

放射医学国家重点学科资助高校放射医学系列教材，供医学类专业使用

涂 彧 周菊英 主 编 孙 亮 副主编

医学放射 防护学



原子能出版社

放射医学国家重点学科资助高校放射医学系列教材,供医学类专业使用

医学放射防护学

涂 彧 周菊英 主 编
孙 亮 副主编

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

医学放射防护学/涂晟,周菊英主编. —北京:原子能出版社,2010.12
ISBN 978-7-5022-5129-1

I. ①医… II. ①涂… ②周… III. ①放射医学—辐射防护
IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 245238 号

内 容 简 介

本教材从电离辐射核物理基础入手,比较详细地概括了放射防护学的基本知识,包括电离辐射来源,放射防护目的、原则与标准,内外照射防护措施等内容,重点介绍了医用电离辐射过程中对患者的防护及相关的医用放射性废物管理、事故的应对和医疗行业的辐射安全文化素养,作为知识的扩展,描述了电离辐射在工业和军事领域的应用与防护和对非人类物种的辐射防护。

本书是医学类及相关专业本科生适用教材,也可以作为电离辐射医学应用从业人员和电离辐射监管人员参考用书。本教材是 2007 年江苏省精品教材立项建设教材。

医学放射防护学

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 肖 萍

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 24.375 字 数 608 千字

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5129-1 定 价 68.00 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

前 言

自伦琴 1895 年发现 X 射线、贝可勒尔 1896 年发现铀的放射性以来,电离辐射线在人类社会的发展过程中扮演着越来越重要的角色。在人们应用电离辐射的实践过程中,放射防护也随之产生和相伴发展。跨越了三个世纪的电离辐射应用历史,也是放射防护的历史。人们在电离辐射应用的实践中,逐渐积累了放射防护经验,逐步确立和不断完善着电离辐射防护的目的、原则、标准和措施。医用电离辐射是涉及人数最多、范围最广的应用领域,核与辐射技术在医学领域的广泛应用,极大地改善了疾病诊断与治疗的条件,为提高大众的健康水平作出了巨大的不可替代的贡献。

医学放射防护学是一门研究电离辐射医学应用过程中对与电离辐射线相关的患者、医务人员和公众实施保护的学科,是放射防护学的重要组成部分,它通过提供合适的符合实际的与源或人相关的防护措施与技术,保证在达到以电离辐射诊断与治疗疾病目的的同时,将受照人员放射危险降到尽可能低的水平,为医用电离辐射的应用保驾护航。

苏州大学作为放射医学国家重点学科所在地,有责任在放射卫生与防护领域作出自己的贡献,为此,从重点学科建设经费中划拨出版专项经费,组织国内富有理论知识和实践经验的同行专家参与编写此书,为临床医学类专业学生提供日渐多样的医用电离辐射应用的防护知识的教材。参与编写的人员来自南方医科大学、第三军医大学、扬州大学、江苏省疾病预防控制中心、山东省疾病预防控制中心和苏州大学。

在编写过程中,编者密切关注国内外放射防护新动向、新内容、新进展、新成果,融入了国际放射防护委员会(ICRP)2007 年 103 号报告的最新内容,有关我国的放射卫生防护标准的资料截至 2010 年 11 月,这些都是教材“新”的体现。同时紧密结合实际,在介绍放射防护目的、原则与标准后,直接进入医用电离辐射内、外照射防护措施的讲述,使得理论与实践的结合在防护措施中得以体现。

本书是放射医学国家重点资助出版的系列教材中的一种,也是 2007 年江苏

省精品教材立项建设项目,在编写的组织与实施过程中得到了学校和国内同行的大力支持和帮助,复旦大学放射医学研究所卓维海教授对本书也提出了许多中肯的意见和建议,苏州大学放射医学专业研究生孙秀锦、陈凤、陈娜、李磊做了不少书稿的文字校验工作,在此一并表示感谢!

