

无 / 损 / 检 / 测 / II / 级 / 培 / 训 / 教 / 材

射线检测

第3版

中国机械工程学会无损检测分会 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

无损检测 II 级培训教材

射线检测

第 3 版

中国机械工程学会无损检测分会 编

本书是无损检测Ⅱ级培训通用教材之一。书中系统介绍了射线检测的必要知识,反映了近年来科研、设备和标准的新成果。在内容编排和选择上参考了 ISO 9712《无损检测人员的资格鉴定与认证》的有关要求,以更好地与国际接轨。本书内容包括射线检测物理基础、设备与胶片、影像质量、基本技术、暗室处理、评片、实时成像、其他射线检测技术、辐射防护、国内外射线检验标准、复习题及答案等。

本书可供无损检测培训师生、生产一线工人、工程技术人员、质量管理人员等使用。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/中国机械工程学会无损检测分会编. —3版. —北京:
机械工业出版社, 2004.3

无损检测Ⅱ级培训教材

ISBN 7-111-13720-5

I.射... II.中... III. 无损检验—放射线检测—技术培训—教材 IV.TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 121414 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吕德齐

封面设计:陈 沛

责任印制:闫 焱

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 2 月第 3 版·第 1 次印刷

1 000mm×1 400mm B5·8 印张·307 千字

0 001—4 000 册

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

第 3 版 前 言

在本教材第 2 版 1994 年出版以来的近 10 年的时间中, 射线检测技术在多方面得到了很快的发展, 尤其在实时成像检测技术和非胶片射线照相检验技术方面取得了重要进展。

现已研制成功一系列新的直接数字化的射线转换器件用于射线实时成像检测, 形成了新的实时成像检测技术。所出现的一些新的射线实时成像检测系统, 其空间分辨力远高于采用图像增强器构成的实时成像检测系统, 同时又具有很宽的动态范围, 并已成功地应用于工业检验之中。CR 技术, 是一种计算机化的数字非胶片射线照相检验技术, 在一些国家已经开始应用于某些产品的检验之中, 它正受到各方面广泛的关注。

随着射线检测技术的发展, 近年, 国内外的许多重要射线检测标准均作了修订, 对一些重要的技术指标均作了修改, 这应该引起射线检验人员的充分注意。

近几年, 我国又制订了一些新的辐射防护标准, 例如, 关于工业 X 射线探伤的防护标准, 关于工业 γ 射线的防护标准等, 它们直接关系到具体的辐射防护问题。此外, 我国正在按 ICRP 的第 60 号建议书修改我国的基本辐射防护标准, 特别是关于剂量限值的规定。这些新的规定, 直接关系到辐射安全问题, 是射线检测人员应该深入理解和严格执行的重要规定。

此外, 本教材在这 10 年的使用中, 也提出了一些需要增删和修改的内容。

正是基于这些情况, 提出了对本教材进行修订的要求。

考虑到本教材第 2 版出版以后, 在使用中受到学员和教师的好评, 它所构建的射线检测技术系统, 对培训人员理解和掌握射线检测技术起到了很好的作用, 并得到许多其他射线检测技术教材和书籍的认同。因此, 这次修订对教材的技术系统未作改变, 主要是对原章节进行了调整, 即把原教材的 8 章改为了 10 章, 增加的两章一是补充和加强关于实时成像检测技术的介绍, 二是介绍射线照相检验的一些标准。

参考 ISO 9712《无损检测人员的资格鉴定与认证》标准所列的关于培训内容的要求, 也对原教材一些章节的内容进行了必要的修改和增删。例如, 删去了扫描照相技术, 关于评片问题补充了较多的实际缺陷照片, 补充了简要的辐射防护管理方面的知识等, 以更好地适应对 II 级人员培训的要求和与

国际接轨的需要。此外，删去了原教材的实验内容，并修改了附录内容。

射线照相检验技术标准规定的核心线索，实际上也就是射线照相技术构成的基本线索，这是我国射线检测工作者提出的看法，它对于更好地理解和掌握射线照相检验技术具有一定帮助，因此，这次修订对该部分内容作了简单介绍。

