

高等工科院校无损检测专业规划教材

射线检测

SHEXIAN JIANCE

张小海 邬冠华◎主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等工科院校无损检测专业规划教材

射线检测

主编 张小海 邬冠华
参编 敖波 刘二军 余欣辉
主审 屠耀元



机械工业出版社

本书是针对高等工科院校无损检测专业射线检测技术课程的需要而编写的。书中强调射线检测理论基础的重要性,始终以理论基础贯穿全书;考虑教学、培训的双重需要,本书将理论、工程、资格考核的有关要求有机结合,不仅有纵向的深度,而且具有横向的广度。本书同时兼顾了射线检测设备、技术的最新发展,内容编排注重结构层次、射线检测过程的逻辑关系。

全书共分十一章节,包括原子与原子结构、原子核与放射性衰变、工业射线检测中的射线、射线与物质的相互作用、射线探测及器件、射线照相检测技术、射线数字成像检测技术、射线 CR 与工业 CT 技术、其他射线检测技术、辐射防护以及射线检测的质量管理。各章节附有一定数量的习题。

本书不仅可以作为无损检测专业及相关专业(机械、材料工程、质量检验等)本科生、研究生的教材,无损检测专业专科学生也可选择性使用,还可作为无损检测及相关专业的工程技术人员、管理人员的培训及参考用书。

本书配有电子课件,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话: 010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/张小海, 邬冠华主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 10
高等工科院校无损检测专业规划教材
ISBN 978-7-111-44227-1

I. ①射… II. ①张… III. ①射线检验-高等学校-教材 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 233982 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: 王海峰 责任编辑: 薛 礼

版式设计: 常天培 责任校对: 胡艳萍

责任印制: 张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·24.5 印张·604 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44227-1

定价: 46.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

社服务中心: (010) 88361066

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

序

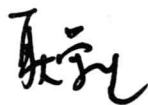
无损检测是一门综合性学科（边缘学科），它利用声、光、热、电、磁和射线等与物质的相互作用，在不损伤被检对象使用性能的前提下，探测其内部或表面的各种宏观缺陷，并判断缺陷位置、大小、形状和性质。无损检测的研究领域涉及物理学、材料学、力学、电子学、计算机、声学、自动控制和可靠性理论等多门学科。随着现代工业和科学技术的发展，该技术已在愈来愈多的行业得到了广泛的应用，其水平高低已在很大程度上反映了一个国家的工业和科技发展水平。

随着对无损检测技术人员在知识结构、理论基础、工程实践能力方面提出更高和更广的要求，对无损检测技术人才的培养也提出了不少新的和特殊的要求。南昌航空大学是我国最早创办无损检测本科专业的高等学校，30年来，她为我国航空、航天、石油、化工、核工业、电力、机械等行业输送了大批无损检测专业技术人才，有力地促进了我国无损检测事业的进步和发展，也为我国无损检测教育事业的发展作出了突出贡献，在国内无损检测界享有很高的声誉。

南昌航空大学在无损检测人才培养过程中，始终关注专业教材的建设，不仅编写了一套校内教学讲义，还先后由航空工业出版社、机械工业出版社正式出版发行了《射线检测工艺学》、《电磁无损检测》、《激光全息无损检测》、《无损检测技术》等教材，推动了我国的无损检测高等教育工作。2007年，南昌航空大学无损检测专业通过了教育部评审，批准为国家特色专业建设点。在国家特色专业建设中，他们继续把编写出版无损检测高等教育系列教材作为主要的建设任务之一。这次由机械工业出版社出版的这套教材，就是他们在原教材的基础上，结合多年来教学改革的经验体会，融入近年来无损检测技术发展成果重新编写改版的新教材。

这套教材对无损检测常规方法和几种非常规方法进行了系统介绍，不仅突出了各种检测方法的基本理论体系、方法工艺和检测技术这一架构，还对该领域的最新研究成果及应用前景作了系统介绍和分析，它既可作为无损检测高等教育的本科生教材，也可作为以无损检测为研究方向的硕士和博士研究生的参考教材，对从事无损检测专业的工程技术人员也必然会有重要参考价值。相信这套教材的出版一定会为促进我国无损检测高等教育事业和推动我国无损检测技术的发展发挥重大作用。

中国无损检测学会理事长



2011年11月

丛 书 序 言

无损检测是一门涉及多学科的综合技术，其特点是在不破坏构件材质和使用性能的条件下，运用现代测试技术来确定被检测对象的特征及缺陷，以评价构件的使用性能。随着现代工业和科学技术的发展，无损检测技术正日益受到人们的重视，不仅它在产品质量控制中所起的不可替代的作用已为众多科技人员所认同，而且对从事无损检测技术的专业及相关人员提出了相应的要求。本套教材正是为了满足各方面人士对无损检测技术学习和参考的需要，促进无损检测技术的进一步发展，根据高等工科院校专业课程教学基本要求，结合南昌航空大学无损检测专业 30 年来的教学经验，在不断探索教学改革的基础上编写的。

