

普通高等学校核技术及应用专业教材

辐射剂量学

主 编 陈国云
副主编 魏志勇



科学出版社

普通高等学校核技术及应用专业教材

辐射剂量学

主 编 陈国云

副主编 魏志勇

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共三篇：第一篇(第 1~5 章)是辐射剂量学基础知识，第二篇(第 6~10 章)介绍核辐射剂量计，第三篇(第 11~15 章)阐述辐射剂量学的分支学科及应用。全书内容包括辐射剂量学基础知识、电离辐射场、基本剂量学、微剂量学、电离辐射的探测与辐射剂量测量方法、外照射剂量学、内照射剂量学、空间辐射剂量学、环境辐射剂量学和非电离辐射剂量学，涵盖了辐射剂量学全部内容。

本书针对本科生设置难度，注重基本概念、原理、方法的应用，并适当增加近年成果和学科前沿，以便学生系统全面地掌握知识，为将来深造和发展奠定基础。本书内容全面充实、知识体系完整、条理清晰、层次分明，章节和习题安排兼顾理论知识掌握与能力培养需求，可作为核技术及应用、核工程、辐射防护与安全、环境保护和空间环境等专业或专业方向的本科生教学用书。此外，本书还可作为核技术应用领域、航天领域、环境保护、辐射防护、放射治疗、辐射诊断等领域从业的医务人员、科研人员及辐射相关领域专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

辐射剂量学/陈国云主编. —北京：科学出版社，2017.12
普通高等学校核技术及应用专业教材
ISBN 978-7-03-056102-2

I. ①辐… II. ①陈… III. ①辐射剂量学-高等学校-教材
IV. ①R144.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 319488 号

责任编辑：昌 盛 王 刚 / 责任校对：张凤琴
责任印制：吴兆东 / 封面设计：迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张：17 1/4

字数：409 000

定价：69.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

广义的辐射分为**电离辐射(ionizing radiation)**和**非电离辐射(non-ionizing radiation)**两大类，**辐射剂量学(radiation dosimetry)**主要关注电离辐射领域，基于电离辐射与物质相互作用及其输运过程，研究射线在介质中的能量转移和沉积、辐射剂量与辐射场的关系、辐射剂量与辐射效应之间的关系、辐射效应及其观测方法与辐射条件及介质之间的关系，通过测量辐射效应实现辐射剂量测量，从而控制辐射场中剂量分布、发展辐射剂量计算方法和辐射危害评价方法、建立辐射剂量的量度规则和测量基准。**辐射计量学(radiometry)**是研究空间和介质中辐射场分布特性的学科，其研究内容包括辐射粒子的输运、演化行为和特点、辐射计量学量的定义及定量描述方法、辐射场的控制技术、辐射测量技术及标准等，另外还有辐射计量学基本量值的测定方法研究、量值传递方法研究以及常规量值传递、模拟、测量和分析现场粒子谱等。辐射计量学和辐射剂量学有许多共同领域，也有各自的侧重点和主要内容：前者研究内容更广，更关注辐射场；而后者更关注能量沉积，与医学和生物材料的关系更加密切。**辐射量(radiation quantities)**分三类：①**辐射计量学量(radiometric quantities)**，定量描述辐射在空间与介质中的分布特性；②**辐射剂量学量(dosimetric quantities)**，描述辐射能在介质中转移和沉积的物理量；③**辐射防护量(radiation protection quantities)**，关于辐射防护技术、标准和评价的物理量，用于评价辐射带来的危害。

辐射技术(radiotechnology)包括基础研究、应用研究及面向生产的实际应用等方面。基础研究的对象是辐射产生机理、射线与物质的相互作用、辐射效应、射线探测方法、辐射探测新技术及辐射信息处理方法等。应用研究以辐射技术为基础，主要关注工程及产业领域的技术问题，通常跨越多个学科领域，如能源、医学和生命科学、环境科学、工业、农业、国防和社会公共安全等。辐射技术实际应用则完全进入工业、农业、国防及其他产业领域。可见辐射剂量学涉及范围很广，与多个学科交叉，可用在多个领域。**核技术(nuclear technology)**尤其是同位素与辐射技术的应用与我们密切相关，已经渗透到国防、工业、农业、医学、环保等诸多领域并得到广泛应用。核技术在美国、日本等发达国家已成为极具生命力的巨大产业，目前非动力的核技术应用经济规模与就业人数超过了核电，对国家 GDP 增长产生了重要影响。

