

医用辐射危害控制与评价

主 编 苏 旭

副主编 侯长松 邓大平

中国原子能出版社

医用辐射危害控制与评价

主 编 苏 旭

副主编 侯长松 邓太平

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医用辐射危害控制与评价 / 苏旭主编. —北京:
中国原子能出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5022-8647-7
I. ①医… II. ①苏… III. ①放射医学—辐射防护—
教材 IV. ①R142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 269383 号

医用辐射危害控制与评价

出版发行 中国原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 刘 岩 姚瑞全
装帧设计 崔 彤
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 16.375
字 数 405.6 千字
版 次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8647-7 定 价 87.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com
发行电话: 010-68452845 版权所有 侵权必究

编辑委员会

主 编：苏 旭

副主编：侯长松 邓太平

编 委（按姓氏笔画顺序）：

朱卫国 刘建香 张 奇 张 震

张庆召 练德幸 梁 婧

前 言

随着科学技术和经济建设的进步与发展，核能核技术已广泛应用于工农业生产、军事和医疗卫生事业中，并发展迅猛，尤其是放射诊疗技术更是日新月异，放射诊疗技术的应用极大地促进了医学的进步与发展，并成为医学诊疗不可或缺的技术手段。然而，放射诊疗技术在促进医学进步、造福人类的同时，如果没有科学的辐射防护，缺乏合理的防护设施和措施，将对患者/受检者、医护人员和公众等造成不必要的辐射照射和健康影响。因此，加强医用辐射检测与评价具有重要的现实意义。为保障放射诊疗技术应用的可持续、健康发展，进一步规范医用辐射的检测和评价工作，提高专业技术人员的能力和水平，中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所组织有关专家编写了《医用辐射危害控制与评价》一书。

《医用辐射危害控制与评价》一书由八个章节组成，第一章、第二章和第三章介绍了核辐射物理学、放射生物学和辐射防护基础知识；第四章介绍了放射防护评价的内容及格式等基本要求；第五章、第六章和第七章详细阐述了放射诊断、放射治疗和核医学诊疗过程中的放射性职业病危害的产生、检测、放射防护及潜在事故的预防措施；第八章介绍了放射防护管理的主要内容。本书涵盖了专业技术人员进行医用辐射危害检测和评价及管理应掌握的基本理论和技能。

前期出版的《放射防护检测与评价》内容覆盖核电厂、大型辐照装置、加速器、铀矿冶、钍矿及伴生放射性矿等建设项目的放射防护检测与评价。《医用辐射危害控制与评价》阐述了放射诊断、放射治疗和核医学建设项目放射性职业病危害检测与评价，是前期出版的《放射防护检测与评价》的姊妹出版物。

《医用辐射危害控制与评价》可供放射卫生检测与评价专业技术人员和放射卫生监督管理人员使用，同时可作为大专院校放射医学与防护专业教学参考用书。

《医用辐射危害控制与评价》涉及核物理学、放射生物、放射卫生等多个学科领域，由于编写人员知识深度与广度有限，且编制时间仓促，因此难免存在不妥之处，恳请读者不吝指正。

目 录

第一章 核辐射物理学基础	1
第一节 放射性衰变	1
一、原子核基本性质	1
二、原子核衰变	5
第二节 射线与物质的相互作用	12
一、带电粒子与物质的相互作用	13
二、X、 γ 射线与物质的相互作用	15
三、中子与物质的相互作用	19
四、相互作用系数	21
五、穿透能力	25
第二章 放射生物学基础	27
第一节 电离辐射生物学作用的基础	27
一、相对生物效能及其加权吸收剂量	27
二、电离辐射的直接作用和间接作用	29
三、辐射生物效应分类	30
四、影响电离辐射生物效应的主要因素	31
五、辐射致癌危险度及组织权重因数	35
第二节 电离辐射的细胞效应	36
一、细胞的放射敏感性	36
二、细胞存活的剂量-效应关系	39
第三节 职业性放射性疾病	43
第三章 辐射防护基础	45
第一节 电离辐射的量与单位	45
一、物理量	45
二、辐射防护中使用的评价量	58

