

航空高等院校教材

无损检测技术

南昌航空工业学院 姚培元等编



航空专业教材编审组

无损检测技术

南昌航空工业学院 姚培元等编



航空专业教材编审室

内 容 提 要

本书简明扼要地叙述了生产实践中的无损检测技术,对射线、超声波、磁粉、渗透、涡流常规检测方法都分章进行了介绍。对激光全息照相、红外、声振和声发射等一些正在发展中的无损检测方法则集中在第六章作了阐述。每种检测方法都包括检测原理、检测方法和工艺以及设备等内容。

本书可作为大学本科非无损检测专业《无损检测技术》课的教材,亦可供工科大专院校有关专业师生和工厂、工艺研究所从事无损检测工作人员作参考用书。

无损检测技术

南昌航空工业学院 姚培元等编

责任编辑 邓云生 罗志华

*

航空专业教材编审室 (北京航空学院内)

南昌航空工业学院印刷厂印装 内部发行

*

787×1092 17 印张 419千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷 印数:0001—3000册

统一书号:22151 定价:1.75元

前 言

无损检测技术在工业生产中日益被重视，并得到迅速发展。这对于航空工业控制产品质量就显得更为重要。《无损检测技术》作为一门独立课程，在国内工科院校开设还只是刚开始，更缺乏系统的教材。南昌航空工业学院在举办三届无损检测技术训练班以及在机械制造工艺及设备专业开设《无损检测技术》选修课的基础上，编写了本教材。

本教材按无损检测的工艺方法划分章节。每章由浅入深，从有关的基础理论出发，对各种无损检测技术的基本原理、检测方法、所使用的仪器设备都作了阐述。同时在具体应用方面的实践知识、经验数据也相应地作了介绍。既反映了我国无损检测技术方面的现状，也注意介绍了国内外新技术的发展。

本书可作为工科大学非无损检测专业《无损检测技术》课教材。也可供从事无损检测工作的技术人员参考用书。

参加本教材编写的有姚培元（绪论、激光全息照相、红外）、黄华云（超声、涡流）、袁振民（声发射）、屠耀元（磁粉、射线原理、声振）、邓达萱（射线检测工艺）、董德玉（渗透）、任吉林（超声原理）等同志。全书由姚培元同志负责总的编写工作。

本教材由北京航空学院汤明、韩云台、程惠苏、梁家惠同志审稿。

由于编者水平有限，错误一定难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

一九八三年十月

目 录

绪 论	1
第一章 射线检测	4
第一节 射线检测的物理基础	4
一 原子结构	4
二 α 射线的产生	5
三 α 射线与物质的相互作用	8
四 α 射线通过物质时的衰减	8
五 原子核结构和放射性衰变规律	10
六 γ 射线	11
七 γ 射线与物质的相互作用	12
八 γ 射线的吸收	12
九 人工放射性与 γ 射线源	13
第二节 射线检测的基本原理和方法	13
一 照相法	14
二 电离检测法	15
三 荧光屏直接观察法	16
四 α 射线电视观察法	16
五 计算机层析照相	18
第三节 射线照相探伤技术	19
一 照相法的灵敏度和透度计	19
二 增感屏及增感方式的选择	21
三 曝光参数的选择	23
四 散射线控制	28
五 射线束方向和胶片位置的选定	29
第四节 射线感光胶片和暗室处理	32
一 射线感光胶片	32
二 胶片的暗室处理	36
第五节 常见的缺陷影像特征及判断	40
一 焊件中常见的缺陷	40
二 铸件中常见的缺陷	41
三 接触点焊中常见的缺陷	42
四 缺陷埋藏深度的测定	43
五 缺陷在射线方向上的厚度测定	44

六 表面缺陷和伪缺陷	44
第六节 射线探伤设备	44
一 α 射线探伤机	44
二 γ 射线探伤机	50
三 高能 α 射线设备	52
第七节 中子照相	53
一 中子照相的物理基础	53
二 热中子照相	56
第八节 射线的安全防护	57
一 射线对人体的有害作用	57
二 射线的防护	58
第二章 磁粉检测	61
第一节 磁粉检测的物理基础	62
一 磁场和磁感应强度	62
二 磁介质和磁场强度	64
三 电磁量的单位制	68
第二节 磁粉检测原理与工艺	71
一 磁粉检测原理	71
二 磁化方法	73
三 磁化电流	75
四 磁粉显示	78
五 退磁	80
第三节 磁粉	80
一 磁粉的种类及使用	80
二 磁粉的性能及其测定	81
三 磁悬液	82
第四节 磁粉检测设备	82
一 磁化装置	82
二 辅助装置	85
第三章 渗透检验	88
第一节 液体渗透检验的基础知识	88
一 渗透原理	88
二 乳化作用	92
三 光激发光	95
第二节 液体渗透检验的方法	97
一 液体渗透检验的基本流程	97
二 液体渗透检验的分类	97

