

高等学校试用教材

X光衍射技术基础

王英华 主编

许顺生 审校
梁志德

原子能出版社

高等学校试用教材

X光衍射技术基础

王英华 主编

许顺生 审校

梁志德

原子能出版社

内 容 简 介

X光衍射技术是研究材料科学的重要手段之一。本书系统地阐述了它的理论基础与实验技术,内容
丰富,结构合理,并反映了近几年X光衍射领域中的新成果。

书中有综述性章节和总结性图表,每章后附有思考与练习题。

本书可作为金属物理类专业大学生的专业教材,也可供攻读其他材料专业——金属、陶瓷、建材、矿物、药物、高分子等——的大学生与研究生作参考书之用。对从事X光衍射工作的科技人员,也是一本较好的参考书。

高等学校试用教材

X 光衍射技术基础

王英华 主编

许顺生

审校

梁志德

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张 20.75·字数 505 千字

1987年4月北京第一版·1987年4月北京第一次印刷

印数1—1900·统一书号:15175·825

定价:3.35元

前 言

X光衍射技术是研究材料科学的重要手段之一。因此，作为攻读材料科学——金属、陶瓷、建材、高分子、以及它们的综合运用者——核材料——的大学生和研究生，都必须掌握它的基本理论与技术。

本书是根据核工业部教育司一九八三年召开的教材编审会议审定通过的大纲编写的。书中介绍的理论与实验技术不仅适用于晶态物质的X光衍射研究，也适用于非晶态物质的X光衍射研究。

一九八五年由核工业部教育司召开了本书的审稿会，与会同志认为，本书内容丰富、结构合理、基础理论阐述透彻，有一定的深度与广度，并且反映了近几年X光衍射领域中取得的新成果。

本书每章后附有思考与练习题；有综述性章节，以启发思维；在符号与概念较多的章节中，有总结性图表，以帮助学习者理解与记忆；附录中有中-英元素名称对照表等。书中还包括了若干选修内容，在标题中以“*”号标记出。

本书第五、六、九章和七、十章的初稿分别由清华大学工程物理系范毓殿和陶琨同志编写，其余各章皆由该系王英华同志编写。全书由王英华同志主编。

在本书编写过程中，张宏涛同志审阅过部分章节的初稿，林树智、陆坤权、常龙存等同志为部分章节提供过资料，并得到校内及教研组有关同志的支持。

许顺生教授和梁志德教授在百忙之中主审了全书。陈洪育、何崇智、常龙存和邹定国等同志分别审阅了部分章节。张立均和贺兴章同志为本书的大纲审定、审稿与编辑出版作了大量工作。徐淑珍同志为本书描绘了插图，编者在此一并表示感谢！

由于编者水平有限、书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

1985年6月 编者

于清华大学

序 言

X射线(或称X光)具有明显的波-粒二象性。它既是一种中性粒子——光子,它与物质原子中的电子碰撞时能产生反冲电子和非弹性散射;又是一种高能的电磁波(其波长和凝聚态物质中相邻原子的间距在同一量级),且能与原子中核外电子相互作用,发生弹性散射及衍射。不同种类及状态的物质(散射体)将会给出不同的散射或衍射信息,它是该物质中不同原子(离子、分子)种类及组态的反映。因此利用X射线衍射(包括散射)分析,可以探索物质的微观结构与宏观组织和性能之间的关系。这种分析技术不但能作为进行物质结构的基础研究的工具,而且还可以在物理、化学、生命科学、地学、材料科学,工程技术及农业等各个方面,作为近代物理测试的一种重要技术手段。

自1912年德国物理学家劳埃等奠定了X射线衍射学的基础以来,经过七十多年的发展,X射线的理论、设备、方法、应用都有很大的进展。近年来由于发明并采用了新型光源及探测设备使该学科更增添了强大的生命力,因此非常需要有新的书籍,以便于学习者参考。

清华大学工程物理系王英华同志等多年来从事X射线衍射工作,积累了丰富的教学和科研经验,并把这些宝贵的经验编入这本《X光衍射技术基础》书中。该书内容丰富、所描述的物理概念清楚、文字深入浅出,并且包含了一些新近发展的实验技术,注意理论联系实际以及在核工业材料方面的应用。该书适合于作为金属物理、核工程物理、金属学、材料科学等学科的大学专业教材(其中有些部分可以选用),亦可供有关专业科技人员参考之用,是继《固体X射线学》(黄胜涛教授主编)后,这一专业书籍方面近年来的又一可喜成果,特为此序,以资介绍。