南昌航空大学无损检测专业是 1984 年经原国家教委批准在国内率先创办的本科专业，经过近 30 年的建设与发展，随着本科专业名称的多次调整，南昌航空大学无损检测专业归类为“测控技术与仪器”专业。但学校始终坚持以无损检测为特色，始终坚持把“培养具有扎实理论基础和较强工程实践能力的高级无损检测技术专业人才”作为专业的培养目标。经过多年努力，把“测控技术与仪器”（即原无损检测）专业建设成为国家级特色专业。并且，在专业教学中，在全国无损检测学会的支持下，经过多年的艰苦努力，编写了国内首套无损检测专业教材。这套教材曾被国内多所高等院校同类及相近专业采用，其中，《射线检测工艺学》和《电磁无损检测》等还由航空工业出版社正式出版。近年来，在国家特色专业建设过程中，为了紧跟无损检测技术进步对人才培养提出的新要求，我们按照新的教学计划对教材进行了重新规划和编写。本套教材不仅汇集了当前无损检测技术的最新成果，有一定的深度和广度，注重理论联系实际，而且更加注意教材的系统性与可读性，以满足各层次读者的需要。

本套教材共 10 册，包括《超声检测》、《射线检测》、《磁粉检测》、《涡流检测》、《渗透检测》、《声发射检测》、《激光全息与电子散斑检测》、《质量控制》、《无损检测专业英语》、《无损检测技能训练教程》。

由于无损检测技术涉及的基础学科知识和工业应用领域十分广泛，而且，新材料、新工艺的出现，以及信息、电子、计算机等新技术在无损检测中的应用十分迅速，很难在教材编写中得到及时反映，因此所编教材难免会有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

本套教材在编写过程中参考了国内外同类教学和培训教材，得到了国内诸多同行专家教授的指导和支持，在此一并致谢！愿本套教材能为提高及促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

无损检测专业教材编写组

2011 年 10 月

前 言

无损检测技术已被广泛应用于航空、航天、电力、石油、化工、机械、电子、建筑、交通等诸多领域。尤其在安全和质量正成为我国生活和生产的重大课题的今天,无损检测正发挥着越来越关键的作用,对无损检测高级技术人员的需求越来越多,国内开办无损检测专业的高等院校也不断增加。但国内系统的无损检测专业本科教材几乎是空白。射线检测技术是无损检测专业必修的五大专业基础课之一,但目前国内高校射线检测技术课程所采用的教材几乎都是培训教材,其内容的选择是面向企业的探伤人员,注重实际应用及考证的需要,而淡化了射线检测的理论基础,不能适合无损检测本科及更高层次教学的需要。为数不多的几本射线检测技术教材是20世纪80年代及90年代出版的,是以射线照相检验技术为主要内容,不能完全反映射线检测技术的全貌和近年来的最新发展。另外,射线检测技术标准也在不断更新,这些教材介绍的工艺及方法有些已经修改或废除。因此这些教材已不能适应无损检测高等教育的需要,必须结合理论教学及工程实践,编写一本注重射线检测理论基础、融合射线检测新技术及新工艺、结构层次清晰、内容系统的射线检测教材,以适应培养无损检测高层次人才的需要。

正是基于以上编写背景,我们组织了一批在南昌航空大学无损检测专业从事射线检测教学、科研多年的教授、副教授、博士,结合射线检测新技术、新标准,以及资格考核大纲的要求,在南昌航空大学无损检测专业使用多年的《射线检测讲义》的基础上,经过将内容、结构重新修改、补充,编写而成《射线检测》教材。

全书共分十一章,包括原子与原子结构、原子核与放射性衰变、工业射线检测中的射线、射线与物质的相互作用、射线探测与器件、射线照相检测技术、射线数字成像检测技术、射线CR与工业CT技术、其他射线检测技术、辐射防护以及射线检测质量管理。每章配有一定数量的习题,其中部分习题选自特种设备射线检测考证习题,附录中给出了部分习题答案。书中带“*”的章节可作为选读内容。本教材具有以下特点:

1) 深化射线检测的理论基础,强化了原子物理、量子力学、光电子理论,充分解释射线的产生、特性、与物质的作用以及探测等内容,始终以理论基础贯穿全文,突出了本科教育的理论基础要求,避免了培训教材的理论过于简单的缺点,实现了从“培训”到“培养”的转化。

2) 教材结构层次清晰,逻辑性强。按无损检测的逻辑过程构造射线检测技术教材,充分体现“射线→作用→缺陷→探测→影像→评定”的射线检测技术过程,有利于提高教材的逻辑性及层次性,避免了内容编排零散、交叠不清晰、不利于教学的缺点。

3) 注重工艺参数选择的数理推导。将理论知识的内容对应地融入检测工艺的各过程,同时尽量探讨工艺参数之间的函数关系,并用理论加以解释,使射线检测技术及工艺扎根于深厚的理论基础,克服了对工艺参数只规定不推导的缺点。

4) 教材内容新颖、系统、完整。引入射线检测新技术,将射线数字检测技术并列

于射线照相检测技术，而不是作为辅助内容进行编写，体现了射线检测技术的完整性、系统性及最新发展，避免了仅以常规射线照相检测技术为主，对射线数字检测技术只作简单介绍的片面性。

5) 专业教学与工程实践、资格考证有机结合。教材内容考虑了无损检测人员考证大纲要求，教材不仅有纵向的深度，而且具有横向的广度；不仅包含深厚的射线检测理论知识，而且具有Ⅱ、Ⅲ级的考证知识、工程应用实例。

