

DINDT

射线检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

射线检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 郑世才

主 审 赵起良



机械工业出版社

本书作为国防科技工业部门无损检测人员的公共培训教材,除具备一般无损检测教材的内容外,结合国防科技工业射线检测工作的实际,从基本理论、实际应用等方面,对检测原理、检测方法等进行了简要、系统论述。此外,本书的有关章节还在质量管理、辐射防护管理以及射线检验标准等方面进行了必要、清晰的介绍。

本书主要供从事无损检测的人员及公共培训的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编审委员会编. —北京:机械工业出版社,2004.3
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-13952-6

I. 射 ... II. 国 ... III. 射线检验-基本知识 IV.
TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第007852号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:武江 吕德齐 责任编辑:庞晖

封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16开·15.5印张·352千字

0001—4000册

定价:28.00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

编写委员会

主 任：马恒儒

副主任：陶春虎、郑鹏

成 员：（以姓氏笔画为序）

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付 洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主 任：吴伟仁

副主任：徐思伟、耿荣生

成 员：（以姓氏笔画为序）

于 岗 王海岭 王晓雷 王 琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘占捷 吕 杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张 鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯 松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主 任：郭广平

成 员：（以姓氏笔画为序）

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术,随着产品复杂程度增加和对安全性保证的严格要求,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性一方面取决于所采用的技术和设备的水平,另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证;认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一级别资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准,国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712,规定了人员取得级别资格与所能从事工作的对应关系,通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来,船舶、核、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作,对提高无损检测人员素质,确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善,国防科技工业管理体制改革逐步深化,技术进步日新月异,特别是高新技术武器装备科研生产对质量工作提出的新的更高要求,现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期,做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力,《国防科工委关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见》提出了要研究并建立与国际惯例接轨,适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动,各项工作稳步推进,2002 年 9 月正式颁布 GJB 9712《无损检测人员的资格鉴定与认证》;2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》;2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会,授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作,标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的第一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材,为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作,国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员资格鉴定与认

证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体、注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用十分迅速，教材编写难度较大。加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高并为促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

《国防科技工业无损检测人员
资格鉴定与认证培训教材》编审委员会

2004 年 3 月

前 言

根据《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试培训教材》的编写要求，我们承担了《射线检测》教材编写，并贯彻以下编制原则：一是紧密围绕考试大纲，强调解决实际问题；二是突出体现国防科技工业无损检测工作特色，适当增加典型应用及案例的介绍；三是教材内容编排应按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作四大部分安排章节。

《射线检测》教材共设 10 章和 3 个附录。第 1 章由钱其林、郑世才编写，第 2 章由鞠清龙、郑世才编写，第 4 章由赵起良、鞠清龙、汤国祥、钱其林、郑世才编写，第 6 章由钱其林、鞠清龙、郑世才编写，第 3、5、7、8、9、10 章和附录由郑世才编写，全书由郑世才整理定稿，赵起良担任主审，郭楚范、李荣生参加了审核。

本教材主要特点有：一是在基本理论方面，明确地确定了射线照相影像质量因素，主要讨论的是射线照相检验技术的理论基础，并以此确立射线照相检验的基本技术，因此，对Ⅲ级人员的射线照相检验基本技术确定为由透照布置选取、透照参数确定、散射控制、暗室处理技术、缺陷定位技术构成；二是在应用方面，本教材结合国防工业射线检测的要求，选取了一些具有一定国防工业应用特点的工件，介绍了它们的射线照相检验技术要点；三是教材从国防工业射线检测工作的实际考虑，介绍了一些其他射线检测技术，并以单独一章介绍射线实时成像检测技术。此外，本教材的有关章节给出了简要的，但较为系统的质量管理、辐射防护管理、射线检验标准方面的内容。附录 A 对缺陷识别基本条件中涉及的基本概念作了一些讨论，希望引起注意。教材目录中带“**”的章节仅适用于Ⅲ级人员，带“*”的章节，对Ⅱ级人员仅要求了解。