本教材是满足各工业部门的通用培训教材，考虑到各工业部门的不同要求，当应用到不同工业部门时，应补充必要的材料、工艺、缺陷、工业部门的标准和规范及一些特殊技术的内容，以使培训收到更好的效果。

本教材修订的准备工作从 2002 年初已开始，2003 年 4 月正式启动修订工作，2003 年 9 月完成修订稿。限于编者水平，错误和疏漏恐所难免，热诚欢迎培训学员、培训教师、读者提出宝贵意见。

郑世才

2003 年 9 月

第 2 版 前 言

无损检测 II 级人员培训教材《射线检测》，第 1 版发行已近五年，在这段时间内使用本教材进行培训的过程中，培训教员和培训班学员提出了一些意见和修改建议；同时在这段时间内我国发布了许多新制订的射线检测标准，其中包括：GB 9445—1988《无损检测人员技术资格鉴定通则》等，客观上它们对培训教材也提出了新的要求。

1991 年 10 月在水损检测学会第五届年会上，学会编辑与出版工作委员会召开了 II 级人员培训教材修订会议，研究了培训教材存在的主要不足，讨论了培训教材修订的指导原则和一些具体问题处理的基本方案，确定了工作的大体计划。会议决定，《射线检测》由第五届射线专业委员会主任郑世才负责编写。

1991 年召开了培训教材修订提纲小型讨论会，参加会议的有：孙德、何双起、赵起良、宫润理、刘本森、蒋福棠、郑世才等，会议具体研究了《射线检测》培训教材的编写基本原则、编写水平，讨论了教材的编写提纲和章节安排。对拟定的编写提纲又征求了无损检测学会第五届射线专业委员会副主任孔凡庚、李衍、赵久同志的意见。

编写工作从 1991 年 10 月开始，至 1992 年 4 月 19 日完成初稿。此后，编者对初稿进行了多次修改。

修订版与第一版相比，主要在下列方面进行了较大的修改：

- (1) 调整了部分章节的安排，对部分章节的内容进行了增删或更新；
- (2) 补充、加强了评片问题的系统化讨论；
- (3) 简明扼要地介绍了射线检测中一些具有特殊应用的技术和一些非常规射线检测技术的主要特点；
- (4) 按照资格鉴定考核的要求，设计了习题，习题包括 5 种类型：问答——该章内容的基本线索；填空——该章需要记忆的内容类型；选择与判断——该章较难记忆或需进一步理解的内容点；计算——该章应掌握的基本计算问题类型。它们有助于全面掌握教材的内容，也有助于通过资格鉴定的基础理论考核。

教材中给出了 8 个附录，附录 I～附录 V，对射线照相检验的一些基本问题给出了比较详细的理论推导过程，这些并不要求 II 级人员掌握，仅是为帮助理解或为了说明所叙述的有关结论，但它们对于 III 级人员则是有用的资

料。附录VI概括地介绍了射线照相检验工艺的编制,附录VII列出了国内外部分主要射线照相检验的标准目录,其中有关ASTM的目录是一比较完整的目录,从中可以看到有关射线照相检验标准的概貌。附录VIII是教材中复习题的答案,可供参考。

III级人员可按照本教材给出的基本系统进行加深和扩展。

与国内同类教材相比,这本教材的特点是:

(1) 设计了一个系统性比较强的章节安排,章节安排贯穿的思想是建立比较完整的常规射线照相检验理论和技术系统,从而为理解和掌握射线照相检验技术、独立解决常规射线照相检验问题、提高射线照相检验工作质量提供基础;

(2) 融入了较多的实践经验和文献资料,具体深入地讨论了典型工件的射线照相检验技术及评片技术,为解决实际问题提供了可资利用的具体方法和依据;

(3) 简明扼要地介绍了射线检测中一些具有特殊应用的技术和一些非常规射线检测技术,为解决特殊问题提供了基本的途径;