核辐射、放射性同位素的应用在给人类带来巨大利益的同时，也影响和危害人类健康、污染环境，对核辐射的安全与防护应给予特别重视。随着人们对核辐射危害性认识的深化和核辐射技术的迅速发展，核辐射安全与防护也得到了很大的发展与加强。近年来，核辐射技术的应用已蔓延到生产和生活的各个领域。核能利用及辐射技术应用的核心内容和终极目标，就是要有目的地控制辐射剂量，使其给人们带来的利益最大化，并将可能的危害降到最低。为此首先根据辐射效应和辐射危害确立目标辐射剂量场；其次是控制辐射粒子输运，以形成与目标辐射剂量场分布一致的剂量场。比如人们在开展医学放射治疗、放射诊断及其他辐射实践时，就需要先确定辐射剂量计划、辐射剂量的控制及放射治疗的质量保证、核辐射设施及核环境剂量评估、辐射的防护措施，从而使目标、控制、测量和验证等环节均有技术支撑和保证。此外，国家及各级政府部门也设有相应监管机构，参考国际标准并结合国情制定了国家层面的法规和

标准,还要求涉及辐射的各个行业都应制定相应的专业技术标准,如医疗行业、核设施、航空领域及环境领域,其中环境领域的辐射防护涉及范围最广,直接关系到人类生存环境,必须确保公众及其后代的健康与安全。辐射剂量学为辐射防护和辐射监管提供了坚实基础。

国际上辐射剂量学领域学术交流一直很活跃。1925年,在英国首都伦敦(London)召开的第一届国际放射学大会(First International Congress of Radiology)上就设立了**国际辐射单位和测量委员会(International Commission on Radiation Units and Measurement, ICRU)**。1928年,在瑞典首都斯德哥尔摩(Stockholm)召开的第二届国际放射学大会(Second International Congress of Radiology)上决定设立**国际辐射防护委员会(The International Commission on Radiological Protection, ICRP)**,ICRU与ICRP两个组织在本书中将经常提到。国际辐射防护组织与**国际放射学学会(International Society of Radiology)**关系密切,设立了常设委员会专门负责医学辐射防护,开展多次学术活动并出版了一系列辐射防护报告。我国是拥有核武器的国家,核科学技术的发展几经周折后迎来了新的发展机遇,核技术已在人们生产生活中占有更重要的地位。如今核技术已被应用于多个领域,其中在医学、生物领域的应用尤为突出,放射医学、核医学及医学物理学等相关学科将会有很广阔的发展空间。21世纪,核能与核科学技术的开发和利用影响了社会多个方面,也给人类带来了许多实在利益和就业机会。从事核科学技术工作的人员增多,接触辐射的人数增多、接触机会增大,此外受慢性低剂量照射的人群也会越来越多,因此要求对辐射危害作出定量评估。

随着卫星的成功发射和宇航的发展,人类活动范围进一步扩大:由地面、大气层逐步向太空发展。太空存在各种高能粒子,不仅使空间飞行器受到辐射损伤,也对航天员的健康造成很大的威胁。空间环境中的高能辐射粒子,使辐射剂量学得以拓展到航天与空间科学等领域,形成了空间辐射剂量学。空间环境辐射场中不仅粒子种类很多,而且粒子能量分布极宽,这就对辐射防护提出了新的挑战。总而言之,随着核科学技术发展、辐射技术的广泛应用及人类太空活动的加剧,辐射剂量学的研究领域也逐渐扩大,不仅包含核设施和人类生存环境,还扩展到太空领域。辐射剂量学的需求逐步扩大,必将获得更多关注。

本书由陈国云(南昌大学)、魏志勇(南京航空航天大学)、徐雪春(南昌大学)、方美华(南京航空航天大学)、张晓红(南京航空航天大学)、付宏斌(吉林大学)共同编写,其中张晓红编写第9章、徐雪春编写第10章、付宏斌编写第12章、方美华编写第13章,其余章节由陈国云编写并统稿,魏志勇负责全书内容的审定。参加本书编写工作的还有南昌大学的王立、廖清华、刘笑兰、赵勇、辛勇、刘崧。本书获得南昌大学教材出版资助。

本书中绝大部分内容均已在教学活动中多次使用,有些内容是根据教材立项时评审专家的建议添加进来的,还有部分内容是编者的科研成果。因编者自身水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正!

陈国云

2017年1月

目 录

前言

第一篇 辐射剂量学基础

第 1 章	辐射与物质相互作用	3
1.1	重带电粒子	3
1.2	电子	11
1.3	γ 射线	20
1.4	中子	30
	复习思考题(一)	35
第 2 章	电离辐射场	37
2.1	电离辐射术语及概念	37
2.2	电离辐射的描述	39
2.3	辐射场输运方程	43
	复习思考题(二)	44
第 3 章	基本剂量学	46
3.1	转移能与比释动能	46
3.2	照射量与照射量率	51
3.3	授予能与吸收剂量	53
3.4	线性能量转移	55
3.5	辐射平衡	57
3.6	比释动能、照射量与吸收剂量的关系	61
	复习思考题(三)	63
第 4 章	微剂量学及等效剂量	64
4.1	粒子径迹	64
4.2	线能	68
4.3	比能	71
4.4	辐射生物学中的微剂量学	72
4.5	辐射效应的评估	76
	复习思考题(四)	83
第 5 章	腔室理论	84
5.1	Fano 定理	84
5.2	Bragg-Gray 理论	85
5.3	Spencer-Attix 理论	88
5.4	大腔室和中等腔室	92

