



国防特色教材·核科学与技术

高等电离辐射防护教程

——主编 夏益华 副主编 陈 凌



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

高等电离辐射防护教程

主 编 夏益华
副主编 陈 凌
编 者 张红见 赵郁森
王仲文 韩永超
主 审 董柳灿 任天山



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书是核工业研究生部为了适应我国核电和核技术应用迅猛发展的大好形势,专门组织中国原子能科学研究院具有长期科学研究和教育工作经验的资深专家编写而成的。

全书分为12章,在对电离辐射防护理论和基础体系进行介绍时,纳入了国际上近几年的最新进展和成果;为了更好地结合工作实际,专门安排了实用辐射防护一章,着重介绍了核电厂等几种核辐射设施的辐射安全问题。

本书内容丰富新颖,条理清晰,理论分析和实际应用紧密结合。主要用作相关领域研究生,以及大学高年级学生的教学用书,也可作为辐射防护、环境保护等相关领域工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高等电离辐射防护教程/夏益华主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-81133-629-0

I. ①高… II. ①夏… III. ①电离辐射-辐射防护-教材 IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 094194 号

高等电离辐射防护教程

主编 夏益华

责任编辑 石 岭

*

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨市南岗区东大直街124号(150001) 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

肇东粮食印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:22 字数:479千字

2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-629-0 定价:48.00元

前 言

我国核工业的发展已经走过了半个多世纪的历程,核能和核技术应用也已取得了举世瞩目的成果。在未来的 20 多年时间里,我国核电事业将得到空前的发展,到那时核电发电量在我国总发电量中的比率将达到当前世界平均水平,我国将由核电大国向核电强国迈进。安全与防护是发展的保障,核事业的迅猛发展必将对安全、防护人才的培养提出更多、更高的要求。

核工业研究生部成立于 1985 年,是我国核工业系统唯一的集研究生教育、核专业人员培训和成人教育于一体的高层次专业人才的培养基地。20 多年来,已培养研究生 2 300 余人,为国家“百千万”人才工程输送了大批高层次人才。研究生部现有专、兼职教师 249 人,其中教授 193 人,副教授 25 人。研究生教育设有 11 个专业方向,96 门课程,辐射防护是其中的重要课程之一。

为了更好地服务于核工业的发展,核工业研究生部特别组织了长期从事辐射防护的专家编写了本教程。本教程共分为 12 章。第 1 章绪论,简要介绍了辐射防护学科的任务、范围及其进展,由夏益华研究员编写;第 2 章,第 3 章是有关辐射防护的物理学基础(辐射与物质的相互作用,辐射防护中常用的辐射量和单位),由陈凌研究员编写;第 4 章,电离辐射的生物效应,由王仲文研究员编写;第 5 章,天然辐射源及人类活动引起其照射的升高,由夏益华研究员编写;第 6 章,辐射防护体系与基本安全标准,由夏益华研究员编写;第 7 章,外照射剂量计算及其防护,由夏益华研究员编写;第 8 章,中子剂量的计算及其防护,由陈凌研究员和韩永超博士编写;第 9 章,内照射的估算、监测及防护,由夏益华研究员编写;第 10 章辐射照射监测与辐射照射评价,其中 10.1 ~ 10.9 小节由夏益华研究员编写,10.10 小节由陈凌研究员和韩永超博士合编;第 11 章实用辐射防护,其中 11.1 核电厂辐射防护和 11.2 研究堆的辐射防护,由赵郁森研究员编写;张红见副研究员负责编写第 11 章实用辐射防护的绪论、11.3 节、11.4 节和 11.5 节;第 12 章核或辐射应急由夏益华研究员编写。因为研究生部课程设置的关系,有关辐射监测技术和环境评价模式等方面的内容不在本教程范围之内。

