

高等学校试用教材

核辐射测量与防护

王汝贍 卓韵裳 主编
刘桂林 主审

原子能出版社

高等学校试用教材

核辐射测量与防护

王汝瞻 卓韵裳 主编

刘桂林 主审

张延生 审校

责任编辑 崔朝晖

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32·印张 14.75·字数 331千字

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数1—1500

ISBN7-5022-0232-3

TL·87(课)定价: 3.50元

内 容 简 介

本书分八章，内容包括：电离辐射与物质的相互作用，核辐射探测器，核辐射测量方法，中子探测，核辐射测量的统计误差和数据处理，辐射防护的基本原则，外照射剂量计算、测量和防护，内照射的防护。

本书是作为高等学校工科原子能各专业核辐射测量与防护课程的教科书编写的，也可供在工业、农业、生物、医学等学科领域和部门从事核技术应用的有关工作人员参考。



本书由刘桂林主审，经原子核物理教材委员会核电子学与核辐射防护分教材委员会核辐射防护课程组于1987年8月由刘桂林、刘继才主持召开的审稿会审定，同意作为高等学校试用教材。

前 言

本书是在原核工业部教育司主持下,根据高等学校原子能专业教学大纲,结合多年教学实践编写的,是高等学校工科各专业本科核辐射测量与防护课程的教科书。本书也可供在地质、石油、冶金、生物、医学等学科领域和部门工作的科技人员参考。

本书内容分两大部分:

一、核辐射测量:第一章介绍了各种探测器的物理基础——射线与物质的相互作用。第二章主要讲述了常用的核辐射探测器(气体探测器、闪烁探测器和半导体探测器)的原理、性能及应用。第三章主要讲射线的计数和能量的测量方法。由于中子探测具有一定的特殊性,专门在第四章讨论。第五章介绍了核辐射测量的统计误差与数据处理。

二、电离辐射防护的基础知识:这一部分介绍了辐射防护的基本原则,外照射剂量的计算、测量和防护,内照射的防护。各章都附有一定数量的习题。

本书主要由清华大学工程物理系实验核物理及核辐射测量教研组负责编写,主编王汝贍、卓韵裳。各章起草或编写人:第一章卓韵裳,第二、五章文胜男,第三章邢振华,第四章刘竞成(上海交通大学),第六、七、八章张志康。其中第二、三、四、五章由主编作了部分修改,个别章节作了较大修改。

本书由刘桂林主审,张延生审校,崔朝晖任责任编辑。

本书编写过程中,衡阳工学院刘继才、田志恒,南京大学方杰,中国科技大学王明谦,北京大学李星洪,天津大学张秀儒,苏州医学院李士骏,中国原子能科学研究院姜希文、姜德熙等同志提出了许多宝贵的修改意见。王敬欣绘制了全部插图。编者特此向他们致谢。

由于编者水平有限且缺少编书经验,书中难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者 1988年5月

目 录

前言

第一章 电离辐射与物质的相互作用

第一节 重带电粒子与物质的相互作用	2
一、重带电粒子与核外电子的相互作用	3
二、原子阻止本领和比电离	7
三、重带电粒子在物质中的射程	11
四、能量歧离和角度歧离	16
第二节 快速电子与物质的相互作用	18
一、快速电子的电离损失	19
二、韧致辐射	20
三、快速电子在物质中的能量损失	22
四、多次散射和散射	24
五、快速电子的吸收和射程	26
第三节 γ 射线与物质的相互作用	34
一、光电效应	34
二、康普顿效应	40
三、电子对效应	47
四、物质对 γ 射线的吸收	49

习题

参考文献

第二章 核辐射探测器

第一节 引言	57
第二节 气体探测器	59
一、气体探测器工作状况概述	60
二、气体电离室	65
三、正比计数器	76
四、G-M计数管	80

五、气体探测器的主要指标 和应用	91
第三节 半导体探测器	91
一、半导体 性能 简介	92
二、PN 结型半 导体探测 器	94
三、锂漂移 (PIN结)型 探测器	103
四、高纯锗半导体探测器	107
五、半导体探测器的应用	114
第四节 闪烁探 测 器	114
一、概述	114
二、闪烁体	116
三、光电倍增管	127
四、闪烁计数器	137
第五节 核辐射探测器的一般 特 性	143
一、核辐射探测器的本征电流信号	143
二、核辐射探测器的运行工作方式	144
三、探测器的探测效率	147
四、电流运行方式下探测器的一般特性	148
五、脉冲运行方式时探测器的一般特性	152
第六节 其它类型探 测 器	157
一、切伦科夫探测器	158
二、累积型探测器	159