本书由南昌航空大学测试与光电工程学院测控技术与仪器专业（无损检测）张小海、邬冠华任主编，张小海统稿。其中，第1~4章由张小海编写；第5章由张小海、敖波编写；第6章由张小海、邬冠华、余欣辉编写；第7~9章由敖波、张小海、刘二军编写；第10章由张小海、敖波、邬冠华编写；第11章由张小海编写。本书在编写过程中，得到了射线检测领域的前辈、我国无损检测高等教育的主要创始人、原全国无损检测学会常务理事和教育培训科普工作委员会主任委员、华东理工大学屠耀元教授的大力支持，并对本书进行了审阅，提出了宝贵意见及建议；江苏申港锅炉有限公司刘二军为本书的编写提供了不少检测资料；南昌航空大学测试与光电工程学院在读研究生李素军对本书的图表整理、文字录入、编排做了大量的工作。本书在编写过程中得到了我国工业射线检测领域有关专家和学者的帮助和支持，书中多处从他们的著作中参考和引用了一些资料、数据和图片，特别是参考了中国机械工程学会无损检测分会、中国特种设备检验协会组织编写的射线检测培训教材；本书还得到了机械工业出版社有关编辑的大力支持和指导，在此一并表示衷心感谢。本教材由南昌航空大学教材建设基金资助。

本书可作为高等院校无损检测专业及相关专业（机械、材料工程、焊接、安全工程、质量检验等）本科生、研究生教材，无损检测专业专科学生也可选择性使用，还可作为无损检测及相关专业的工程技术、管理人员的培训及参考用书。

由于编者水平有限，书中难免有不足甚至错误之处，希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

序

丛书序言

前言

第1章 原子与原子结构 1

- 1.1 原子的基本性质 1
- 1.2 原子结构模型 3
- 1.3 量子力学基础 12
- 1.4 原子内电子的排布 16
- 习题 21

第2章 原子核与放射性衰变 23

- 2.1 概述 23
- 2.2 原子核的基本性质 23
- *2.3 核模型 27
- 2.4 放射性核衰变 28
- 2.5 典型的放射性衰变 32
- 2.6 α 、 β 、 γ 衰变的比较 37
- 习题 37

第3章 工业射线检测中的射线 39

- 3.1 射线的分类 39
- 3.2 X 射线 39
- 3.3 γ 射线 48
- 3.4 中子射线 53
- 习题 56

第4章 射线与物质的相互作用 58

- 4.1 概述 58
- 4.2 X 射线和 γ 射线与物质的相互作用 58
- *4.3 带电粒子与物质的相互作用 77
- 4.4 中子与物质的相互作用 80
- 习题 84

第5章 射线探测及器件 85

- 5.1 概述 85
- *5.2 气体探测器 85
- 5.3 闪烁探测器 87
- 5.4 半导体探测器 90
- 5.5 工业射线检测常用的探测器 91
- 习题 126

第6章 射线照相检测技术 127

- 6.1 射线照相法原理 127
- 6.2 射线照相检测设备 133
- 6.3 影像质量及评价 155
- 6.4 透照布置与工艺参数选择 181
- 6.5 曝光曲线 204
- 6.6 散射线控制 215
- 6.7 典型工件检测 220
- 6.8 暗室处理 234
- 6.9 评片技术 249
- 习题 271

第7章 射线数字成像检测技术 275

- 7.1 射线数字成像检测分类及工作
原理 275
- 7.2 射线数字成像系统设备组成 279
- 7.3 射线数字成像系统的主要性能
指标 280
- 7.4 射线数字成像基本技术 285
- 7.5 图像质量、评定及存储 292
- 7.6 射线数字成像系统的工业应用 294
- 习题 295

第8章 射线 CR 与工业 CT 技术 296

- 8.1 射线 CR 296
- 8.2 工业 CT 306
- 习题 318

第9章 其他射线检测技术 319

- 9.1 中子射线照相检测技术 319
- 9.2 高能 X 射线照相技术 324
- 9.3 康普顿散射成像技术 330
- 习题 334

第10章 辐射防护 335

- 10.1 辐射防护概述 335
- 10.2 辐射量及其单位 336
- 10.3 辐射生物效应 342
- 10.4 辐射防护的要求、方法及计算 346
- 10.5 辐射监测 355
- 10.6 辐射防护的一般管理 358

习题	361	11.6 射线检测的文件管理	369
第 11 章 射线检测的质量管理	363	11.7 射线检测工艺管理	374
11.1 质量管理体系认证	363	11.8 射线检测记录及归档	374
11.2 计量认证体系	364	习题	378
11.3 射线检测的人员资格鉴定	364	附录 各章计算题答案	379
11.4 射线检测的设备器材管理	367	参考文献	381
11.5 射线检测耗材的管理	368		

第 1 章 原子与原子结构

1.1 原子的基本性质

地球上的物质是由不同的元素构成的。构成某一元素的最基本单元是元素的原子。不同元素的原子具有不同的性质，但它们的结构是相似的。原子是由原子核和核外电子组成的，在原子核中有质子和中子。原子结构的发现、原子结构理论的形成经历了一个漫长的过程。