三、辐射防护实用量	63
四、几类量的关系	66
第二节 辐射防护体系	67
一、照射情况的类型	67
二、辐射实践的正当性	68
三、辐射防护和安全最优化	69
四、剂量限值和剂量约束	70
第三节 常用辐射防护方法	76
一、外照射及其防护	77
二、内照射及其防护	86
第四章 放射防护评价基本要求	88
第一节 放射防护评价过程管理	89
一、评价程序与方法	89
二、评价资料收集	92
三、质量控制	93
第二节 评价报告书的内容与格式	94
一、内容与格式的总体要求	94
二、预评价报告书	94
三、控制效果评价报告书	101
第五章 X 射线诊断项目危害控制与评价	105
第一节 X 射线诊断设备及工作原理	105
一、诊断设备	105
二、工作原理	106
第二节 辐射危害因素识别	107
第三节 辐射危害控制设施及措施	108
一、工作场所布局、分区及其管理	108
二、机房屏蔽防护要求	109
三、机房尺寸要求	114
四、X 射线诊断检查一般要求	114
五、其他防护措施	115

第四节 辐射监测	116
一、场所监测	116
二、质量控制检测	118
第五节 潜在照射控制	121
第六章 放射治疗危害控制与评价	123
第一节 放射治疗设备及工作原理	123
一、医用电子直线加速器	123
二、质子重离子加速器	124
三、 ^{60}Co 治疗机	124
四、 ^{60}Co 源立体定向治疗	125
五、X 射线治疗机	125
六、后装治疗机	125
第二节 辐射危害因素识别	126
一、各辐射源产生的射线类型	126
二、放射治疗装置的辐射源项	126
第三节 辐射危害控制设施及措施	129
一、场所布局及辐射工作场所分区	129
二、屏蔽计算	130
三、安全联锁	143
四、应急开关	145
五、通风	145
六、视频对讲装置、警示标识、声光报警装置、个人防护用品	145
七、其他防护要求	146
第四节 辐射监测	146
一、场所监测	146
二、设备质量控制检测	156
第五节 潜在照射控制	158
一、潜在照射	158
二、事故预防	158
三、应急预案	159

第七章 核医学诊疗危害控制与评价 162

 第一节 核医学诊疗原理 162

 一、核医学诊断和治疗原理 162

 二、核医学诊疗工作流程 169

 第二节 辐射危害因素识别 172

 一、核医学诊断过程中的辐射危害因素 173

 二、核医学治疗过程中的辐射源项 176

 第三节 辐射危害控制设施及措施 177

 一、工作场所的放射防护要求 177

 二、核医学诊疗室的屏蔽要求 187

 三、操作的防护要求 195

 四、放射性污染控制和废物管理 197

 五、个人防护用品 199

 第四节 辐射监测 200

 一、工作场所监测 200

 二、个人监测 206

 三、设备质量控制检测 206

 第五节 潜在照射控制 207

 一、潜在照射 207

 二、事故预防 208

 三、应急方案 208

 第六节 放射性核素治疗患者的出院管理 209

 一、患者出院的体内放射性活度要求 209

 二、患者出院时体内放射性活度控制方法 210

第八章 放射防护管理与评价 212

 第一节 组织机构及职责 212

 第二节 个人剂量监测 213

 第三节 职业健康检查 214

 第四节 医疗照射的控制 215

 一、医疗照射的正当性 215

二、医疗照射的防护最优化·····	218
三、放射诊断指导水平·····	224
四、医疗照射的质量保证与质量控制·····	233
第五节 辐射应急·····	234
第六节 教育培训·····	238
第七节 辐射监测与评价·····	239
第八节 其他管理措施·····	240
一、放射诊疗许可·····	240
二、放射诊疗建设项目卫生审查·····	243
致谢·····	246
参考文献·····	247