许顺生

一九八六年二月于上海

目 录

第一章	X 光的基本性质	1
第一节	X 光的产生	1
第二节	X 光的本质和 X 光谱	3
第三节	X 光与物质的作用	8
第四节	X 光的探测与防护	12
	思考与练习	13
第二章	X 光的散射与干涉	15
第一节	自由电子对 X 光的散射	15
第二节	散射线的干涉	19
第三节	原子的散射	23
第四节	原子群体的散射	27
	思考与练习	32
第三章	晶体学基础	34
第一节	晶体与晶体点阵	34
第二节	晶体中的对称操作与对称元素	41
第三节	阵胞内几何元素表示法	47
*第四节	点群与空间群	54
第五节	晶体的投影	60
第六节	倒易点阵	71
	思考与练习	78
第四章	晶体的衍射	82
第一节	小晶体的衍射	82
第二节	衍射方向的确定	87
第三节	结构因数与消光条件	92
*第四节	衍射方法概述	97
第五节	衍射线的积分强度	101
	思考与练习	115
第五章	劳埃法及其应用	117
第一节	劳埃法	117
第二节	用透射劳埃法测单晶取向	119
第三节	用背射劳埃法测单晶取向	123
第四节	劳埃法在塑性变形研究中的应用	125
	思考与练习	130
第六章	粉末照相法	131
第一节	德拜法	131
第二节	德拜照片的初步计算	137
第三节	聚焦法照相	142
	思考与练习	146
第七章	衍射仪法	148
第一节	衍射仪	148

第二节	探测器及基本记录系统	150
第三节	衍射仪的运动方式	156
第四节	实验参数的选择	157
第五节	试样制备要求	158
第六节	晶体单色器	160
第七节	某些技术发展	161
	思考与练习	164
第八章	衍射线线形分析	165
第一节	衍射线的线位	165
第二节	衍射线的强度	167
第三节	衍射线的宽度	169
*第四节	真实线形的获得	170
	思考与练习	185
第九章	物相分析	186
第一节	定性相分析	186
第二节	定量相分析	190
	思考与练习	194
第十章	精确测定点阵参数	196
第一节	一般考虑	196
第二节	德拜法的主要误差	198
第三节	衍射仪法的某些重要误差	200
第四节	外推法消除系统误差	205
	思考与练习	210
第十一章	宏观应力的测定	212
第一节	测定宏观应力的原理	212
第二节	照相法测定应力	218
第三节	衍射仪法测定应力	222
	思考与练习	225
第十二章	织构的测定	226
第一节	织构及其表示方法	226
第二节	照相法测定正极图	232
第三节	衍射仪法测定正极图与极图分析	237
第四节	反极图的获得与分析	246
第五节	极分布图的测定	252
	思考与练习	256
第十三章	微晶尺寸与微观应力的测定	258
第一节	微晶尺寸的确定	258
第二节	微观应力的测定	260
*第三节	两种宽化效应的分离	263
*第四节	卷积函数的积分宽度	272
	思考与练习	274
*第十四章	非晶态材料的研究	275
第一节	非晶态及其结构描述	275

第二节 单种原子非晶系统的RDF	278
第三节 多元非晶系统的RDF	281
第四节 RDF实验数据的处理	289
第五节 测试实例	294
第六节 EXAFS简介	297
思考与练习	301
主要参考书	301
附录	303
1. 国际原子量	303
2. 按原子序数排列的汉-英元素名称对照表	304
3. 按字母顺序排列的英-汉元素名称对照表	305
4. 晶体结构资料	306
5. 某些化合物和固溶体的晶体结构	308
6. 某些元素的特征谱与吸收限波长 ($\text{\AA}$)	309
7. K_{α} 双线分离度 ($\theta_{\alpha_2} - \theta_{\alpha_1}$)	310
8. 质量吸收系数和密度	312
9. 原子散射因数 f	315
10. 原子散射因数在吸收限近旁的减小值 Δf	317
11. 洛伦兹-偏振因数 $(1 + \cos^2 2\theta)/(\sin^2 \theta \cos \theta)$	318
12. 德拜-瓦洛温度因数 $e^{-\{B \sin^2 \theta\}/\lambda}$	320
13. 米勒指数的二次式	320
14. 晶面间距和点阵参数的关系	322
15. 常用矢量关系与有关公式的证明	322

第一章 X 光的基本性质

第一节 X 光的产生

一、X 光 管

实用的 X 光发生器中的核心部件是 X 光管。图 1-1 是在结构分析中常用的 X 光管示意图。X 光管实质上就是一个真空二极管，它的基本组成部分是发射电子的灯丝和接受电子轰击的靶面，其它辅助部份是起支撑、真空密封、电子束准直、高压绝缘、冷却靶面和 X 光的防护等作用。

