 前剂量在测定年代方面的应用	69
C. 耐火的剂量测定方法	75
参考文献	77
第二章 径迹蚀刻在剂量学中的应用	84

I. 引言	84
II. 辐射损伤的机理	86
III. 潜在径迹的稳定性	90
IV. 蚀刻方法和探测器材料	93
V. 径迹的计数	105
VI. 裂片的记录	114
VII. α 粒子和反冲核的记录	128
VIII. 摘要和展望	137
参考文献	138
第三章 适用于辐射测量的真空室	152
I. 引言	152
II. 次级电子发射现象	155
A. 初级粒子	155
B. 次级电子的能量-角度分布	160
C. 能量分布	166
D. 角度分布	168
E. 次级电子的产额	170
III. Greening的真空室理论	174
A. 压力	174
B. 饱和特性	175
C. 实验检验	180
D. 灵敏度	183
IV. 用作剂量测量的真空室	184
A. 辐射测量	184
B. 灵敏度	185
C. X和 γ 射线剂量计	190
D. 电子剂量计	192
E. 中子剂量计	193
F. 自供电剂量计	196
V. 用作电子射束监测器的真空室	198
A. 射束监测器的构造	198
B. 饱和特性曲线	202
I	

C. 效率	203
Ⅴ. 用于脉冲测量的真空室	209
Ⅵ. 用作能谱分析仪的真空室	211
A. 理论	211
B. 外加电压对电子发射的干扰	213
C. 实验方法	216
D. 电子谱	218
Ⅶ. 用作分界面剂量测定的真空室	222
A. 理论	222
B. 实验方法	224
参考文献	225
第四章 微剂量学中的无壁探测器	235
I. 引言	235
Ⅰ. 设计准则	239
A. 结构材料的影响	239
B. 边界上的扩散	241
C. 体积的形状	243
Ⅱ. 运行状况的研究	245
A. 能量损失和电离	245
B. 电离的收集	247
C. 雪崩特性	248
D. 分辨能力	251
E. 结构和运行的详细情况	253
Ⅲ. 性能和运行检验	256
A. 分辨能力	257
B. 形状	258
C. 能量的刻度	259
Ⅳ. 无壁计数器的设计	259
A. 场限定的壁	260
B. 栅限定的壁	264
Ⅴ. 实验结果	267
A. 单能带电粒子射束	267

B. 壁效应	271
VI. 小结	273
参考文献	273
第五章 低能X射线剂量学	278
I. 引言	278
II. 能量注量的测量	279
A. 关于全吸收得不完全的修正	279
B. 全吸收量热法	281
C. 全吸收电离室	282
D. 硅位垒层器件的全吸收	283
E. 化学剂量计	284
F. 其他全吸收器件	285
III. X射线谱分布	285
A. 连续区	286
B. 特征辐射	297
C. 近似的谱分布	299
IV. 照射量的测量	300
A. 照射量标准	300
B. 空腔电离室	304
C. 测量照射量的其他类型电离室	305
D. 讨论	307
V. 吸收剂量的测定	308
A. 量热法	308
B. 电离方法	309
C. 硫酸亚铁剂量测量	317
D. 根据能量注量的测量确定吸收剂量	321
E. 固体方法	323
VI. 低能X射线测量中的一些特殊问题	328
A. 将吸收剂量分布从一种材料转到另一种材料	328
B. 射束监测器	329
C. 在剂量计中吸收剂量或吸收剂量率的变化	330
参考文献	330

第六章 粒子径迹的结构	338
I. 引言	338
II. 高能重离子的探测	341
A. 理论	341
B. 从 γ 射线到重离子	349
C. 电离能的空间分布和径迹的结构	350
D. 固体剂量计: 玻璃和LiF	363
E. 干燥的固体生物物质	365
F. 有机闪烁体	370
G. 硫酸亚铁(弗里克)剂量计	373
III. 细胞对重离子、快中子、阻止的 π 介子和混合辐射场的响应	375
A. 一般考虑	376
B. 细胞存活模型	378
C. 细胞对混合辐射环境的响应	395
D. 重离子放射疗法	404
参考文献	409
第七章 用慢化剂方法测定中子场中的剂量当量	413
I. 各种测量方法分类	413
II. 雷姆计数器方法	421
A. 单响应仪器	422
B. 多响应仪器	430
III. 监测器方法	442
A. 每单位注量的响应是平直的仪器	442
B. 任意响应的仪器	457
C. 换算系数的确定	462
IV. 中子能谱测量学	465
A. 一般概念	465
B. 计算程序	466
V. 仪器的刻度	473
A. 中子源	473
B. 中子场	475
VI. 结论	480