本教材是国防科技工业的通用培训教材，考虑到各行业的特点，还应补充必要的材料、工艺、缺陷等工业部门的标准和规范及一些特殊技术的内容，以期使培训收到更好的效果。

本教材在编写中，除了参考国内外公开出版的一些文献外，还特别参考了无损检测学会编写的培训教材及航空、航天、兵器、船舶、核工业等内部培训教材，编写组对有关作者表示衷心感谢。此外，教材也写入了编写组成员多年从事射线检测工作积累的经验和在培训教学中的一些体会。

限于编者水平，错误和疏漏在所难免，热诚欢迎培训教师、培训学员、读者提出宝贵意见。

《射线检测》编写组

2003 年 9 月

目 录

编审委员会

序言

前言

绪论 1

第1章 射线检测的物理基础 3

1.1 原子结构 3

1.1.1 原子结构的行星模型 3

*1.1.2 原子核 5

*1.1.3 放射性与放射性衰变 5

1.2 射线概念 8

1.2.1 射线分类 8

*1.2.2 X射线与X射线谱 8

1.2.3 γ 射线 12

1.2.4 X射线与 γ 射线的主要性质 12

1.3 光子与物质的相互作用 13

1.3.1 光电效应 13

1.3.2 康普顿效应 14

1.3.3 电子对效应 15

1.3.4 瑞利散射 15

1.4 射线衰减规律 16

1.4.1 基本概念 16

1.4.2 单色窄束射线衰减规律 17

*1.4.3 宽束连续谱射线的衰减规律 19

复习题 21

第2章 射线照相检验设备与器材 23

2.1 X射线机 23

2.1.1 X射线机的基本结构与类型 23

2.1.2 X射线管 24

2.1.3 高压发生器 27

2.1.4 冷却系统 28

*2.1.5 控制和保护系统 29

2.1.6 高压电缆 30

*2.1.7 X射线机的技术性能、使用与维护 30

2.2 γ 射线机 36

2.2.1 γ 射线机的类型 36

2.2.2 γ 射线机的基本构成 36

2.2.3 γ 射线机使用 38

*2.3 加速器 39

2.4 工业射线胶片 41

2.4.1 射线胶片的结构 41

2.4.2 胶片的主要感光特性与感光特性曲线 41

*2.4.3 潜影形成与射线照相效应特点 44

2.4.4 射线胶片的分类与选用 45

2.5 射线照相检验常用的

其他设备和器材 47

2.5.1 增感屏 47

2.5.2 像质计 49

*2.5.3 其他设备和器材 54

复习题 55

第3章 射线照相检验技术的

理论基础和基本技术 57

3.1 射线检测的基本原理 57

3.2 射线照相的影像质量 58

*3.2.1 影像质量基本因素的提出 58

3.2.2 影像的射线照相对比度 59

3.2.3 影像的射线照相不清晰度 61

*3.2.4 影像的颗粒度 64

3.3 缺陷射线照相检出能力 64

*3.3.1 细节影像可识别性	64	*4.1.3 笼型转子射线照相检验技术	107
**3.3.2 细节影像可识别性公式	65	*4.1.4 固体火箭发动机药柱质量 的射线照相检验技术	108
3.3.3 射线照相灵敏度	68	4.2 熔焊接头射线照相检验技术	109
**3.4 射线照相检验技术的基本构成	69	4.2.1 环形对接接头射线照相 检验技术	109
3.5 透照布置	70	4.2.2 小直径管对接接头射线 照相检验技术	113
3.5.1 基本透照布置	70	*4.2.3 T形接头射线照相检验技术	117
3.5.2 确定透照布置的基本考虑	71	*4.2.4 球罐焊接接头 γ 射线全景 照相检验技术	118
3.5.3 有效透照区	71	**4.3 特殊焊接接头射线照相 检验技术	121
3.6 基本透照参数	73	4.3.1 电阻点焊接头射线照相 检验技术	121
3.6.1 射线能量	73	4.3.2 波纹管组件电子束对接接头 射线照相检验技术	122
3.6.2 焦距	74	4.3.3 钎焊接头射线照相检验技术	123
3.6.3 曝光量	76	4.4 非金属材料与复合材料制件 射线照相检验技术	124
3.7 散射线控制	78	*4.4.1 射线照相检验技术的一般考虑	124
3.8 曝光曲线	81	**4.4.2 金属蜂窝夹层结构的 射线照相检验技术	125
3.8.1 曝光曲线的类型与制作	81	**4.4.3 纤维增强复合材料射线 照相检验技术	126