三 显象方式的分类·····	98
四 液体渗透检验的应用范围·····	99
五 液体渗透检验工艺·····	99
六 几种特殊的渗透检验方法·····	104
第三节 液体渗透探伤剂·····	104
一 渗透液·····	104
二 乳化剂·····	105
三 清洗剂·····	106
四 显象剂·····	106
第四节 液体渗透检验的装置·····	106
一 便携式设备、喷罐·····	106
二 固定式装置·····	107
三 紫外线照射装置·····	109
四 紫外灯强度检测仪·····	110
第五节 对比试块·····	110
第六节 常见的缺陷·····	111
第七节 渗透检验的质量控制·····	112
第四章 超声检测 ·····	113
第一节 基本原理·····	113
一 声响检测与超声检测·····	113
二 超声检测的物理基础·····	113
第二节 超声波换能器及探伤仪·····	128
一 超声波换能器及其性能·····	128
二 超声波探伤仪·····	136
第三节 超声波探伤法·····	140
一 超声波探伤法及探伤波形·····	140
二 超声波探伤波型名称符号及其含义·····	144
三 影响探伤波形的因素及最佳探伤条件的选择·····	144
第四节 工件的超声波探伤及测量技术·····	146
一 缺陷的定位定量和定性·····	146
二 工件的超声波探伤·····	159
三 超声波测量技术·····	178
第五章 涡流检测 ·····	180
第一节 基本原理·····	180
一 涡流检测基本原理·····	180
二 涡流检测的特点·····	181
第二节 涡流检测的物理基础·····	182

一	电磁感应和麦克斯韦方程组	182
二	检测线圈阻抗及阻抗平面图	186
三	有效导磁率及界限频率	190
四	检测线圈电压计算	192
五	探头线圈的阻抗分析	198
第三节	涡流检测仪器	207
一	涡流检测仪基本原理及分类	207
二	检测线圈	209
三	电桥	210
四	放大器	211
五	信号处理	212
第四节	涡流仪在航空工业中应用	216
第六章	无损检测新工艺	217
第一节	激光全息照相检测	217
一	激光全息照相	217
二	激光全息照相无损检测技术	222
三	激光全息照相无损检测技术的应用范围	226
第二节	声振检测	227
一	声振检测基础知识	227
二	声阻法检测原理	231
三	声阻检测方法	233
四	共振法检测原理	234
五	共振检测方法	235
第三节	红外检测	238
一	概述	238
二	红外辐射的特性参数	239
三	红外探测器	241
四	红外成象	246
五	红外无损检测的应用	247
第四节	声发射检测	249
一	声发射现象的物理基础	249
二	声发射检测仪器	254
三	声发射检测的应用	257

绪 论

随着工业生产的不断发展,尤其是原子能、航空、航天技术的高度发展,无损检测技术越来越为人们所重视。因为所采用的材料从原来的一般材料逐渐被耐高温、难切削、贵重金属以及复杂合金、复合材料等特殊材料所取代。它们要在高温、高压、高速和高载荷下工作。由于材料的特异性能和价格昂贵以及对安全性保证的严格要求,迫使在工业生产中必须采用不破坏产品原来的形状、不改变或不影响使用性能的检测方法来确保产品的安全可靠,这就是无损检测技术。

无损检测技术的广泛应用和伴随其他基础科学的综合应用以及新检测技术不断涌现,又使无损检测技术从单纯的质量检验发展为多功能的一门技术,它的主要功能有:

1. 无损探伤——对产品质量作出评价,无论是锻件、铸件、焊接件、板金件或机加件以至于非金属结构都能用无损检测技术找出它的表层或内部的缺陷,并能对缺陷进行定性定量分析。

