

辐射及其安全防护技术

陈万金 陈燕俐 蔡捷 编著



化学工业出版社
安全科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

辐射及其安全防护技术/陈万金, 陈燕俐, 蔡捷编著. —北京:
化学工业出版社, 2005.8

ISBN 7-5025-7539-1

I. 辐… II. ①陈…②陈…③蔡… III. 辐射防护-安全技术
IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 094382 号

辐射及其安全防护技术

陈万金 陈燕俐 蔡捷 编著

责任编辑: 侯玉周

文字编辑: 钱 诚

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
安全科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 23¼ 字数 434 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7539-1

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序 言

近年来，电波技术及射频电子设备发展十分迅速，应用日益广泛，在通讯、广播电视、国防、测量、控制、工业、科学、农业和医疗等系统中都有大量的应用。可以说，在国民经济的各个部门乃至每个家庭的日常生活中，电波无时不在、无所不在。随着科学技术的不断提高，电波技术与电子设备的生产和应用必将日益发展。

电子技术的高速发展和电子设备的广泛应用，推动了生产建设事业的发展 and 人民物质文化生活水平的不断提高。然而，任何射频设备工作时，总是要不断向四周空间发射和泄漏电磁能量，污染作业及居民环境。电磁能量通过空间传播及线路传导等多种形式，施加于人体、生物体以及仪器设备上，因而出现许多异常问题。强场辐射对人员、武器弹药、可燃性气体、油品、电子仪器和控制系统的这类影响和危害问题，特别是当其辐射场强或干扰电压超过允许限值时，电磁辐射与泄漏等将造成电磁污染，危害人体健康，干扰和破坏生态平衡，干扰有用信号的传输等，已成为当今世界上许多国家研究的课题。

同样，放射性元素由于其能够放出射线这一固有特性，而在农业、工业、医学、科研等国民经济各个领域得到了广泛的应用。如工业上的无损检验、厚度测量、密度测量、湿度测量以及有毒有害工艺过程的监督控制等方面的应用已为大多数人熟知。放射性元素已为提高生产效率、人的健康水平、减少危险作出了积极的贡献。辐射生物学及辐射医学也已应用到杀虫灭菌、使害虫不育、处理公害、改善环境以及诊断疾病等。使用放射性元素具有无痛苦、无创伤以及灵敏度高特点，因而深受医务人员和病人的欢迎，在诊断、治疗以及体内激素和代谢产物等的测定方面发展得十分迅速。

随着生产和科学研究的发展，放射性元素的应用将会更加深入人心，发挥更大的作用。然而，也正是由于放射性元素具有能放出射线这一固有特性，对于使用与接触放射性的人员可能会带来一定的损害，在某种意义上说，甚至会影响到整个社会。欲使放射性元素发挥最大的作用，使人类得到最大的利益，使放射性危害减到最小，关键是要努力地认识它，认真地对待它。

辐射技术包括辐射装置及其剂量测量以及工艺研究等技术在各个交叉学科中的广泛应用。辐射装置的设计、选用、安装、调试以及维修等过程中环境保护是实施一切辐射技术的先决条件。

环境污染是当今严重的公害，高频电磁辐射污染和放射性元素辐射污染在科

学技术现代化的过程中也日趋严重。随着工业发展而凸现出的各种污染的治理都必须全过程同时进行。

在中国，国家对于从事射频作业人员和放射性元素作业人员的身体健康，防止电磁辐射和核辐射污染环境，保障作业人员与居民的健康，给予了高度重视。

因此，遵照“辐射防护最优化”的精神和要求，以人为本，高效地预防和控制超标辐射与超常泄漏辐射，防止污染；进而创造和谐的辐射技术应用环境，与时俱进科学合理地发展中国核辐射与电磁辐射技术资源，是当务之急。