习题

参考文献

第三章 核辐射测量方法

第一节 放射性样品活度测量 概 述	166
一、放射性活度及其单位	166
二、影响活度测量的几个因 素	167
第二节 α 和 β 放射性样品活度的测量方法	172
一、小立体 角 法	172
二、 4π 计数 法	181
第三节 符合方法	186

一、符合的概念	186
二、符合方法的基本原理	187
三、 $4\pi\beta$ - γ 符合方法	190
第四节 低水平活度样品测量的一般问题	193
一、探测装置的优质因子	193
二、灵敏度	194
三、测量装置的判断限和可探测限	195
四、测量装置的本底	198
五、测量数据的稳定性	203
第五节 α 能谱与 β 最大能量的测定	207
一、能量测量任务的特点	207
二、 α 能谱的测定	209
三、 β 最大能量的测定	213
第六节 γ 射线能谱的测定	213
一、单能 γ 射线的能谱及其影响因素	214
二、标准核素 γ 谱及其在复杂 γ 谱解析中的应用	220
三、能量特征峰	225
四、 γ 能谱测量装置	231
五、计算机在复杂 γ 谱数据处理中的应用	236
第七节 半衰期的测定	243
一、中等半衰期的测定	244
二、短半衰期和长半衰期的测定	247
第八节 选用测量装置时的主要考虑因素	248
习题	
参考文献	
第四章 中子探测	
第一节 中子探测的基本方法	253
一、核反应法	254
二、核反冲法	256
三、核裂变法	257
四、活化法	259

第二节 中子探测器	260
一、气体探测器	260
二、闪烁探测器	264
三、堆用探测器	267
第三节 中子通量密度和中子源活度测量	268
一、中子计数法测量中子通量密度	268
二、伴随粒子法测量中子通量密度	270
三、活化法测量中子通量密度	170
四、中子源活度的测量	273
第四节 中子能谱的测量	274
一、核反应法	274
二、核反冲法	275
三、飞行时间法	277
四、晶体衍射法	278
习题	
参考文献	
第五章 辐射测量的统计误差和数据处理	
第一节 关于测量误差的一些基本概念	280
第二节 核辐射测量的统计误差	283
一、产生统计误差的原因	283
二、统计分布规律	285
三、统计误差的计算和表示	293
第三节 测量数据的误差分析	300
一、标准误差检查	300
二、统计检验	302
三、可疑数据的舍弃	311
第四节 最小二乘法	317
一、最小二乘原理	317
二、直线方程参数的最小二乘估计	321
三、非等精度测量中直线方程参数的最小二乘估计	325
习题	

参考文献

第六章 辐射防护的基本原则

第一节 辐射与人类的密切关系	335
一、天然本底照射	335
二、人工辐射源的本底照射	337
三、辐射在国民经济和社会发展中的广泛应用	338
第二节 辐射生物效应与辐射防护的目的	340
一、辐射对人体危害的资料来源	340
二、辐射效应分类	341
三、辐射防护的目的	345
第三节 辐射防护中常用的量和术语	346
一、辐射在介质中的能量沉积、授与能	346
二、吸收剂量 D 和吸收剂量率 $\dot{D}$	347
三、辐射品质因数 Q	348
四、剂量当量 H 和剂量当量率 $\dot{H}$	350
五、有效剂量当量 H_E , 危险度 γ	350
六、待积剂量当量 H_{50}	352
七、集体剂量当量 S	352
第四节 辐射防护三原则	353
一、辐射实践的正当化原则	353
二、辐射防护的最优化原则	353
三、个人剂量的限制	354
第五节 剂量当量限值	354
一、《放射卫生防护基本标准》中规定的剂量当量限值	354
二、剂量当量限值的安全评价	356