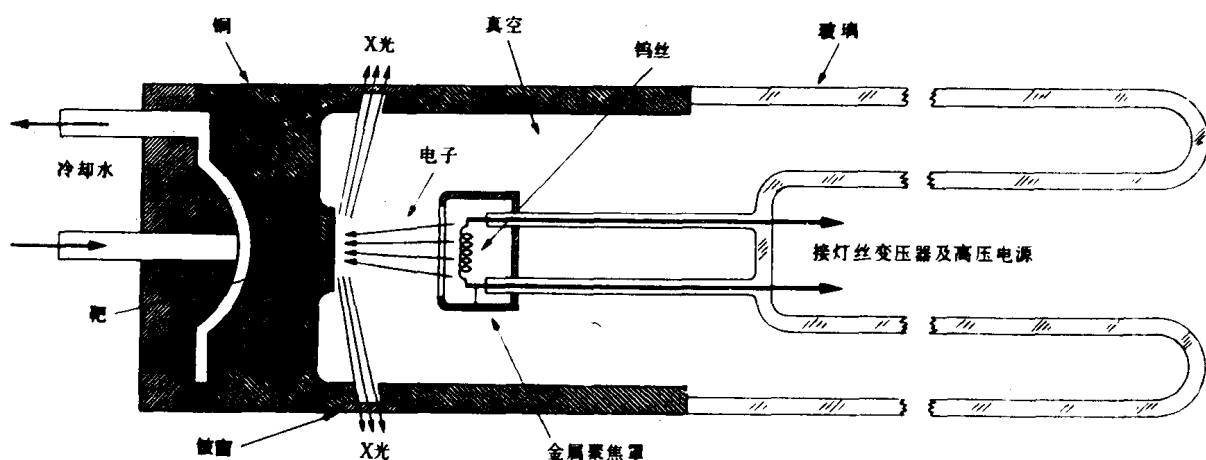


图 1-1 X 光管示意图

X 光管的管头是用金属制成的，它与阳极连在一起，并接地。阴极和阳极之间用玻璃绝缘。通常把靶面材料镶嵌或镀在阳极上。常用的靶面材料有 Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Mo、Ag 和 W，其中以 Cu 用得最多。阴极主要由灯丝和灯罩构成。灯丝由钨丝绕成圆盘状或柱状。灯丝温度可达 2000°C 。为使灯丝发出的电子在射向阳极的行程中聚焦，在灯丝前面加上灯罩，它与灯丝等电位。X 光管内要达到 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 托的真空度。在管子的两极之间，常施加几十仟伏的负高压。在 X 光管的管头上，开有 $2 \sim 4$ 个窗口，让 X 光射出。要用吸收系数很小的 Be 板或 Li-Be 玻璃封住窗口。

一般 X 光管的寿命为 $500 \sim 1000$ 小时，但也往往由于靶面被钨蒸气弄脏而报废。

由于靶面冷却能力的限制，封闭式 X 光管的功率一般在 $500\text{W} \sim 3000\text{W}$ 之间。目前，可拆式 X 光管的最大功率可达 100kW ，这是采用旋转阳极的办法来实现的。如图 1-2 所示。这种 X 光管工作时，阳极不断地旋转，使得靶面上受电子轰击的部份不停地变更。因此，功率可

以增高。

从发展X光技术的角度来看,不断地研制适应各种要求的新型X光源,是一件重要的工作。

二、焦点与有效焦点

实际上,从X光管中发出X光的部位是靶面上被电子轰击的面积,称此为焦点。焦点的形状决定于灯丝的形状。柱状灯丝射出截面为长方形的电子束,相应地,焦点也是长方形的。一般X光管焦点尺寸为 $1 \times 10 \text{ mm}^2$ 左右,特殊用途的细焦X光管,它的焦点只有几十微米到几微米。

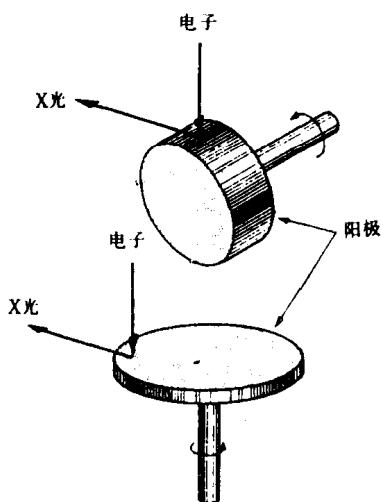


图 1-2 旋转阳极

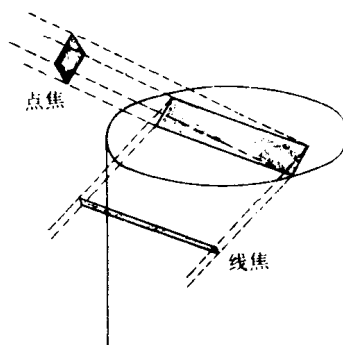


图 1-3 线焦和点焦

取用X光束时要与靶面成一定的角度,此角记为 α ,一般 $\alpha = 3^\circ \sim 6^\circ$ 。焦点在取用方向的法平面上的投影,与焦点的实际尺寸不同,称此投影为有效焦点。图1-3表示出,如果沿长方形焦点的长轴方向取用X光,当 $\alpha = 6^\circ$ 时,有效焦点则为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 的正方形,称此为点焦;如果沿它的短轴方向取用,则成为 $0.1 \times 10 \text{ mm}^2$ 的长方形,称此为线焦。有效焦点的尺寸和形状实际上影响着衍射图样的分辨率。