由于水平和时间的限制,本教程还存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2010 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 电离辐射与物质的相互作用	3
2.1 带电粒子与物质的相互作用	3
2.2 γ 射线与物质相互作用	12
2.3 中子与物质相互作用	18
复习思考题	21
第3章 电离辐射防护领域中常用的量和单位	22
3.1 描述辐射场的量	22
3.2 基本的剂量量	24
3.3 辅助的剂量量	27
3.4 运行实用量	29
3.5 比释动能	31
3.6 照射量	34
复习思考题	35
第4章 电离辐射的生物效应	36
4.1 生物体对电离辐射的反应	36
4.2 大剂量照射——确定性效应(组织反应)	40
4.3 辐射的随机性效应——致癌效应	44
4.4 辐射的随机性效应——遗传效应	48
4.5 胎内照射效应	49
复习思考题	50

第5章 天然辐射源及人类活动引起其照射的升高	51
5.1 天然照射的来源及其水平	51
5.2 人为活动引起天然照射的升高	54
5.3 对天然照射的控制和防护	58
复习思考题	60
第6章 辐射防护体系与基本安全标准	61
6.1 辐射防护体系的形成	61
6.2 防护体系的建立基础	63
6.3 防护体系的基本目的	65
6.4 防护体系基本组成	65
6.5 防护体系的核心:辐射防护原则	67
6.6 防护法规体系监管的范围	69
6.7 辐射防护与安全的国家基础结构	70
6.8 我国的基本安全标准	70
复习思考题	76
第7章 外照射剂量的计算及其防护	77
7.1 外照射防护的一般方法	77
7.2 γ 剂量率的计算	78
7.3 X, γ 射线在物质中的减弱规律	86
7.4 γ 和 X 射线的屏蔽计算	91
7.5 带电粒子外照射剂量计算及防护	99
7.6 辐射平衡与剂量互易原理	107
复习思考题	109
第8章 中子剂量计算及防护	110
8.1 中子源	110
8.2 中子的剂量计算	111
8.3 中子的防护	113
复习思考题	116

第9章 内照射的估算、监测及其防护	117
9.1 概述	117
9.2 器官(组织)待积当量剂量的计算	118
9.3 放射性核素进入人体的主要途径和在人体内的生物动力学模型	119
9.4 摄入滞留函数与摄入排泄函数	127
9.5 内照射监测	129
9.6 内照射防护	139
复习思考题	140
第10章 辐射照射监测与辐射照射评价	142
10.1 辐射照射监测的目的	142
10.2 辐射照射监测的分类	142
10.3 辐射照射监测的运行实用量	143
10.4 个人监测	144
10.5 工作场所监测	147
10.6 环境监测	148
10.7 流出物监测	153
10.8 环境样品的采集、预处理及其管理	159
10.9 辐射照射的评价	161
10.10 概率统计在放射性测量及数据处理中的应用	164
复习思考题	180
第11章 实用辐射防护	181
11.1 核电厂辐射防护	183
11.2 研究堆的辐射防护	206
11.3 临界实验装置的辐射防护	213
11.4 开放型放射性设施的辐射防护	222
11.5 放射性物质运输的辐射防护	260
复习思考题	271

第 12 章 核或辐射应急	273
12.1 概述	273
12.2 应急计划	274
12.3 应急计划区	278
12.4 照射途径与防护措施	280
12.5 应急干预原则、干预水平	282
12.6 应急工作人员的防护	284
12.7 核恐怖突发事件与突发事件综合预案	284
复习思考题	287
附录 I 附表及附图	288
附录 II 个人监测用仪器仪表	326
附录 III 工作场所监测用仪器仪表	333
参考文献	339