(4) 在某些方面,如技术理论、辐射防护等补充了常见教材的不足,或更新了某些已经陈旧的概念或内容,为正确、全面理解这些方面提供了新的知识。

教材稿已在航空航天部西北地区无损检测资格鉴定委员会举办的(1992) II级射线人员培训班进行了试用,受到了好评,使用者希望能尽快出版。

航空航天部无损检测资格鉴定委员会委员赵起良高级工程师、无损检测学会第五届射线专业委员会副主任孔凡庚研究员、李衍高级工程师审阅了书稿,提出了宝贵的意见和修改建议,编者表示由衷的感谢。

在编写本教材中,无损检测学会总干事长张企耀同志、劳动部锅炉压力容器检测中心总工程师童有武同志,对书稿提出了有益的指导意见。无损检测学会第五届编辑与出版工作委员会副主任方婉莹同志、无损检测学会第五届青年工作委员会副主任何双起同志给予了全面的关心和帮助。编者对他们的支持表示深深的谢意。

限于编者的水平,教材中肯定存在不足和错误之处,热诚欢迎各种批评、指正,期望在大家的帮助下使这本教材能成为一名较好的教材。

郑世才

1993年11月北京

第 1 版 前 言

当前, 全国各地正在开展对无损检测人员技术培训和资格鉴定工作, II 级人员处于工业生产第一线, 担负着日常的检验工作, 并签发检验报告、对检验结果负责。为确保受检产品的质量, 必须加速对 II 级人员的培训和资格鉴定, 这是一项紧迫而又繁重的任务。

为了逐步适应广泛国际经济技术合作的需要, 我国与国外无损检测学会的人员资格互认的时机也正趋成熟, 这就要求有一套与各国水平相协调的全国统一的无损检测培训教材。为此, 中国机械工程学会无损检测学会在全国范围内组织力量编写了无损检测五种常规方法的教材, 推荐作为全国无损检测 II 级人员培训的通用教材。《射线检测》就是其中的一本。

本教材编写过程中, 参考了日本和联邦德国的射线检测 II 级教材以及国内各地的自编教材。教材初稿曾于 1981 年在南昌试用, 修改稿于 1982 年在成都试用, 再修改稿于 1984 年在重庆试用。1984 年 10 月, 由全国无损检测学会射线学组在丹东组织了对本教材的审定。

本书主要作为从事射线检测的 II 级人员培训教材, 亦可作为设计、工艺或检验等其他人员的参考读物。内容包括:

1. 理论知识 (约 84 学时)

含物理基础 (12 学时)、仪器设备 (16 学时)、射线检验原理 (8 学时)、暗室处理 (8 学时)、影像质量 (4 学时)、物体检查 (6 学时)、底片评定 (12 学时)、中子照相 (4 学时)、辐射防护 (8 学时)、标准及其解说 (6 学时)。

2. 实验知识 (约 32 学时)

共 8 个实验, 每个实验 4 学时。

3. 习题汇编

选自日本、美国与我国无损检测学会推荐的统一参考习题共 250 道及其解答。

每期 II 级人员培训班在采用本教材时, 理论授课约 84 学时, 进行 8 个实验需 32 学时, 整理实验记录需 16 学时, 考试 6 次连同考前复习约需 24 学时。此外, 尚需补充讲授无损检测概论以及焊、铸等冶金知识共约 16 学时。以上总计 172 学时, 大约折合 22 天, 连同公休日在内, 每期办班约需 26 天。

本书由孔凡庚主编, 理论教材中第 2 章的 X 射线机部分主要为肖忠普

VIII

执笔，加速器以及第9章中子照相与第十章辐射防护部分主要为石磊执笔，实验部分主要为张维疆执笔，其余部分的编著以及全书的统稿工作则由孔凡庚负责。

尽管本教材已历经三次修改和四次试用，但限于编著者水平，错误仍在所难免，欢迎读者批评指正。

本教材在组织编著过程中，陶亨咸、应崇福、赖坚、许绍高、程瑞全、王务同、张企耀等同志曾直接予以指导和支持，康纪黔、常继明、苏恒兴和孙秀琴等同志曾提出不少宝贵意见，最后由赵起良同志整理定稿，谨此表示感谢。