参考文献	481
第八章 辐射光致发光剂量测量方法的进展	493
I. 引言	493
II. 银激活的磷酸盐玻璃的辐射光致发光 (RPL) 中心和动力 学特性	494
III. 新型辐射光致发光材料	500
A. 银激活的磷酸盐玻璃	500
B. 银激活的硼酸锂玻璃	503
C. 氟化锂	505
IV. 能量补偿滤片	506
V. 新型测量技术	517
A. RPL测量	517
B. 应用于RPL玻璃上的其他探测方法	522
VI. 磷酸盐玻璃剂量计的实际应用	529
A. 在个人剂量常规监测方面的准确度	529
B. 长时间剂量累积	536
C. γ +中子混合辐射场的剂量测量	538
D. 高水平剂量的测量	543
E. 高温下照射的剂量测量	547
VII. 荧光强度微分测量的应用	547
A. X-辐射品质的测定	547
B. X和 γ 射线照射量的测量	549
C. 辐射入射的方向	553
VIII. 直接指示关键器官中吸收剂量的剂量计	559
IX. 小结	564
参考文献	567
附录	575

第一章 考古学测定年代中的 热释光剂量学

M. J. Aitken S. J. Fleming

I. 引 言

A. 基 本 概 念

1. 热释光测定年代

许多物质都可呈现热释光*现象, 不过这些物质的热释光强度也许比已研制出的或专为测量辐射剂量而选取的某些特殊发光体(例如激活的 LiF 和 CaSO_4)要弱好多数量级。物质中偶尔夹杂的某些矿物质的热释光性质, 可以成功地用于考古学中测定年代, 在某种程度上也可用于地质学。在考古学中基本是用陶器, 由于目前在这方面(特别是在剂量测量方面)发展得相当快, 因此本章仅限于讨论这方面的应用。热释光过程可以在电子(或空穴)陷阱和发光中心概念的基础上进行讨论。这种陷阱和发光中心是由晶格中的缺陷(例如空位和杂质原子)形成的。电离辐射照射时产生自由电子和空穴, 这些自由电子和空穴中有一些能扩散进陷阱和发光中心而不发生复合。陷阱可设想为一种“势阱”。有些陷阱是很深的(由缺陷的性质决定的), 除非在热释光测量中

* 关于热释光现象以及它在辐射剂量学方面的应用, 已由 J. F. Fowler 和 F. H. Attix 作了介绍, 请参阅《辐射剂量学》第二卷第十三章。另外, 还可参阅 J. R. Cameron, N. Suntharalingam 和 G. N. Kenney 著的《Thermoluminescence Dosimetry》(Univ. of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin, 1968) 一书。

有意做的那种情况以外，否则这些深陷阱中的电子能保持几千年。在热释光测量过程中，升高温度使电子获得的热激发能足以让它从陷阱中逸出。逸出的电子可以到达发光中心，并引起发射可见光（这种光的波长是发光中心的特性）。将光强度对温度作图得到的曲线就是通称的热释光发光曲线。陷阱越深，发射光子的温度就越高。在任何给定温度和加热速率情况下，光的强度正比于所吸收的电离辐射剂量。

用热释光方法确定的代是古人把生粘土烧制成陶器的年代。在烧制陶器的过程中，将矿物质成分（最主要的是石英）中先前储存的热释光信号释放出来了。烧成陶器以后则以某种速率重新累积潜在的热释光信号，累积速率正比于所受照射的剂量率。在典型情况上，这个速率是每年一拉德的剂量率。其主要部分是陶粘土器中的放射性杂质（即百万分之几的铀、钍，以及百分之几的钾）所引起的。大约总有效剂量率的20%是由陶器埋藏后土壤中的放射性杂质引起的。宇宙射线也有百分之几的贡献。