习题

参考文献

第七章 外照射剂量计算、测量和防护

第一节 剂量计算和屏蔽计算中若干常用量与概念	361
一、粒子注量 ϕ 和注量率 $\dot{\phi}$	361
二、比释动能 K	362

三、照射量 X 和照射量率 $\dot{X}$ ·····	363
四、次级带电粒子平衡和带电粒子平衡条件·····	364
五、质能转移系数 $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 和质能吸收系数 $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ ·····	366
第二节 外照射防护的基本方法·····	370
一、时间防护·····	370
二、距离防护·····	370
三、屏蔽·····	371
第三节 γ 射线剂量计算和屏蔽·····	371
一、点状 γ 源的照射量率 $\dot{X}$ 和空气中比释动能计算·····	371
二、 γ 射线剂量当量与照射量的关系·····	376
三、窄束 γ 辐射穿透介质时的减弱规律·····	379
四、宽束 γ 射线在物质中减弱规律, 积累因子·····	382
五、确定 γ 屏蔽层厚度的简单方法·····	384
六、 γ 射线的屏蔽材料·····	385
第四节 中子的剂量计算和屏蔽·····	387
一、中子的剂量计算·····	387
二、中子的屏蔽·····	388
第五节 β 射线的剂量计算和防护·····	393
一、 β 射线的剂量计算·····	393
二、 β 射线的韧致辐射的剂量·····	394
三、 β 射线的屏蔽·····	396
第六节 外照射剂量测量·····	396
一、 γ 和 X 射线的剂量测量·····	396
二、中子剂量测量·····	401
三、 β 射线剂量测量, 外推电离室·····	406
四、外照射常规监测·····	408

习题

参考文献

第八章 内照射的防护

第一节 内照射及其次级限值 and 导出限值·····	415
-----------------------------	-----

VIII

一、内照射	415
二、内照射的次级限值标准——年摄入量限值(ALI)	419
三、导出限值	422
第二节 内照射防护的基本方法	423
一、放射性核素的毒性分类和工作场所分级	424
二、开放型工作场所的分区原则和其内部建筑要求	426
三、通风柜和手套箱	427
四、个人防护	428
第三节 与内照射防护有关的安全监测	429
一、表面污染监测	429
二、工作场所空气中放射性气溶胶浓度监测	431

习题

参考文献

附表

附表1 正态概率积分表	435
附表2 泊松分布表	436
附表3 t分布表	437
附表4 χ^2 分布表	438
附表5 F分布表	440
附表6-1 几种物质(水、空气、混凝土、NaI)的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	442
附表6-2 ^1_1H 、 $^{12}_6\text{C}$ 、 $^{14}_7\text{N}$ 的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	443
附表6-3 $^{16}_8\text{O}$ 、 $^{23}_{11}\text{Na}$ 、 $^{24}_{12}\text{Mg}$ 、 $^{27}_{13}\text{Al}$ 的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	444
附表6-4 $^{28}_{14}\text{Si}$ 、 $^{31}_{15}\text{P}$ 、 $^{32}_{16}\text{S}$ 、 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	445
附表6-5 $^{39}_{19}\text{K}$ 、 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 、 $^{56}_{26}\text{Fe}$ 、 $^{64}_{29}\text{Cu}$ 的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	446
附表6-6 $^{119}_{50}\text{Sn}$ 、 $^{208}_{82}\text{Pb}$ 、 $^{238}_{92}\text{U}$ 的 μ/ρ 、 μ_{en}/ρ 和 μ_{tr}/ρ	447
附表7 各向同性点源照射量率积累因子 B_r	449
附表8-1 水的减弱倍数 K (对各向同性 γ 点源)	453
附表8-2 混凝土的减弱倍数 K (对各向同性 γ 点源)	455
附表8-3 铁的减弱倍数 K (对各向同性 γ 点源)	457
附表8-4 铅的减弱倍数 K (对各向同性 γ 点源)	459

第一章 电离辐射与物质的相互作用

在核工程和核技术领域内所涉及到的电离辐射通常是指正负电子、质子、 α 粒子、中子、 γ 射线，有时把X射线也包括在内，而且这些辐射的能量是在几keV到十几MeV的范围内。随着核科学的不断发展，核技术的应用范围也在不断扩大，在有些资料中讲述电离辐射与物质相互作用时也涉及到重离子和裂变碎片。表1-1介绍了一些电离辐射的特性。