复习思考题(五)	94
----------------	----

第二篇 核辐射剂量计

第 6 章 气体剂量计	97
6.1 辐射剂量计概述	97
6.2 电离室	98
6.3 空腔电离室	104
6.4 电离室剂量计实例	113
复习思考题(六)	123
第 7 章 固体剂量计	124
7.1 半导体剂量计	124
7.2 闪烁剂量计	127
7.3 荧光剂量计	134
7.4 热释光剂量计	137
复习思考题(七)	147
第 8 章 量热剂量计和化学剂量计	148
8.1 量热剂量计工作原理及分类	148
8.2 量热剂量计的剂量测量方法	150
8.3 典型量热剂量计	153
8.4 辐射化学剂量计	154
8.5 其他化学剂量计	159
复习思考题(八)	164
第 9 章 生物剂量计	165
9.1 生物剂量计特征与分类	165
9.2 细胞遗传学检测法	166
9.3 体细胞基因突变检测法	171
9.4 分子生物学检测法	173
复习思考题(九)	174
第 10 章 其他类型剂量计	175
10.1 胶片剂量计	175
10.2 径迹蚀刻探测器	176
10.3 电子自旋共振剂量计	179
10.4 辐射变色薄膜剂量计	181
10.5 晶溶发光剂量计	182
复习思考题(十)	183

第三篇 学科分支及应用

第 11 章 外照射剂量学	187
11.1 体模及其剂量场参数	187

11.2 射束的剂量特性	191
11.3 体模中的吸收剂量	193
11.4 外照射剂量计算	196
11.5 辐射防护限值与实用量	197
复习思考题(十一)	202
第 12 章 内照射剂量学	203
12.1 体内放射性核素的输运	203
12.2 呼吸道模型	205
12.3 胃肠道、消化道模型及全身模型	208
12.4 库室方程与滞留函数	210
12.5 内辐射吸收剂量和待积剂量当量	211
12.6 内照射限值与参考水平	212
12.7 内照射剂量测量	213
复习思考题(十二)	215
第 13 章 空间辐射剂量学	216
13.1 天然空间辐射	216
13.2 次级辐射环境	221
13.3 空间辐射效应	222
13.4 空间辐射剂量	225
复习思考题(十三)	228
第 14 章 环境辐射剂量学	229
14.1 氡及其同位素	229
14.2 氡的析出	230
14.3 氡的子体	233
14.4 氡的危害及评价	235
14.5 环境中的 ^{14}C	238
14.6 环境中的 ^{40}K	242
14.7 其他环境辐射	245
复习思考题(十四)	250
第 15 章 非电离辐射剂量学	251
15.1 非电离辐射电磁波	251
15.2 非电离辐射剂量学量	254
15.3 电磁辐射生物效应	258
复习思考题(十五)	264
主要参考文献	265

第一篇 辐射剂量学基础

辐射剂量学基础部分是理解并掌握电离辐射剂量计原理及应用的先修内容，包括辐射与物质相互作用、电离辐射场、基本剂量学、微剂量学及等效剂量以及腔室理论共五章。本篇在辐射与物质相互作用规律的基础上引入电离辐射场概念，来描述和表征电离辐射分布空间。为在宏观层面定量描述电离辐射，需要定义一系列剂量学量来表征辐射能量沉积及其空间分布特征；而电离辐射在微观层面上的能量沉积行为已形成一个新的学科分支——微剂量学。各种辐射产生的效应千差万别，人体各器官对辐射的耐受性质也有很大不同。为了统一评估人体所受照射，需要定义一系列等效剂量学量。将剂量计置于待测辐射场中可形成腔室，射线在腔室内的能量沉积及转移特性，以及腔室对原辐射场的干扰和影响常用腔室理论解释。

第1章 辐射与物质相互作用

广义的辐射分为电离辐射与非电离辐射，狭义的辐射仅指电离辐射。辐射又分为四大类：①轻带电粒子，如 $\beta^\pm$ 射线(即正负电子)和 $\mu^\pm$ 介子；②重带电粒子，如 α 粒子、质子及重离子(见1.1节)；③具有一定质量的中性粒子，如 π^0 、中子等；④光子，如 γ 射线、X射线等电磁波。带电粒子与物质相互作用的方式类似，其中电子因质量轻、速度高稍有些不同。中子、光子与物质相互作用又分为两步：中子和光子首先将自身能量传递给带电粒子或产生一定能量的带电粒子，然后带电粒子再与物质发生相互作用。