限于水平和时间,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2010.12

目 录

第 1 章 电离辐射的物理基础	(1)
1.1 原子、原子核与放射性	(1)
1.1.1 原子、原子核	(1)
1.1.2 放射性	(4)
1.2 射线与物质的作用	(6)
1.2.1 带电粒子与物质的相互作用	(7)
1.2.2 X(γ)射线与物质的相互作用	(10)
1.3 电离辐射剂量	(17)
1.3.1 基本剂量学量	(17)
1.3.2 放射防护量	(21)
复习思考题	(26)
参考文献	(26)
第 2 章 电离辐射生物学效应	(27)
2.1 辐射生物学效应的分类和影响因素	(27)
2.1.1 辐射生物学效应分类	(27)
2.1.2 影响辐射生物学效应的因素	(28)
2.2 电离辐射的细胞生物学效应	(30)
2.2.1 电离辐射所致的细胞死亡与凋亡	(30)
2.2.2 细胞存活曲线及细胞损伤	(31)
2.2.3 染色体的辐射效应	(33)
2.2.4 电离辐射的旁效应	(35)
2.3 电离辐射的随机性效应	(35)
2.3.1 随机性效应的概念及特征	(35)
2.3.2 电离辐射致癌效应	(35)
2.3.3 电离辐射遗传效应	(39)
2.4 电离辐射的确定性效应	(40)
2.4.1 出生前照射效应及疾病	(40)
2.4.2 出生后确定性效应	(41)

2.4.3 儿童的确定性效应	(45)
复习思考题	(47)
参考文献	(47)

第3章 电离辐射来源..... (48)

3.1 天然辐射源	(48)
3.1.1 宇宙辐射	(48)
3.1.2 陆地辐射	(50)
3.1.3 天然本底照射的平均年有效剂量	(55)
3.1.4 人类实践活动增加的天然辐射照射	(56)
3.2 人工辐射源	(56)
3.2.1 人工辐射源对公众产生的照射剂量	(56)
3.2.2 人工辐射源对职业人员产生的照射剂量	(63)
复习思考题	(63)
参考文献	(64)

第4章 放射防护标准..... (65)

4.1 放射防护简史	(65)
4.1.1 国际防护标准的历史演变	(65)
4.1.2 我国的放射防护标准发展历程	(69)
4.2 放射防护目的与原则	(70)
4.2.1 放射防护制定的生物学依据	(70)
4.2.2 放射防护目的	(73)
4.2.3 放射防护三原则	(73)
4.3 放射防护标准	(75)
4.3.1 关于防护与安全的基本情况	(75)
4.3.2 剂量限值	(80)
4.3.3 辐射实践的豁免准则及豁免水平	(86)
4.3.4 职业照射的控制	(87)
4.3.5 医疗照射的控制	(89)
4.3.6 公众照射的控制	(94)
4.4 放射防护相关国际组织	(94)
4.4.1 国际放射防护委员会 ICRP	(94)
4.4.2 国际辐射单位与测量委员会 ICRU	(95)
4.4.3 国际原子能机构 IAEA	(96)
4.4.4 联合国原子辐射效应科学委员会 UNSCEAR	(96)

复习思考题	(97)
参考文献	(98)

第 5 章 医用外照射防护 (99)

5.1 医用外照射源项	(99)
5.1.1 医用放射诊断装置	(99)
5.1.2 医用常见的放射治疗设备	(103)
5.2 医用外照射防护基本措施	(106)
5.2.1 工作场所区域划分	(106)
5.2.2 减少医用照射源对人体外照射剂量的三项措施	(107)
5.3 物质对光子的衰减规律	(108)
5.3.1 窄束 γ 光子通过屏蔽体时的减弱规律	(108)
5.3.2 宽束 γ 光子通过屏蔽体时的减弱规律	(109)
5.4 屏蔽体厚度的估算	(112)
5.4.1 γ 点源整体屏蔽厚度估算	(112)
5.4.2 ^{60}Co 治疗室屏蔽厚度估算	(114)
5.4.3 电子直线加速器治疗室屏蔽厚度估算	(116)
5.4.4 医用 X 射线诊断室屏蔽厚度估算	(116)
5.4.5 β 射线屏蔽厚度估算	(118)
5.5 医用外照射场所的建造与防护要求	(120)
5.5.1 诊断 X 射线机房的建造与防护要求	(120)
5.5.2 γ 远距治疗室设计的防护要求	(121)
5.5.3 医用电子加速器室设计的防护要求	(122)
5.5.4 联锁装置	(123)
复习思考题	(127)
参考文献	(128)