三、X 光 机

称给X光管供电的电器装置为X光机。X光机主要是由高压发生装置和控制装置组成。在可拆卸式X光机中,还有一套真空系统。

高压发生装置供给高压电源和灯丝加热电源,控制装置主要用于调节和指示电压与电流。

在结构分析用X光机的高压发生装置中,常用的是自(半波)整流、全波整流和恒电位电路,如图1-4(a)、(b)、(c)所示。它们产生的管电流由图1-5所示。

自整流电路简单,装置的价格便宜,结构紧凑。但是,X光管要负担较高的逆电压。同时,当X光管靶面温度太高时,会产生逆电流。因此,自整流电路只能在较低的管电压和功率

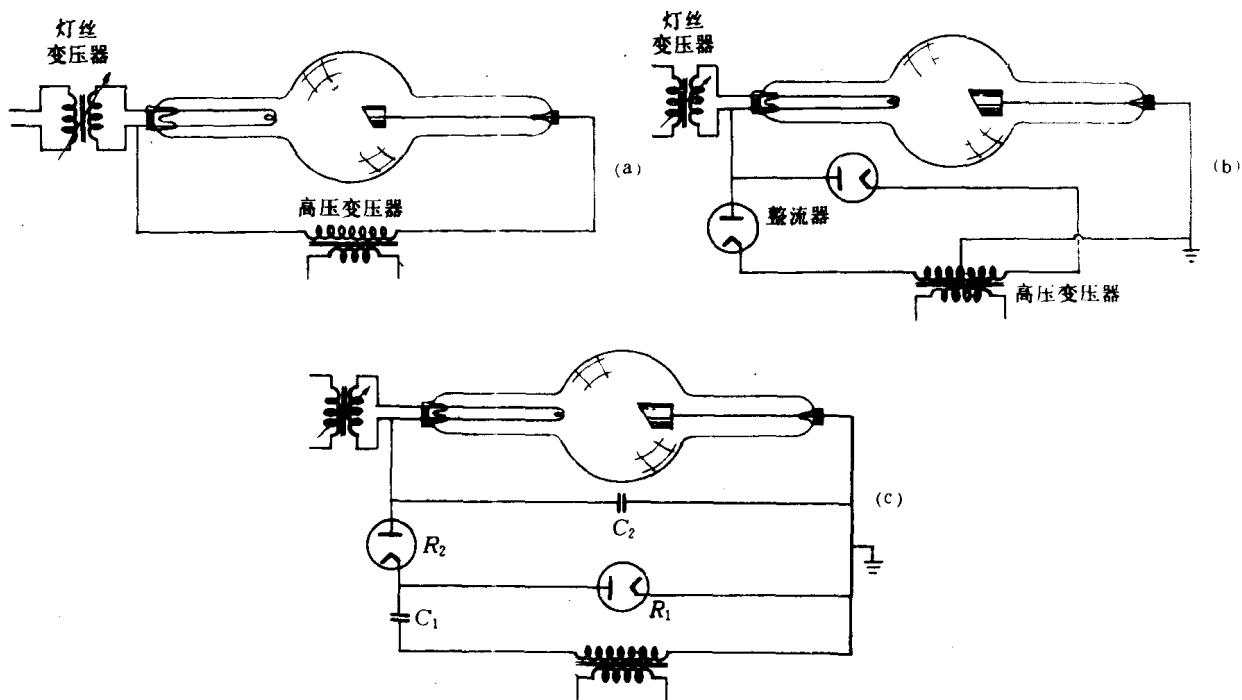


图 1-4 X 光机中常用的自整流 (a)，全波整流 (b)，和恒电位 (c) 电路

下工作。

某些 X 光机采用三相全波整流电路。这样能得到接近稳定的高压电源，所产生的 X 光强度也是稳定的。这种 X 光机能满足衍射仪对光源的要求，而对于一般衍射工作并不必要。

第二节 X 光的本质和 X 光谱

一、X 光的本质

X 光是波长 $10^{-2} \sim 10^2 \text{ \AA}$ 之间的电磁波，见图 1-6。衍射工作中使用的 X 光，波长在 $1 \text{ \AA}$ 左右。

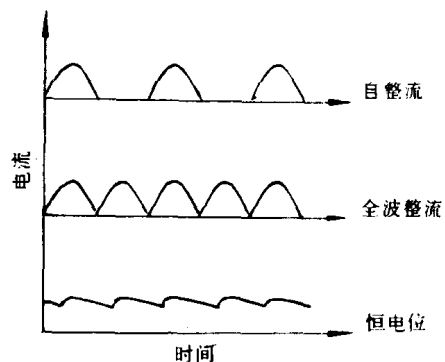


图 1-5 相应几种电路时的管电流随时间的变化

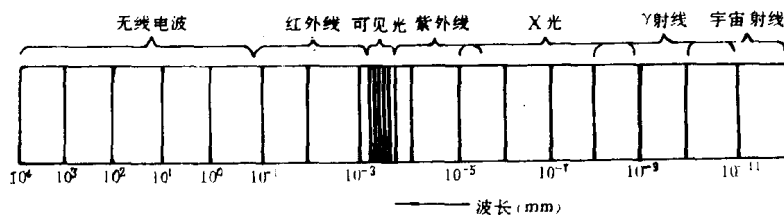


图 1-6 电磁波谱

X光光子的能量为 $E = h\nu$, $\nu = c/\lambda$, h 为普朗克常数, ν 为X光的频率, c 为光速, λ 为波长。从而获得X光的波长 ($\text{\AA}$) 与光子能量之间的关系为

$$E(\text{keV}) = 12.4/\lambda \quad (1-1)$$

二、X 光 谱

由X光管发出的X光, 其波长并不相同。如果定义单位时间内垂直通过单位面积上的光子数为X光的强度, 则测试强度按波长的分布, 就能获得强度与波长之间的关系曲线。图1-7是Mo靶施加35kV电压时测得的X光谱强度曲线。把图中强度随波长连续变化的部分称为连续谱, 而叠加在连续谱上面的是强度很高的极窄波长区, 称为特征谱, 记为 K_α 和 K_β 。