辐射剂量学基本问题就是射线在介质中能量的沉积和转移，而它和辐射与物质相互作用直接相关。研究辐射与物质相互作用可以深化对物质结构的认识，也是设计、研制核辐射探测器和剂量计的基础，因为任何核辐射探测器的性能最终都取决于带电粒子与探测器灵敏介质之间的相互作用。此外，研究辐射与物质相互作用还可以为研究辐射损伤机制、辐射防护措施及技术提供理论基础和方法指引。

1.1 重带电粒子

重离子(heavy ion)是比 α 粒子更重(质量数大于4)的离子，如锂离子、碳离子等；**重带电粒子(heavy charge particle)**常指比电子重得多的带电粒子，如 α 粒子、质子等。重带电粒子通过物质时，主要与靶物质原子中的壳层电子发生非弹性碰撞使物质原子电离和激发。重带电粒子质量大，散射不明显，碰撞后运动方向几乎保持不变，因此重带电粒子在物质中的运动径迹近似直线。除能量很高外，重带电粒子引起的韧致辐射可忽略不计。

1.1.1 电离和激发

带正电的重带电粒子从靶物质原子近旁掠过时主要与其外壳层电子发生库仑(Coulomb)相互作用，壳层电子受库仑引力作用获得能量。若该能量足以使它挣脱原子核束缚成为自由电子，则失去电子后带正电的原子或原子团就是**正离子(positive ion)**，靶物质原子形成电子-离子对的过程就称为**电离(ionization)**。若壳层电子所获得能量虽不足以使它挣脱原子核，但能发生能级跃迁，就称靶原子被**激发(excitation)**。处于激发态的原子不稳定，在激发态作短时间停留后又会跃迁回到基态，称为**退激(deexcitation)**。在原子退激过程中，多余的能量将以可见光或紫外线的形式释放出来，这就是原子的发光现象。

入射重带电粒子直接与原子相互作用产生的电离称为**直接电离或初级电离(primary ionization)**，初级电离中发射的电子称为**次级电子(secondary electron)**，又称 δ 电子或 δ 射线。如果 δ 电子动能达10eV量级，则还能继续使其他原子发生**次级电离(secondary ionization)**，重带电粒子总电离就是初级电离与次级电离之和，两类电离的份额与重带电粒子入射能量有关，一般次级电离贡献占60%~80%。

1.1.2 电离损失

1. 阻止本领的导出

设重带电粒子质量为 m 、电荷为 $+ze$ 、能量为 E ，并以速度 v 入射，靶物质中自由电子质量为 m_0 ，重带电粒子与电子之间的距离为 r ，则库仑引力就为

$$f = -\frac{ze^2}{r^2} \quad (1.1)$$

由碰撞理论可知，高速重带电粒子入射时，速度 v 改变甚微可近似看成常量，即 $\Delta v/v \sim m_0/m \ll 1$ ，碰撞中的冲量可写为

$$P_y = \int_{-\infty}^{\infty} f_y dt = \frac{2ze^2}{bv} \quad (1.2)$$

式中 b 为碰撞参数，即电子到重带电粒子路径的垂直距离。入射重带电粒子损失的能量也就是电子获得的动能，大小为

$$\Delta E_b = \frac{P_y^2}{2m_0} = \frac{2z^2e^4}{m_0v^2b^2} \quad (1.3)$$

设吸收物质原子序数为 Z ，靶物质原子数密度(number density，单位体积内靶物质原子个数)为 N_A ，有

$$N_A = \frac{\rho N_{Av}}{M} \quad (1.4)$$

式中 ρ 、 M 分别为吸收物质密度和原子量， $N_{Av}=6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 是阿伏伽德罗(Avogadro)常量。将式(1.3)对 b 积分，即得单位路径上的能量损失

$$-\frac{dE}{dx} = N_A Z \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \Delta E_b 2\pi b db = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_0 v^2} N_A Z \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad (1.5)$$

碰撞参数 b 越大，碰撞中传递的能量就越小；而 b 最大值取决于电离和激发的能量，最小值取决于碰撞过程中的能量转移。设 I 为吸收物质原子的平均电离电位(average ionization potential)，即吸收物质单个原子中所有电子的电离能和激发能的平均值，则

$$b_{\max} = \frac{ze^2}{v} \sqrt{\frac{2}{m_0 I}}, \quad b_{\min} = \frac{ze^2}{m_0 v^2} \quad (1.6)$$

用量子理论可导出非相对论的能量损失率为

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_A Z}{m_0 v^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I} \quad (1.7)$$

重带电粒子通过物质时速度将逐渐降低而损失能量，在单位长度路径上损失的能量称为阻止本领(stopping power)，又因所损失能量主要消耗在使物质原子电离和激发上，也称为电离损失，在单位长度路径上的电离损失就称为电离损失率。若限定每次传递的动能低于某一阈值，则阻止本领就称为定限阻止本领或传能线密度(见本书 3.4.1 节)，相应地，式(1.5)和式(1.6)所示的阻止本领称为非定限阻止本领，并用 $-dE/dx$ 来表示(负号表示阻止过程中能量在减少)。经相对论效应等修正后的阻止本领表达式为