*3.8.2 曝光曲线的应用	84	*4.5 电子元器件射线照相检验技术	128
**3.8.3 曝光曲线的函数关系 与厚度宽容度	86	复习题	128
3.8.4 曝光量计算	87	第5章 评片技术	130
3.9 暗室处理技术	90	5.1 评片技术概述	130
3.9.1 暗室处理概述	90	5.1.1 评片的主要内容与底片质量	130
3.9.2 显影	91	5.1.2 评片的主要条件与要求	131
3.9.3 停显或中间水洗	95	5.1.3 评片基本知识	132
3.9.4 定影	96	5.2 铸件常见缺陷识别	134
3.9.5 水洗与干燥	98	5.3 熔焊接头常见缺陷识别	138
3.9.6 存档质量	99	*5.4 复合材料构件与非金属材料 制件的内部缺陷	143
3.9.7 胶片自动处理	99	*5.5 底片上的其他影像	143
3.9.8 暗室处理的质量控制措施	100		
**3.10 缺陷位置与尺寸测定方法	101		
3.10.1 缺陷位置测定方法	101		
3.10.2 缺陷深度尺寸测定方法	103		
复习题	103		
第4章 典型工件的射线照相检验技术	105		
4.1 铸件射线照相检验技术	105		
4.1.1 铸件射线照相检验常用技术	105		
*4.1.2 发动机叶片射线 照相检验技术	106		

5.5.1 常见的伪缺陷	143	7.2 GJB 1187A—2001 (射线检验)	
5.5.2 静电斑纹	144	的主要规定	163
5.5.3 衍射斑纹	145	7.2.1 标准简介	163
5.6 质量评定	147	7.2.2 GJB 1187A—2001 标准关于射线	
**5.6.1 验收标准 (技术条件)		照相检验技术方面的主要规定	164
关于内部质量的规定	147	7.2.3 GJB 1187A—2001 标准关于	
5.6.2 质量分级评定的基本步骤	148	射线照相检验质量控制方面	
复习题	152	的主要规定	166
第 6 章 射线照相检验质量管理		*7.3 国外主要射线照相检验	
与工艺编制	153	技术标准介绍	167
**6.1 质量保证的基本概念	153	7.3.1 ISO5579: 1998 标准规定的	
6.1.1 质量概念	153	主要改变	167
6.1.2 全面质量管理概念	153	7.3.2 EN444: 1994 标准的主要规定	169
6.1.3 质量保证体系概念	154	7.3.3 ASTM E1742-00 标准	
6.1.4 射线照相检验的质量概念	155	的主要规定	171
**6.2 射线照相检验人员管理	155	7.3.4 国外射线照相检验标准规定	
6.2.1 岗位责任制	155	的主要改变	173
6.2.2 技术培训与资格	155	**7.4 射线照相检验标准的选用	174
6.2.3 技术档案	156	复习题	174
6.2.4 健康	156	第 8 章 射线实时成像检验技术	175
6.2.5 考核	156	*8.1 概述	175
*6.3 射线照相检验设备和器材管理	156	*8.2 射线实时成像检验系统	176
6.3.1 合格证明	157	8.2.1 射线实时成像检验系统	
6.3.2 维护	157	的基本构成	176
6.3.3 校验	157	8.2.2 工业射线实时成像检验系统	176
6.3.4 档案资料	157	**8.3 射线实时成像检验系统的	
*6.4 射线照相检验工艺质量管理	157	图像和性能	179
6.4.1 射线照相检验规程	158	8.3.1 射线实时成像检验技术的图像	179
6.4.2 射线照相检验工艺卡	159	8.3.2 射线实时成像检验系统	
6.4.3 工艺稳定性控制	159	图像的主要性能	180
6.4.4 新技术、新工艺、新材料、		8.3.3 射线实时成像检验系统	
新设备使用的控制	160	性能的鉴定	181
**6.5 射线照相检验实验室管理	160	**8.4 射线实时成像检验的基本技术	182
6.6 射线照相检验工艺卡编制	160	8.4.1 射线实时成像检验技术	
复习题	162	的一般要求	182
第 7 章 射线照相检验标准	163	8.4.2 常用图像处理技术	183
7.1 射线照相检验标准概述	163	8.4.3 射线实时成像检验的技术控制	184