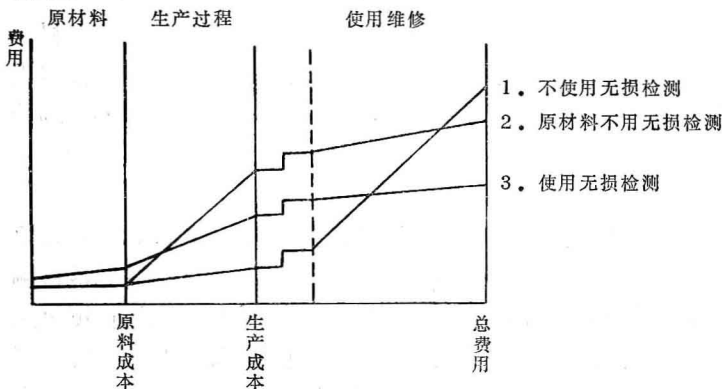
2. 材质检查——用无损检测技术能测定材料的物理性能、机械强度和组织结构,能判别材料的品种和热处理状态,进行混料分选。

3. 几何度量——产品的几何尺寸、涂层或镀层厚度、表面腐蚀状态、硬化层深度和应力应变状态都能用无损检测技术来测定。根据检测结果利用断裂理论确定是否进行修补或报废处理,对产品进行寿命评定。

4. 现场监控——可对在役或生产中的产品进行现场的或动态的检测,将产品中的缺陷变化信息连续地提供给检验者以实行监控。现场监控不但可检查运转中的机器、航线上的飞机和正在焊接中的焊缝,也可用来在码头、海关检查行李和货物。

采用无损检测技术可以达到以下目的:

1. 降低产品成本。虽然采用了无损检测技术会由于检查费用在生产过程中增加一些制造成本,但如果从无损检测能防止不合格产品后续工时的浪费、无损检测不损伤产品还能大大降低维修费用,综观起来,采用无损检测技术后产品成本反而最低。这可用下面的图形来表示。



使用无损检测的经济效果

2. 提高安全可靠。

产品由于经过了无损检测,质量情况已经掌握,在使用过程中安全可靠得到了保证,可以放心使用。

3. 可以改进制造工艺。

由检测结果可以评定制造工艺是否正确适宜。在制订制造工艺时也可先制试样,经过无损检测来选择最合适的工艺程序。用无损检

测技术来评定试件质量比破坏试验要便宜得多。

无损检测的方法很多，最常用的有射线检测、超声波检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测等，已成为生产中的常规检测技术。另外还有各种新技术如激光全息照相检测、声振检测、红外检测和声发射检测等等。无损检测新技术有的已为生产单位用于工艺过程，有的则还待进一步探讨，逐步推广和普及。

射线检测有 α 射线、 γ 射线和中子射线等检测方法。它是利用各种射线源对材料的透射性能及不同材料对射线的衰减程度的不同，使底片感光成黑度不同的图象来观察的。射线检测用来检测产品内部的气孔、夹渣、铸造孔洞等立体缺陷。当裂纹方向与射线平行时就能检查出来。射线检测的优点是检测结果可记录下来作为档案资料长期保存，检测图象较直观，对缺陷尺寸和性质判断比较容易。射线检测的缺点是当裂纹面与射线近于垂直时就很难检查出来，射线检测对微小裂纹的检测灵敏度低，生产费用大些，并且射线对人体有害，需要有防护设备。

超声波检测是利用超声波射入被检物，由遇到缺陷反射回来的伤波来判断物体内部缺陷的。超声波检测可检测垂直于超声波的金属和非金属材料的平面状缺陷。它能检测出钢板的层叠、分层和裂纹等缺陷，能检测大型锻件，可探测的厚度大，检测灵敏度高，仪器轻便可携带，成本低，可自动化检测，并且超声波对人体无害。缺点是检测时有一定的近场盲区。检测结果不能记录。检测时需用的耦合剂沾污了产品，这对某些产品是不允许的。超声波检测的可靠程度取决于操作人员的责任性、工作时的精神状态和技术水平。常用的A型显示只提供“时间”和“回波高度”两个信息，判断缺陷性质的技术难度较大。另外，超声波检测要求用成套的标准试块和对比试块作为调整仪器本身的性能和灵敏度。