第1章 绪 论

在人类赖以生存的环境中,无时无刻没有电离辐射的存在,人类从形成的第一天起就始终生活在电离辐射的照射之中。但是一直到大约一个世纪以前,人类才发现了电离辐射的存在,并随着对电离辐射的应用认识到了辐射对人体的可能损伤,从此开始了辐射防护的历史。一个世纪以来,人类在利用辐射和核能的过程中不断改进对辐射的防护,同时也深化了自身对辐射防护的理解,从而不断推动着辐射防护学科本身的发展。由于电离辐射对人体随机性生物效应的存在和线性无阈模式的性质,使得不能简单从技术上找到所谓“安全”与“危险”的分界点来作为辐射防护标准的基点,这就给阐明辐射危害的控制带来某些困难;此外,既然辐射防护的基本出发点在于保护人类及其环境,因此辐射防护体系的建立就不可能单纯以技术因素为基础,它必然会受到人的生命价值观,以及心理、伦理观等社会因素的影响,必须要在安全、技术、经济、社会诸多因素的基础上进行优化考虑。这些都对辐射防护的发展提出了挑战,也极大地丰富了辐射防护的内涵。

辐射防护,就是研究如何保护人类和环境免受辐射照射的有害效应,而又不过多限制可能与照射相关的有益于人类的事业和活动的学科。它是一门综合性的学科,主要相关的学科包括核物理、核化学、核工程、辐射探测、辐射屏蔽、放射生物、大气扩散、地质水文、环境评价、事故应急、心理社会学等。辐射防护又称保健物理或辐射安全,有时也称放射卫生,与核安全、反核恐等紧密相关。

考虑到本学科研究生教学的需要和安排,本教程主要包括以下几方面内容:(1)绪论;(2)辐射防护基础(第2,3,4章);(3)辐射防护体系与标准(第5,6章);(4)辐射照射的计算、监测、评价与防护(第7,8,9,10章);(5)实用辐射防护(第11章);(6)核或辐射应急(第12章)。

2007年,国际放射防护委员会(ICRP)出版了新的第103号建议书,反映了辐射防护最近十多年来的主要进展:

(1)根据生物和物理学方面的最新科学信息更新了当量剂量和有效剂量的辐射和组织权重因数,不同器官/组织的危害分布已有某些变化,特别是乳腺癌和遗传疾病方面。然而,假设在低剂量时响应是线性的,超额癌和遗传效应的总的危害约为每希沃特5%保持不变。

(2)保持了三项放射防护基本原则,即正当性、最优化和剂量限值的应用。

(3)从以前的以过程为基础的实践和干预的防护方法,演变为对所有可控照射情况应用实践正当性和防护最优化基本原则的、基于照射情况的方法,建议把照射情况分为计划照射、应急照射和现存照射情况。

(4)对计划照射情况下所有被监管的源沿用现行的有效剂量和当量剂量的个人剂量限值,这些限值代表在任何计划照射情况下监管机构可以接受的最大剂量。

(5)再次强调了防护最优化的原则,这一原则可以用类似的方法用于所有照射情况,但受

到个人剂量和危险限制的制约,对计划照射情况称作剂量和危险约束,对应急照射和现存照射情况称作参考水平。

(6)对电离辐射的健康效应广泛评议结果表明,不需对放射防护体系作任何基本改变。

(7)当量剂量和有效剂量的应用保持不变,但计算方法作了许多修改,采用基于 X 射线断层影像资料的人体模型取代过去采用的各种数学模型。

(8)有效剂量被用作防护量,主要用途是对防护设计和优化中的预期剂量进行评价,衡量是否符合监管剂量限值要求。有效剂量是针对参考人而非受照个人进行评价,不推荐用于流行病学估算,也不应用于个人照射和危险的详细、专门的回顾性调查。

(9)集体有效剂量是最优化的一个工具,主要是在研究职业照射的过程中比较放射防护技术和防护方法,不能用作流行病学危害评价的工具,在危险估计中采用它也是不合适的。用非常低的个人剂量在长时间尺度上进行聚合是不适当的,特别要防止基于来自很小个人剂量的集体剂量来计算癌症死亡人数。

(10)认识到保护环境的重要性,仍然相信为保护公众所需要的环境控制标准将保证其他物种不受危害,建议采用参考生物和植物,计算它们的附加剂量,但不准备制定保护环境的任何形式的“剂量限值”。