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_A Z}{m_0 v^2} \ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{\delta}{2} \right)$$

(1.8)

阻止本领常用单位 MeV/cm，keV/cm 或 keV/μm。式(1.7)和式(1.8)中 z 、 v 分别为入射重带电粒子核电荷数及运动速度； Z 、 N_A 分别为吸收物质原子序数及原子数密度； m_0 为电子静止质量； $\beta=v/c$ (c 是光速)是相对论因子， C/Z 是壳修正因子，它与入射粒子、介质性质均有关，如图 1-1 所示。

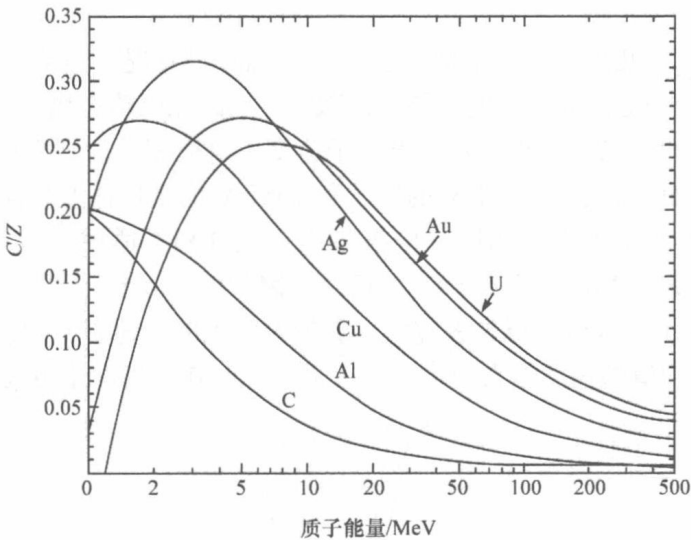


图 1-1 典型材料的壳修正因子

式(1.8)中 δ 为密度效应(也称极化效应)修正因子； I 是平均电离电势。理论计算得到 I 近似地正比于 Z (即 $I=kZ$)：在 $Z<20$ 时， $I\approx 11.5Z$ eV；在 $Z>20$ 时， $I\approx 8.8Z$ eV。表 1-1 给出了常见几种物质的平均电离电势值，可见平均电离电势要比第一电离电势高。

表 1-1 常见几种物质的平均电离电势

材料	原子序数	第一电离电势/eV	平均电离电势/eV
H	1	13.6	18
C	6	11.2	77
N	7	14.5	88
O	8	13.6	100
Al	13	6.0	164
Ar	18	15.7	184
Fe	26	7.9	300
Pb	82	7.4	820
空气			81
水			75

2. 阻止本领的特点

重带电粒子阻止本领与粒子本身、介质性质均有关。①与重带电粒子电荷数平方成正比： $-dE/dx \propto z^2$ 。相同速度下重带电粒子电荷越多，能量损失越大，穿透本领也就越弱。例如， α 粒子($z=2$)与质子($z=1$)以相同速度穿过同种物质时，前者电离损失率是后者的 4 倍，因此质子穿透本领强于 α 粒子。②与重带电粒子自身质量无关。③与重带电粒子入射速度有关：当速度

不很高时有 $-dE/dx \propto 1/v^2$ ，速度越小，电离损失率越大。这是因为碰撞过程中的动量转移与相互作用时间长短有关。带电粒子速度越慢，掠过电子的时间就越长，静电库仑力作用时间就越长，电子获得动量也就越大，因而入射带电粒子的能量损失也就越大；反之能量损失率就越小。④与吸收物质原子序数成正比： $-dE/dx \propto Z$ 。相同能量的同种粒子入射，吸收物质原子序数越大，电子密度也越大，电离损失率也越大，故重元素物质阻止能力比轻元素物质强。⑤与吸收物质原子数密度成正比： $-dE/dx \propto N_A$ 。吸收物质的原子数密度 N_A 越大，电离损失率也越大。

图 1-2 给出了电子、几种介子和重带电粒子在空气(标准状况下)中的电离损失率与能量之间的关系。可见 $(-dE/dx)$ 随入射粒子能量增加而减小，在 高能区略有增加。这是式(1.8)中大括号内的相对论项作用的结果。如果两种带电粒子速度、电荷相等，则它们在同种介质中的能量损失率也相同。例如，能量为 10MeV 的质子和 20MeV 的氘核速度相同，且电荷数均为 1，两者在同一物质中的能量损失率相同。应该指出：式(1.8)不适用于入射粒子速度很低(如 $E < 1\text{MeV}$ 的 α 粒子、 $E < 1.3\text{MeV}$ 的质子)时的情况。因为低能 α 粒子可以俘获 1~2 个电子成为氦离子(He^+)或氦原子，也可以再失去它们。重带电粒子的电荷态会随速度变化而变化，具有涨落特性，且其平均值随速度增大而增大，可见低能时作用情况十分复杂。