表1-1 常见电离辐射的特性

辐射类型	常用符号	电 荷 (相对值)	静止质量 (u)	静止质量的 等效能量 (MeV)	平均寿命 (s)
中子	n	0	1.008982	939.507	1.073×10^3
质子	p	1	1.007593	938.213	稳定
氘核	d	1	2.014187	1,875.50	稳定
α 粒子	α	2	4.002777	3,727.16	稳定
正电子 (β^+ 粒子)	β^+, e^+	1	0.000549	0.510976	稳定
电子 (β^- 粒子)	β^-, e^-	-1	0.000549	0.510976	稳定
γ	γ	0	0	0	稳定
X	X	0	0	0	稳定

电离辐射可分为带电的和不带电的两类。

带电的电离辐射（如电子、正电子、质子、 α 粒子等），在穿透物质时主要通过库仑力发生如下 4 种相互作用：

- （1）与核外电子的非弹性碰撞，即电离和激发；

(2) 与核外电子的弹性碰撞;

(3) 与原子核的非弹性碰撞, 发射韧致辐射或其它类型的辐射 (切伦科夫光);

(4) 与原子核的弹性碰撞。

不带电的电离辐射 (如中子和 γ 光子) 在与物质相互作用时, 可能产生出电子、质子等带电粒子。而这些电子和质子等与物质相互作用的规律就与带电的电离辐射相同了。因此本章先介绍带电的电离辐射与物质的相互作用。而在讲述中子和 γ 辐射与物质的相互作用时, 只介绍由它们穿透物质时产生带电粒子的作用过程以及中子、 γ 辐射本身的衰减规律。

研究电离辐射与物质的相互作用有以下几方面的意义:

(1) 可以详细了解原子和原子核的结构、射线本身的性质和射线发射的过程;

(2) 它是研制和了解各种类型辐射探测器的物理基础;

(3) 它是了解和进行辐射防护以求保证人体和环境安全的基础;

(4) 它是在工农业、医疗以及在各学科中开展辐射应用研究工作的理论基础。

第一节 重带电粒子与物质的相互作用

根据带电的电离辐射静止质量的差别可分为重带电粒子 (如 α 粒子、质子等) 和轻带电粒子 (电子和正电子)。

在核工程技术领域内所涉及到的重带电粒子, 其能量绝大部分在 10keV 到 10MeV 之间。在此能量范围内的重带电粒子, 穿透物质时, 在气体内最多穿透几个 cm , 在液体和固体内最多穿透几十 μm 的深度后全部停滞在该物质内。与这深度相应的经历时间, 在气体内约为 10^{-9}s , 在液体和固体内约为 10^{-12} 到 10^{-11}s 量级。在这段历程内, 1MeV 的重带电粒子大约经历 10^4 次或更多次的碰撞, 大约使 10^4 或更多个原子电离。尽管经受如此多次的碰

撞，重带电粒子本身偏离原来运动方向很小，因此通常可以认为重带电粒子在物质中的路径是直线。

一、重带电粒子与核外电子的相互作用

重带电粒子可与核外电子发生弹性碰撞，但它只在其能量低于100eV时有意义，所以一般只考虑带电粒子与核外电子的非弹性碰撞。

重带电粒子与核外电子发生非弹性碰撞的结果是使原子发生电离或激发。电离就是核外电子通过非弹性碰撞得到足够的能量后克服了原子核的束缚而脱离出来，使原子成为一个自由电子和一个正离子。这二者的总称叫离子对。如果非弹性碰撞使核外电子得到的能量不够克服原子核的束缚而脱离出来，仅使电子从能量低的壳层跃到能量较高的壳层，这就是原子的激发。处于激发态的原子是不稳定的，它将自发地跳回基态，这个过程叫退激。退激时，多余的能量常以光子形式释放出来。