第一章 核辐射物理学基础

第一节 放射性衰变

一、原子核基本性质

(一) 原子结构

世界上的物质是由分子组成的，用化学方法可以分解或合成分子。分子是由原子组成的，原子是构成元素的最小单位，其直径仅为 10^{-10} m，质量约为 $10^{-24} \sim 10^{-22}$ g，用化学方法不能分解原子。原子是由更小的基本粒子组成，这些基本粒子包括质子、中子和电子。

质子 (p) 是一种带 1.6×10^{-19} 库仑 (C) 正电荷的亚原子粒子，它的直径约为 $1.6 \times 10^{-15} \sim 1.7 \times 10^{-15}$ m，质量是 $1.672\,623\,1 \times 10^{-27}$ kg，大约是电子质量的 1 836.5 倍。

电子 (e^-) 带有和质子正电荷相同数量的负电荷，电子的质量约为 $1/1\,840$ 原子质量单位，在考虑原子质量时，大多数情况下电子的质量可以忽略不计。

中子为电中性的一个基本粒子，其质量接近于 1 个原子质量单位。

在原子的中间有一个带正电荷的原子核，原子核的周围有等值带负电荷的电子按照一定的轨道绕核运行，最靠近原子核的轨道最多只能容纳 2 个电子，而第二层轨道能达到 8 个电子，……，依此类推直到外层轨道。内层轨道称为 K 轨道 (或 K 壳层)，第二层轨道为 L 壳层，第三层轨道为 M 壳层等等，K、L、M、N 壳层最多能够容纳的电子数分别是 2、8、18、32。例如，图 1-1 表示的锌的原子结构中有 30 个电子，排列在 4 层壳层中。

中子和质子构成了原子核，原子核里的正电荷总数等于核外电子负电荷的总数，图 1-2 表示了两种简单的原子，一种是氢原子，另一种是氦原子。氢原子是所存原子中最简单的原子，而且是一种唯一不包含中子的原子。

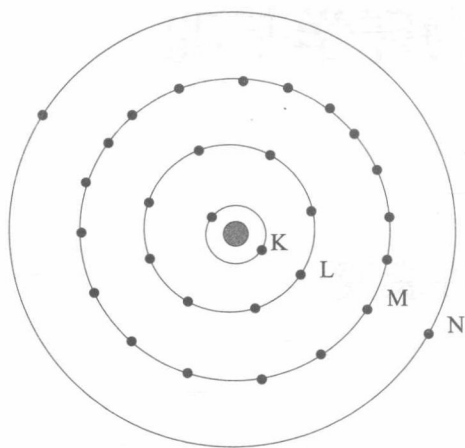


图 1-1 锌原子的原子结构

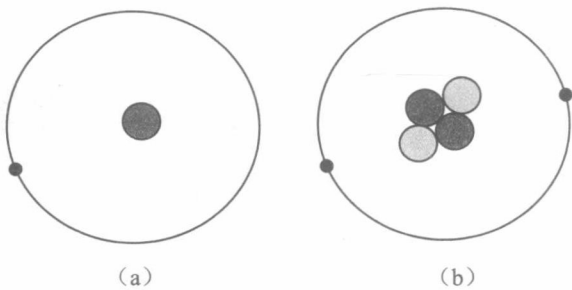


图 1-2 氢和氦的原子结构
(a) 氢; (b) 氦

原子核外的电子按照轨道绕核运行。在某一轨道上的电子具有一定的能量，电子可以吸收外来的能量从能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道，这种现象叫做原子的激发。如果外来的能量较大，使得轨道上的电子脱离原子核的束缚力而自由运动，则叫原子的电离。当电子从能量较高的外层轨道跃迁到能量较低的内层轨道时，电子将多余的能量以电磁波的形式辐射出来。

这一电磁波的波长 λ 和两个轨道能量级的关系可以用下式表示：

$$hc / \lambda = E_n - E_{n'} \tag{1.1}$$

式中： h ——普朗克常数， $h=6.62\times10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；
 c ——光在真空中的速度， $c \approx 3\times10^{10} \text{ cm/s}$ ；
 E_n 和 $E_{n'}$ ——分别代表 n 和 n' 壳层中电子的能量。