第 6 章 医用内照射防护 (129)

6.1 开放型放射性核素的医学应用	(129)
6.1.1 开放型放射性核素的诊断应用	(129)
6.1.2 开放型放射性核素的治疗应用	(129)
6.2 操作开放源的辐射危险	(130)
6.2.1 开放源的外照射	(130)
6.2.2 表面放射性污染	(130)
6.2.3 工作场所的空气污染	(130)
6.2.4 放射性核素进入人体内的途径	(131)

6.3 内照射防护的基本原则与措施	(131)
6.3.1 围封包容	(131)
6.3.2 保洁去污	(131)
6.3.3 个人卫生防护	(131)
6.3.4 妥善治理放射性废物	(131)
6.4 工作场所的建筑设计及防护要求	(132)
6.4.1 工作场所分级、分类	(132)
6.4.2 对工作场所建筑设计的防护要求	(136)
6.4.3 工作场所选址	(136)
6.4.4 核医学工作场所平面布局	(137)
6.4.5 对核医学诊疗场所内环境及设备的要求	(138)
6.4.6 辐射监测	(140)
6.5 开放型放射性核素操作的个人防护	(141)
6.5.1 个人安全操作的卫生要求	(141)
6.5.2 安全操作	(141)
6.5.3 穿戴个人防护衣具	(142)
6.5.4 非密封源易发事故及防护对策	(142)
6.6 去除表面放射性污染	(143)
6.6.1 去污的一般原则	(143)
6.6.2 体表去污	(144)
6.6.3 设备表面去污	(145)
6.6.4 工作服表面污染的去污方法	(147)
6.6.5 评价去污染效果的指标	(147)
复习思考题	(148)
参考文献	(148)

第7章 医用放射性废物的收集与处理	(149)
7.1 放射性废物的来源与分类	(149)
7.1.1 常见的放射性固体废物	(149)
7.1.2 常见的放射性液体废物	(149)
7.1.3 常见的放射性气载废物	(149)
7.2 放射性废物的收集与贮存	(150)
7.2.1 原则与要求	(150)
7.2.2 放射性废液的收集与处理	(151)
7.2.3 固体放射性废物收集与处理	(152)
7.2.4 气载放射性废物的处理	(153)

7.2.5 用于设备质控的废弃密封源的处理	(153)
7.3 建立废物管理制度	(153)
7.4 放射性废物管理需要注意的问题	(153)
复习思考题	(154)
参考文献	(154)

第8章 放射诊断与放射治疗过程对患者的防护 (155)

8.1 对患者实施放射防护应遵循的原则	(155)
8.1.1 放射诊断中对患者防护应遵循的基本原则	(155)
8.1.2 放射治疗中对患者防护应遵循的基本原则	(159)
8.2 医院应承担的防护职责	(162)
8.2.1 放射诊疗用房与功能区分布	(162)
8.2.2 配备合格的仪器设备	(163)
8.2.3 具备防护知识的医务人员	(163)
8.3 放射诊断过程中对患者防护的基本措施	(165)
8.3.1 应保证X射线发生器的基本条件	(165)
8.3.2 在特殊诊断检查中应当采取的措施	(166)
8.3.3 减少患者受照剂量的措施	(168)
8.4 放射治疗过程中对患者防护的基本措施	(172)
8.4.1 远距离治疗机及辅助设备应满足防护要求	(172)
8.4.2 近距离治疗中须考虑的防护问题	(177)
8.4.3 靶区以外器官屏蔽	(177)
8.4.4 治疗装置的安全运行和联锁装置的应用	(180)
8.5 医用电离辐射设备的质量保证与质量控制	(180)
8.5.1 设备质量管理的作用	(180)
8.5.2 设备质量管理的任务	(181)
8.5.3 设备质量保证与质量控制	(181)
8.5.4 质量保证与质量控制的好处	(181)
8.5.5 有效制定与使用设备的质量管理与质量控制	(182)
复习思考题	(183)
参考文献	(183)