无论是电离或是激发都导致重带电粒子损失动能，速度逐渐减慢直到最后停止。使一个原子电离所需要的平均能量称为平均电离能。平均电离能要比原子的电离电位大，这是因为它包括了在带电粒子穿过物质时由于激发作用而损失了的能量。在同一种类的气体中，一种带电粒子的平均电离能与它的动能无关。不同种类的物质平均电离能虽不同，但其数值变化不大。例如 α 粒子在空气中的平均电离能为34.98eV，在氩气中的平均电离能为26.3eV（参看第二章表2-1）。

把带电粒子使物质原子电离或激发而损失的能量称为电离能量损失。带电粒子在物质中单位路程上的电离损失称为电离能量损失率，常用符号 $(-dE/dx)_{ion}$ 表示。脚标“ion”表示是由入射粒子使原子电离或激发所引起的能量损失。 $(-dE/dx)_{ion}$ 也反映了物质原子的电子对入射带电粒子的阻止能力，所以又称为电子阻止本领。

从理论上可以推导出 $(-dE/dx)_{i.o.}$ 的表达式。在相对论情况下，

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{i.o.} = & \frac{4\pi Z^2 e^4}{m_e v^2} NZ \left[\ln \frac{2m_e v^2}{\bar{I}} - \frac{C_K}{Z} \right. \\ & \left. - \ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中，

z : 重带电粒子的电荷数;

e : 一个电子的电量, 等于 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$;

Z : 物质原子的原子序数;

N : 物质在单位体积中包含的原子数目;

C : 光速;

v : 重带电粒子的速度;

m_e : 电子的静止质量;

$\bar{I}$: 物质原子中电子的平均等效电离电位。 $\bar{I}$ 的较好的近似表示式是

$$\bar{I} = 9.1Z(1 + 1.9Z^{2/3}) \quad (\text{以eV为单位}) \quad (1-2)$$

C_K : 修正系数, 数值约为 1, 它是考虑到重带电粒子能量损耗到较低数值时, 就不能使 K 层电子电离, 能量再进一步降低就不能使 L 层电子电离的影响。以质子穿透铝材为例, 铝的 K 层电子速度约为 $2.8 \times 10^7 \text{m/s}$, 为使质子达到这一速度的能量约为 4MeV。

从 (1-1) 式可以看出, $\ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$ 和 v^2/c^2 两项是在 v 接近于 c 时才起作用, 当 $v/c \ll 1$ 时这两项的值趋近于零。它们是考虑相对论效应而引入的。

由 (1-1) 式可以得到如下几个结论:

1. $(-dE/dx)_{i.o.}$ 与重带电粒子电荷数 z 的平方成正比。如果 α 粒子和质子的速度相等, 物质对 α 粒子的阻止本领是对质子的

阻止本领的 4 倍。带电粒子的电荷愈多，能量损失率愈大，穿透能力也就愈弱。

2. $(-dE/dx)_{i.o.}$ 与带电粒子的质量无关。原因在于重带电粒子的质量比电子质量至少大 1800 多倍。重带电粒子的质量与电子质量相比，都可以近似地被看成是无穷大。因此，重带电粒子的质量的确切数值就对阻止本领没有影响了。

3. $(-dE/dx)_{i.o.}$ 与重带电粒子的速度有关。当速度较小时，可以近似地认为电离能量损失率与速度的平方成反比，对数项的数值影响不大；当速度比较高时， $\frac{1}{v^2}$ 项变化很小，对数项的影响较大。由于我们所讨论的重带电粒子的能量限于十几个 MeV 以内，所以其相对论效应可不考虑。

必须指出，当重带电粒子的速度很低时，(1-1) 式是不适用的。此时，电离能量损失率随着速度减小而减小。在能量很低时， α 粒子可能俘获一个或两个电子使本身电荷减少。由于有效电荷随粒子速度减小而减小，从而使电离损失下降。图 1-1 表示 $(-dE/dx)_{i.o.}$ 随粒子能量的变化。图中曲线 a 段是由于重带电粒子速度减小，有效电荷下降和物质内层电子对能量损失没有贡献而使电离能量损失率下降。曲线 c 段是相对论效应起作用的区域，曲线上翘。图 1-2 和图 1-3 分别表示几种材料在阻止 α 粒子和质子时的 $[(-dE/dx)/\rho]$ 与粒子能量的关系。