下面分别讨论两组谱线的特点。

(一) 连续谱

当X光管中高速运动着的电子射到阳极表面时, 它的运动突然受到制止, 使其周围的电磁场发生急剧变化, 从而产生电磁波。由于大批电子射到阳极上的时间和条件不尽相同, 因此所产生的电磁波具有各种不同的波长, 形成了X光的连续谱。

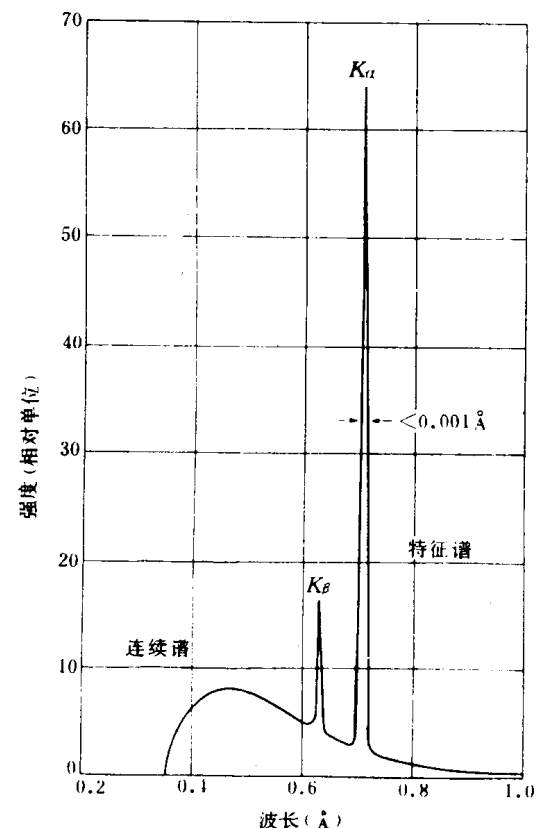


图 1-7 Mo靶X光管发出的X光谱强度(35kV时)

图1-8、1-9、1-10都是连续谱强度变化的实验规律, 它们分别表示任意改变管电压(V)、管电流(i)和靶面材料这三个因素之一的连续谱强度变化。实验表明: 连续谱强度的零值点——短波极限 λ_0 仅随管电压变化(图1-8), 而不随其他两个因素变化(图1-9和1-10)。 λ_0 值相当于一个电子把全部能量交给一个光子时的光子能量, 即

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{hc}{eV} \\ &= \frac{12.4}{V} \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中电压 V 的单位为kV, 波长单位为埃($\text{\AA}$)。记连续谱中强度最大处的波长为 λ_m , 一般有如下的经验规律

$$\begin{aligned} \lambda_m &= 1.5 \lambda_0 \\ I_{\text{总}} &= K_1 i Z V^2 \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $I_{\text{总}}$ 为连续谱的总强度, K_1 为常数, Z 为靶面材料的原子序数。因此, 当实验工作需要强