第9章 核医学诊疗过程对患者的防护 (184)

9.1 临床核医学放射防护应遵循的基本原则	(184)
9.1.1 放射实践的正当性	(184)
9.1.2 放射防护的最优化	(184)

9.1.3 个人剂量限值和剂量约束值	(184)
9.2 医院应承担的防护职责	(185)
9.2.1 配备必要的防护设施	(185)
9.2.2 加强人员的培训及管理	(185)
9.2.3 制订核医学质量保证计划,建立必要的规章制度	(185)
9.3 核医学诊断中对患者的防护	(187)
9.3.1 严格掌握检查的适应证及操作程序	(187)
9.3.2 诊断用场所的布局应有助于工作程序	(193)
9.3.3 对陪同人员的防护	(193)
9.3.4 减少患者体内的辐射吸收剂量	(193)
9.3.5 对特殊人群的防护	(194)
9.4 核医学治疗中对患者的防护	(195)
9.4.1 确定门诊治疗和住院治疗的原则	(196)
9.4.2 治疗性放射性药物的选用	(196)
9.4.3 核医学治疗中患者的防护原则	(197)
9.4.4 核医学治疗中患者的防护要求	(197)
9.4.5 治疗给药失误的应急处理原则	(198)
复习思考题	(198)
参考文献	(199)

第 10 章 核与辐射技术的军事应用及其防护

10.1 核武器	(200)
10.1.1 核武器的历史	(200)
10.1.2 核武器技术水平的主要标志	(201)
10.1.3 核武器的种类、爆炸原理、基本构造	(202)
10.1.4 核武器的杀伤破坏因素	(205)
10.1.5 核武器损伤的防护	(208)
10.2 贫铀弹	(211)
10.2.1 概述	(212)
10.2.2 贫铀弹	(213)
10.3 核动力装置	(217)
10.3.1 核动力装置的基本组成与工作过程	(217)
10.3.2 核反应堆自身构造的防护	(220)
10.3.3 我国为保证核电安全采取的措施	(221)
10.3.4 核动力厂的应急准备和应急响应	(221)
复习思考题	(222)

参考文献	(222)
第 11 章 核与辐射技术在工业应用及其防护	(223)
11.1 工业辐照及其防护	(223)
11.1.1 工业 γ 辐照	(224)
11.1.2 工业电子加速器辐照	(238)
11.2 工业辐射成像技术及其防护	(247)
11.2.1 工业辐射照相法的分类	(247)
11.2.2 X 射线成像技术	(248)
11.2.3 工业成像系统实例	(250)
11.2.4 工业辐射成像安全与防护	(252)
11.3 工业核仪器仪表及其防护	(256)
11.3.1 概述	(256)
11.3.2 指数型工业核仪表	(257)
11.3.3 料位计的工作原理	(258)
11.3.4 水分测量	(259)
11.3.5 同位素静电消除器的应用	(260)
11.3.6 离子感烟报警器的应用	(260)
11.3.7 工业核仪器仪表的辐射防护与安全	(260)
复习思考题	(264)
参考文献	(264)
第 12 章 放射卫生监督与辐射事故	(265)
12.1 放射卫生法规的历史沿革与体系	(265)
12.1.1 放射卫生法规的历史沿革	(265)
12.1.2 我国辐射安全与防护法规的层次	(266)
12.1.3 我国发布的辐射防护标准	(266)
12.1.4 辐射安全与防护法规对辐射防护管理的意义	(267)
12.2 放射工作场所辐射防护监督管理	(268)
12.2.1 建设项目“三同时”	(268)
12.2.2 放射源分类办法	(269)
12.2.3 辐射安全许可制度	(269)
12.2.4 放射诊疗工作许可制度	(272)
12.3 辐射事故	(275)
12.3.1 辐射事故的类型	(276)
12.3.2 辐射事故的基本特点	(282)