古希腊的德谟克里特（Democritus）最早提出了原子一词。但直到 1803 年才由英国的化学家道尔顿（John Dalton）创立了相对科学的原子论。道尔顿的原子论认为：所有物质都是由既不能分割也不能毁灭的最小微粒所组成，这种微粒称为原子。道尔顿的原子论使人们开始从微观的角度探求物质的本质。

1871 年，英国的物理学家瓦利莱（C. F. Varley）发现阴极射线带有负电荷，并认为这是从阴极发射出的微小粒子。

1879 年，英国的物理学家克鲁克斯（W. Crookes）观察到阴极射线可以在磁场中发生偏转。

1897 年，英国的物理学家汤姆逊（J. J. Thomson）在前人的研究基础之上，测定了阴极射线中微粒的荷质比，通过实验证实该微粒是所有物质的共有组分，并且将其称为电子。

汤姆逊对电子的发现叩开了原子结构的大门，使我们能够一窥物质内部的秘密，人们随后又发现了原子核中的质子、中子，并将其与电子一道称为构成物质的基本粒子。但随着科学的发展和实验技术的进步，人们已经发现组成物质的微粒是多种多样的，曾经认为的“基本粒子”——电子、质子、中子和光子不再“基本”。到目前为止，发现的粒子已有 700 多种。

射线的产生与原子、原子核结构和性质密切相关。本章重点介绍原子的结构模型，原子核外电子的运动规律和特征，原子核外电子的排布以及量子力学的基本知识，以便于读者更好地理解后续章节将要介绍的有关射线的产生、射线与物质的相互作用及射线探测器原理等内容。

1.1.1 阿伏伽德罗定律

19 世纪初，人们在研究总结化学变化规律的基础上，已能对个数相同的两群不同原子的质量进行相对比较测量，因此形成了相对原子质量的概念。

1961 年，国际协议规定，把碳元素的一种同位素 ^{12}C 的单个原子质量的 $1/12$ 作为量度原子质量的相对单位。由此就可确定各种核素单个原子的相对质量，例如， ^1H 为 1.007825， ^{12}C 为 12.0000， ^{16}O 为 15.99491。这表明单个 ^1H 原子的质量是单个 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 的 1.007825 倍……按此所得核素原子的相对质量叫该核素的相对原子质量。化学中常用的元素相对原子质量是天然元素中所含各种同位素相对原子质量按丰度的平均值，可看做核素相

对原子质量的近似值。

以 10^{-3}kg (或 g) 作质量单位时, 若由相同原子组成的核素系统的质量值正好等于该核素的相对原子质量值, 那么, 就定义此系统所包含物质的量为 1mol (摩尔)。例如, 12.000000g 的 ^{12}C 为 1mol 的 ^{12}C , 1.007825g 的 ^1H 为 1mol 的 ^1H 。

阿伏伽德罗 (A. Avogadro) 定律: 1mol 的任何核素物质所包含的原子个数相同, 都等于恒量 N_A 。

N_A 叫阿伏伽德罗数, 其值需由实验测定。公认值为

$$N_A = 6.0220943(63) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$$

一般地, 物质系统的组成基本单元可以是原子, 也可以是分子、离子、电子或这些粒子的某种特定组合等。摩尔作为量度物质多少的通用单位, 一般的定义为: 1mol 的任何物质系统所包含基本组元的个数等于 12.000000g 的 ^{12}C 所包含原子个数。因此阿伏伽德罗定律可一般地表述为: 1mol 任何物质所包含基本组元的个数为 N_A 。

1.1.2 原子的质量

原子质量是指单个原子的质量, 是原子的一个重要基本量。

利用阿伏伽德罗定律和 N_A 值, 可以从宏观的核素相对原子质量求得原子的质量。设核素的相对原子质量为 A_r , 它的每个原子的质量 m 应为

$$m = \frac{A_r}{N_A} \quad (1-1)$$

可以把 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 看做类似于克 (g) 或千克 (kg) 的一种较小的新质量单位, 叫做原子质量单位, 并用 u 表示。 u 和 kg 的换算关系式为

$$1u = \frac{1}{12} \cdot \frac{12 \times 10^{-3} \text{kg/mol}}{N_A/\text{mol}} = 1.6605655(86) \times 10^{-27} \text{kg}$$

按 u 的定义, 核素相对原子质量就可看成以 u 为单位的该核素原子的质量。例如, 氧的相对原子质量为 16 , 一个氧原子的质量 $m = 16u$ 。只要知道 m 的 kg 值, 就可利用上式按一般的单位换算。

1.1.3 原子的大小

对原子的大小作一简单的估算。对任意一种原子, 假如相对原子质量是 A , 则 $A\text{g}$ 该原子具有 N_A 个原子, 若该原子的质量密度是 $\rho\text{g/cm}^3$, 那么 $A\text{g}$ 该原子的总体积为 A/ρ ; 假如 1 个原子占有体积为 $\frac{4}{3}\pi r^3$ (r 为原子半径), 则

$$\frac{4}{3}\pi r^3 N_A = \frac{A}{\rho} \quad (1-2)$$

由此可以得到原子的半径公式

$$r = \sqrt[3]{\frac{3A}{4\pi\rho N_A}} \quad (1-3)$$

表 1-1 所示为用多种方法对不同原子半径的测定值。结果表明, 不论原子轻重如何, 它们的大小在通常情况下都是差不多的, 任何原子的半径数量级都为 10^{-10}m 或 $1\text{\AA}$ 。