基于上述认识和社会责任，长期从事环境工程、安全工程技术实践以及安全环境学科教育与研究的陈万金教授同南京邮电大学陈燕俐老师、江苏金思维信息技术有限公司蔡捷高级工程师精诚合作，并带领张春燕、刘素霞博士，钱剑安、陈宏、时亚丽、马海涛等硕士历经近三年的工作，收集查阅了大量文献资料，结合安全工程和环境工程本科《电磁辐射防护技术》、《核辐射防护技术》课程教学和社会实践整理撰写，三易其稿，最终完成了《辐射及其安全防护技术》一书的编写工作。

《辐射及其安全防护技术》把息息相关又各具特性的辐射及其防护技术有机地结合在一本书中，内容相互有别，又相互渗透，防护技术及其手段彼此通融又相互支撑，这在此前的书籍上可说是不多见的。

这本书是陈万金教授等编著人员辛勤劳动的结晶，是他们共同合作的丰硕成果，是他们学识和智慧的总结，也是作者与化学工业出版社同志们共同为中国辐射技术开发运用和环境保护、职业安全健康事业所做出的贡献！

刘潜

2005年6月11日

前 言

随着科学技术的不断发展，在核科学、工业技术领域中的科学研究、工农业生产以及人们日常生活中越来越多地接触和应用各种电磁辐射能和原子核能，如：矿石开采、金属冶炼、机械加工与热处理、介质的热加工、无线电探测、利用射线进行辐射聚合、辐射交联微型核反应堆等。此外，在化工过程的测量和控制、无损探伤、制作永久性发光涂料，以及在农业科学技术研究、医学卫生事业的诊断、治疗及微生物学等方面，射线、放射性同位素、射频电磁场和微波都得到广泛的应用。

电磁波和放射性物质所产生的辐射，由于其能量的不同，根据对物质原子或分子是否能够直接或间接造成电离效应而将它们分成电离辐射和非电离辐射两大类。 α 粒子、 β 粒子、X 射线、 γ 射线和中子属于电离辐射；紫外线、红外线、射频电磁场和微波等属于非电离辐射。

辐射对人体的危害及其防护问题，是现代工业生产中一个新的重要课题，也是安全工程中的重要组成部分。随着辐射源（即由电磁辐射能或原子核能构成的各种辐射源）的日益增多，由此所带来的职业危害和环境污染也已成为当今的严重公害。辐射是一项边缘科学，工作起步又较晚，资料较少，而且，目前图书市场上关于辐射的著作多集中论述辐射理论基础知识和辐射技术的应用，附带提到辐射污染及其防护方面的一些知识，且把放射物辐射和电磁辐射分列出书。鉴于两种辐射技术的相互关联性和各自特殊性，本书拟定将二者结合起来一并收入，内容编排顺序上做了适当安排。

本书内容所用素材，部分来自作者多年来从事安全工程科学技术和相关学科的科研、教学所积累的研究资料与教学讲稿、讲义的总结，部分来自近年来国内外本领域公开发表出版的优秀论文和专著。在编著本书时，作者既注重了辐射及其防护理论基础知识的介绍，也注重了辐射防护工程技术手段的推介；除了安排部分章节（1.5、8.4、8.5）简要、集中介绍常规辐射防护技术措施之外，全书用了大量篇幅更突出介绍讨论辐射技术及其产品，诸如：开发设计方案优化、参数合理选取、生产工艺正确制定、加工岗位规范操作、使用运营安全监测以及运输储藏的安全包装等一系列防护工程技术措施，力求从内容上实现辐射防护的所谓本质安全化。这也是本书编写的特点所在。

在本书的编著、出版过程中得到了有关领导、部门和诸多专家、教授等同仁的大力支持和帮助，书中又多处从他们著作中引用了一些资料和数据；本书还得

到了化学工业出版社有关编辑的大力支持和具体指导，在此一并向诸位表示衷心的感谢。同时还要感谢张春燕、刘素霞博士生和钱剑安、陈宏、时亚丽、马海涛等硕士生，他们为本书也做了大量的工作。

本书的第1~3章、第6章、第11章、第13章由陈万金执笔，第7~10章、第12章由陈燕俐执笔，第4章、第5章由蔡捷执笔，全书由陈万金统稿。本书涉及面广，知识新，虽力求全面、系统、简明、实用，但由于作者经验不足，学识水平有限，书中不足在所难免，敬请广大读者予以批评指正。

