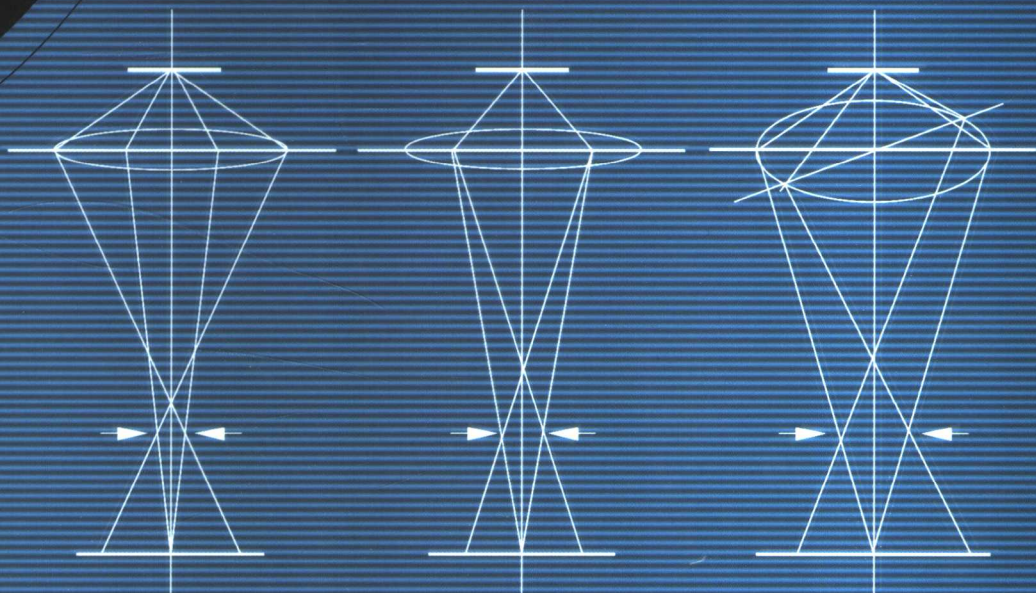




国防科工委「十五」  
规划教材

# 材料现代分析 测试方法

●王富耻 主编



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·材料科学与工程

# 材料现代分析测试方法

王富耻 主编



**北京理工大学出版社**

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书着重介绍了材料现代分析测试方法的基本原理、试验方法、仪器设备及其应用。内容包括: X射线衍射分析原理、X射线多晶衍射方法及应用、透射电子显微分析、扫描电子显微分析与电子探针、光电子能谱与俄歇电子能谱、光谱分析技术、热分析技术、动态力学实验技术。此外,还对一些较新的其他显微分析方法的原理和应用进行了简要介绍。各章附有相应的习题与思考题。

本书可作为材料科学与工程学科的本科生教材或教学参考书,也可供相关学科与专业的教师、研究生和科技人员使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料现代分析测试方法/王富趾主编. —北京:北京理工大学出版社,2006.1

国防科工委“十五”规划教材. 材料科学与工程  
ISBN 7-5640-0484-3

I. 材… II. 王… III. 工程材料-分析方法-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第114847号

## 材料现代分析测试方法

王富趾 主编

责任编辑 刘 铁

责任校对 张 宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

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

E-mail: chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:23 字数:467千字

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

印数:3000册.

ISBN 7-5640-0484-3 定价:37.00元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编委:王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光祜

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



## 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

# 前 言

本书是按照国防科工委重点教材建设计划编写的系列教材之一,供材料科学与工程一级学科或二级学科的本科专业基础课教学使用,也可供相关学科与专业的教师、研究生和科技人员参考。本书内容广泛,在编写过程中注意了各章内容的相对独立、完整和相互衔接。授课教师可自行取舍以满足不同学时数的教学需求,建议60学时。

根据材料科学与工程学科的发展趋势及其对人才培养需求的变化,本书内容界定在“材料科学与工程”一级学科范围,将原来分属于不同课程的有关材料结构与性能测试分析的各种方法(如X射线衍射分析、电子显微分析、仪器分析等)进行了整合和优化,吸收了近些年发展起来的部分新方法并结合了国防科技工业的特点,在将衍射分析、电子显微分析、电子能谱分析和光谱分析等方法有机融合的基础上,增加了热分析和材料动态力学实验技术等重要内容。在教材编写过程中,始终贯彻宽口径、重基础的指导思想,力求内容深度适中,知识结构合理,有利于学生的能力培养。在内容的组织上尽可能达到少而精,繁简结合,基本理论与实际应用密切结合。在写作方面力求通俗易懂,深入浅出,便于读者阅读后有一个清晰的概念。