4. $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{i.o.}$ 与物质的电子密度 NZ 成正比。物质密度越大，物质中原子的原子序数越高，则此种物质对重带电粒子的阻止本领也越大。

5. 不同种类的入射粒子，当能量相同时， $(-dE/dx)_{i.o.}$ 与其质量成反比。

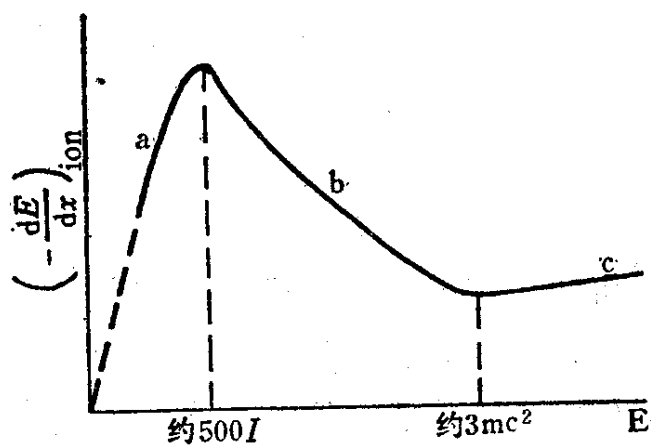


图1-1 重带电粒子的 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$ 与其能量的关系^[1]

M : 粒子静止质量; c : 光速; $\bar{I}$: 与 (1-1) 式中的 $\bar{I}$ 相同。

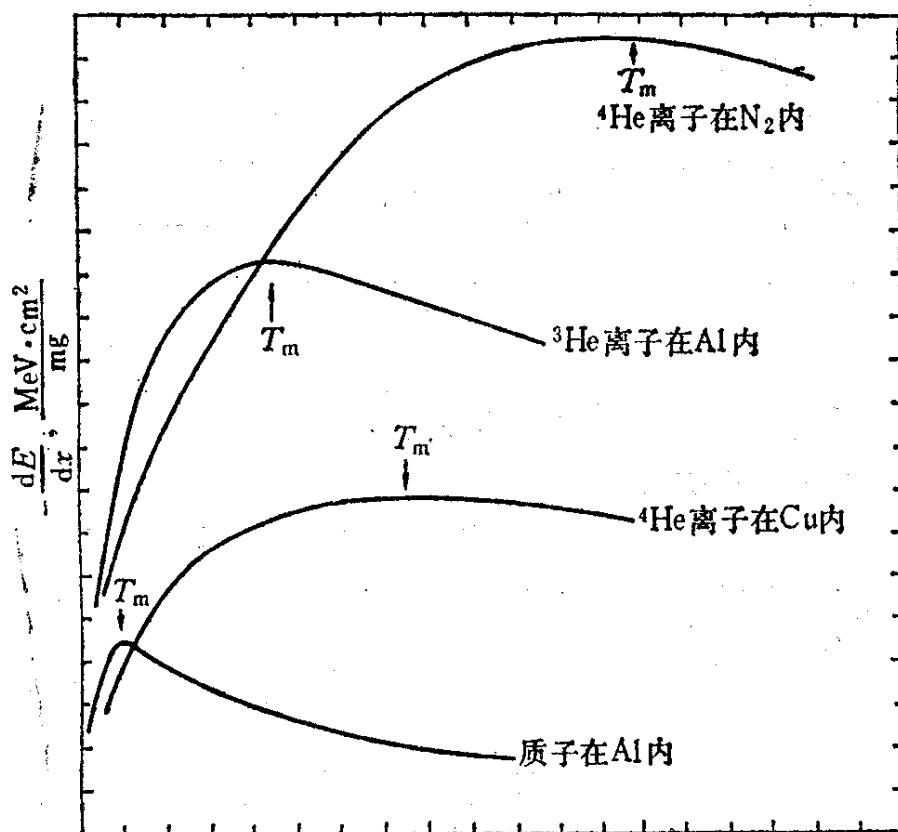


图1-2 质子和 α 粒子的 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}/\rho$ 与粒子能量的关系^[3]

T_m : $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}/\rho$ 达到最大值时的粒子能量。 $-\frac{dE}{dx}$ 实际上是

$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}/\rho$, ρ 是材料的密度