12.3.3 辐射事故分级	(287)
12.3.4 辐射事故应急处理	(287)
12.3.5 辐射事故的处理	(290)
12.3.6 辐射事故的预防	(292)
12.4 放射诊疗事故	(293)
12.4.1 放射诊断事故	(293)
12.4.2 放射治疗事故	(294)
12.4.3 临床核医学实践中发生的放射事故	(296)
复习思考题	(299)
参考文献	(300)

第 13 章 放射工作人员的职业健康管理	(301)
13.1 放射工作人员职业健康管理的法律依据	(301)
13.2 放射工作人员证制度	(302)
13.3 职业性放射性疾病的诊断和鉴定	(303)
13.4 放射工作人员防护知识培训	(304)
13.4.1 医学放射工作人员辐射防护培训规范	(304)
13.4.2 辐射防护技术人员资格要求	(305)
13.5 个人剂量监测与管理	(306)
13.5.1 个人剂量监测的内容和分类	(306)
13.5.2 个人剂量监测方法	(306)
13.5.3 个人剂量监测的原则与评价	(307)
13.5.4 个人剂量监测管理	(307)
13.6 职业健康监护	(308)
13.6.1 上岗前体检	(308)
13.6.2 在岗期间健康检查	(309)
13.6.3 离岗时健康检查	(309)
13.6.4 医学追踪	(310)
13.6.5 职业健康检查结果及处理	(310)
13.6.6 放射工作人员的健康要求	(311)
13.7 职业健康监护档案	(311)
13.7.1 放射工作人员的职业健康监护档案内容	(311)
13.7.2 放射工作单位的责任	(311)
13.7.3 放射工作人员权利	(312)
复习思考题	(312)
参考文献	(313)

第 14 章 医疗行业中的辐射安全文化素养	(314)
14.1 辐射安全文化素养产生的历史背景	(314)
14.2 辐射安全文化素养的含义	(315)
14.2.1 辐射安全文化素养的特性	(315)
14.2.2 辐射安全文化素养对医疗行业不同层面的要求	(315)
14.2.3 辐射安全文化发展的三个阶段	(317)
14.2.4 辐射安全文化素养的自我评估监管和评价	(319)
14.3 辐射安全文化素养在医疗行业的应用发展及存在问题	(321)
14.4 医疗行业辐射安全文化素养建设的必要性	(324)
14.4.1 辐射事故及原因分析	(325)
14.4.2 培养安全文化素养的要求	(325)
14.5 辐射安全文化素养的发展	(326)
14.6 结语	(327)
复习思考题	(327)
参考文献	(328)
 第 15 章 非人类物种放射防护	 (329)
15.1 不同物种的辐射生物效应	(330)
15.1.1 陆生植物的辐射生物效应	(330)
15.1.2 陆生动物的辐射生物效应	(331)
15.1.3 水生生物的辐射生物效应	(331)
15.2 参考动物和参考植物	(332)
15.2.1 建立参考动植物的目的	(332)
15.2.2 在选择候选参考动植物时,应该考虑的内容	(333)
15.2.3 选择参考动植物的准则	(333)
15.2.4 参考生物的选择	(333)
15.2.5 剂量考虑水平	(334)
15.3 参考剂量学模式	(335)
15.4 非人类物种与人类辐射防护	(335)
15.4.1 非人类物种与人类辐射防护比较	(335)
15.4.2 人类和非人类物种防护的共同方法	(336)
15.5 国际主要非人类物种辐射剂量评估方法	(337)
复习思考题	(338)
参考文献	(338)