编者

1988年5月

目 录

第3版 前言

第2版 前言

第1版 前言

第1章 射线检测的物理基础	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 原子结构	1
1.1.2 光子概念	2
1.1.3 原子能级	3
1.1.4 元素、同位素、元素 周期律	4
1.1.5 射线概念	4
1.2 X射线与 γ 射线	5
1.2.1 X射线的发现与主要性质 ..	5
1.2.2 X射线产生与X射线谱	5
1.2.3 放射性与放射性衰变	7
1.2.4 γ 射线的产生与 γ 射线 的主要性质	10
1.3 光子与物质的相互作用	10
1.3.1 光电效应	11
1.3.2 康普顿效应	11
1.3.3 电子对效应	12
1.3.4 瑞利散射	13
1.4 射线衰减规律	14
1.4.1 基本概念	14
1.4.2 单色窄束射线衰减规律 ..	15
1.4.3 线衰减系数与半厚度	16
1.4.4 宽束、连续谱射线的 衰减规律	19
1.5 射线检测的基本原理	20
复习题	22

第2章 设备与胶片	25
2.1 X射线机	25
2.1.1 X射线机的基本结构	25
2.1.2 X射线管	29
2.1.3 X射线机的主要技术 性能	32
2.1.4 X射线机的工作过程、 常见故障与维护	35
2.2 γ 射线机	38
2.2.1 γ 射线机的基本构成	38
2.2.2 常用 γ 射线源的主要特性 ..	40
2.2.3 γ 射线机与X射线机比较 ..	40
2.3 加速器	41
2.4 工业射线胶片	43
2.4.1 射线胶片的结构	43
2.4.2 潜影形成	43
2.4.3 胶片的感光特性曲线	44
2.4.4 胶片的主要感光特性	46
2.4.5 射线胶片的分类与选用	48
复习题	50
第3章 射线照相的影像质量	52
3.1 影像形成的简单分析	52
3.2 影像质量	53
3.2.1 影像质量的基本因素	53
3.2.2 影像的射线照相对比度	54
3.2.3 影像的射线照相不 清晰度	57

3.2.4 影像的颗粒度	60	4.6.2 曝光曲线的典型形式	90
3.2.5 不清晰度对对比度的影响	61	4.6.3 曝光曲线的应用	93
3.3 射线照相灵敏度	62	4.6.4 曝光曲线制作	95
3.3.1 概念	62	4.6.5 曝光量计算	98
3.3.2 丝型像质计	62	4.7 典型工件的透照技术	101
3.3.3 其他像质计	64	4.7.1 平板工件透照技术	101
3.4 细节影像的可识别性	67	4.7.2 变截面工件透照技术	102
复习题	68	4.7.3 环焊缝透照技术	103
第4章 射线照相检验的基本技术	70	4.7.4 小直径管对接焊缝透照技术	109
4.1 透照布置	70	4.7.5 非金属材料与复合材料工件的透照技术	112
4.1.1 透照布置概述	70	4.7.6 多个工件一次透照技术	114
4.1.2 射线源、工件、胶片的相对位置	71	4.8 缺陷位置与尺寸测定方法	114
4.1.3 有效透照区	71	4.8.1 缺陷位置测定方法	114
4.1.4 中心射线束方向	73	4.8.2 缺陷深度尺寸测定方法	116
4.1.5 像质计和标记的放置	73	4.9 射线照相检验的质量控制	116
4.2 基本透照参数	74	4.9.1 射线照相检验质量控制概念	116
4.2.1 透照参数概念	74	4.9.2 射线照相检验技术控制	117
4.2.2 射线能量的确定	74	4.9.3 其他方面控制	118
4.2.3 焦距的确定	76	4.9.4 射线照相检验工艺卡编制	119
4.2.4 曝光量确定	78	复习题	121
4.3 增感	80	第5章 暗室处理技术	124
4.3.1 增感概念	80	5.1 暗室处理概述	124
4.3.2 增感屏的类型与特点	80	5.1.1 暗室处理的基本过程与方法	124
4.3.3 增感屏使用	83	5.1.2 暗室的基本要求	124
4.4 散射线控制	84	5.1.3 暗室操作的基本要求	126
4.4.1 散射线的产生	84		
4.4.2 散射线对影像质量的影响	86		
4.4.3 散射线防护的主要方法	86		
4.5 曝光因子	88		
4.6 曝光曲线与曝光量计算	90		
4.6.1 曝光曲线概述	90		