编著者
2005年5月30日

目 录

第 1 章 辐射的基础知识	1
1.1 射线及其放射性	1
1.1.1 原子结构	1
1.1.2 射线及其放射性	5
1.2 天然放射系及其衰变	10
1.2.1 天然放射系	10
1.2.2 放射性物衰变规律	11
1.2.3 天然本底辐射	17
1.3 射线的发生	18
1.3.1 X射线的产生	19
1.3.2 γ 射线的产生	23
1.4 辐射技术的应用	24
1.5 核辐射的危害与防护技术	24
1.5.1 辐射的危害	24
1.5.2 辐射的防护技术简介	25
1.6 常用辐射量及其单位	27
1.6.1 照射量及其单位	28
1.6.2 吸收剂量及其单位	30
1.6.3 剂量当量及其单位	30
1.6.4 照射量与剂量当量的关系	32
第 2 章 电离辐射与物质的相互作用	34
2.1 α 射线与物质相互作用	34
2.1.1 α 粒子射程	34
2.1.2 α 粒子与核外电子作用	34
2.1.3 α 粒子与原子核作用	35
2.2 β 射线与物质的相互作用	35
2.2.1 电离和激发	35
2.2.2 韧致辐射	36
2.3 γ 射线与物质的相互作用	36
2.3.1 光电效应	36
2.3.2 康普顿效应	36

2.3.3	电子对效应	37
2.3.4	核光电效应	37
2.4	中子与物质的相互作用	37
2.4.1	散射	38
2.4.2	吸收	39
2.5	α 、 β 、 γ 射线和中子的相对危害	40
2.5.1	α 射线	40
2.5.2	β 射线	40
2.5.3	γ 射线	40
2.5.4	中子	40
2.6	电离辐射对人体的影响	41
2.6.1	射线对人体的作用	41
2.6.2	影响辐射损伤的因素	41
第3章	电离辐射的生物效应	45
3.1	引言	45
3.2	人体生理学基础	45
3.2.1	循环系统	45
3.2.2	呼吸系统	46
3.2.3	消化系统	46
3.3	细胞生物学	46
3.4	辐射与细胞的相互作用	47
3.4.1	最初的物理阶段	47
3.4.2	物理-化学阶段	48
3.4.3	化学阶段	48
3.4.4	生物阶段	48
3.5	电离辐射的生物效应	48
3.5.1	生物效应的过程	49
3.5.2	直接作用	50
3.5.3	水分子的电离	50
3.5.4	间接作用	52
3.6	辐射的躯体效应	52
3.6.1	辐射的早期效应	52
3.6.2	辐射的远后效应	54
3.7	影响辐射生物效应的因素	58
3.7.1	辐射种类	58
3.7.2	剂量	59

3.7.3	剂量率	59
3.7.4	照射方式	60
3.8	讨论	60
第4章	核辐射在工程技术上的应用及其安全防护	62
4.1	辐射育种	62
4.1.1	辐射育种机理	62
4.1.2	辐射育种方法	64
4.1.3	不同诱变剂的比较	65
4.2	辐射不育	66
4.2.1	辐射不育基本原理	66
4.2.2	辐射不育技术要点	67
4.3	环境保护中的辐射技术	69
4.3.1	废水的辐射处理	69
4.3.2	废气、废物的辐射处理	69
4.4	中子源的非辐射应用	70
4.4.1	中子水分计	70
4.4.2	中子活化分析	71
4.5	食品辐射处理及其安全性	72
4.5.1	辐射抑制发芽	72
4.5.2	辐射灭菌	72
4.5.3	辐射杀虫	74
4.5.4	辐射改进品质	74
4.6	高分子材料的辐射聚合	75
4.6.1	丙烯酰胺等的辐射聚合	75
4.6.2	辐射共聚合	76
4.6.3	复合材料的辐射制备	77
4.7	高分子材料的辐射改性	78
4.7.1	辐射交联	78
4.7.2	辐射交联聚乙烯热收缩材料	79
4.7.3	辐射接枝	80
4.7.4	辐射裂解	80
4.8	其他应用	81
4.8.1	医疗用品辐射消毒	81
4.8.2	中成药辐射灭菌	81
4.8.3	档案图书辐射杀虫	82
第5章	核辐射装置系统及其辐射源选择应用的安全技术	83