附表	(340)
附表 1 我国发布的放射卫生防护法规和规范性文件	(340)
附表 2 我国现行的辐射防护标准	(341)
附表 3 放射源分类表	(345)
附录 X 射线摄影受检者器官剂量转换系数(补充件)	(348)
附录 1 X 射线摄影检查成年人甲状腺剂量转换系数 C_T	(348)
附录 2 X 射线摄影检查成年人卵巢剂量转换系数 C_T	(349)
附录 3 X 射线摄影检查成年人睾丸剂量转换系数 C_T	(350)
附录 4 X 射线摄影检查成年人肺剂量转换系数 C_T	(351)
附录 5 X 射线摄影检查成年人女性乳腺剂量转换系数 C_T	(352)
附录 6 X 射线摄影检查成年人子宫(胚胎)剂量转换系数 C_T	(353)
附录 7 X 射线摄影检查成年人红骨髓剂量转换系数 C_T	(354)
附录 8 X 射线摄影检查成年人全身平均剂量转换系数 C_T	(355)
附录 9 X 射线摄影检查儿童甲状腺剂量转换系数 C_T	(356)
附录 10 X 射线摄影儿童检查卵巢剂量转换系数 C_T	(358)
附录 11 X 射线摄影儿童睾丸剂量转换系数 C_T	(360)
附录 12 X 射线摄影检查儿童肺剂量转换系数 C_T	(362)
附录 13 X 射线摄影检查儿童红骨髓剂量转换系数 C_T	(364)
附录 14 X 射线摄影检查儿童全身剂量转换系数 C_T	(366)
中英文对照	(368)

第 1 章 电离辐射的物理基础

众所周知,放射防护是一门随着核技术应用过程发展起来的趋利避害的应用性学科。电离辐射本质上是能量,电离辐射的有害效应则是这种能量在人体内沉积所导致的直接危害或潜在危害。基于描述这类危害的目的,势必要求首先了解电离辐射本身、电离辐射场、电离辐射与物质相互作用的类型和能量的转移传递等方面的定性概念和定量指标。因此,本章从原子物理、原子核结构、电离辐射与物质的相互作用和放射防护量入手来介绍相应的基础知识。

1.1 原子、原子核与放射性

世间万物都是由原子和分子构成,每一种原子对应一种化学元素。到目前,包括人工制造的不稳定元素,人们已经知道了 110 多种元素。一般来说,物质的许多化学及物理性质、光谱特性基本上与核外电子有关,而放射性现象主要归因于原子核。

1.1.1 原子、原子核

1.1.1.1 原子内部结构

卢瑟福(E Rutherford)1911 年用 α 粒子束轰击金属薄膜,发现存在大角度 α 粒子散射。通过对实验结果的理论分析,确定原子中存在一个带正电的核心,此即原子核(nucleus)。原子核的尺寸在 10^{-12} cm 的数量级,仅是原子大小的万分之一,质量却占整个原子质量的 99.9% 以上。卢瑟福 α 散射实验奠定了现代原子模型的基础。由于原子整体上呈中性,因此原子核的电量必定与核外的电子总电量相等,符号相反。

后经过研究,原子核由中子(neutron)和质子(proton)组成,质子和中子统称为核子(nucleon)。不同的原子核所含的核子数目不同,核子数也称为原子核的质量数 A (mass number),等于原子序数 Z (atomic number,即原子核的质子数)与原子核中子数 N 之和。中子不带电,质子电荷量与电子电荷量相等,都为一个电荷单位 e ,不同的是质子带正电荷,而电子带负电荷。一个原子核的总电荷为 Ze 。原子结构示意图如图 1.1 所示。

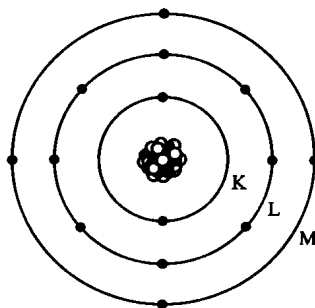


图 1.1 原子结构示意图

任何原子的核外电子数称为该原子的原子序数。由于原子是电中性的,核内质子数必等于核外电子数,因此原子序数同时表示了核外电子数、核内质子数和核电荷数。具有确定质子数和中子数的原子的总体称为核素。具有相同原子序数(质子数)的原子的总体称为元素。到目前为止,天然的和人工合成的元素共有 109 种,它们组成一个元素周期表。原子序数相同而质量数不同的核素,它们在元素周期表中处于同一个位置,故互称同位素。