材料分析方法和测试技术繁多,作为材料专业的学生不可能在有限的学时内掌握所有的内容。因此,本教材以目前材料研究中最基本和最常用的几种材料分析测试方法为主要内容,对其基本原理、试验技术和分析方法、常用设备及应用情况进行了系统的介绍,让学生对材料科学研究中的现代测试技术与分析方法有一个初步的较全面的认识,使学生能够掌握材料现代测试分析中所必需的基本理论、基础知识与基本技能,具备一定的实验操作能力,为日后从事材料科学研究工作和解决材料应用中的工程实际问题奠定基础。

本书由北京理工大学教师合作编写,参加编写工作的有:朱时珍教授(绪论、第一章、第二章、第六章和第七章)、郑秀华教授(第三章)、王富耻教授(第四章、第九章)、李云凯教授(第五章)和李树奎教授(第八章)。全书由王富耻教授主编。



在本书的编写过程中参考和引用了一些单位和同志的研究成果、资料和图片,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,恳请广大读者对本书疏漏及不当之处提出批评指正。

编者

2005年5月



# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 X 射线衍射分析原理 .....</b>	<b>3</b>
1.1 概述 .....	3
1.2 X 射线物理学基础 .....	4
1.3 X 射线衍晶体学基础 .....	15
1.4 X 射线衍射方向 .....	23
1.5 X 射线衍射强度 .....	36
习题与思考题 .....	51
<b>第二章 X 射线多晶衍射方法及应用 .....</b>	<b>54</b>
2.1 多晶衍射方法 .....	54
2.2 X 射线物相分析 .....	67
2.3 点阵常数的精确测定 .....	76
2.4 宏观应力测定 .....	83
2.5 晶粒尺寸和微观应力的测定 .....	92
2.6 非晶态物质及其晶化过程的 X 射线衍射分析 .....	100
习题与思考题 .....	105
<b>第三章 透射电子显微分析 .....</b>	<b>107</b>
3.1 概述 .....	107
3.2 电子与固体的相互作用 .....	108
3.3 透射电镜的构造与工作原理 .....	120
3.4 电子衍射谱的特征与分析 .....	138
3.5 TEM 显微图像衬度分析 .....	148
3.6 试样制备 .....	156
习题与思考题 .....	163
<b>第四章 扫描电子显微镜与电子探针 .....</b>	<b>165</b>
4.1 扫描电子显微镜 .....	165
4.2 电子图像分析 .....	180
4.3 电子探针的工作原理与结构 .....	190
4.4 电子探针仪的分析方法及应用 .....	200
习题与思考题 .....	205



<b>第五章 光电子能谱与俄歇电子能谱</b> .....	206
5.1 光电子能谱的基本原理 .....	206
5.2 光电子能谱实验技术 .....	210
5.3 光电子能谱的应用 .....	216
5.4 俄歇电子能谱分析 .....	219
习题与思考题 .....	230
<b>第六章 光谱分析</b> .....	231
6.1 光谱分析法及其分类 .....	231
6.2 原子、分子结构与光谱 .....	232
6.3 原子发射光谱法 .....	238
6.4 原子吸收光谱法 .....	243
6.5 分子振动光谱法 .....	248
习题与思考题 .....	264
<b>第七章 热分析技术</b> .....	266
7.1 概述 .....	266
7.2 差热分析 .....	267
7.3 差示扫描量热法 .....	277
7.4 热重分析 .....	281
7.5 热分析仪器的的发展趋势 .....	285
习题与思考题 .....	289
<b>第八章 材料动态力学实验技术</b> .....	291
8.1 概述 .....	291
8.2 惯性效应与应力波的概念 .....	292
8.3 中低速冲击载荷实验装置 .....	294
8.4 高速和超高速冲击载荷实验装置 .....	302
8.5 动态参量测量技术 .....	304
习题与思考题 .....	311
<b>第九章 其他分析方法简介</b> .....	312
9.1 扫描隧道显微镜 (STM) .....	312
9.2 原子力显微镜 (AFM) .....	316
9.3 离子探针 (SIM) .....	320
9.4 原子探针—场离子显微分析 .....	324
9.5 穆斯堡尔谱法 .....	329
9.6 核磁共振 (NMR) 及其应用 .....	334
习题与思考题 .....	338
<b>附录</b> .....	339
附录 1 常用物理常数 .....	339