5.1	放射性同位素 γ 源的一般特性	83
5.1.1	选用的 γ 源应满足的条件	83
5.1.2	半衰期 $T_{1/2}$	85
5.1.3	总活度和比活度	87
5.1.4	γ 能量和能谱	88
5.2	γ 源的结构	90
5.2.1	源元件	90
5.2.2	环状源	91
5.2.3	平板源	93
5.3	辐射源的安全倒装	95
5.3.1	倒源准备工作	95
5.3.2	倒装顺序	96
5.4	辐射源的储藏和升降的技术要求与安全操作	96
5.4.1	屏蔽水层厚度的确定	96
5.4.2	储源水井的技术要求	98
5.4.3	γ 源的提升系统	100
5.5	核辐射装置及其安全计算	102
5.5.1	γ 核辐射装置系统及其建设程序	102
5.5.2	设计、施工基本安全要求	102
5.5.3	装置的调试验收安全要求	103
5.5.4	封闭式辐射装置的基本结构	104
5.6	小型 γ 室内装置的合理布置	112
5.6.1	室内装置的平面布局	112
5.6.2	辐照室照射率分布	113
5.6.3	样品照射系统	115
5.7	生产性辐射装置的安全技术	116
5.7.1	基本技术要求	116
5.7.2	装置的结构特点	117
5.7.3	生产能力的设计及其安全估算	119
第 6 章 核装置的辐射安全防护技术		121
6.1	辐射防护的基本问题	121
6.1.1	剂量当量限制制度	121
6.1.2	辐射防护三原则	123
6.1.3	辐射的致害作用	124
6.1.4	辐射防护的基本方法措施	125
6.2	辐射源安全防护	128

6.2.1	密封源	128
6.2.2	非密封源	136
6.2.3	非密封源的安全操作	139
6.2.4	操作非密封源时个人卫生措施	139
6.3	加速器辐射安全	140
6.3.1	加速器防护设施及其设计要求	140
6.3.2	加速器的安全运行	140
6.3.3	辐射的安全监测	141
6.4	同位素辐照装置安全	143
6.4.1	辐射装置安全的重要性	143
6.4.2	中子防护特殊要求	144
6.4.3	辐射装置设计的安全要求	147
6.4.4	辐照室的合理进排风	147
6.4.5	辐射安全联锁系统和设施	149
6.4.6	辐照室的安全运行	150
6.4.7	辐照装置的安全管理	150
6.5	辐射环境安全	151
6.5.1	环境辐射与辐射环境评价	151
6.5.2	辐射环境安全管理	152
6.6	辐射事故管理和应急措施	156
6.6.1	辐射事故管理的基本原则	156
6.6.2	事故应急计划与准备	156
6.6.3	辐射事故应急响应程序	157
6.7	放射性物质运输安全	157
6.7.1	放射性物质分类	157
6.7.2	货包的分类、设计和试验要求	159
6.7.3	货包的试验要求	160
6.7.4	安全运输管理体制	161
6.8	放射性废物的处理	163
6.8.1	废气的净化	163
6.8.2	放射性废液的处理	164
6.8.3	放射性固体废物的处理	167
6.8.4	放射性废物的储存	167
6.8.5	放射性废物的处置	169
6.9	辐射事故的防止和处理	170
6.9.1	核辐射事故与监测	170