(二) 质量数

原子中电子的微小质量可以忽略，原子的质量可以用质子和中子的数目来确定。原子核内的质子和中子数的总和叫做原子质量数，用符号 A 表示：

$$\text{质量数}(A) = \text{质子数} + \text{中子数}$$

例如：图 1-2 (b) 中的氦原子

质子数	2
-----	---

中子数	2
-----	---

质量数 (A)	4
-------------	---

就图 1-2 (a) 中的氢原子来说

质子数	1
-----	---

中子数	0
-----	---

质量数 (A)	1
-------------	---

(三) 原子序数

原子中质子的数目称为原子序数, 用符号 Z 表示:

原子序数 (Z) = 质子数

例如: 氢有 1 个质子, $Z=1$; 氦有 2 个质子, $Z=2$; 锌有 30 个质子, $Z=30$ 。

因而上面叙述过的那种类型的氢原子用 ${}^1_1\text{H}$ 表示, 氦原子用 ${}^4_2\text{He}$ 表示, 锌原子用 ${}^{60}_{30}\text{Zn}$ 表示。

质子数也就是原子序数, 它确定了原子的化学特性, 原子序数为 1 的所有原子是氢原子, 原子序数为 2 的所有原子是氦原子, 原子序数为 3 的所有原子是锂原子, 等等。

(四) 元素

具有相同核电荷数即相同质子数的同一类原子的总称, 称为元素。

元素按原子量在元素周期表中依序排列, 每种元素有一个元素符号。用 X 表示元素, 用 A_ZX_N 表示质量数为 A , 原子数为 Z , 中子数为 N 的元素, 通常用 A_ZX 表示。例如, ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 表示原子质量数为 60, 原子序数 (即质子数、核外电子数) 为 27 的钴原子核, 其中子数为 $N=A-Z=60-27=33$ 。

(五) 同位素

质子数相同, 但中子数不同, 因而具有相同原子序数但质量数不同的一类核素, 互称为同位素。同一种元素的同位素在元素周期表中占据同一位置, 其化学性质相同。

例如, 元素磷 (P) 的原子序数为 15 (也就是每个原子含有 15 个质子),

但是它可以具有不同数目的中子：

- $^{28}_{15}\text{P}$ 15 个质子 13 个中子 ($Z=15, A=28$)
- $^{29}_{15}\text{P}$ 15 个质子 14 个中子 ($Z=15, A=29$)
- $^{30}_{15}\text{P}$ 15 个质子 15 个中子 ($Z=15, A=30$)
- $^{31}_{15}\text{P}$ 15 个质子 16 个中子 ($Z=15, A=31$)
- $^{32}_{15}\text{P}$ 15 个质子 17 个中子 ($Z=15, A=32$)
- $^{33}_{15}\text{P}$ 15 个质子 18 个中子 ($Z=15, A=33$)
- $^{34}_{15}\text{P}$ 15 个质子 19 个中子 ($Z=15, A=34$)

这些不同类型的原子称为元素磷的同位素。图 1-3 中画出了氦 ($Z=2$) 的三种同位素，这三种同位素通常分别称之为 ^3_2He ， ^4_2He ， ^5_2He 。

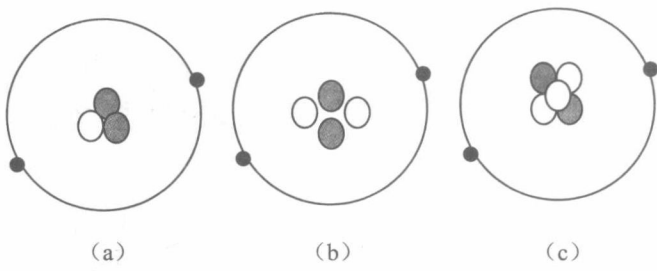


图 1-3 氦的三种同位素
(a) ^3_2He ；(b) ^4_2He ；(c) ^5_2He

因为元素的化学特性取决于这种元素的原子序数，一种给定元素的所有同位素在化学性质上是相同的。

同位素可分为稳定性同位素和放射性同位素。放射性同位素又可分为天然放射性同位素和人工放射性同位素。人工生产放射性同位素可以用核粒子轰击（例如，在核反应堆中用中子轰击）天然同位素。放射性同位素是不稳定的，将自发地以放出次级粒子或 γ 光子的方式向稳定核素转化，核素是指任一种元素的任一种同位素。