**8.5 射线实时成像检验技术	10.2 辐射生物效应	211
主要标准简介	10.2.1 辐射生物效应分类	211
复习题	*10.2.2 危险度、权重因子与有效剂量当量	212
第9章 其他射线检测技术	10.2.3 辐射损伤	213
*9.1 中子射线照相检验技术	10.3 辐射防护原则、剂量限制体系和防护技术	214
9.1.1 概述	10.3.1 辐射防护原则	214
9.1.2 热中子射线照相检验技术	10.3.2 剂量限制体系	215
9.1.3 热中子射线照相技术的应用	10.3.3 外照射防护方法	216
**9.2 射线CT检测技术	*10.3.4 外照射防护计算	219
9.2.1 概述	10.4 辐射防护管理	221
9.2.2 射线CT系统	*10.4.1 辐射防护管理的一般规定	221
9.2.3 CT图像重建原理理解	*10.4.2 放射工作人员的基本条件与健康管理	222
**9.3 康普顿散射成像检测技术	*10.4.3 放射性工作场所分类	223
9.3.1 康普顿散射成像技术检测原理	*10.4.4 辐射(放射)事故管理	223
9.3.2 康普顿散射成像检测技术系统	*10.4.5 放射性物质管理	225
9.3.3 康普顿散射成像检测技术的主要特点	*10.5 辐射防护监测	225
**9.4 电子射线照相检验技术	10.5.1 辐射防护监测概述	225
**9.5 非常规射线照相检验技术	10.5.2 比释动能概念	226
9.5.1 高能X射线照相检验技术	10.5.3 辐射防护监测的主要规定	226
9.5.2 放大射线照相检验技术	复习题	227
9.5.3 扫描射线照相检验技术	附录	228
**9.6 CR技术	附录A 关于缺陷影像的 ΔD , $\Delta D_{\min}$ 与黑度 D 关系的讨论	228
复习题	附录B 放射性同位素与射线装置放射防护条例	229
第10章 辐射防护	附录C 国内外射线照相检验的部分标准目录	233
10.1 辐射量	参考文献	236
10.1.1 照射量		
10.1.2 吸收剂量		
10.1.3 剂量当量		
*10.1.4 吸收剂量与照射量的关系		

绪 论

射线检测技术是一种重要的无损检测技术，它依据的是被检工件由于成分、密度、厚度等的不同，对射线产生不同的吸收或散射的特性和对被检工件的质量、尺寸、特性等作出判断。

1895 年德国物理学家伦琴发现 X 射线，1912 年美国物理学家 D.库利吉博士研制出新型 X 射线管——白炽阴极 X 射线管，这种 X 射线管可以承受高电压、高管流，为 X 射线的工业应用提供了基础。1922 年美国麻萨诸塞州 Watertown 陆军兵工厂安装了库利吉管 X 射线机，工作电压为 200 kV，管电流达 5mA，第一次完成了真正的工业射线照相。此后，射线照相检验技术得到了迅速的发展。1930 年前后，射线照相检验技术正式进入工业应用。1940 年前后，首次提出了射线照相检验底片质量问题。1962 年前后，建立了完整的、至今仍在指导常规射线照相检验技术的基本理论。1970 年以后，图像增强器射线实时成像检验技术、射线层析检测技术（CT 技术、康普顿散射成像检测技术）等发展迅速。1990 年以后，射线检测技术进入了数字射线检测技术时代，成像板及线阵列射线实时成像检验技术和 CR 技术是发展中的重要技术。