6.9.2	辐射源泄漏的预防和处理	173
6.9.3	源架的迫降	175
6.9.4	人员误入事故的处理	176
第7章	电磁感应与电磁辐射	179
7.1	紫外线、红外线及其辐射伤害	179
7.1.1	紫外线辐射及其伤害	180
7.1.2	红外线辐射特性	180
7.2	射频及射频辐射	181
7.2.1	射频电磁场与射频辐射	181
7.2.2	射频辐射对机体的伤害作用	181
7.3	电磁感应	182
7.3.1	电磁感应	182
7.3.2	电磁振荡	183
7.3.3	电场中的物质变化	184
7.3.4	磁场能量与物质的磁性	186
7.4	电磁场与电磁辐射污染	187
7.4.1	电磁场与电磁辐射	187
7.4.2	电磁辐射作用场区分类	189
7.4.3	电磁辐射场强影响参数	192
第8章	电磁辐射的生物学效应及其防护	194
8.1	电磁辐射的生物学效应	194
8.1.1	电磁辐射在有机体中的传播特性	194
8.1.2	电磁辐射对生物体的初级效应	196
8.1.3	电磁辐射对生物体的次级效应	197
8.1.4	电磁辐射对生物体的作用机制	198
8.2	电磁辐射对人体健康的危害影响	202
8.2.1	高频辐射对人体健康的危害和影响	202
8.2.2	高频辐射卫生标准的动物实验研究	203
8.2.3	微波辐射对人体健康的危害和影响	205
8.3	射频干扰及感应危害	208
8.3.1	射频干扰感应	208
8.3.2	射频干扰传播	209
8.3.3	其他影响和危害	209
8.4	电磁辐射安全控制标准	210
8.4.1	电磁辐射吸收剂量与人体响应	210
8.4.2	电磁辐射作业安全标准	211

8.4.3	电磁辐射居民安全标准	216
8.4.4	射频设备漏场标准	217
8.4.5	工业干扰允许标准	217
8.5	电磁辐射防护措施	218
8.5.1	电磁辐射热效应标准计算	218
8.5.2	射频辐射的预防措施	219
第9章	工业、科学和医疗射频设备辐射污染与防护技术	223
9.1	射频设备电磁辐射	223
9.1.1	射频设备电磁辐射的危害	223
9.1.2	射频设备电磁辐射机理	225
9.1.3	射频设备电磁辐射特性分析	226
9.1.4	电机电磁辐射	227
9.1.5	电磁感应	228
9.2	高频感应加热表面淬火辐射污染与安全防护	231
9.2.1	感应加热表面淬火工艺过程	231
9.2.2	职业性危害	233
9.2.3	高频电磁场危害的防护措施	235
第10章	广播、电视和电气化交通电磁辐射污染与防护技术	239
10.1	广播电视的电磁辐射污染与危害	239
10.1.1	广播的电磁辐射污染	239
10.1.2	电视广播对微波信号的干扰	240
10.1.3	接收机的无用辐射	242
10.1.4	中短波电磁辐射的危害	244
10.1.5	电磁辐射生物防护容许值标准	244
10.2	电气化铁道的电磁污染与危害	246
10.2.1	电气化铁道在无线电频段内产生干扰影响的原因	247
10.2.2	电气化铁道的电磁辐射频率特性与其传播特性	247
10.2.3	电气化铁道的主要辐射污染及其后果	249
第11章	机械射线探伤及其安全防护	250
11.1	射线探伤装置	250
11.1.1	探伤用 X 射线装置原理	250
11.1.2	探伤用 X 射线装置结构	250
11.1.3	X 射线管构造	251
11.1.4	X 射线管回路	260
11.1.5	X 射线发射器	263
11.1.6	高压发生器	265