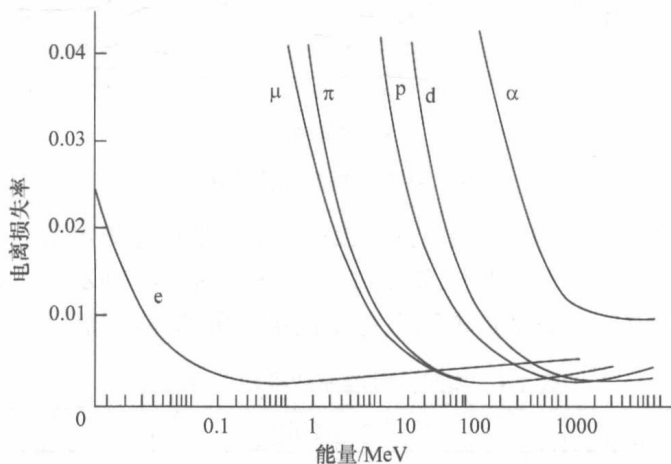


图 1-2 带电粒子在空气介质中的电离损失率与能量之间的关系

3. 原子阻止截面

从吸收物质角度来看，重带电粒子在穿过吸收物质时，吸收物质原子中电子的阻止作用引起了入射带电粒子在单位路径上的能量损失，因此单位路径上的电离损失率 $(-dE/dx)$ 又称为吸收物质对入射带电粒子的**线性阻止本领(linear stopping power)**。厚度和密度的乘积定义为**质量厚度(mass thickness)**，单位 g/cm^2 。入射带电粒子通过单位质量厚度的吸收物质时，因吸收物质的阻止作用所损失的能量称为**质量阻止本领(mass stopping power)**，用 $-(1/\rho) \cdot dE/dx$ 表示，其中 ρ 是吸收物质密度，单位 g/cm^3 。式(1.8)反映的是入射粒子与吸收物质电子传递能量时导致的能量损失，吸收物质电子密度越大，它对入射带电粒子的阻止本领也越强，因此入射带电粒子阻止本领 $(-dE/dx)$ 有时也称为**电子阻止本领(electron stopping power)**，原子核对入射带电粒子的阻止本领称为**核阻止本领(nuclear stopping power)**，它是原子核对入射带电粒子能量损失的贡献。原子阻止截面(stopping cross section)定义为阻止本领与靶物质原子数密度 N_A 的商，即 $(1/N_A) \cdot (-dE/dx)$ ，单位为 $\text{eV} \cdot \text{cm}^2/\text{原子}$ 。

4. 平均电离能

入射带电粒子穿过靶物质时,因电离作用会在其路径周围留下大量离子对,单位路径上产生的离子对数称为**比电离**或称**电离密度**,用 $(-dN_i/dx)$ 表示,单位是 pairs/cm。带电粒子在物质中每形成一对离子平均消耗的能量称为**平均电离能**,用 W 表示。对能量比较高的粒子, W 大小只与吸收物质性质有关,而与入射粒子种类和能量几乎无关。气体的 W 值为 30~40eV,半导体的 W 约 3eV,而密介质的 W 为 3~30eV。物质的平均电离能一般比电离电势约大 1 倍,如氙的电离电势是 15.7eV,但它的平均电离能 W 大约是 26.4eV。这是因为在能量损失中大约有一半消耗在使原子和分子激发上,而这部分能量不产生离子对,最后导致分子热运动。1MeV 的 α 粒子若将其能量全部消耗于氙气中,大约产生 37880 个离子对;而在半导体中可产生 378800 个离子对。由平均电离能 W 和电离损失率 $(-dE/dx)_i$ 可得单位路径上产生的离子对数(即比电离)为

$$-\frac{dN_i}{dx} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_i / W \quad (1.9)$$

式(1.9)中左边的负号仅为了抵消右边电离损失率中的负号。特定介质的 W 值接近常数,因此比电离大小与电离能量损失成正比。因 $(-dE/dx)_i$ 与入射粒子速度和电荷有关,故比电离也与入射带电粒子速度和电荷有关。对相同速度的入射粒子,电荷数越多比电离越大;对同种粒子,速度越慢的入射粒子比电离越大。正因为如此,带电粒子在穿过物质时整个路径上产生的离子对数目分布是不均匀的。

图 1-3 给出了 α 粒子射入标准状态空气后在其路径上各点的比电离值变化情况,其中横坐标所标识距离通常也称为 α 粒子的**剩余射程(remaining range)**。图 1-3 又称**布拉格(Bragg)曲线**,曲线中的峰称为 **Bragg 峰**。在曲线起始段比电离值上升得很慢,到快接近路径末端时