附录 2 某些特征 X 射线的波长及吸收限 .....	339
附录 3 元素质量吸收系数 $\mu_m$ 及密度 $\rho$ .....	342
附录 4 原子散射因子 $f$ .....	343
附录 5 原子散射因子校正值 $\Delta f$ .....	344
附录 6 各种点阵的结构因子 $F^2$ .....	344
附录 7 粉末法的多重性因子 .....	345
附录 8 某些物质的特征温度 $\Theta$ .....	345
附录 9 德拜函数 $\frac{\phi(\chi)}{\chi} + \frac{1}{4}$ 之值 .....	345
附录 10 $\mu_r < 5$ 时的圆柱粉末试样的吸收因子 $A(\theta)$ .....	346
附录 11 $\mu_r > 5$ 时的圆柱粉末试样的吸收因子 $A(\theta)$ 相对值 .....	347
附录 12 元素的物理性质 .....	347
附录 13 布拉菲点阵参量 .....	350
附录 14 晶面间距公式 .....	350
附录 15 晶面夹角公式 .....	351
附录 16 标准电子衍射谱 .....	352
附录 17 标定电子衍射花样用表 .....	355

# 绪 论

材料的设计、制备和表征是材料研究中的三个重要方面。材料的设计要依据对材料性能的需求分析和对材料结构及其与性能间关系的认识来进行,材料制备的实际效果也必须通过材料结构检测和性能检测来加以分析。材料结构与性能表征的研究水平对新材料的研究、发展和应用具有重要的作用。因此材料结构与性能的表征在材料研究中占据了十分重要的地位。材料分析测试方法是材料科学的一个重要组成部分。

材料结构与性能的表征包括了材料性能、微观结构和成分的测试与表征。材料的性能是由其结构决定的。描述或鉴定材料的结构涉及它的化学成分、组成相的结构及其缺陷的组态、组成相的形貌、大小和分布以及各组成相之间的取向关系和界面状态。所有这些特征都对材料的性能有着重要的影响。随着科学技术的进步,用于材料性能检测、微观结构和化学成分分析的实验方法和检测手段不断丰富,新型仪器设备不断出现,种类极其繁多,这为材料的测试分析工作提供了强有力的物质支撑。材料科学工作者必须要掌握这些分析手段才能很好地开展材料研究工作。用于材料微观结构和化学成分分析的实验方法主要有衍射法、显微法、谱学法等。衍射法主要包括 X 射线衍射、电子衍射、中子衍射、 $\gamma$  射线衍射等;显微法主要包括光学显微、透射电子显微、扫描电子显微、扫描隧道显微、原子力显微、场离子显微等;谱学法主要有电子探针、俄歇电子能谱、光电子能谱、光谱等。不同的实验方法和仪器可以获得不同方面的结构和成分信息。

材料成分和微观结构分析可以分为三个层次:化学成分分析、晶体结构分析和显微结构分析。

化学成分是影响材料性能的最基本因素。材料性能不仅受主要化学成分的影响,而且在许多情况下还与少量杂质元素的种类、浓度和分布情况等有很大的关系。研究少量杂质元素在材料组成中的聚散特性、存在状态等,不仅涉及到探讨杂质的作用机理,而且开拓了利用少量杂质元素改善材料性能的途径。分析材料平均化学成分的常规方法有湿化学法和光谱分析法等。在大多数情况下,我们不仅要检测材料中元素的种类和浓度,而且还要确定元素的存在状态和分布特征,这就需要更先进的分析方法,如 X 射线荧光光谱、电子探针、光电子能谱和俄歇电子能谱等,利用这些方法可以得到元素的种类、浓度、价态和分布特征。

在化学成分相同的情况下,晶体结构不同或局部点阵常数的改变同样会引起材料性能的变化。晶体结构、点阵常数的测定可采用 X 射线衍射和电子衍射等方法进行分析。

材料的显微结构受到材料的化学成分、晶体结构及工艺过程等因素的影响,它与材料的性能有着密切的关系。从某种意义上说,材料的显微结构特征对材料性能有决定性的影响。材



料的显微结构要通过显微术来研究,显微术主要包括光学显微、透射电子显微、扫描电子显微、扫描隧道显微、原子力显微、场离子显微等。

此外,还可以通过热分析技术来研究材料的物理变化或化学变化过程,从中获得材料微观结构变化的重要信息。

材料性能包括物理性能、化学性能和力学性能,各种性能的测试都需要有一套相应的测试方法和测试装置。加载速率的高低是影响材料性能的重要环境因素。根据施加载荷的速度不同,材料的力学性能可划分为准静态力学性能和动态力学性能。在国防科学技术领域,材料动态力学性能的测试对军用材料的研究和应用具有特别重要的作用,因此本教材增加了对材料动态力学实验技术的介绍。