11.1.7	高压电缆	266
11.1.8	油泵冷却系统	267
11.1.9	操纵台	267
11.1.10	X射线机线路	268
11.1.11	X射线机常见故障的排除和安全维修	268
11.1.12	常见国产及国外X射线机型号及技术性能	270
11.1.13	X射线探伤机的选择	272
11.1.14	射线探伤安全监察	273
11.2	射线探伤的防护技术	276
11.2.1	屏蔽防护技术	276
11.2.2	距离防护	278
11.2.3	时间防护	278
第12章	电磁辐射安全检测与计量技术	279
12.1	电磁辐射近区场强测量技术	279
12.1.1	射频设备漏场水平的测量	279
12.1.2	近区场工作空间场强测定	281
12.2	电磁辐射环境污染场强测量技术	287
12.2.1	测量仪器	288
12.2.2	测量方法	291
12.3	环境电磁辐射场强实用计算公式	301
12.3.1	电场强度计算公式	301
12.3.2	辐射功率密度计算公式	302
12.3.3	微波天线主视方向下的安全静空距离与建筑物标高的计算公式	303
第13章	电磁辐射的抑制与安全防护	304
13.1	射频设备的漏场抑制	304
13.1.1	线路传导辐射的抑制	304
13.1.2	设备的漏场辐射抑制	307
13.2	屏蔽技术	309
13.2.1	影响屏蔽效果的若干问题	309
13.2.2	屏蔽材料的选择	311
13.3	屏蔽体的设计	316
13.3.1	屏蔽体与场源间距大小的关系及其确定原则	316
13.3.2	屏蔽体的结构设计原则	318
13.3.3	孔隙的设计	319
13.3.4	设备屏蔽的实施原则	320
13.4	接地与接地系统	320

13.4.1	接地与接地系统的基本问题	320
13.4.2	接地程度与屏蔽效能的关系	323
13.4.3	接地系统结构设计与实施	327
13.5	屏蔽室的设计与设计举例	329
13.5.1	屏蔽室设计	329
13.5.2	屏蔽室设计举例	334
13.6	屏蔽室屏蔽效能的测试	336
13.6.1	屏蔽室屏蔽效能的表达式	336
13.6.2	屏蔽效能测试	337
13.6.3	微波频段检测	344
13.7	其他电磁干扰的抑制技术	347
13.7.1	本振辐射干扰抑制措施	347
13.7.2	电磁兼容与相互回避	349
13.7.3	汽车点火系统干扰辐射的防止技术	350
13.8	微波防护	351
13.8.1	减少与降低微波场源的直接辐射	351
13.8.2	工作地点实行屏蔽或加大场源与工作部位距离——远控	351
13.8.3	个体防护	352
13.8.4	加强卫生预防工作	352
13.8.5	制定安全操作规程，防止误操作	352
13.9	建筑物电波干扰及其防止	352
13.9.1	干扰形态	352
13.9.2	抑制技术方案	352
主要参考文献		354

第 1 章 辐射的基础知识

1.1 射线及其放射性

1.1.1 原子结构

1.1.1.1 元素和原子结构

地球上所有的物质是由各种不同的元素组成的。构成某一元素的最基本的单位是该元素的原子。不同元素的原子具有不同的性质，但是它们的构造是十分相似的。原子是由带正电的原子核和围绕原子核的电子所组成（图 1-1）。原子核带正电荷，电子带负电荷，正常的原子在电极上呈中性，其电子数等于原子核的电荷数。当原子失去一个或数个（或增加一个或数个）绕行电子时，它就带有电荷。此时把它称为离子。

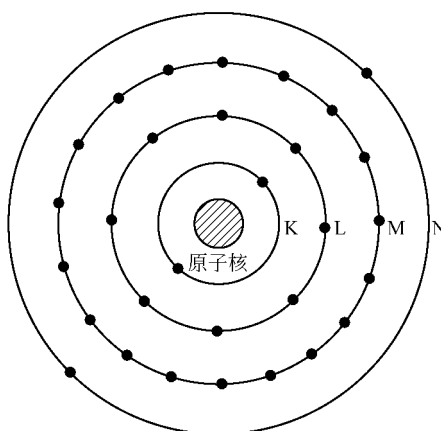


图 1-1 锌的原子系统

通常用字母 Z 来表示不同元素的原子核所带的正电荷数（用 e 为单位），亦即是绕行电子数，它称为原子序数。不同的元素用 Z 的数值从 1 到 92 来代表。近年来，又在实验室内制造出原子序数比 U 更高的新元素，即所谓超铀元素。

元素是构成物质的基本单元，而原子是具备该元素化学性质的最小单位，是很小的粒子，它的直径只有 10^{-8} cm 左右。原子的质量也十分微小，最轻的氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} g，就是最重的铀原子的质量也不过是 3.951×10^{-22} g。