对于工业应用，射线检测技术已形成了一个完整的技术系统，一般认为可划分为：射线照相检验技术、射线实时成像检验技术、射线层析检测技术和辐射测量技术四类。射线照相检验技术主要是 X 射线照相检验技术、 γ 射线照相检验技术、热中子射线照相检验技术和非胶片射线照相检验技术，此外还有电子射线照相检验技术等。射线实时成像检验技术主要是采用图像增强器、成像板和线阵列等构成的射线实时成像检验系统，目前在工业应用中，线阵列射线实时成像检验系统显示了更优越的性能。射线层析检测技术，即 CT 技术和康普顿散射成像检测技术，主要应用在精密件、特殊结构件和研究领域。

射线检测技术不仅可用于金属材料（黑色金属和有色金属）的检验，也可用于非金属材料 and 复合材料的检验，特别是它还可以用于放射性材料的检验。检验技术对被检工件或试件的表面和结构没有特殊要求，所以它可以应用于各种产品的检验。目前，射线检测技术广泛地应用于机械、兵器、船舶、核工业、航空、航天、电子等各工业领域，其中应用最广泛的方面是铸件和焊接件的检验。射线检测技术在工业与科学研究等方面的主要应用类型包括：

- 1) 探伤：铸造、焊接工艺缺陷检验，复合材料构件检验等；
 - 2) 测厚：厚度在线实时测量；
 - 3) 检查：机场、车站、海关检查，结构与尺寸测定等；
 - 4) 研究：弹道、爆炸、核技术、铸造工艺等动态过程研究，考古研究，反馈工程等。
- 射线检测技术，与其他常规无损检测技术，如超声检验技术、磁粉检验技术、渗透

检验技术、涡流检验技术比较，具有的主要特点是：

- 1) 对被检验工件无特殊要求，检验结果显示直观；
- 2) 检验技术和检验工作质量可以自我监测。

在应用中，射线检测技术需要考虑的主要问题是辐射防护问题。射线具有辐射生物效应，对人体可以产生伤害，因此在应用射线检测技术时必须考虑辐射防护问题，必须按照国家和地方的有关标准、法规作好辐射防护工作，应力求避免辐射事故。

第 1 章 射线检测的物理基础

1.1 原子结构

1.1.1 原子结构的行星模型

自然界的物质都是由不同的分子组成的，分子由原子组成。原子是一种非常小的物质粒子，直径大约是 10^{-10}m 。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，原子具有自己的结构。

原子由质子、中子和电子组成。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 $1.6021892 \times 10^{-19}\text{C}$ （这个电量常简记为 e ）。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。

关于原子结构，曾提出过多种不同的模型。20 世纪初物理学家汤姆孙提出了一种“葡萄干面包”球体模型。这种模型认为，原子是一个均匀的阳电球体，电子均匀地嵌在球体中，按一定频率围绕各自的平衡位置振动。由于与实验结果不符合，很快被抛弃。1911 年，物理学家卢瑟福根据 α 粒子散射实验，提出了原子的核式结构模型。他设想，原子中的带正电部分集中在很小的中心体内，即原子核，并占有原子的绝大部分质量，原子核外边散布着带负电的电子。这个模型很快被广泛接受。但是，核外电子的分布情况并不清楚。1913 年，物理学家玻尔在原子核式结构模型的基础上，提出了后人称为卢瑟福-玻尔原子模型的原子结构模型，即原子结构的行星模型。

原子结构的行星模型认为，原子由带正电荷 Z_e 的原子核和 Z 个核外电子组成， Z 为原子序数。原子核位于原子的中心，电子围绕原子核运动。但电子绕核运动的轨道不是任意的，也不能连续变化。电子只能沿一些分立的满足一定条件的轨道运动，这些轨道称为量子轨道。