陶器烧制后，所经过的时间基本上可由下式确定：

$$\text{年代} = \frac{\text{累积的热释光量}}{(\text{每拉德产生的热释光量}) \times (\text{每年接受的拉德数})} \quad (1)$$

累积的热释光量就是把有关的陶器样品在实验室中第一次加热时测得的光强度。每拉德产生的热释光量称为样品的灵敏度，它是由测量已知吸收剂量引起的热释光量来确定的。以每年拉德数表示的吸收剂量率是由测量陶器和周围土壤中的放射性含量推算的。上述关系式中所指的热释光可以认为是与势能足够深的陷阱有关的光，在这种陷阱中的电荷在整个考古学时间内都不逸出。实际上，这意味着在读出（即获得发光曲线）期间观测的热释光应是在 350℃ 以上的温度范围内发射出的光。由于样品的热辐射（见第 I.B.2 节）使得实际的测量上限约为 450℃。

实际上，(1) 式太简单化了。如果要得到可靠的年代值，必

须考虑一些复杂的因素。特别是必须考虑陶器的非均质性这一点（在烧制的粘土基质中嵌着矿物的夹杂物），这就使热释光性质和局部的放射性强度（及其引起的剂量率）的空间分布都不均匀。另一些复杂因素是由于每拉德热释光响应与使陶器接受剂量的电离辐射的种类有关，例如每拉德 α 粒子引起的响应比 γ 或 β 射线引起的要小。在本章的后面几节中将对这些因素以及其它一些重要因素进行讨论。

2. 发展史

虽然人们研究热释光现象已有几百年了（S.R.Boyle(1663)记载了早期的研究工作），但在应用物理学中利用这种现象却是最近几十年的事情，这是从威斯康星大学F.丹尼尔（Daniels）的工作开始的。当然，丹尼尔的工作主要是在辐射剂量学中的应用，但他也提出了在地质学和考古学中测定年代的可能性（Daniels等，1953）。在早期，Kennedy和Knopff(1960)以及Grögler等(1960)曾做过这方面应用的一些尝试，以后另一些人也做过一些尝试。最初考虑把陷阱数目的增加（以热释光灵敏度的增加作为证据）作为测定年代的基础，但Tite和Waine(1962)指出，在考古学时间内由可能接受的总剂量引起晶体损伤而产生的新陷阱数目与固有陷阱数目相比是可以忽略的。（最近发现实际上可以利用灵敏度的变化作为测定年代的基础，这就是在第V节中将要简单叙述的所谓“前剂量”技术。）那时发现应用填充陷阱的概念而不用陷阱增加的概念之后，这种技术更有生命力。不过可获得的精确度通常不能好于 $\pm 20\%$ ，而且所测定的年代是相对的，需要用已知年代的类似陶器进行校正。有人企图在绝对的基础上计算年代，即仅仅利用实验室数据作计算，但得到的年代值却为实际值的 $1/5$ （Tite，1966），这表明对所涉及的物理过程很不了解。那时Fremlin和Srirath(1964)指出，上述情况多少是由于不均匀性引起的。随后，Ichikawa(1965)发现，只限于对陶器中选取的直径在0.1毫米左右的石英颗粒作热释光测量有

可能获得准确的绝对年代 (Fleming, 1966), 对这种颗粒的剂量测量既简单又易于定量处理。后来又从这种“夹杂物法测定年代的技术”发展出一种“细颗粒技术”(Zimmerman, 1967)。这种技术是利用线度范围在1—8微米的石英颗粒做热释光测量的。这种技术在实验上比较简单, 对常规应用来说人们倾向于应用它。在最初的试验中 (Aitken等, 1966), 用这种方法测定年代的准确度在 $\pm 15\%$ 和 $\pm 10\%$ 之间。后来由于提高准确度的工作得到加强, 使这两种技术都得到了进一步的改进 (Fleming, 1970; Zimmerman, 1971a)。

在撰写本稿期间, 主要有五个研究中心把热释光测定年代的技术应用于考古学, 它们是: 牛津大学考古研究室, 里索的丹麦原子能研究机构 (Mejdahl, 1969), 宾夕法尼亚大学考古应用科学中心 (Ralph和Han, 1966, 1969), 英国博物馆, 以及苏格兰古物博物馆。