一个原子的基本特征可以用符号 A_ZX 表示,其中 X 是元素符号, Z 是原子序数, A 是原子

的质量数,也是原子核内的核子数。

1.1.1.2 原子核能级

电子在原子核库仑场所具有的势能主要由主量子数 n 和轨道量子数 l 决定,并随 n 和 l 的增大而提高。习惯上规定当电子与原子核相距无穷远时,这种势能为零,因此当电子位于原子核外某一个壳层时,势能为负。 n 和 l 的变化就构成了分立的原子能级。电子填充壳层时按照从低能级到高能级的顺序以保证原子处于能量最低状态,这种状态称为基态。

当一个自由电子填充壳层时,会以发射一个光子的形式释放能量,能量值的大小等于壳层能级能量的绝对值,这些能量称为相应壳层的结合能。由于壳层能级能量随主量子数 n 和轨道量子数 l 增大,并且是负值,因此,轨道电子的结合能随 n 和 l 的增大而减小。以钨原子为例,由于 K、L、M 层能级的能量分别是 $-70\,000\text{ eV}$ 、 $-11\,000\text{ eV}$ 和 $-2\,500\text{ eV}$,因此 K、L、M 层电子的结合能分别是 $70\,000\text{ eV}$ 、 $11\,000\text{ eV}$ 和 $2\,500\text{ eV}$ (见图 1.2)。同样地,由于高原子序数的能级能量更低,并且是负值,因此对于同一个能级,结合能将随原子序数增大而增加。以 K 层电子为例,当原子是氢、碳、氧和钨时,结合能依次是 13.6 eV 、 285 eV 、 528 eV 和 $70\,000\text{ eV}$ 。

当电子获得能量,从低能级跃迁到高能级而使低能级出现空位时,称原子处于激发态。处于激发态的原子很不稳定,高能级电子会自发跃迁到低能级空位上而使原子回到基态。两能级能量的差值一种可能是以电磁辐射的形式发出,这种电磁辐射称为特征辐射,当特征辐射的能量足够高,进入 X 射线能量范围时,又称为特征 X 射线;另一种可能是传递给外层电子,获得能量的外层电子脱离原子束缚而成为自由电子,这种电子称俄歇电子,它的能量等于相应跃迁的 X 射线的能量减去该电子的结合能。

原子核内部也存在类似原子的壳层结构和能级。每个壳层只能容纳一定数量的质子和中子。核子填充壳层的顺序也遵从低能级到高能级的顺序。当核获得能量,可以从基态跃迁到某个激发态。当它再跃迁回基态时,以 γ 射线形式辐射能量,能量值等于跃迁能级值之差。跃迁回基态的过程可以是一步完成,也可首先跃迁到其他较低的能级,再经数步回到基态。

一个微观粒子能量很微小,通常不是以能量的国际单位制(SI)单位焦耳(J)表示,而是采用电子伏特(eV)或千电子伏特(keV)或兆电子伏特(MeV)。1 eV 是一个电子在真空中通过 1 V 电位差所获得的动能,它与其他三个单位的转换关系是:

$$1\text{ eV} = 1.0 \times 10^{-3}\text{ keV} = 1.0 \times 10^{-6}\text{ MeV} = 1.602\,192 \times 10^{-19}\text{ J}$$

1.1.1.3 原子、原子核的质量

由于一个原子的质量很微小($10^{-24} \sim 10^{-22}$ 数量级),因此,通常不是以 g 或 kg 为单位,

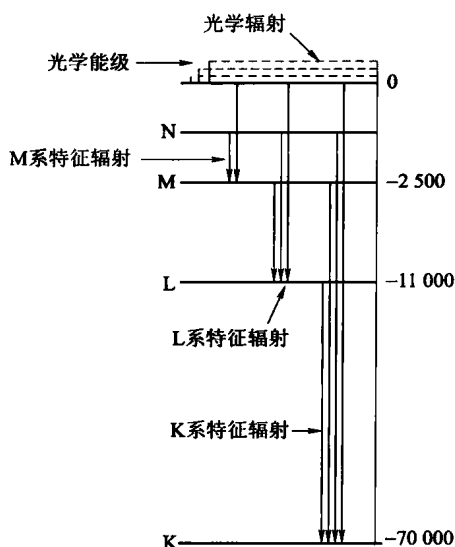


图 1.2 钨原子的能级示意图
(能量单位: eV)