5.2 显影	126	6.3.2 气孔	145
5.2.1 显影过程的作用	126	6.3.3 裂纹缺陷	146
5.2.2 显影液的组分	127	6.3.4 冷隔	147
5.2.3 显影液配制	128	6.3.5 夹杂物	148
5.2.4 显影操作与影响显影 的因素	129	6.3.6 偏析	148
5.3 停显或中间水洗	130	6.4 熔焊接头常见缺陷识别	149
5.4 定影	131	6.4.1 熔合不良缺陷	150
5.4.1 定影过程的作用	131	6.4.2 裂纹	152
5.4.2 定影液的组分与作用	131	6.4.3 气孔	153
5.4.3 定影操作与影响定影 的因素	132	6.4.4 夹杂物	154
5.5 水洗与干燥	133	6.4.5 成形不良	156
5.5.1 水洗	133	6.5 底片上的其他影像	157
5.5.2 干燥	134	6.5.1 常见的伪缺陷	157
5.6 胶片自动处理	134	6.5.2 静电斑纹	158
5.7 暗室处理的质量控制 措施	135	6.5.3 衍射斑纹	159
复习题	136	6.6 质量评定	160
第 6 章 评片	138	6.6.1 质量评定概述	160
6.1 评片概述	138	6.6.2 质量验收标准关于内 部质量规定的理解	160
6.1.1 眼睛的视觉特性	138	6.6.3 质量分级评定的基本 步骤	162
6.1.2 评片的主要条件 与要求	138	6.6.4 实例	162
6.1.3 评片的主要内容	139	复习题	166
6.1.4 缺陷识别一般方法	140	第 7 章 射线实时成像检验技术	168
6.2 底片质量	141	7.1 概述	168
6.2.1 黑度	141	7.2 射线实时成像检验系统	169
6.2.2 射线照相灵敏度	142	7.2.1 射线实时成像检验系统 的基本构成	169
6.2.3 标记系	143	7.2.2 图像增强器射线实时 成像检验系统	169
6.2.4 表观质量	143	7.2.3 其他射线实时成像检验 系统	171
6.3 铸件常见缺陷的识别	143	7.3 射线实时成像检验系统 (图像)性能	173
6.3.1 缩孔、缩松、疏松 (显微缩松)	144		

7.3.1 性能基本指标	173	9.3.3 外照射防护方法	202
7.3.2 系统性能测定方法	174	9.3.4 外照射防护计算	205
7.3.3 系统性能表示方式	175	9.4 辐射防护监测与辐射防护	
7.4 射线实时成像检验技术		管理	209
与应用	175	9.4.1 辐射防护监测	209
7.4.1 技术的一般规定	175	9.4.2 辐射防护管理的一般	
7.4.2 实时成像检验技术的		规定	209
一些特殊考虑	176	9.4.3 辐射防护管理的部分	
7.4.3 射线实时成像检验技术		主要规定	210
应用	177	9.4.4 现场射线照相检验辐射	
复习题	179	防护的主要规定	212
第 8 章 其他射线检测技术	181	复习题	213
8.1 中子射线照相检验技术	181	第 10 章 射线照相检验标准	215
8.1.1 中子概述	181	10.1 射线照相检验标准	
8.1.2 热中子射线照相技术	182	概述	215
8.1.3 热中子射线照相技术		10.2 射线照相检验技术标准	
的应用	183	的主要规定	216
8.2 射线 CT 检测技术	185	10.3 射线照相检验标准的	
8.3 康普顿散射成像检测		选用	218
技术	187	10.4 国内外主要射线照相	
8.4 CR 技术	189	检验技术标准介绍	219
复习题	191	10.4.1 国内的射线照相检验	
第 9 章 辐射防护	193	技术标准	219
9.1 辐射防护概述	193	10.4.2 国外的射线照相检验	
9.2 辐射量与辐射生物效应	194	技术标准	221
9.2.1 主要辐射量	194	10.4.3 ISO5579:1998 标准规	
9.2.2 吸收剂量与照射量		定的主要改变	221
的关系	196	10.4.4 射线照相检验技术标准	
9.2.3 辐射生物效应	197	规定的主要变化	222
9.2.4 辐射损伤	198	复习题	225
9.3 辐射防护原则、剂量限值		附录	226
体系和防护技术	200	附录 A 细节射线照相对比度	
9.3.1 辐射防护原则	200	基本公式	226
9.3.2 剂量限值体系	201		