本教程中辐射的含义,仅指电离辐射,不包括非电离辐射,如微波、电磁辐射、激光和红外线等。

第2章 电离辐射与物质的相互作用

辐射分为电离辐射和非电离辐射。凡是与物质直接或间接作用时能使物质电离的一切辐射,称为电离辐射。电离辐射是由直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何辐射。直接电离粒子具有可以通过碰撞引起物质电离的动能,电子、 β 射线、质子和 α 粒子是常见的直接电离粒子。间接电离粒子是能够释放出直接电离粒子或引起核变化的非带电粒子,如光子、中子等。与之发生作用的物质可以是气体、液体或固体,可以是单质、化合物或混合物。而有些辐射不能引起物质电离称为非电离辐射,如红外线、微波等。只有深入了解射线与物质相互作用的原理,才能理解射线穿过物质时的各种现象。

2.1 带电粒子与物质的相互作用

带电粒子种类很多,常见的是电子、 β 射线、质子、 α 粒子等。凡静止质量大于电子的带电粒子,称为重带电粒子,如 μ 介子, π 介子,质子, Σ^+ , Σ^- , α 粒子及被加速的原子核等。 β 射线和电子本质上是相同的,通常所说的电子是指核外电子,而 β 射线是指由原子核发射出来的高速电子。带电粒子穿过靶物质时,与路径上靶物质的原子核及核外电子发生相互作用。随入射粒子种类和能量的不同,各种相互作用的强度和特征有很大差别。

2.1.1 带电粒子与物质相互作用的方式

具有一定能量的带电粒子入射到靶物质,与路径上的原子核或核外电子发生库仑相互作用,从而把一部分动能转移给靶物质的原子核或核外电子而逐渐损失能量,最终停止在靶物质中,这个过程称为慢化。慢化过程中带电粒子在靶物质中除发生能量损失,也会出现如角度偏转等运动状态的改变。能量损失和角度偏转,完全是入射带电粒子与靶物质的核外电子和原子核发生各种相互作用的结果。带电粒子与物质相互作用的方式主要有如下几种。

1. 带电粒子与靶原子的核外电子发生非弹性碰撞

当带正电或负电的入射粒子从靶原子附近掠过时,靶原子的核外电子因库仑相互作用而受到吸引或排斥,从而获得一部分能量。如果核外电子获得的能量大于它在该轨道上的结合能,它就会脱离原子核的束缚而逸出,成为一个自由电子,而剩下的原子成为正离子,这就是入射带电粒子引起靶原子电离的过程。原子的最外层电子受核的束缚最弱,从而最容易被电离。如果电离过程中发射出的电子具有足够高的动能,其也可能与靶原子发生作用而导致二次电离。实际上,二次电离约占总电离的60%~80%。如果电离过程中被电离的是内层电子,当

外层电子向该壳层跃迁时,会发射特征 X 射线或俄歇电子。

如果核外电子在库仑相互作用中获得的动能较小,不足以被电离,但有可能从原来较低的能级跃迁到较高的能级,从而使原子处于激发态,这一过程称为激发。处于激发态的原子是不稳定的,会通过跃迁返回基态,称为退激。退激过程会释放出可见光或紫外线,这就是受激原子的发光现象。

常用线碰撞阻止本领来描述入射带电粒子在介质中单位路径上电离损失的平均能量,记作 $\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}}$ 或 $\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{ion}}$ 。为了消除密度的影响,常用质量碰撞阻止本领来描述,它是 $\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}}$ 除以物质密度 ρ 而得的商,记作 $\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}}$ 。贝特 (Bethe) 用量子力学的处理方法推导重带电粒子的质量碰撞阻止本领公式为

$$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}} = K_1 \frac{Zz^2}{M_a\beta^2} \left[\ln \frac{(2\mu\beta^2)^2}{I^2(1-\beta^2)^2} - 2\beta^2 - 2\frac{C}{Z} - \delta \right] \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.1)$$