表 1-1 部分原子半径的测定值

(单位: $\text{\AA}$)

原 子	由粘滞系数所得	由晶格常数所得	由气体方程体积修正量所得
Ne	1.18	1.60	1.2
Ar	1.44	1.90	1.48
Kr	1.58	1.97	1.58
Xe	1.75	2.20	1.72

1.2 原子结构模型

1.2.1 电子的发现

1897 年, 英国物理学家汤姆逊 (J. J. Thomson) 发现了电子, 开创了人类认识原子内部结构的新纪元。

阴极射线是低压气体放电过程中出现的一种现象。有人认为此射线类似紫外线, 是一种“以太波”; 也有人认为它是由带负电的物质粒子组成的, 但当时实验上还难以确定, 最后的判定实验是由汤姆逊做出的。外加电磁场能够使带电粒子偏转, 但当时一些实验没有观测到阴极射线在外加电磁场中偏转, 汤姆逊认真分析后认为, 没有偏转的原因可能是放电管内的真空度不高, 他提高了放电管的真空度, 获得了阴极射线束在静磁场或静电场中的稳定偏转; 从而判定它是由带负电的微粒组成, 即电子。1910 年, 密立根在著名的液滴实验中, 精确测定了电子电荷为 $1.59 \times 10^{19} \text{C}$ 。直到 1929 年才发现它有 1% 的误差。电子电荷的精确值为 $e = 1.602 \times 10^{19} \text{C}$ (1 个单位负电荷), 电子的质量为 $m_e = 9.109 \times 10^{-28} \text{g}$ 。

1.2.2 汤姆逊原子结构模型

汤姆逊用经典力学的理论, 根据带电粒子之间库仑作用与距离平方成反比进行了大量计算, 设计在原子中电子稳定分布的状态, 提出了原子结构的布丁 (pudding) 模型: 由于每个原子在整体上是电中性的, 汤姆逊假设正电部分均匀分布在一个球体内, 电子镶嵌在其中某些平衡位置上, 像西餐中一种镶嵌葡萄干的松软甜点, 如图 1-1 所示。电子在它们的平衡位置作简谐振动, 它们像赫兹振子那样, 可以发射或吸收特定频率的电磁辐射。观测到的原子光谱的各种频率相当于这些振动的频率, 汤姆逊的原子结构模型把当时知道的实验结果和理论考虑都归纳进去了。

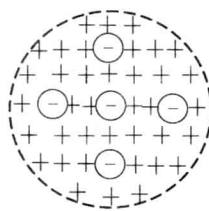


图 1-1 汤姆逊
原子结构模型

1.2.3 卢瑟福原子核式模型

1909 年, 卢瑟福建议他的助手盖革 (H. Geiger) 和学生马斯顿 (E. Marsden) 做 α 粒子散射实验 (见图 1-2), 他们发现受金属箔散射后大多数 α 粒子只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的偏转, 但却观察到约有 $1/8000$ 的 α 粒子偏转大于 90° , 有的几乎达到 180° , 即以与入射时相反的方向散射。当卢瑟福得知有 $1/8000$ 的 α 粒子被大角度散射的实验结果时, 很惊奇地说: “就像你用一枚 15in (1in = 25.4mm) 的炮弹轰击一张薄纸被弹回并击中你一样不可思议。”当时物

理学家都相信汤姆逊的原子结构模型, 这里定性地分析一下 α 粒子在汤姆逊原子模型上的散射情况, 如图 1-3 所示。由库仑力公式知, 当 α 粒子接近原子时, 如距原子中心的距离 $r > R$, 则受原子正电荷斥力; 当 $r < R$ 时, α 粒子受斥力随 r 的减小而线性地减小趋于零, α 粒子受原子最大的力在原子球表面 $r = R$ 处, 这是个有限大小的力, 这个力引起 α 粒子动量的变化 Δp 对原动量的比值就是 α 粒子偏转的角度, 每次碰撞的最大偏转角远小于 1° , 因而原子很容易穿越这种原子。有人估算, 产生 90° 偏转的几率约为 10^{-3000} , 而盖革和马斯顿的实验结果竟是 $1/8000$ 。

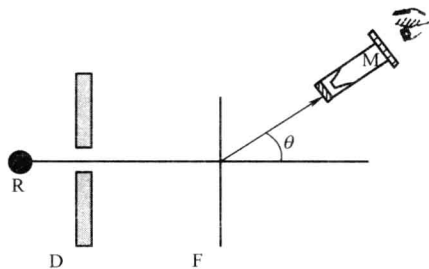


图 1-2 α 粒子散射实验

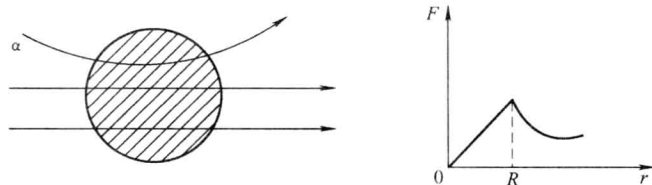


图 1-3 α 粒子在汤姆逊原子模型上的散射

卢瑟福于 1911 年提出了原子的有核结构模型。设想原子中心存在一个“核”, 它集中了原子中的全部正电荷 (电量为 Ze) 和几乎全部质量, 核的大小远小于整个原子, 约为原子的万分之一, 电子在核的外边绕核运动, 如图 1-4 所示。这样, α 粒子接近原子和达到原子表面时, 受到原子的作用和汤姆逊的模型一样; 但当它深入到原子内部时, 受到的作用就不同了, 如图 1-5 所示。这时 α 粒子仍处在核的外面, 整个核的正电荷仍对它起作用, 受库仑斥力为 $F = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ 。由于核的线度很小, α 粒子越靠近核, r 越小, α 粒子所受斥力就越大, 因此就可能在一次散射中发生大角度偏转。