附录 B 放射性同位素与射线 装置放射防护条例 (中华人民共和国国务 院第 44 号令.1989) ...	229
--	-----

附录 C 国内外射线照相检验 的部分标准目录	234
附录 D 复习题参考答案	236
参考文献	239

第 1 章 射线检测的物理基础

1.1 基本概念

1.1.1 原子结构

直到 19 世纪末,人们一直认为原子是组成物质的最小微粒,它是不能再分割的。19 世纪末 20 世纪初物理学的许多新发现,揭示了原子是可以分割的,并且具有自己的结构。研究证明,原子都是由原子核和核外电子组成的。

原子核位于原子的中心,核外电子围绕原子核运动。原子核由质子和中子组成,不同原子的原子核含有的质子数和中子数不同。原子核的半径为 10^{-14}m ,约为原子半径的万分之一,它的体积只占原子体积的几千亿分之一,可见在原子内部存在很大的空间,电子就在这个空间中围绕原子核运动。

质子是一种物质微粒,其质量为 $1.6726 \times 10^{-27}\text{kg}$,带有一个单位的正电荷,电量为 $1.6021892 \times 10^{-19}\text{C}$ 。中子也是一种物质微粒,其质量为 $1.6748 \times 10^{-27}\text{kg}$,不带电荷。电子是一种更小的物质微粒,其质量为 $9.1095 \times 10^{-31}\text{kg}$,仅为质子质量的 $1/1836$,其带有一个单位的负电荷,电量为 $1.602189 \times 10^{-19}\text{C}$ 。

核外电子在原子空间做高速运动,电子的运动与我们通常所见的物体的运动存在根本的不同。对普通物体,我们可以测定或计算它在某一时刻的准确位置,描绘它们运动的轨迹。但对电子,我们既不能测定或计算它在某一时刻的准确位置,也不能指出它的运动轨迹,而只能指出它在核外空间某个位置出现机会的多少。

不同能量的电子运动状态不同,能量低的电子通常在核附近的区域运动,能量高的电子通常在离核较远的区域运动。也就是说,能量低的电子出现在离核较近区域的机会多,能量高的电子出现在离核较远区域的机会多。按照这种情况,可以称核外电子在不同电子层运动。离核最近的称为第一层,从核向外依次称为第 2、3、4、5、6、7 层等,也常称为第 K、L、M、N、O、P、Q 层等。实际上,核外电子的运动是相当复杂的。

如果把在一定电子层上的电子所占据的空间称为一个“轨道”,这样也可以说电子在不同的轨道上运动,但这并不是我们对通常物体所说的轨道。按照这种概念,核外电子也可以称为轨道电子。

核外电子的分层排布（也就是其可能的运动状态）服从下述的规律：

1) 泡利不相容原理：在同一原子中，不能存在运动状态完全相同的电子。

2) 能量最低原理：核外电子总是先排在可能的能量最低的轨道上，使原子的能量处于最低的状态，这时候原子才是稳定的。

按照上述规律，如果以 n 记层数，则各层最多可能存在的电子数为 $2n^2$ 。即第 1 层最多可以存在 $2 \times 1^2 = 2$ 个电子；第 2 层最多可以存在 $2 \times 2^2 = 8$ 个电子……。原子的上述结构可以形象简单地画成图 1-1 所示的图形。