式中, $K_1 = \frac{2\pi e^4 N_A}{mc^2} = 2\pi mc^2 r_e^2 N_A = 0.1535 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mol}$, r_e 为电子半径, $r_e = \frac{e^2}{mc^2} = 2.817938 \times 10^{-13} \text{ cm}$, N_A 为阿伏加德罗常数 ($6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), m 为电子静止质量, $mc^2 = 0.511006 \text{ MeV}$, $\mu = mc^2$, e 为电子电荷; β 为相对速度, $\beta = \frac{v}{c}$, v 为带电粒子速度, c 为光速; δ 为考虑密度效应的修正项; Z 为物质的原子序数; z 为重带电粒子的电荷 (以电子电荷的倍数表示); M_a 为物质的相对原子量; I 为物质中原子的平均激发能; $\frac{C}{Z}$ 为壳修正项, 参数 C 由内部各壳层的贡献组成: $C = C_K + C_L + C_M + \dots$ 当入射粒子速度比较低时, 壳修正显得较为重要。

从上述关系式可以看出: ① 电离损失与重带电粒子的电荷 z^2 成正比, 说明带电粒子的电荷 z 越大, 与轨道电子的库仑作用力越大, 因而传递给电子的能量越多; ② 电离损失与带电粒子的速度成反比 (即与入射粒子的能量成反比, Bethe 公式只适用于阻止本领最大值对应的能量以上的能区), 带电粒子传递给轨道电子的能量和相互作用时间有关, 速度愈小, 作用时间愈长, 传递给轨道电子的能量愈大; ③ 电离损失与物质的电子密度成正比, 若 n 表示每单位体积的电子数, 则 $n = \frac{\rho N_A Z}{M_a}$ 。

如果带电粒子是电子, 在入射电子和原子中的电子发生库仑碰撞后, 两者不可分辨, 在实际处理时, 把碰撞后具有较大能量的电子看成入射电子, 而把能量较低电子看成反冲电子, 则每次碰撞的最大能量传递为入射电子能量的一半。可以用公式 (2.2) 表示电子的质量碰撞阻止本领:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{col}} = K_1 \frac{Z}{M_a\beta^2} & \left[\ln \frac{mv^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right. \\ & \left. + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 - \delta \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

式中, E 为入射电子的能量 (MeV), 其他符号含义同上。同样可以得出电离损失与带电粒子的速度成反比, 与物质的电子密度成正比的结论。

2. 带电粒子与靶原子核发生非弹性碰撞

当入射带电粒子到达靶原子核的库仑场时, 其库仑引力和斥力会使入射粒子的速度和方向发生变化。由电磁学理论可知, 伴随着这种运动状态的改变会产生电磁辐射 (称为轫致辐射), 从而造成入射粒子的能量损失, 这种能量损失称为辐射损失。重的带电粒子由于质量较大, 与靶核碰撞后运动状态改变不大, 辐射损失比电离损失要小。而 β 粒子由于质量较小, 与靶核库仑作用后其运动状态改变显著, 因此辐射损失是轻带电粒子损失能量的主要方式。

对于一定能量的带电粒子, 其辐射损失正比于 $\frac{Zz^2}{m^2}$, 其中 Z 为物质的原子序数, z 为带电粒子的电荷数, m 为带电粒子的质量数。辐射损失与 Zz^2 成正比, 表明物质的原子序数愈大、带电粒子的电荷数愈多, 辐射损失愈大。它与带电粒子的质量 m^2 成反比, 表明带电粒子质量愈大, 辐射损失愈小。带电粒子通过辐射方式损失能量, 为定量描述辐射损失能量的大小, 引入辐射阻止本领的概念。带电粒子在物质中单位路径长度上因辐射而损失的平均能量, 记作 $\left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}}$, 同样为消除密度的影响, 常使用质量辐射阻止本领来描述, 它是 $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}}$ 除以物质密度 ρ 而得的商, 记作 $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}}$ 。