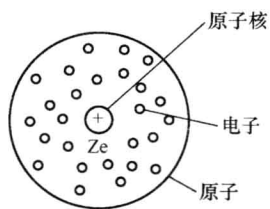


图 1-4 卢瑟福原子核式模型

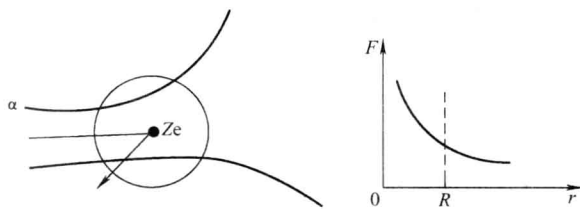


图 1-5 α 粒子在卢瑟福原子模型上的散射

卢瑟福的原子核式模型成功地解释了 α 粒子的散射实验, 但是无法解释原子的稳定性问题。由于电子在原子核外作加速运动, 按经典电动力学, 加速运动的带电粒子将不断辐射而损失能量, 从而落到原子核上, 这样原子也就“崩溃”了, 但事实上原子稳定地存在着。其次, 辐射电磁波的频率应等于电子绕核转动的频率, 随着电子能量的损失, 其转动频率将发生变化, 辐射的电磁波的频率也应是不不断改变的。但是事实上电子可以在原子核的周围处于无辐射的状态, 原子光谱不是连续光谱, 而是分立的线状光谱, 如氢原子光谱。这些问题卢瑟福的原子核式模型无法解释。

1.2.4 玻尔原子模型

玻尔原子模型是1913年由玻尔提出的一个革命性的模型，支持了卢瑟福的有核模型，解决了原子稳定性的问题，解释了氢光谱。玻尔的原子模型吸取了前人很多正确的思想，包括普朗克的量子假说，爱因斯坦的光量子假说，卢瑟福的有核模型，原子光谱的巴耳末公式。在了解玻尔的原子模型之前，先回顾一下量子说产生的背景，这涉及黑体辐射、光电效应及氢光谱的解释。

1. 黑体辐射与普朗克的量子化假设

(1) 黑体辐射 所有物体都能发射热辐射，热辐射与光辐射一样，是物体的一种电磁辐射现象。一般地，温度越高的物体，热辐射包含的短波长成分越多；温度越低，则长波长的成分越多。例如，室温下的物体通常不辐射可见光，但辐射大量看不见的红外线；家用煤炉温度不高，煤火中波长较长的红光较多；炼钢炉膛温度很高，发出耀眼的白光，其中包含了波长较短的黄光、绿光和蓝光。因此，在冶金学中，人们通常根据炉内钢液的颜色来分析炼钢的好坏；在天文学中，靠辐射的强度分布来判断星体表面的温度。

物体不仅有热辐射现象，对光也会有吸收现象。如果一物体对什么光都吸收而无反射，则物体的吸收本领为1，称这种物体为黑体。黑体能够吸收射到它表面的全部电磁辐射。自然界不存在真正的黑体，任何物体的表面都对电磁波有一定的反射能力。不过有些物体可以近似地看做黑体。例如，在一个空腔的壁上挖一个小孔，小孔的表面就是一个相当好的黑体了，只要进入这个小孔的光线就很难再逃逸出空腔，它在腔内壁经过若干次反射，能量便完全被吸收了，如图1-6所示。

1859年，基尔霍夫（G. R. kirchhoff）证明，黑体与热辐射达到平衡时，辐射能量密度 $\rho(\nu, T)$ 是与物质无关的普适函数， $\rho(\nu, T)$ 表示在频率 ν 附近单位频率范围内的能量密度。 $\rho(\nu, T)$ 随频率 ν 或波长 λ 变化的曲线形状和位置只与黑体的绝对温度 T 有关。图1-7给出了不同温度下黑体辐射的辐射能量密度分布曲线（黑体辐射谱）。

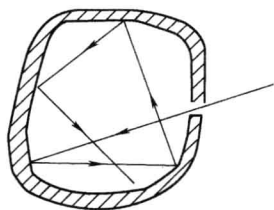


图1-6 空腔小孔

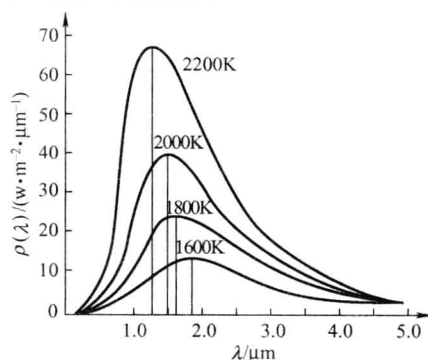


图1-7 黑体辐射谱

1893年，维恩（W. Wien）发现黑体辐射的位移律：能量密度每条曲线都有一个极大值，其相应的波长设为 $\lambda_{\max}$ ，随着温度的增加， $\lambda_{\max}$ 的值减小，与绝对温度 T 成反比：

$$\lambda_m T = b \quad (1-4)$$

其中 b 是一个常数， $b = 2897.756 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。维恩利用热力学知识及一些假设得到辐射能量分