注: X光的波长单位有时用X光单位XU或者kXU(为1000XU)。kXU与 $\text{\AA}$ 之间关系为

$$1 \text{ kXU} = 1.002056 \text{ \AA}$$

本书中用 $\text{\AA}$ 作单位。文献中也有用国际单位nm。

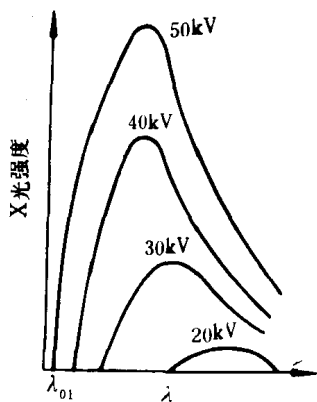


图 1-8 管电压对连续谱强度的影响

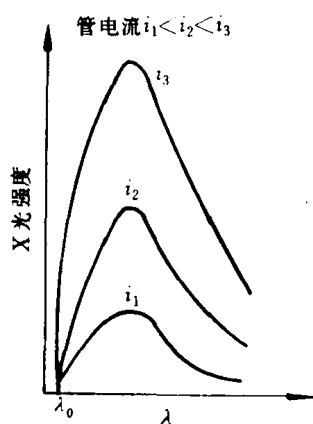


图 1-9 管电流对连续谱强度的影响

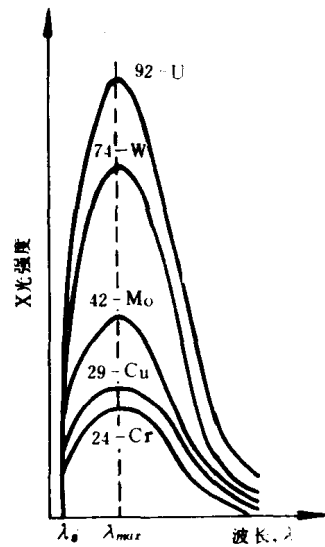


图 1-10 靶材料对连续谱强度的影响

的连续谱时，应选用原子序数较高的材料作为X光管靶面。

X光管的效率 η 为

$$\eta = \frac{K_1 i Z V^2}{i V} = K_1 V Z \quad (1-4)$$

这是个极小的数，对于W靶，管电压加到100kV时，它也只有1%左右。也就是说，约有99%的能量在靶面上转化为热能。

(二) 特征谱

X光特征谱的实验特征是：对于一定的靶面材料，其特征谱波长有一确定值。改变管电压和管电流只能影响特征谱的强度，而不影响其波长。同时，当管电压 V 低于某个特定值 V_k 时，在X光谱强度曲线中，仅有连续谱而没有特征谱。只有在 $V > V_k$ 时，其中才会伴有特征谱，称此特定的电压值为激发电压。各种靶面材料都有自己的特定激发电压值，见表1-1。

表 1-1 某些常用靶的K系谱线波长

原子序数 Z	元素	波 长 (Å)				K吸收限波长 (Å)	K系激发电压 (kV)
		$K_{\alpha} = \frac{1}{3}(K_{\alpha_2} + 2K_{\alpha_1})$	K_{α_2}	K_{α_1}	K_{β}		
24	Cr	2.2909	2.29352	2.28962	2.08479	2.0701	5.98
26	Fe	1.9373	1.93991	1.93597	1.75654	1.7433	7.10
27	Co	1.7902	1.79279	1.78890	1.62073	1.6081	7.71
28	Ni	1.6591	1.66168	1.65783	1.50008	1.4880	8.29
29	Cu	1.5418	1.54434	1.54050	1.39217	1.3804	8.86
42	Mo	0.7107	0.71354	0.70926	0.63225	0.6198	20.0

Mo的激发电压 V_k 为20kV，因此，对于Mo靶X光管，只有在 $V > 20\text{kV}$ 时，X光谱中才会伴有特征谱出现，见图1-11。

可以用图1-12来说明特征谱的发射过程。每种物质都有它特定的原子结构，而与X光谱

的发射有关的原子结构特征为原子中各电子壳层的能量。图1-12示意表示基态和 K 、 L 、 M 、 N 等激发态的能级。当X光管中灯丝发出的电子达到一定的能量时，会将靶面材料中原子的 K 层电子击出，使原子处于 K 激发态。于是，它的外层电子(L 、 M 、 N ...层)将跃迁至 K 层，以使其能量降低。这时，多余的能量会以光子的形式辐射出来。当 L 层电子跃迁至 K 层时，发出的X光称为 K_{α} 辐射， M 层电子跃迁至 K 层时发出的X光称为 K_{β} 辐射。电子向 K 层跃迁时发出的一系列X光称为 K 系辐射。同样， L 层电子被击出，有 L 激发，也会产生一系列 L 系辐射。见图1-12。由于各种靶面材料的原子结构不同，所以各自的激发电压不同，辐射的波长也不同。管电压和管电流的变化只能影响靶面材料中被激发的原子数目，而不能影响它们各层电子的能级，这就解释了特征谱的实验规律。