若用 E 表示入射电子能量, 当 $mc^2 \ll E \ll 137mc^2 Z^{-\frac{1}{3}}$ 时, 核外电子对核电荷的屏蔽作用可以忽略, 可知质量辐射阻止本领为

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}} = \frac{K_1}{2\pi M_a} \frac{(E + mc^2)}{mc^2} \frac{Z(Z+1)}{137} \times \left[4 \ln \frac{2(E + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right] \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.3)$$

当 $E \gg 137mc^2 Z^{-\frac{1}{3}}$ 时, 核外电子对核电荷的屏蔽是完全的, 质量辐射阻止本领为

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl}\right)_{\text{rad}} = \frac{K_1}{2\pi M_a} \frac{(E + mc^2)}{mc^2} \frac{Z(Z+\zeta)}{137} \times \left[4 \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} + \frac{2}{9} \right] \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.4)$$

式中, $\frac{1}{137}$ 为精细结构常数 ($\alpha = \frac{2\pi e^2}{\eta c} \approx \frac{1}{137}$); ζ 为原子序数的函数, 具体见表 2.1。

3. 带电粒子与靶原子核发生弹性碰撞

当带电粒子与原子核库仑场相互作用时, 其运动方向发生改变, 而作用前后体系的动能与动量守恒, 此过程称为带电粒子与靶原子核的弹性碰撞。入射粒子可以多次与靶原子核发生这种弹性碰撞, 造成能量损失。同时反冲的靶

表 2.1 不同原子序数对应的 ζ 值

Z	ζ
1	1.40
10	1.29
40	1.20
90	1.14

原子核如果能量较高,也可以与其他原子核碰撞,这种级联碰撞可造成靶物质的辐射损伤。从靶物质对入射粒子的阻止作用来讲,这种作用过程也称为“核阻止”。由于重带电粒子质量大,只有当它非常靠近原子核而穿行时,才会发生明显的散射,所以一般重带电粒子在物质中的径迹是比较直的。而电子的质量小,易受到原子核的散射,与核外电子对其散射效应累积,致使电子在穿透物质时,发生严重的散射效应,出射方向偏离较大,具有统计分布特点,入射电子在物质中的径迹曲折杂乱。

4. 带电粒子与靶原子的核外电子发生弹性碰撞

在这种弹性碰撞中,入射粒子与核外电子发生库仑相互作用,碰撞前后体系的能量和动量守恒。入射粒子将微小的一部分能量转移给靶原子的核外电子,但不足以改变核外电子的能量状态。这种相互作用可以看成是入射粒子与整个靶原子的相互作用。只有在极低能量(≤ 100 eV)的电子与物质相互作用时才需要考虑这种作用过程。

2.1.2 描述带电粒子与物质相互作用的几个概念

1. 阻止本领

带电粒子在物质中的一切能量损失,用总质量阻止本领来表示。总质量阻止本领 $\frac{S}{\rho}$ 定义为带电粒子在密度为 ρ 的介质中,穿过的路程 dl 时所损失的一切能量 dE 除以 ρdl 而得的商,即

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (2.5)$$

定义中的一切能量损失,是指带电粒子与物质相互作用的一切过程中的能量损失之和。在一般能量范围内,例如 $E < 10$ MeV,主要是电离损失和辐射损失,而其他过程的能量损失,相对来说,可以忽略不计。因此总质量阻止本领等于入射粒子与核外电子和原子核非弹性碰撞的碰撞质量阻止本领与辐射质量阻止本领之和,即

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{rad}} = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{rad}} \quad (2.6)$$

2. 射程

带电粒子在与物质相互作用的过程中,逐渐耗尽其动能,最后阻留在物质中被物质吸收。带电粒子在某种物质中沿着入射方向从进入到最后被物质吸收所经过的最大直线距离,称为带电粒子在该物质中的射程。射程的大小与粒子的种类、初始能量及吸收物质的性质有关。