磁粉检测是利用强磁性材料磁化后，磁力线遇到裂纹等缺陷时，会绕过缺陷而产生漏磁现象来发现缺陷的。它能检测铸件、锻件、焊接件和机加件的表面缺陷或近表面缺陷如裂纹、夹杂物和气孔等，适用于强磁性和铁磁材料。它的设备简单、操作方便、迅速可靠，对表面缺陷检测灵敏度高，缺陷较直观，成本低。它的缺点是只能测知缺陷的位置和在表面方向的长度，不能测出缺陷深度，探测灵敏度随缺陷深度而下降，对飞机上常用的结构材料如奥氏体钢、不锈钢和铝镁合金不能检测。

渗透检测是利用液体渗透的物理性能，首先使着色渗透液或荧光渗透液渗入表面开口的裂纹内，然后清除表面的残液，用吸附剂吸出裂纹内的渗透液，从而显现出缺陷图象的一种检测方法。它不受材料种类限制，可检查钢铁、有色金属、陶瓷材料、塑料等除多孔性材料外几乎所有固体材料的表面缺陷，如裂纹、疏松和针孔等。它不需大型设备，可一次性查出产品上的全部缺陷，灵敏度高，使用方便，操作简单，适合于无电源、水源的野外现场检测。它的缺点是不能检测产品的内部缺陷，对产品表面光洁度有一定要求，试剂对环境有污染、具有一定的毒性。

涡流检测是用电磁线圈使被测材料内部由于电磁感应形成涡电流，利用不同材质或缺陷的存在会改变涡电流的强弱、形成的涡流磁场也就不同的原理来检测材料缺陷的。它能检测钢铁、有色金属和石墨等导电材料的表面和近表面的缺陷，如裂纹、凹坑等。涡流检测可进行材质检查，可检测材料的冶金成份、热处理情况和内应力大小，也可检测产品的尺寸和形状、涂层和镀层的厚度。还可根据各种材料导电率的不同进行混料分选。不论产品尺寸大小或奇特外形都能进行检测。它对小零件如销、珠等能快速地检测，其速率钢珠为3600个/小

时，螺母为6000个/小时，线材为4000米/分，而钢管为60米/分，不但检测速度快并且易于实现检测自动化。涡流检测时不需要耦合剂。它操作简单，成本低，仪器轻巧适于携带供现场检测。涡流检测的缺点是只能用于导电材料。由于它受多种因素影响，检测时干扰大。在机械化传动带上检测时要求传动的稳定性要好。此外，涡流检测也需要用标准试块进行对照比较。

至于无损检测新技术应用到实际生产中去的有激光全息照相、声振、红外和声发射等。如声振法用于检测蜂窝等胶接结构，声发射法用于动态监控都已用于实际生产中并有商品仪器供应了。激光全息照相和红外检测方法正在发展中，它们对胶质炸药柱的胶接质量检测都已接近于成熟的阶段，激光全息照相检测方法在蜂窝等胶接结构的检测中已显示了它的优异性能。

无损检测技术虽然近几十年来发展很快，已作为生产过程中不可缺少的一个重要手段。但因各种无损检测方法都是通过一定的中间过程来显示材料缺陷的信息的，不可避免地会受到材料本身和检测时主客观因素的影响。因此每一种检测方法都还不能百分之百地对检测结果绝对保证无误，各种方法都有各自的优点和不完善的地方，需要互相补充，在实际生产中往往是选择几种方法配合使用的。

第一章 射线检测

第一节 射线检测的物理基础

射线检测的几种主要射线源——X射线、 γ 射线和中子射线的发现与发展同原子结构和原子核结构理论的建立与发展密切联系在一起的。因此，本节将结合原子结构和原子核结构理论来阐述射线的产生机理、与物质的相互作用、以及物质对射线的衰减规律。中子射线方面的内容，放在第七节中讲述。

一、原子结构

1. 原子的核模型

1912年卢瑟福假设：原子内部有一个原子核，原子核具有体积小、质量大而且带正电荷的特征。带有负电荷的电子则是分布在与原子大小同数量级的核外轨道上绕核运动。对于中性原子，所有电子所带负电荷之和等于原子核所带的正电荷，这一假设被称为原子的核模型。按照这一假设，如果用带有正电荷的 α 粒子去轰击某种金属（例如金、银或铜），那么当 α 粒子进入金属的原子之后，必定受到原子核所带正电荷的排斥而发生偏转，而且 α 粒子轰击方向与原子核间的垂直距离愈小，则偏转角愈大，反之则偏转角愈小。卢瑟福对此作了定量的计算，得出 α 粒子轨道偏转角的公式为：