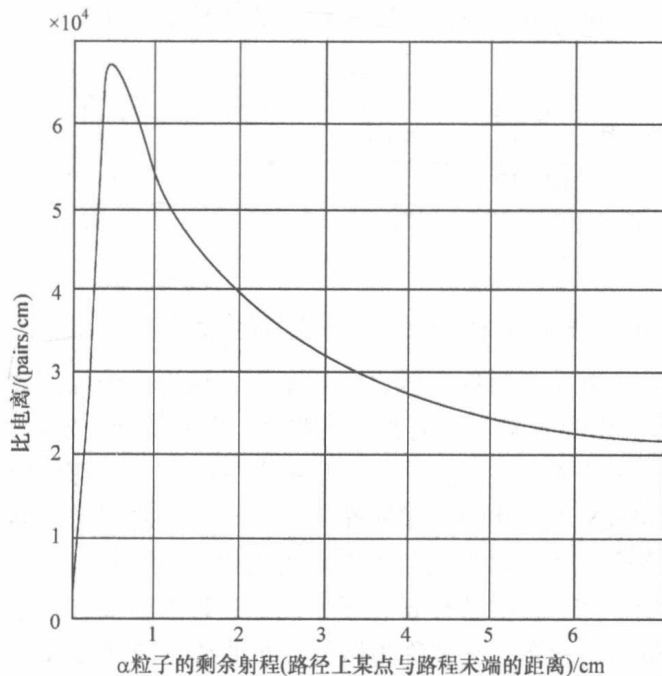


图 1-3 α 粒子在空气中的比电离

比电离值增加得很快,峰值过后曲线急剧下降而趋于零,此时已到路径末端。入射带电粒子

开始时速度最快,因而电离损失率较小;入射粒子越接近路径末端速度越慢,电离损失率也越大,比电离值也最大。因粒子在越过峰值后能量几乎耗尽,比电离值骤然下降并很快到达零。 α 粒子在空气中的最大比电离约为 6600pairs/mm,对应 α 粒子能量约为 700eV。因此比电离越大,该入射粒子的电离本领越强,但其穿透本领却越弱。重带电粒子在能量很低时能量损失率很大。这一特点被广泛用于肿瘤治疗。仔细选取射线的能量并使其大部分的能量损失发生在恰当的深度,就能达到让一束重带电粒子消灭机体中一定深度的癌细胞而基本上不损坏其他的健康细胞的目的。

1.1.3 α 粒子的吸收与射程

1. 射程的定义

重带电粒子在物质中因电离和激发不断损失自身能量,若吸收物质足够厚,最终它将耗尽自身能量而停留在吸收物质中,此时粒子被物质**吸收(absorption)**。带电粒子从进入物质到完全被吸收的过程中沿原入射方向穿行的最大直线距离,称为它在吸收物质中的**射程(range)**,亦即入射粒子沿入射方向穿透的最大距离。需要注意:射程和路径的概念不同,路径是指入射粒子在物质中所经过的实际路径的长度,而射程是路径沿入射方向的投影,路径大于射程。重带电粒子质量大,在与核外电子非弹性碰撞、与原子核弹性碰撞中,入射粒子运动方向改变很小。因此重带电粒子的路径接近直线(仅在末端略有弯曲),其射程近似等于路径长度。单能重带电粒子在物质中射程几乎相同;当入射粒子能量较低时,路径和射程之间存在差异:能量越低,差异越大,且对不同吸收物质的差异大小也不相同。

图 1-4(a)是测量 α 粒子在空气中射程的实验装置:左端放置 α 源, α 射线经准直器准直后进入探测器被计数。探测器可沿 α 粒子的出射方向移动。保持探测器对 α 源所张立体角不变,改变探测器与 α 源之间的距离分别测量 α 粒子的计数率,所得结果如图 1-4(b)所示。