关于原子结构玻尔提出了两条假设：一是原子只能存在于一些具有一定分立能量 E_1 、 E_2 、 E_3 、… 的稳定状态上。处于稳定状态的原子不辐射能量，只有在原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态时，它的能量才发生改变。这些稳定态对应的不连续的能量数值组成原子的能级。二是原子从能量为 E_n 的稳定态跃迁到能量为 E_m 的稳定态时，将发射或吸收一个一定频率 ν 的光子，频率由下式决定

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1-1)$$

式中是 $h\nu$ 光子的能量， h 是普朗克常数，其值为 $6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ ， ν 是辐射频率，其单位符号是 Hz，单位名称为赫兹，它是一个普适恒量。这个关系称为玻尔频率规则。

这些稳定态称为“定态”，能量最低的定态称为“基态”，其他定态均称为“激发态”。处于基态的自由原子相当稳定，处于激发态的原子均不稳定，在很短的时间后将释放能量回到基态。

按照玻尔的理论，原子内部的电子呈壳层分布，这些壳层叫作电子壳层或电子层。电子壳层的分布按原子内电子所具有的能量大小排列而成。能量越大的电子，离核的平均距离越远。各壳层自核向外排列，最内层（在原子物理中， n 称为电子壳层的主量子数）

$$n=1$$

并称为 K 层， $n=2、3、4、5、6、7$ 等，则称为 L、M、N、O、P、Q 层等。

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。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运动轨道。按照这种概念，核外电子也可以称为轨道电子。按照现代观点，电子壳层并不表示电子在空间的确切位置，属于某一壳层的电子可以穿越另一壳层的电子轨道，这些轨道也不是一条严格确定的路径。

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：核外电子总是先排布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，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 层最多可以存在的电子数为

$$2 \times 2^2 = 8$$

依此类推。

描述原子的主要常数是核电荷数和相对质量数。核电荷数表示原子核带有的电荷，通常采用符号 Z 表示，其值等于原子核的质子数。原子的质量很小，通常采用相对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。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。由于电子的相对质量远小于质子、中子的相对质量，所以原子的相对质量近似等于质子和中子的相对质量之和。忽略电子的相对质量，将原子核内所有质子和中子的相对质量加起来，得到的数值称为相对质量数，常用 A 表示，中子数常用 N 表示。这样有

相对质量数 = 质子数 + 中子数

也即

$$A = Z + N$$

某相对质量数为 A 、原子序数为 Z 的原子（元素） X 则可记为

A_ZX

**1.1.2 原子核

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。

在原子核中，作用的力除了库仑力、万有引力、磁力外还存在强大的核力，其他力远小于核力。1935年，（日本）汤川秀树提出了核力的介子理论。核力具有下列性质：

- 1) 核力是一种短程力，随着距离增大，作用力急剧减小。作用距离为 10^{-15}m 。
- 2) 核力具有饱和性，一个核子（质子、中子）只与相邻的核子发生作用。
- 3) 核力与电荷大小无关，它比电场力强得多，质子和中子都受核力的作用。

核力的上述性质决定了原子核的稳定性特性。精确的测定发现，原子核的质量总是小于构成原子核的质子和中子的质量和。即核子结合构成原子核时质量减少了。按照相对论的质能关系，质量减少表示释放了能量。即核子结合构成原子核时将释放能量，释放的能量称为原子核的结合能。原子核不同结合能也不同，每个核子的平均结合能也不同。

相对质量数 A 为 40~120 的中等核，核子的平均结合能最高，都接近 8.6MeV 。 $A > 120$ 的重核，核子的平均结合能比中等核略低，如铀核核子的平均结合能为 7.6MeV 。 $A < 30$ 的轻核，核子的平均结合能显示周期性变化，极大值出现在 A 为 4 的整倍数、且质子数等于中子数的核（偶偶核）；平均结合能极小值的核是质子数等于中子数、且均为奇数的核。 $A > 30$ 以后核子的平均结合能值变化不大。