每种分析方法或检测技术都是针对特定研究内容的,并有一定的适用范围和局限性。因此,在材料的检测分析中必须根据具体问题的研究内容和研究目的,选择合适的方法和手段来进行研究,必要时采用多种手段进行综合分析来确定影响材料性能的各种因素。在此基础上才有可能采取相应的措施来改善材料的性能。目前仪器设备的发展趋势是多种分析功能的组合,这使人们能在同一台仪器上进行形貌、微区成分和晶体结构等多种微观组织结构信息的同位分析。

学生学习本课程后要求具备专业从事材料分析测试工作的初步基础,具备日后通过自学掌握材料分析新方法、新技术的能力,做到:能够正确选择材料分析与测试的方法(遇到相关问题时知道采用哪种或哪几种方法来解决);能够看懂或能够分析一般的(典型的、较简单的)测试结果(如图谱、图像等);可以与分析测试专业的人员共同商讨有关材料分析研究的实验方案和分析较复杂的测试结果。

# 第一章 X 射线衍射分析原理

## 1.1 概 述

X 射线衍射对于 20 世纪科学起着奠基石的作用。它的发展推动了固体科学的发展,并使人们对化学键有了更多的了解。本章将介绍材料科学中应用 X 射线衍射分析所必须掌握的基础知识。

1895 年,德国物理学家伦琴(W. C. Röntgen),在研究真空管中的高压放电现象时,发现了 X 射线。由于当时对这种射线的本质还不了解,故称之为 X 射线。后人为了纪念 X 射线的发现者,也称之为伦琴射线。

几个月之后,医学界就将 X 射线运用于诊断及医疗。后来人们又用它进行金属材料及机械零件的探伤。这方面的应用,均属于 X 射线透射学。1912 年,德国物理学家劳埃(M. von Laue)等人发现了 X 射线在晶体中的衍射现象,这一方面证明了 X 射线是一种电磁波的本质,另一方面也证实了晶体的周期性结构,从而为研究物质的微观世界提供了崭新的方法。后来这一方法发展成为 X 射线衍射学。为了解释衍射图像,劳埃提出了一组衍射方程。由于劳埃方程组使用不够方便,1913 年,英国物理学家布拉格父子(W. H. Bragg 和 W. L. Bragg)提出了晶面“反射”X 射线的概念,推导出简单而实用的布拉格方程。它是 X 射线衍射学的理论基础。1913—1914 年,莫塞莱(H. G. J. Moseley)发现了原子序数与发射 X 射线的频率之间的关系——莫塞莱定律,并最终发展成为 X 射线发射光谱分析(电子探针)和 X 射线荧光分析。1916 年,德拜(P. Debye)、谢乐(P. Scherrer)提出采用多晶体试样的“粉末法”,给 X 射线衍射分析带来了极大方便。1928 年,盖革(H. Geiger)、弥勒(W. Müller)首先用计数器来记录 X 射线,这种方法导致衍射仪的产生,并于 20 世纪 50 年代起获得普遍使用。20 世纪 70 年代后,电子计算机、高真空、电视等先进技术与 X 射线分析相结合,发展成为现代型的自动化衍射仪。

X 射线衍射学除了用来研究晶体的微观结构外,已发展成为应用极广的一门实用科学。在物理、化学、材料、冶金、机械、地质、化工、纺织、食品、医药等各个领域无不使用 X 射线衍射分析法。X 射线衍射分析在材料科学与工程方面的贡献尤为显著,成为近代材料微观结构与缺陷分析必不可少的重要手段之一。X 射线衍射分析在材料科学中的应用大体可归纳为四个方面:

(1) 晶体结构研究。解决晶体的结构类型和晶胞大小,原子在单胞中的位置、数量等,用来



研究晶体的微观结构。例如对晶体点阵参数的精确测定可以用来分析固溶体。

(2)物相分析。这方面的应用又可分为定性分析和定量分析两类。定性分析的目的是鉴定待测样的物相而非化学元素组成。定量分析则是求出各物相的相对含量。

(3)精细结构研究。材料中的宏观、微观应力的测定,晶粒大小的研究属于这一范畴。

(4)单晶体取向及多晶织构的测定。半导体材料、磁性材料、激光材料的单晶体,其取向用X射线法测定最准确。借助于晶体取向,可研究材料的滑移、孪生过程,测定沉淀相从基体析出时的惯习面。多晶的择优取向称为织构,用射线法可以获得有关织构的最完全的知识。

## 1.2 X射线物理学基础

### 一、X射线的产生与性质

#### (一)X射线的产生

德国物理学家伦琴在阴极射线管中偶然发现X射线后,大量实验证明,高速运动着的电子突然受阻时,随着电子能量的消失和转化,就会产生X射线。其他带电的基本粒子也有类似的现象。因此,为了获得X射线,需具备如下条件:

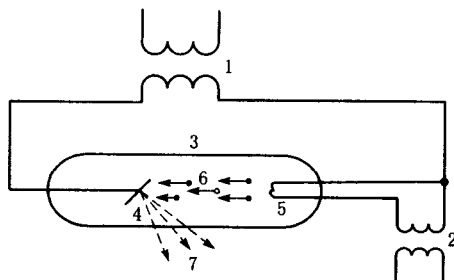


图 1-1 X射线发生装置示意图

1—高压变压器;2—灯丝变压器;3—X射线管;  
4—阳极;5—阴极;6—电子束;7—X射线

(1)产生并发射自由电子(如加热钨灯丝发射热电子);

(2)在真空中迫使电子朝一定方向加速运动,以获得尽可能高的速度;

(3)在高速电子流的运动路线上设置一障碍物(阳极靶),使高速运动的电子突然受阻而停下来。

上述要求构成了X射线发生装置的基本原理,如图1-1所示。这是一种装有阴阳极的真空密封管,在管子两极间加上高电压,使阴极发射出的电子流高速撞击金属阳极靶,就会产生X射线。

X射线管是获得X射线最常用的办法,其他还有同步辐射和放射性同位素X射线源。同步辐射是20世纪70年代以来发展起来的X射线源。当电子在同步加速器中加速时,就能辐射X射线。同步辐射具有通量大、亮度高、频谱宽和光谱纯等优点。在放射性物质的衰变过程中,也能产生X射线。放射源X射线比较弱,目前用于X射线光谱分析。

#### (二)X射线的性质

1895年伦琴发现了X射线,在此后很长的一段时间内,人们只认识到这种肉眼看不见、穿透能力很强的射线具有的一些特征,如:X射线直线传播,在穿过电场和磁场时不发生偏转;它



能使底片感光,使荧光物质发光,使气体电离;对生物细胞有杀伤作用等。但对其本质则争论不一。直到 1912 年德国物理学家劳埃等人发现了 X 射线在晶体中的衍射现象后,才揭示了其本质。

X 射线从本质上来说,和无线电波、可见光、 $\gamma$  射线等一样,也是电磁波,其波长范围在 0.001~100 nm 之间,介于紫外线和  $\gamma$  射线之间,但没有明显的分界线,如图 1-2 所示。

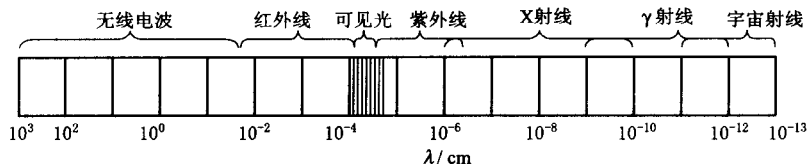


图 1-2 电磁波谱

电磁波是一种横波,它由交替变化的电场和磁场组成。电场矢量  $E$  和磁场矢量  $H$  以相同的周期和相位在两个相互垂直的平面内作周期振动。电磁波的传播方向与  $E$  和  $H$  的振动方向垂直,传播速度为光速。

X 射线同可见光、紫外线以及电子、中子、质子等基本粒子一样,具有波粒二象性。它既有波动性,又有粒子性,只不过在某些场合(比如 X 射线与 X 射线间的相互作用)主要表现出波动性,而在另一些场合(比如 X 射线与电子、原子间的相互作用)主要表现出粒子性。描写 X 射线波动性的物理量频率  $\nu$ 、波长  $\lambda$  和描写粒子性的物理量光子能量  $E$ 、动量  $P$  之间,遵循爱因斯坦关系式:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1-1)$$

$$P = h/\lambda \quad (1-2)$$

式中,  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速。

X 射线作为一种电磁场波,在传播过程中载有一定的能量,所带能量的多少表示其强弱的程度。通常以单位时间内,通过垂直其传播方向的单位截面的能量来表示其强度。以波动形式描述,强度与波的振幅平方成正比。按粒子形式表达,则它的强度为光子流密度和每个光子的能量的乘积。