3. 比电离

带电粒子通过与核外电子相互作用,能够引起物质原子电离。有些电离是入射粒子直接

作用产生的,称为直接电离(或初级电离);有些电离是由具有较大动能的次级电子(δ 电子)引起的,称为间接电离(或次级电离)。直接电离和间接电离合在一起称为总电离。电离后的原子带正电荷,它与逸出的自由电子合称为离子对。若用 w 表示产生一对离子对所消耗的平均能量,当入射粒子能量为 E 时,则在介质中产生的总的电子离子对数 N 为 E/w 。单位径迹长度上产生的离子对数,称为比电离或电离密度,用 S 表示。比电离可以用线碰撞阻止本领来计算,表示带电粒子在单位路程上电离损失的平均能量。

2.1.3 重带电粒子与物质的相互作用

具有一定能量的重带电粒子与物质相互作用,其能量损失的主要方式是与靶原子的核外电子的非弹性碰撞而导致电子被电离或激发。在本书所讨论的能量范围内,辐射损失及与靶原子核、核外电子发生弹性散射损失的能量可以忽略不计。总质量阻止本领可用碰撞质量阻止本领近似表示。

重带电粒子与核外电子的每一次碰撞只损失很小一部分能量,经多次这种小能量损失而逐渐降低其速度。设重带电粒子的质量为 M ,电荷为 z ,相对速度为 β 。它与原子序数为 Z 、相对原子量为 M_a 、密度为 ρ 的物质相互作用。质量碰撞阻止本领可由下式表示:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}} \propto \frac{Zz^2}{M_a} f(\beta, I, \delta) \quad (2.7)$$

式中

$$f(\beta, I, \delta) = \ln \left[\frac{2\mu\beta^2}{I(1-\beta^2)} \right]^2 - 2\beta^2 - 2\frac{C}{Z} - \delta$$

设有两种速度相同的带电粒子,分别带有电荷 z_1, z_2 ,在给定物质中的阻止本领之比为

$$\frac{\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},1}}{\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},2}} = \frac{z_1^2}{z_2^2} \quad (2.8)$$

也就是说,具有相同速度的两种带电粒子在同一物质中的碰撞阻止本领之比,等于它们所带电荷数的平方之比。

对于一种相对速度为 β 的带电粒子,分别与两种不同的物质 a 和 b 相互作用,如果忽略对数项中 I 和 δ 的差异,可得

$$\frac{\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},a}}{\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},b}} = \frac{\left(\frac{Z}{M_a} \right)_a}{\left(\frac{Z}{M_a} \right)_b} \quad (2.9)$$

也就是说,具有相同速度的重带电粒子在两种物质中的碰撞阻止本领之比,等于此两种物

质的相应原子序数与相对原子量的比值之比。若 $\frac{Z}{M_a} \approx \frac{1}{2}$, 则这两种物质中的质量碰撞阻止本领近似相等, 即

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},a} \approx \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col},b} \quad (2.10)$$

根据 Bethe 阻止本领公式, 可知 $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}} \propto \frac{z^2}{v^2} f(v)$, 即阻止本领只与入射粒子速度 (即 $\frac{E}{m}$) 有关, 而与它的质量无关; $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}} \propto z^2$, 即阻止本领与入射重带电粒子所带电荷的平方成正比, 入射粒子速度相同, 所带电荷数大的粒子的阻止本领大; 阻止本领与靶物质的 NZ 乘积成正比, 原子序数高和密度大的物质阻止本领大。