除少数较轻的元素外，原子中的中子数都超过质子数，这种差数随 Z 的增大而增大，例如：

- ^4_2He 2 个质子 + 2 个中子
- $^{31}_{15}\text{P}$ 15 个质子 + 16 个中子
- $^{65}_{30}\text{Zn}$ 30 个质子 + 35 个中子
- $^{238}_{92}\text{U}$ 92 个质子 + 146 个中子

(六) 同质异能素

原子核中的质子和中子在核力作用下像核外电子一样有一定的轨道能级，电荷数和质量数都相同，但能量状态不同的核素，称为同质异能素。例如： ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 与 ${}^{60\text{m}}_{27}\text{Co}$ 是同质（ A 相同、 Z 相同）异能的两种核素，此处以 m 表示原子核处于能级较高的激发态。因此，一个核素包括电荷数、质量数和核子能级三个参数。

(七) 原子核的稳定性

中等质量原子核的核子平均结合能比轻核和重核都大，因此中等核最稳定。图 1-4 是最常见的稳定核的中子-质子图。从图中可以看出，对于稳定核， $Z < 20$ 时， $n/Z \approx 1$ ；当 $Z > 20$ 时， $n/Z \approx 1.5$ 。 $Z=82$ 的铅（Pb）以后，天然存在的核素都具有放射性。

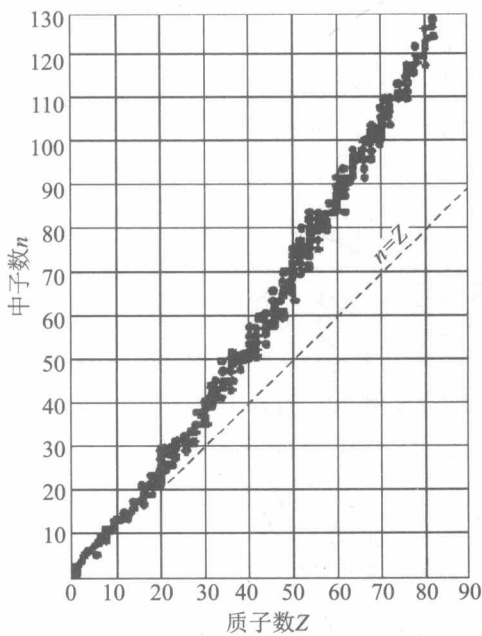


图 1-4 最常见的稳定核的中子-质子图

二、原子核衰变

(一) 衰变方式

1896 年贝可勒尔（Becquerel）首先发现有些元素具有天然放射性，他发现

放在铀化合物附近的照相底片变黑。后来认识到这个现象是由于铀发射辐射的缘故。在此后的 10 年里，卢瑟福（Rutherford）、索迪（Soddy）、居里夫妇（Mr. and Mrs Curie）和其他科学家，在其著名的实验工作中证实了某些原子核不稳定，这些不稳定的原子核主要通过三种方式（即 α 、 β 和 γ 衰变）以一定的衰变规律向稳定态转化。

1. α 衰变

有些放射性核素衰变时释放出结合在一起的两个质子和两个中子组成的 α 粒子，称为 α 衰变， α 粒子有 2 e 正电荷，因此放射性元素发生 α 衰变后，原子序数降低 2，质量数 A 减少 4 个原子质量单位。 α 衰变一般发生于重的不稳定核素中，原子序数大于 82 的天然放射性核素多发生此种衰变，其中 ^{226}Ra 、 ^{210}Po 、 ^{235}U 是典型的 α 衰变核素。

α 衰变可用下式表示：

$$^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He} + Q_\alpha \text{ 或 } ^A_Z\text{X} \xrightarrow{\alpha} ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + Q_\alpha$$