不同的原子核具有不同的结合能，结合能越大核越稳定。在发现的 109 种元素的约 2000 种核素中，有 274 种稳定核素。事实表明，质子数和中子数都是偶数的核素非常稳定，非偶数的核，特别是质子数和中子数都是奇数时，核素很不稳定。即当 N/Z 过高或过低时核都不稳定。实验发现，很重的核都是不稳定的。

不稳定的核素会自发蜕变，变成另一种核素，同时放出射线，即发生放射性衰变。当原子核与其他粒子相互作用（碰撞）时，核也可以发生改变，这个过程称为（原子）核反应。

*1.1.3 放射性与放射性衰变

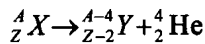
1896 年法国物理学家贝克勒尔发现铀和含铀的矿物能发射出看不见的射线，这种射线可以穿透黑纸使胶片感光，可以使气体电离。物质发射这种射线的性质称为放射性，具有放射性的元素叫做放射性元素，自然界存在的放射性元素称为天然放射性元素。放射性元素的原子核不稳定，它们能自发地发生转变（蜕变），发射射线。这种能自发地发出射线的现象，称为天然放射现象。某些元素的同位素也具有放射性，称为放射性同位

素。1934 年发现,用人工方法也可以得到放射性同位素,称为人工放射性同位素。天然放射性同位素仅有 40 多种,人工放射性同位素已有一千多种。在射线探伤中应用的 γ 射线源,主要都是人工放射性同位素。

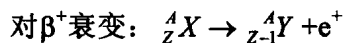
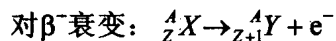
一种元素的原子核放出射线之后就转变为新的原子核。原子核由于放出某种粒子或射线而转变为新核的变化,称为原子核的衰变。原子核自发地放射出射线转变为另一种原子核的现象,称为放射性衰变。在衰变的过程中电荷数和相对质量数保持守恒。放射性的发现揭示了原子核结构的复杂性。

放射性衰变的主要方式是 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变,此外还有其他一些衰变方式。

α 衰变是指原子核放出 α 粒子的衰变过程。 α 粒子带有两个单位的正电荷,相对质量数为 4,实际就是氦原子核。它穿透物体的能力很小,在空气中也只能飞行几个厘米,但具有很强的电离能力。以 X 表示原来的核,以 Y 表示衰变后的核,则 α 衰变过程可写成如下形式



β 衰变是指原子核放出 β 粒子的衰变过程。 β 粒子是负电子或正电子流,它具有较大的穿透能力,甚至可以穿透几毫米厚的铝,但电离作用较弱。放出负电子的称为“ β^- 衰变”,放出正电子的称为“ β^+ 衰变”。在 β^- 衰变中,核内的一个中子转变为质子。在 β^+ 衰变中,核内的一个质子转变为中子。 β 衰变中放出的电子能量具有连续谱分布。 β 衰变可写成如下形式



当一种放射性元素发生连续衰变时,有的过程是 α 衰变,有的过程是 β 衰变,在这些衰变过程中常伴随辐射 γ 射线。这是由于放射性元素的核,经过上述衰变后变成处于激发态的核,当它返回正常态时将辐射 γ 射线,这个过程称为 γ 衰变(也称为 γ 跃迁)。 γ 射线是波长很短的电磁波,穿透物体的能力很强,甚至可以穿透几个厘米厚的铅板,但它的电离作用却很小。

放射性原子核的衰变过程是自发进行的,但衰变过程遵循一定的统计规律。实验表明,对于同种放射性元素,它的每个原子核发生衰变的可能性是相同的,但不是同时发生衰变,在很短的时间间隔内,衰变的原子数与存在的原子数成正比。即若在很短的时间 Δt 内如果有 ΔN 个原子核发生衰变,则它们满足下面的关系

$$\Delta N = -\lambda \Delta t$$

式中的负号表示衰变后原子核数减少。对此式积分,则得到放射性衰变规律

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-2)$$

可见,原子核的减少服从指数衰减规律。

式中 N_0 —— 初始时刻($t=0$)放射性物质未发生衰变的原子核的数量;

N —— t 时刻放射性物质尚未发生衰变的原子核的数量;