描述原子的主要常数是核电荷数和质量数。

核电荷数表示原子核带有的电荷，通常采用符号 Z 表示，其等于原子核的质子数。

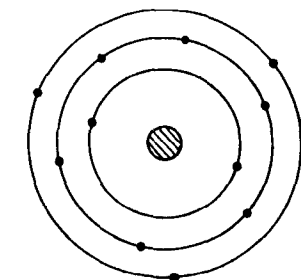


图 1-1 原子结构行星模型图

原子的质量很小，通常采用相对原子质量表示原子的质量，即采用质量为 $1.9927 \times 10^{-26} \text{kg}$ 的碳原子质量的 $1/12$ 为原子质量的单位，其他原子的质量与其相比，得到的数值即为这种原子的相对原子质量。由于电子的质量远小于质子、中子的质量，所以原子的质量近似等于质子和中子的质量之和。质子的相对质量为 1.007，中子的相对质量为 1.008，均近似取整数值，即取为 1。忽略电子的质量，将原子核内所有质子和中子的相对质量加起来，得到的数值称为质量数，常用 A 表示，中子数常用 N 表示。这样有

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

也即

$$A = Z + N$$

一个质量数为 A 、质子数为 Z 的原子 X ，可以记为



从这个符号可以知道，其原子核中有 Z 个质子、 $(A-Z)$ 个中子，核外有 Z 个电子。

1.1.2 光量子概念

关于光的本性研究，在 17 世纪形成了两种学说，一种是牛顿的微粒说，另一种是惠更斯的波动说。微粒说认为，光是光源发出的物质微粒，在媒质中以一定速度传播。波动说认为，光是某种振动以波的形式传播。麦克斯韦

的电磁场理论进一步揭示了光是电磁波。但这些理论都存在一些不能解释的现象。

1905 年爱因斯坦提出光是光子流，光子简称为光子。光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-1)$$

h 是一个普适恒量，称为普朗克常数，其值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ， ν 是辐射频率，单位是赫[兹] (Hz)。

光子不带电荷，它的静止质量为 0，在真空中沿直线以光速 c 传播，光速 c 的值为

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$$

不同波长的光具有不同能量的光子。光子与一般基本粒子的本质不同是，它的静止质量为 0，即只有当它运动时才具有质量，质量的大小还与它的运动速度相关，速度越大质量也越大。此外，光子在真空中将以恒定的速度传播。

光子概念的提出使对光的本性的认识进入了新的阶段——光子说阶段。光子说认为，光既具有粒子性，又具有波动性，也就是说光具有波粒二象性。单个光子的运动显示出粒子性，大量光子的运动显示出波动性。但光既不是我们通常所说的微小物体，也不是我们通常概念中的波。以后的研究证明，一切微观粒子都具有波粒二象性。光子的能量越高（波长越短），粒子性越强；光子的能量越低（波长越长），波动性越强。

1.1.3 原子能级

1913 年，物理学家玻尔提出了一种原子理论，这一理论以下列两个假设为前提。

1) 原子只能处于一系列分立的能量状态中，在这些状态中原子是稳定的。这些状态称为定态。

2) 原子从一种定态 (E_n) 跃迁至另一种定态 (E_m) 时，将辐射或者吸收一定频率的光子，光子的能量决定于两个定态的能量差，即

$$h\nu = E_n - E_m$$

式中 E_n —— 初态能量；

E_m —— 终态能量。

这个假设称为玻尔频率规则。

原子各个定态的能量值组成原子能级。电子的不同轨道分布对应于原子的不同能量状态。在正常状态下，原子处于最低能级，即其核外电子都在可能的最低能量轨道上运动。这种定态称为基态，其他的定态称为激发态。

原子从基态向激发态跃迁将吸收能量，从激发态向基态或从能量较高的