布的经验公式:

$$\rho(\nu, T) = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu / T} \quad (1-5)$$

式中, C_1 、 C_2 为经验参数, T 为平衡时的温度。除了在低频部分有显著偏差外, 此公式在高频与实验相符得很好。

1899 年, 瑞利 (J. W. S. Rayleigh) 和金斯 (J. H. Jeans) 根据经典电动力学和统计物理学得到瑞利—金斯公式:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} kT \nu^2 \quad (1-6)$$

式中, c 为光速, $k = 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度, 是玻耳兹曼常数。此公式在低频部分与实验曲线还比较符合, 但当 $\nu \rightarrow \infty$ 时, $\rho(\nu, T) \rightarrow \infty$, 是发散的, 即当频率较高时与实验明显不符, 这就是当时物理学界有名的“紫外灾难”。

(2) 普朗克的量子化假设 在以上两个公式的基础上, 普朗克 (M. Planck) 进一步分析实验曲线, 于 1900 年在德国物理学会年会上提出一个黑体辐射能量分布公式:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1-7)$$

此式与当时测得的最精确的实验结果相符合 (见图 1-8)。为了给上述公式找到合理的理论解释, 普朗克提出了能量量子化的假设: 对于一定频率 ν 的电磁辐射, 物体只能以 $h\nu$ 为单位吸收或发射它。也就是说, 吸收或发射电磁辐射只能以“量子”的方式进行, 每个“量子”的能量为

$$\varepsilon_0 = h\nu \quad (1-8)$$

式中, h 即为普朗克常数, $h = 6.6218 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。吸收或发射电磁辐射能量 ε 是不连续的, 是一个离散的变量, 只能取基本单元能量量子 ε_0 的整数倍

$$\varepsilon_n = n\varepsilon_0 \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-9)$$

普朗克公式用波长表示

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi h}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1-10)$$

普朗克提出的能量量子化的假设, 冲破了经典物理思想的束缚, 为整个量子理论的建立开辟了道路。正因为普朗克的能量量子学说与经典物理是如此不同, 因此在普朗克公式正式提出后 5 年内, 没有人对其加以理会。直到 1905 年, 才由爱因斯坦作了发展, 提出了光子说支持普朗克的量子论。普朗克因此获 1918 年诺贝尔物理学奖。

2. 光电效应与爱因斯坦光子假说

(1) 光电效应 赫兹 (H. Hertz) 在 1887 年用莱顿瓶放电的实验中, 发现光电效应, 但对其机制还不清楚。直到电子发现后, 才认识到这是由于紫外线照射, 大量电子从金属表面逸出的现象。当光束照射在金属表面上, 使电子从金属中脱出的现象, 叫做光电效应。电子 (光电子) 从金属中逸出需要克服一定阻力, 需要外界对它们做功, 称为逸出功。

图 1-9 所示为观察光电效应的实验装置图。当入射光投射到金属阴极 K 上时, 电子从阴

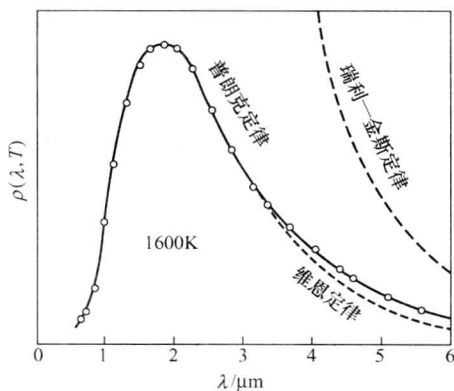


图 1-8 各黑体辐射公式与实验的比较

极 K 表面发射, 在正向电压 V 的作用下飞向 A 极, 形成光电流。实验发现, 当电压 V 减小时, 光电流 I 随着减小。但当电压为零时, 电流并不为零, 只有当电压变负并且达到某一数值 V_0 时, 电流才降为零, 这时没有一个电子能够到达 A 极, V_0 称为截止电压。假定电子从 A 极发射出来的最大速度为 $v_{\max}$, 显然 V_0 满足:

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \quad (1-11)$$

实验发现, 对于一定的阴极材料, 截止电压 V_0 与入射光的强度无关, 而与光的频率 ν 成正比。图 1-10 给出了这一实验结果。当 ν 减小时, V_0 线性地减小, 当 ν 小到某一数值 ν_0 时, $V_0 = 0$, 这时即使不加负电压也不会有光电子发射了, ν_0 称为光电效应的截止频率或临界频率, 相应的波长 $\lambda_0 = c/\nu_0$, 称为光电效应的红限。红限大小与阴极材料有关, 与光强无关。表 1-2 给出了一些元素的光电效应红限。