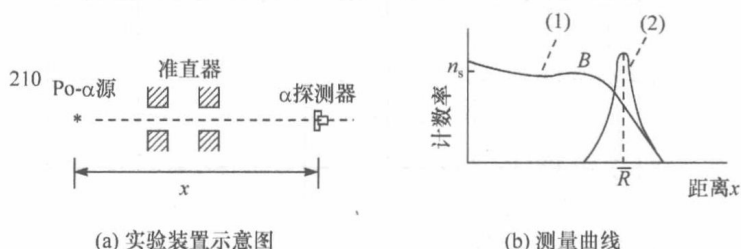


图 1-4 测量 α 粒子在空气中的射程的实验装置和测量曲线

图 1-4(b)中横坐标 x 为 α 源与探测器之间的距离,纵坐标为探测器所测计数率。开始一段距离计数率保持不变,表明 α 粒子没有被空气吸收;当增加到一定距离时计数率很快下降,并一直降为零。这表示 α 粒子在这个距离时已全被空气吸收,全部停留在射程附近区域内。对于 ^{210}Po 源释放的 5.3MeV 的 α 粒子,在标准状态下空气中射程是 3.84cm。由图 1-4(b)可知,能量相同的 α 粒子的路径长度差别不大。图 1-4(b)的曲线(1)中 B 点左方计数率基本为常数,越过 B 点后曲线(1)开始下降,表明已有 α 粒子不能到达计数器而被记录。曲线(2)表示单位路径上 α 粒子变化量随距离的分布,它常称为微分分布曲线,曲线(1)则常称为积分曲线。由微分曲线(2)可知,大多数 α 粒子停留在射程对应的位置,而此处曲线(1)表示 α 粒子数恰好减为原来的一半。这说明能量相同的 α 粒子的射程基本上相等但略有涨落,平时测量或计算的 α 粒子射程都是指平均射程。

2. 射程经验公式

入射粒子要经历大量电离碰撞而损失自己的能量,如1个5MeV的 α 粒子在其能量全部耗尽前平均要经历 1.4×10^6 次电离碰撞,且每两次碰撞之间 α 粒子所走过的距离、损失的能量都不同,有一定统计涨落,导致相同能量 α 粒子的射程有涨落,称为**射程歧离**。不过重带电粒子射程歧离很小,例如,对5MeV的 α 粒子,射程歧离仅为平均射程的1%左右。 α 粒子射程与其能量有关,能量越大,射程也越大。图1-5给出了 α 粒子在标准状态空气中的平均射程随能量变化的情况。

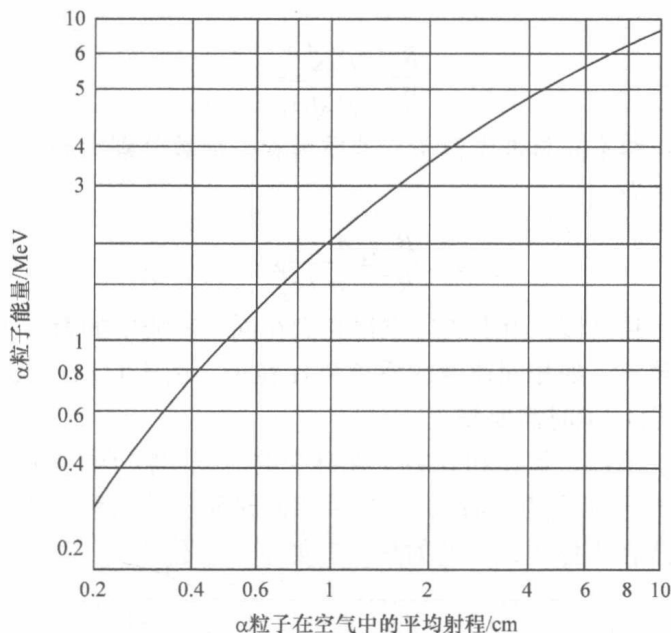


图1-5 α 粒子在空气中的平均射程与能量的关系

α 粒子在标准状态空气中的射程与能量之间的关系有如下经验公式:

$$\bar{R} = 0.325 \cdot E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}, \quad E_{\alpha} = 2.12 \cdot \bar{R}^{\frac{2}{3}} \quad (4\text{MeV} < E_{\alpha} < 8\text{MeV}) \quad (1.10)$$

其中射程单位 cm, 能量单位 MeV。当 $4\text{MeV} < E_{\alpha} < 8\text{MeV}$ 时射程为 $2.5 \sim 7.5\text{cm}$; 当 E_{α} 较大时 $\bar{R} \propto E_{\alpha}$; 当 E_{α} 较小时 $\bar{R} \propto E_{\alpha}^{3/2}$ 。若 α 粒子能量已知, 由式(1.10)即可估算出它在空气中的平均射程; 反过来根据测得的 α 粒子在空气中的射程也可以求出它的能量, 以便对 α 放射性核素作出鉴别。 α 粒子在其他物质中的射程可用如下经验公式换算:

$$R = 3.2 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{A} \cdot R_0 / \rho \quad (1.11)$$

式中 R 为 α 粒子在吸收物质中的射程(cm), R_0 为 α 粒子在空气中的射程(cm), A 是吸收物质原子的质量数, ρ 是吸收物质密度(g/cm^3)。例如, 能量为 5.3MeV 的 α 粒子在空气中的射程 R_0 是 3.8cm , 据此可求得它在铝($A=27$, $\rho=2.7\text{g/cm}^3$)中的射程为 0.023mm 。

3. CSDA 射程

粒子在介质中走过的实际路径定义为**连续慢化近似(continuous slowing down approximation, CSDA)射程**, CSDA 射程的投影就是上述射程。重带电粒子在介质中能量损失过程中运动方向变化、角度偏离均较小, 径迹基本是直线, CSDA 射程与粒子射程偏离不