3. 本章梗概

正如已经指出的, 热释光法测定年代实质上是辐射剂量测量问题。对这一点正确理解的程度决定着所得结果的精确度和绝对准确度。引言这一节的其余部分概括地叙述了陶器情况下的一些明显特征, 并指出了实验上要求的指标, 尤其是弱光的测量问题。在第Ⅰ节中叙述了有关陶器矿物的热释光特性以及其它一些特性, 根据这些特性在第Ⅲ节中对陶器微剂量学及其在测定年代中的应用作了更充分的讨论。

第Ⅳ节中叙述了适用于陶器的发光体剂量学, 即用灵敏的热释光发光体估算天然剂量率, 代替以往的应用放射性测量技术测定陶器和陶器周围土壤中的铀、钍、钾的含量。正如将会看到的, 这种联系起来的处理方法, 比把每个问题分开来进行讨论更为方便。

最后, 在第Ⅴ节中讨论了新近发展起来的测定陶器年代的“前剂量技术”。这种方法是利用石英110℃峰的热释光灵敏度的

变化作为剂量的量度，代替累积热释光量的测量。

B. 放射性基质中热释光灵敏颗粒的微剂量学

1. 剂量学情况

图1表明典型的古陶器热释光特性的不均匀性(引自 Fremlin 和 Srirath, 1964)。这是把一块接受了几百万拉德剂量的样品薄片加热时得到的热释光照片。照片中的亮点是嵌在粘土基质中的结晶体，其中有一些经鉴定为石英。人们已清楚地了解到，在古陶器中存在着这种矿物夹杂物。这种夹杂物可能存在于用来制造陶器的未经处理的粘土原料中，另外，陶器工人为了改进耐火性能，也许把这种夹杂物作为“耐火材料”以砂子的形式掺和到陶土中去。总之陶器中存在这种夹杂物，这种夹杂物的热释光灵敏度比嵌着它的烧过的粘土基质要高出一个数量级。



图1 一块古陶瓷薄片在人为地受到几百万拉德的剂量以后加热时发出的热释光

亮点代表结晶体，这些结晶体嵌在粘土中，它们的热释光灵敏度比粘土高得多。

Ichikawa(1965)用磁分离法获得了无磁结晶和带磁粘土基质的分离样品，并对这两种样品作了适当的热释光测量，也得到

了上述结论。由于陶器中的天然辐射剂量（见表 I）主要是由 α 粒子沉积的，这些 α 粒子的射程（20—50微米）比许多夹杂物的直径还要小；同时，夹杂物与基质相比，铀和钍的含量是未必相同，因此看来剂量学方面的情况可能变得复杂些，以致难以定量

表 I 埋入土壤中的陶器碎片的年辐射剂量^{a)}
(假设土壤和陶器都具有典型的放射性杂质浓度^{b)})

	α	β	γ
U	860	39	36
Th	855	26	63
K	0	86	26
总计	1715	151	125

a) 以毫拉德/年为单位。

b) U为3ppm, Th为12ppm, K为1%。

处理 (Fremlin和Srirath, 1964)。然而 Fleming (1966, 也可参见Fleming, 1970) 发现, 夹杂物的 α 放射性水平至少比粘土基质要低一个数量级(大家都知道, 对于石英来说铀和钍的含量确是很低的)。这就使情况变得很简单了。事实上我们有灵敏的热释光夹杂物 (它本身没有 α 放射性), 这些夹杂物嵌在粘土基质中, 而基质中的放射性强度又是均匀分布的。因此, 直径大于或相当于铀系和钍系的 α 粒子射程的那些夹杂物受到的平均剂量, 比直径小得多的颗粒受到的平均剂量显著地低。图 2 表示了含有铀系和钍系的两种基质平均 α 剂量与石英颗粒粒度的关系。

以下两种粒度的夹杂物的剂量测量方法是很简单的: (1) 细颗粒, 这种颗粒能接受全部 α 剂量, 而又没有显著的屏蔽效应; (2) 大颗粒, 在这种颗粒中, 平均 α 剂量足够小, 而对 β 剂量的减弱又不很显著。下面对这两种极端情况的年代测定体系进行更细致的讨论。

2. 细颗粒测定年代