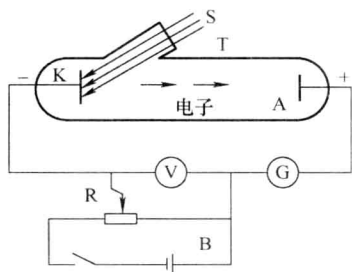


图 1-9 光电效应实验装置图

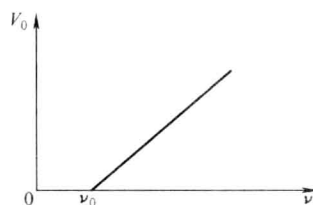


图 1-10 截止电压与频率的线性关系

表 1-2 光电效应的红限

金属	钾	钠	锂	汞	铁	银	金
λ_0/nm	550	540	500	273.5	262	261	265

实验还发现, 从入射光束照射到光电阴极上时, 无论光强怎样微弱, 几乎在开始照射的同时就产生了光电子, 弛豫时间最多不超过 10^{-9}s 。

关于上述实验规律, 经典物理无法做出解释。因为经典电磁理论认为, 入射光的能量与光强成正比, 而与光的频率无关, 因而光电子动能应与入射光强度成正比, 与频率无关, 这同 V_0 与频率成正比, 与光强无关的实验事实相矛盾。此外, 光电效应的弛豫时间与光强无关的事实同经典电磁理论亦相矛盾。按照经典理论, 光强越大, 每个电子获得足够的逸出金属表面所需能量的时间应越短, 因而弛豫时间应越短。

(2) 爱因斯坦光子量子假说 1905 年, 爱因斯坦 (A. Einstein) 发展了普朗克的量子说。他提出了光子的概念, 成功地解释了光电效应。爱因斯坦认为, 光在空间的传播正像粒子那样运动, 是以每份能量为 $h\nu$ 的方式被吸收的, 这种能量量子称为光子或光量子, 每个光子的能量 ε 与它的频率成正比:

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-12)$$

按照爱因斯坦的观点, 当光射到金属表面, 能量为 $h\nu$ 的光子被电子吸收, 电子把这能量的一部分用来克服金属表面对它的束缚 (逸出功), 另一部分就是电子离开金属表面后的动能:

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - \phi \quad (1-13)$$

式(1-13)称为爱因斯坦光电效应公式。 h 是普朗克常数。 ϕ 是电子的逸出功,表示电子在金属中的结合能。

将式(1-13)代入式(1-11),可得

$$V_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{\phi}{e} \quad (1-14)$$

于是立刻得到 V_0 与 ν 成正比的结论。如果作出 eV_0 随 ν 变化的直线,由式(1-14)可知,将 $V_0=0$ 代入,便可得到截止频率 $\nu_0 = \phi/h$,因而它只与材料性质有关。由于光电子的发射是由单个光子能量 $h\nu$ 决定的,因此弛豫时间与光强无关。1921年,爱因斯坦获得诺贝尔物理学奖,并非由于他在相对论方面的伟大贡献,而主要是因光电效应方面的工作。

3. 氢原子光谱与玻尔的原子理论

(1) 氢原子光谱 氢原子光谱的发现起始于1853年,这一年埃格斯特朗首先从气体放电的光谱中找到了氢的红线,即著名的 H_α 线,并测定了其波长。人们把这一年视为光谱学的开始。以后在可见光区又陆续发现了另外几条谱线,即 H_β 、 H_γ 和 H_δ ,这4条谱线的波长分别为656.210nm(红)、486.074nm(深绿)、434.010nm(青)及410.120nm(紫)。

1885年,瑞士的巴耳末(J. Balmer)仔细分析了这些谱线的数据,发现这些谱线的波长可归结为下列简单的关系:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-15)$$

式中,常数 $B = 364.51\text{nm}$ 。分别把 $n = 3, 4, 5, \dots$ 代入上式,就可算得 H_α 、 H_β 、 H_γ 、 $\dots$ 谱线的波长,且计算结果与实验符合得很好,上式称为巴耳末公式,它所表达的一组谱线称作巴耳末系。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\lambda = B = 364.51\text{nm}$,可见 B 就是巴耳末系的系限波长。图1-11所示为氢光谱的巴耳末系和系限外的连续谱。

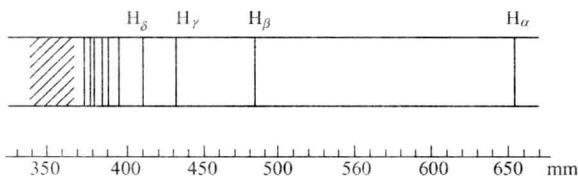


图1-11 氢光谱巴耳末系和系限外连续谱

引入波数 $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$,则式(1-15)表示为

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-16)$$

式中, $R_H = \frac{4}{B} = 1.0973732 \times 10^7 \text{m}^{-1}$,称为里德伯常数。由式(1-16)可见,当 n 增大时,波数也随之增大,相邻谱线的间隔却越来越小。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{\nu} = R_H/4$ 称为线系限波数。此后氢光谱的其他线系陆续被发现。1914年,赖曼(T. Lyman)在紫外区发现一线系。1908年、1922年和1924年,分别由帕邢(F. Paschen)、布喇开(F. Brackett)和普丰特(H. Pfund)在红外区各发现了一个线系,它们都可用一简单公式来表达,并以发现者的名字来命名光谱线系。