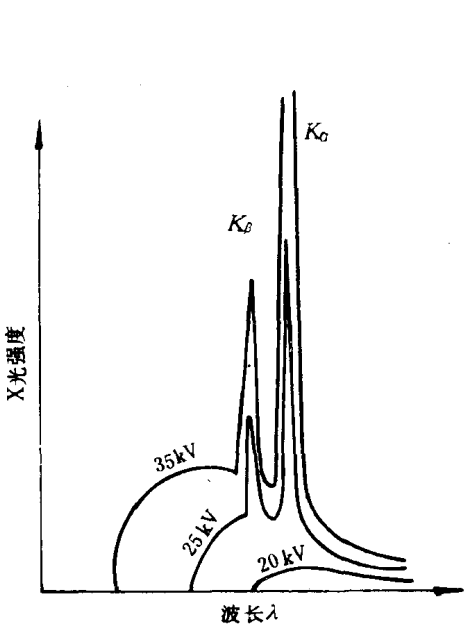


图 1-11 钨靶X光管发出的特征谱

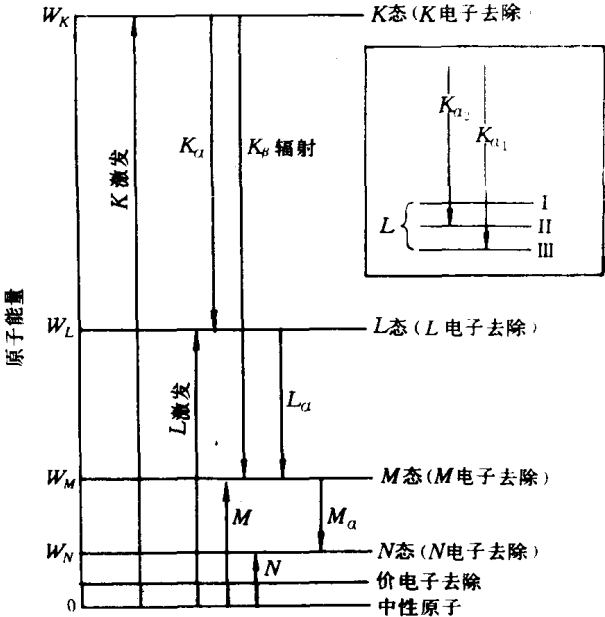


图 1-12 原子的激发和X光的发射

表1-1给出几种常用靶 K 系辐射的波长与激发电压。表1-2为几种元素 K 系辐射中各个分量的相对强度。表1-3为 L 系辐射中各分量的相对强度。

表 1-2 某些元素 K 系辐射中各分量的相对强度

元 素	α_1	α_2	β_1	β_2
24 Cr	100	51.5	17.9	
26 Fe	100	50.0	16.7	
27 Co	100	49.7	16.0	
28 Ni	100	49.5	18.7	
29 Cu	100	49.7	20.0	
42 Mo	100	49.9	27.9	5.17
47 Ag	100	49.9	29.0	6.17

由于在 K 系辐射中， K_{α_1} 与 K_{α_2} 的波长相差甚小，所以在一般的衍射工作中忽略它们之间的差别，认为它们就是 K_{α} 辐射，波长为 K_{α_1} 与 K_{α_2} 的加权平均值。然而，在精细的工作中，要考虑它们的影响，甚至还要考虑 L 系的影响。

表 1-3 某些元素的L系辐射中各分量的相对强度

元 素	I	α_1	α_2	η	β_6	β_2	β_1	β_4
42 Mo		13	100			8.0	62	9.9
47 Ag	4.4	8.61	100	2.0	0.56	11.9	49.1	3.9
74 W	2.4	11.3	100	1.1	1.2	25.0	48.4	4.26
78 Pt	3.0	11.4	100	1.1			39.1	
元 素	β_3	β_8	β_{10}	γ_3	γ_1	γ_2	$\gamma_3 + \gamma_6$	γ_4
42 Mo	14.2				6.8		1.04	
47 Ag	7.2	0.074	0.043	0.28	4.36	0.66	(γ_3)	
74 W	7.0	0.6	0.6	0.43	9.8	1.4	2.2	0.53
78 Pt					9.0			

由于 K_α 谱线强度极高，例如在施加30kV电压所获得的Cu辐射中， K_α 辐射的强度约为其附近连续谱强度的90倍，并且是近单色的，半高强度处宽度(图1-7)小于 $0.001\text{ \AA}$ ，因此实验工作中常用 K_α 辐射。 K 系辐射强度为

$$I_{\text{特}} = K_2 \cdot i (V - V_K)^{1.5 \sim 1.7} \quad (1-5)$$

其中 K_2 为常数，其它符号意义同前。一般在 $V/V_K = 3 \sim 5$ 时，能获得 $I_{\text{特}}/I_{\text{连}}$ 的最大值。

三、X光的一般性质

X光作为电磁波，它能被带电粒子所散射；作为辐射的光子流能产生康普顿效应，这些在后面的章节中将详细讨论。

X光作为波，能产生折射、反射、散射、干涉、衍射和偏振。X光由真空进入另一介质中时的折射率 n 近于，但小于1。如果 $\delta = 1 - n$ ，则 δ 值在 10^{-6} 数量级。表1-4给出某些物质的 δ 的测量值。在一般工作中，可以不考虑折射的影响。但对于精细工作，则要考虑X光入射到试样中去和射出时的折射，并加以修正。

因为 $n < 1$ ，所以当X光由一密度较小的介质进入一密度较大的介质（如水、玻璃、金属）中时，将离开交面法线而向外折射，见图1-13。同时，当X光由空气（或真空）射向试样时，会产生全反射，如图1-14所示。但因 $n \approx 1$ ，所以产生X光全反射的掠射角极小，一般不超过 $20' \sim 30'$ 。例如，当波长 $1.279\text{ \AA}$ 的X光照射银表面时，产生全反射的掠射角为 $22'30''$ 。

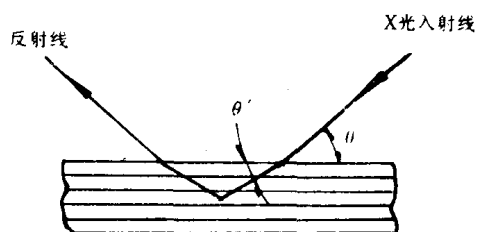


图 1-13 X光的折射



图 1-14 X光的全反射

表 1-4 某些物质的 δ 的测量值

波长($\text{\AA}$)	物 质	$\delta \times 10^{-6}$
0.52	玻璃	0.9
0.631	玻璃	1.22 ± 0.15
0.708	方解石	2.03 ± 0.09
0.708	方解石	2.001 ± 0.009
1.279	玻璃	4.2
1.279	银	21.5
1.389	玻璃	6.65 ± 0.05
1.537	玻璃	8.12 ± 0.05
1.537	甘油	4.41
1.537	水	3.69
1.750	玻璃	10.0 ± 0.4
1.933	玻璃	12.4 ± 0.4