例如： $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He} + Q_\alpha$

Q_α 称为衰变能（或 Q 能），即母核衰变为子核时放出的能量，将分给子核和放出的 α 粒子。

α 粒子带正电荷，原子量接近 4，质量较大，比电子重约 7 500 倍，运动较慢，它每次与电子碰撞只损失很少一部分能量，需要通过多次碰撞，速度才逐渐减慢。而且碰撞过程基本不改变方向。 α 粒子损失的能量使得粒子径迹附近形成大量的激发分子与粒子，例如 ^{210}Po 衰变产生的一个 5.6 MeV 的 α 粒子通过 3.8 cm 的空气层被阻停时，总共产生约 150 000 个离子对和更多的激发分子。因此，当 α 粒子穿入介质后，随着深度的增加和更多电离事件的发生，能量逐渐耗尽，粒子运动速度变慢，而慢速粒子又引起了更多的电离事件，因此在其行径的末端，电离密度明显增大，形成峰值（图 1-5），称为布喇格峰（Bragg peak）。

外照射下， α 粒子对人体不会产生严重危害。但当发射 α 粒子的放射性核素进入体内时，造成的损伤较重。在放射治疗中用高能中子（>20 MeV）和负 π 介子照射组织时，在组织中可产生 α 粒子，对杀伤癌细胞起到重要作用。因此，布喇格峰位置的测量对放射治疗条件的考虑相当重要。

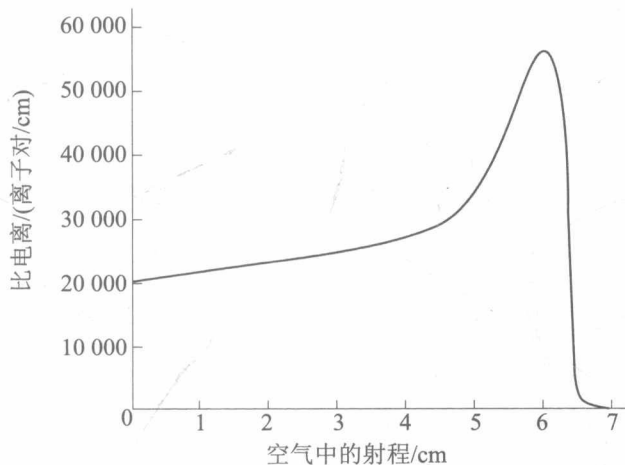
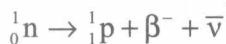


图 1-5 α 粒子在空气中的比电离曲线
图中显示了布喇格电离峰

2. β 衰变

不稳定原子核通过放出 β 粒子或俘获核外的轨道电子转变为另一原子核的现象。 β 衰变分为 β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获三种类型。中子过多的不稳定核素易发生 β^- 衰变，质子过多的不稳定核素易发生 β^+ 衰变或轨道电子俘获。 β 衰变放出的是电子或正电子，带有一个负或正电荷。因此放射性元素发生 β 衰变后，原子序数变化 1 个单位，质量数 A 没有改变。

β^- 衰变过程中不仅放出 β^- 粒子，还放出一种不带电的反中微子 ($\bar{\nu}$)，因此 β^- 衰变可看成是母核中一个中子转变为质子同时放出反中微子的过程，即：



反中微子是中微子 ν 的反粒子，静止质量几乎为零、自旋为 $1/2$ 的中性粒子，其自旋方向与运动方向相同。发生 β^- 衰变后，子核和母核的质量数 A 相同，核电荷数 Z 增加 1。如果用 ${}_Z^AX$ 和 ${}_{Z+1}^AY$ 分别代表母核、子核，则 β^- 衰变可用下式表示：



例如： ${}_{15}^{32}\text{P} \rightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$

式中， Q_{β^-} 为 β^- 衰变能（或 β^- 能）。

发生 β^+ 衰变后的子核同母核具有相同的质量数 A ，但原子序数减少 1，因此 β^+ 衰变可以看成是在原子核内一个质子转变成中子同时放出正电子和中微子的结果，即：