原子由原子核和围绕原子核的电子组成，电子数目恰好使原子成中性。原子核是由 Z 个带正电荷的质子（ p ）和 N 个不带电的中子（ n ）所组成，即：

$$A = Z + N \quad (1-1)$$

式中， A 称为质量数，是一个没有量纲的数，其数值等于原子核内质子数与中子数之和。质子和中子统称为核子。质子（ p ）按核标度带有 1 个单位的正电荷，它的质量大约是 1 原子质量单位（ u ）；电子（ e^- ）带有和质子的正电荷

同样多的负电荷。电子的质量是 $1/1840$ 原子质量单位，在考虑原子质量时，大多数情况下可以忽略不计；中子（n）常常被看作是一个质子和一个电子的紧密结合体。中子为电中性的，如果忽略了电子的质量，它的质量就接近于 1 原子质量单位。按照通常的惯例，在本书中把中子当作一个基本粒子。原子核中的质子数 Z 即为该元素的原子序数。通常用 ${}_Z^AX$ 表示原子结构， X 代表元素的符号，如钴 60，即 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 。

原子中的电子是按轨道层分布的。每一个壳层有一定数目的几个轨道，每个轨道最多只能有一个电子。最靠近核的是 K 壳层，它有两个轨道，所以最多只能有两个绕行电子。其次是 L 壳层，它有两个支壳层，第一个支壳层有两个轨道，第二个支壳层有六个轨道，所以 L 壳层最多只能有 8 个绕行电子。第三层是 M 壳层，它有三个支壳层，共有 18 个轨道，所以最多只能有 18 个绕行电子。一般说来，壳层里可以有的最大电子数目可以用 $2n^2$ 来表示（ n 为层数， $n=1$ 代表 K 壳层， $n=2$ 代表 L 壳层，余者类推）。由此可见，越到外层容纳的电子越多，但是外一层的电子数是严格限制的，总不会超过八个。这样可把元素的周期律用原子的电子壳层理论来解说：当发生化学变化时，原子深处电子不发生多大变化，只有最外层电子发生了位置和运动的变化。因此，原子最外层的电子多少，就基本上决定了原子的化学性质。故在元素周期表中把各元素的最外层电子从 1~8 作周期性地排列时，元素的化学性质也在周期性地变化。

在某一轨道绕行的电子具有一定的能量。K 壳层轨道的电子能量最低，越往外的轨道电子的能量越高。原子在正常状态时，电子是在距原子核最近的轨道上运行，此时原子能量最小，也最为稳定。当从外界输送能量给原子时，电子可以吸收外来的能量而从能量较低的轨道跃迁至能量较高的轨道（电子从内层跃迁到外层或脱离原子），此时原子即处于激发状态。激发状态的原子是不稳定的，很快就会复原，即电子跃回到低能轨道，而多余的能量视其大小不同，以 X 射线或可见光的形式放出。

原子可以描绘成电子围绕着原子核运转着的行星系。电子以椭圆或圆形的轨道围绕原子核旋转，这些确定的轨道组成一系列壳层，这一个个壳层叫做能级或量子级。壳层用字母（K, L, M, N, O, P, Q）或量子级（1, 2, 3, 4, 5, 6, 7）表示。K, L, M, N... 壳层最多能够容纳电子数分别是 2、8、18、32...。例如，图 1-1 表示锌的原子系统有 30 个电子，排列在 4 个壳层中。

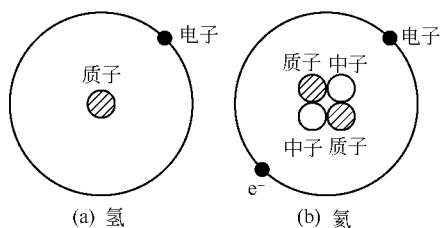


图 1-2 氢和氦的原子系统

每一个原子的质子数通常与电子数相同。这就是说原子核里的正电荷总数等于原子电子负电荷的总数，因而原子