重带电粒子入射到足够厚的靶物质中, 通过与靶原子的碰撞而逐渐损失能量, 最终停止下来。根据前面的讨论, 重带电粒子的质量大, 当它的速度比较高时, 与靶原子核外电子的非弹性碰撞不会导致运动方向有很大偏离, 轨迹近似为直线, 可以近似认为射程等于其路径长度。如果已知阻止本领即可求出射程。实际上, 由于碰撞过程的统计性, 单能粒子在物质中的射程具有统计分布, 对于重带电粒子, 射程是指平均射程, 即

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{\left(-\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}}} \quad (2.11)$$

对于重带电粒子, $\frac{dE}{dl} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{col}}$, 可知

$$R \propto \left(\frac{M}{z^2} \right) \left(\frac{M_a}{\rho Z} \right) F(\beta_0, I, \delta) \quad (2.12)$$

式中, β_0 为初始相对速度。

对于两种初速度相同而种类不同的带电粒子 1 和 2, 可推得在同一物质中的射程比为

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \quad (2.13)$$

假设函数 $F(\beta_0, I, \delta)$ 主要取决于粒子的相对初始速度 β_0 , 而不同材料的 I, δ 影响甚小, 那么初速度相同的某种重带电粒子, 在两种不同的物质 a 和 b 中的射程比为

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\left(\frac{Z}{M_a} \right)_b \left(\frac{\rho_b}{\rho_a} \right)}{\left(\frac{Z}{M_a} \right)_a} \quad (2.14)$$

该式表明, 只要知道重带电粒子在物质 b 中的射程 R_b , 便可求出在物质 a 中的射程 R_a 。

当 $\frac{Z}{M_a} \approx \frac{1}{2}$ 时, 有

$$R_a \rho_a \approx R_b \rho_b \quad (2.15)$$

实际工作中,可以根据试验数据总结出一些经验公式,估算粒子在物质中的平均射程,例如对于能量在 3 ~ 7 MeV 的 α 粒子在空气中的平均射程表示为

$$R_0 = 0.318 E_{\alpha}^{\frac{3}{2}} \quad (2.16)$$

式中, E_{α} 为 α 粒子能量,单位是 MeV; R_0 表示 α 粒子在 15 °C, 标准大气压下空气中的平均射程,单位为 cm。这个经验公式的误差小于 10%。如果 α 粒子能量较高,则射程近似正比于 $E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}$; 如果 α 粒子能量较低,则射程近似正比于 E_{α}^2 。表 2.2 给出 α 粒子在几种物质中的平均射程。

表 2.2 α 粒子在几种物质中的平均射程

α 粒子能量/MeV	空气 R/cm	生物组织 $R/\mu\text{m}$	铝 $R/\mu\text{m}$
4.0	2.5	31	16
4.5	3.0	37	20
5.0	3.5	43	23
5.5	4.0	49	26
6.0	4.6	56	30
6.5	5.2	64	34
7.0	5.9	72	38
7.5	6.6	81	43
8.0	7.4	91	48
8.5	8.1	100	53
9.0	8.9	110	58
9.5	9.8	120	64
10.0	10.6	130	69

2.1.4 β 射线与物质的相互作用

β 射线即电子,由于质量轻、速度快,与靶物质相互作用时,其能量损失和运动轨迹与重带电粒子不同。电子与靶物质的相互作用主要有电离能量损失和辐射能量损失,而多次散射导致电子在物质中的运动轨迹十分曲折。

快电子通过靶物质时,也会与原子的核外电子发生非弹性碰撞,使靶物质的原子电离或激发,这与重带电粒子的能量损失机制类似。电离损失也是 β 射线在物质中损失能量的一种主要方式。与重离子不同的是,入射电子与靶原子的核外电子发生库仑相互作用时,一次碰撞有可能损失较多的能量,最多可将本身能量的一半转移给靶原子的核外电子。式(2.2)表示入射电子的能量较高时,考虑相对论效应,修正后的电子阻止本领。从电离角度看,和重带电粒子相比,电子的电离本领比较弱,所以比电离值也比较小。

β 粒子穿过物质时,除了使原子电离或激发损失能量外,还有另一种能量损失的方式——