X 射线存在一个波长范围,不同波长的 X 射线有不同的用途。一般称波长短的为硬 X 射线,反之,称为软 X 射线。波长愈短穿透能力愈强,用于金属探伤的 X 射线波长为 0.005~0.01 nm 或更短。适用于晶体结构分析的 X 射线,波长约为 0.05~0.25 nm。

## 二、X 射线谱

由 X 射线管发出的 X 射线,其波长并不相同。如果我们用适当的方法去测量各个波长的 X 射线强度,一般可得到图 1-3 所示的波长与强度的关系曲线,即 X 射线谱。X 射线管中发



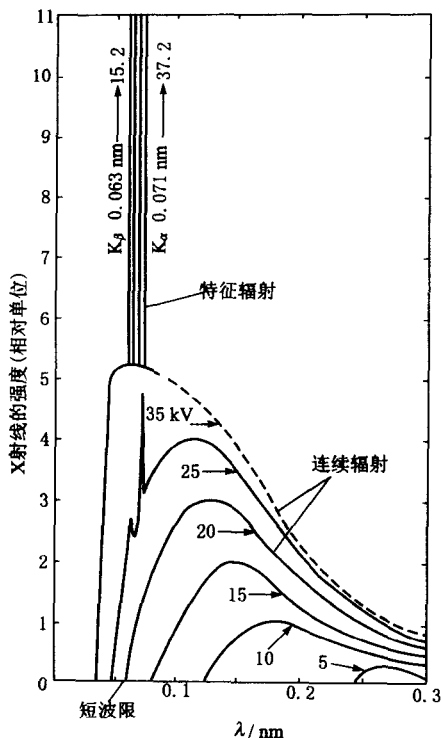


图 1-3 不同管压下 Mo 的 X 射线谱

出的 X 射线有两种不同的波谱,把图中强度随波长连续变化的部分称为连续谱,它和白光相似,是多种波长的混合体,故也称白色 X 射线;而叠加在连续谱上面的是强度很高的具有一定波长的 X 射线,称为特征谱,它和单色光相似,故也称单色 X 射线。

### (一) 连续谱

图 1-3 中,在不同的管压下,连续谱都有一强度最大值,并在短波方面有一波长极限,称短波限,用  $\lambda_0$  表示。随 X 射线管电压的升高,各种波长的 X 射线的强度一致升高,最大强度对应的波长变短,短波限也相应变短,与此同时波谱变宽。这些实验规律说明,管压既影响连续谱的强度,也影响其波长范围。

用经典物理学和量子理论可以解释连续谱的变化规律和产生机理。

近代物理学从理论和实验两方面都证明:任何高速运动的带电粒子突然减速时,都会产生电磁辐射。在 X 射线管中,从阴极出发的电子在高电压的作用下以极大的速度向阳极运动,当撞到阳极时,其大部分动能都变为热能而损耗,但一部分动能就以

电磁辐射——X 射线的形式放射出来。由于大量电子射到阳极上的时间和条件不尽相同,而且有的电子还可能与阳极作多次碰撞而逐步转移其能量,情况复杂,因此所产生的电磁波具有各种不同的波长,形成了连续 X 射线谱。在极限情况下,电子将其在电场中加速得到的全部动能转化为一个光子,则此光子的能量最大,波长最短,相当于短波限的 X 射线。此光子的能量  $E$  为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = eU = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_0} \quad (1-3)$$

如果电压  $U$  用 kV 为单位,波长  $\lambda_0$  用 nm 表示,将光速  $c$ 、普朗克常数  $h$ 、电子电荷  $e$  值代入上式,则可得

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU} = \frac{1.24}{U} \quad (1-4)$$

在连续谱中,短波限对应的光子能量最大,但相应光子数目不多,故强度极大值不在短波限处,而在位于  $1.5\lambda_0$  附近。式(1-4)说明,连续谱短波限只与管压有关,当固定管压时,增加管流或改变阳极靶材料,短波限  $\lambda_0$  不变,而仅使各波长 X 射线强度增高。当加大管压时,击靶