第三节 X光与物质的作用

一、X光与物质的作用

X光与物质相互作用时,会产生各种复杂的物理、化学和生化过程,引起各种效应。例如它可以使气体电离,可以使一些物质发出可见的荧光,又能使离子固体发出黄褐色或紫色的光,即能破坏物质的化学键,也能促使新键形成,促进物质的合成,引起生物效应,使新陈代谢发生变化等等。然而,就X光与物质之间的物理作用而言,可以分为两类:即被电子散射和被原子吸收。

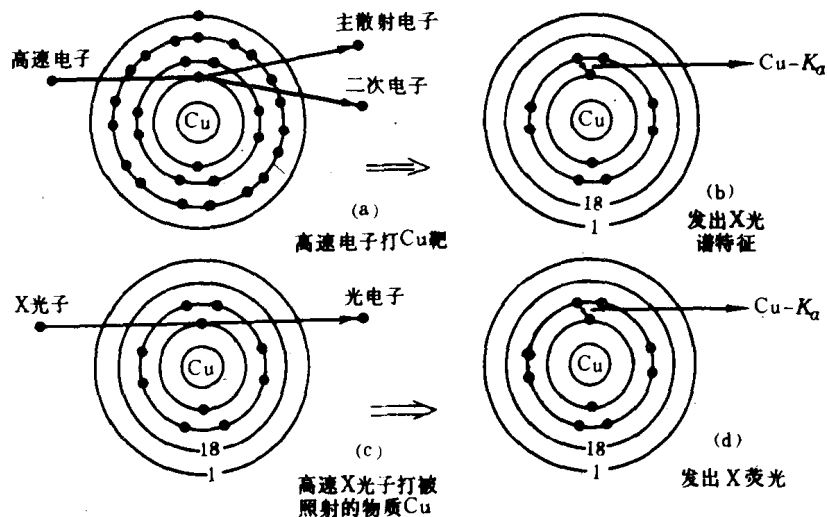


图 1-15 电子激发Cu的特征谱

(a)、(b): X光激发Cu的特征谱;(c)、(d)。图中表示的是原子核,电子轨道与电子“●”,外层轨道上的数字为其拥有的电子数目

散射过程有两种，一种是只引起X光方向的改变，不引起能量变化的散射，称为相干散射，这是X光衍射的物理基础；另一种是既引起X光子方向改变，也引起能量改变的散射，称为非相干散射，或康普顿散射，同时产生反冲电子（光电子）。第二章将详细讨论X光的散射过程。本节要介绍的是由于散射作用使X光改变了传播的方向，从而使透射束中的强度减弱的规律。

物质吸收X光的主要方式是以X光子的能量激发物质中的原子，使原子处于激发态。自然，这些被激发的原子，也会像X光管中靶面上的被激原子一样，发出一系列X光特征谱线。由于这些X光特征谱是由X光的入射而产生的二次射线，所以称为二次X光，或X荧光。图1-15示意描述了X光管中的Cu靶受电子的激发和Cu试样受X光子的激发，以及它们辐射出的Cu特征谱的过程。

不言而喻，对于同一种物质，不管是用电子激发还是用X光子激发，它们所辐射的X光特征谱是相同的；同时，激发荧光辐射的光子的最低能量($h\nu_K$)应与激发特征谱的电子的最低能量(eV_K)相等，即

$$h\nu_K = eV_K$$

于是有

$$\lambda_K = \frac{12.4}{V_K} \quad (1-6)$$

其中， V_K 以kV为单位， λ_K 以Å为单位。

二、X光的减弱规律

X光穿过物质时，因被散射和吸收而减弱。设入射X光的强度为 I_0 ，透过厚度为 d 的物质，强度为 I ， $I < I_0$ 。现在利用图1-16来说明 I_0 与 I 的关系。在被照物质中取一深度为 x 处的小厚度元 dx ，照到此小厚度元上的X光强度为 I_x ，透过此厚度元的X光强度为 I_{x+dx} ，于是强度改变量为

$$dI_x = I_{x+dx} - I_x$$

假设此改变量与入射到此厚度元上的强度和厚度元的厚度成正比，即

$$dI_x = -\mu I_x dx \quad (1-7)$$

式中的负号表示 dI_x 与 dx 的变化方向相反， μ 是个常数，称为线减弱系数。它与入射X光束的波长及被照物质的元素组成和状态有关。对(1-7)式积分，有

$$\ln(I/I_0) = -\mu d$$

于是

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1-8)$$

(1-8)式是X光透过物质时的减弱规律。

由于因吸收引起的减弱远大于因散射引起的减弱，所以，一般用吸收系数代替减弱系数。附录8中给出各元素对某些X光波长的质量吸收系数 μ_m ，

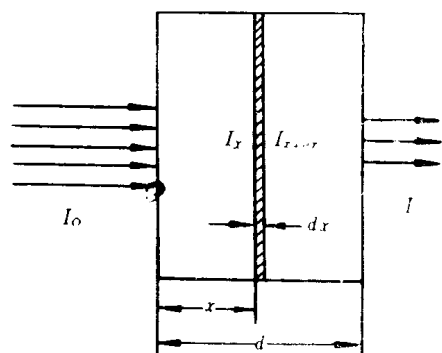


图 1-16 X光减弱规律的图示