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{M v_0^2}{2 Z e^2} P \quad (1-1)$$

式中 θ ——偏转角；

P ——轰击方向与原子核间的垂直距离；

v_0 —— α 粒子的轰击速度；

M —— α 粒子的质量；

Z ——金属的原子序数；

e ——电荷数。

上述计算由卢瑟福的学生于1913年进行了详细的实验验证。这表明原子的核模型是正确的。

2. 玻尔假设

卢瑟福所提出的原子结构假设是十分粗糙的，对于更进一层的问题，例如电子如何绕核运动？原子状态的改变遵循什么规律？等等，都未解决。直到1913年玻尔以原子的核模型为基础，结合某些实验规律，应用普朗克的量子概念提出了新的假设之后，才成功地建立了原子结构理论。

玻尔的假设为：

(1) 原子只能存在一些不连续的稳定的状态，这些稳定状态各有一定的能量 E_1 、 E_2 、 E_3 ……，处于这些稳定状态中的运动的电子虽然有加速度，也不会发生能量的辐射。一切能量的改变，由于吸收或放射能量的结果，或由于碰撞的结果，只能从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态的跃迁来产生，不能任意连续地改变。

(2) 原子从一个能量为 E_n 的稳定状态过渡到能量为 E_m 的稳定状态时, 它发射(或吸收)单色的辐射, 其频率 $\tilde{\nu}_{n \rightarrow m}$ 决定于下列关系式(称为玻尔的频率条件)。

$$h \tilde{\nu}_{n \rightarrow m} = E_n - E_m \quad (1-2)$$

通常可用图 1—1 所示的图解方法, 以能级的形式表示原子的能量, 而且使最低的能级与最小的能量相对应。用把两个能级连接起来的箭头来表示在这二个能级之间发生跃迁时所辐射的谱线。在正常状态下, 原子处于能量最小的稳定状态中, 换句话说, 处于最低能级中。若受外界的作用, 原子由较低能级吸收能量而升到较高的能级, 这时原子的状态称为激发态或受激态。受激态原子是不稳的, 当它回到原来的状态时, 将发射出一定的谱线, 其频率可由式(1—2)计算。

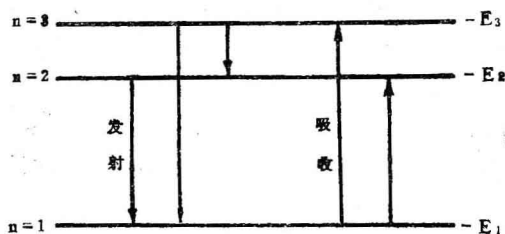


图 1—1 原子的能级

在正常状态下, 原子处于能量最小的稳定状态中, 换句话说, 处于最低能级中。若受外界的作用, 原子由较低能级吸收能量而升到较高的能级, 这时原子的状态称为激发态或受激态。受激态原子是不稳的, 当它回到原来的状态时, 将发射出一定的谱线, 其频率可由式(1—2)计算。

玻尔对元素中最简单的一种元素的原子(即氢原子)进行了定量计算, 得出:

在氢原子中, 电子绕核旋转的轨道半径为:

$$a = 0.529 \times 10^{-8} \times \frac{n^2}{2} \text{ 厘米} \quad (1-3)$$

电子运动的能量为:

$$E_n = - \frac{2 \pi^2 m e^4 Z^2}{n^2 h^2} \quad (1-4)$$

上式中的 n 为原子所处的能级数, 亦即电子运动的轨道数。 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。 Z 为原子序数。 h 为普朗克常数。

按照玻尔的第二个假设, 当电子由第 n_i 个轨道过渡到第 n_f 轨道时所放射的谱线频率为:

$$\tilde{\nu} = \frac{2 \pi^2 m e^4 Z^2}{h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1-5)$$

对应于 $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ 的轨道层, 常用字母 $K, L, M, N, O, \dots$ 来表示。

3. 电子的壳层结构:

绕核运动的电子按照以下规律分布:

(1) 在第 n 壳层上, 最多可容纳 $2n^2$ 个电子;

(2) 在第 n 壳层上的电子, 又都分布在 n 个不同的支壳层上(支壳层用 l 表示), 每一支壳层最多可容纳电子数为 $2(2l+1)$; $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$, 这些支壳层可分别记以 $s, p, d, f, g, \dots$ 。

(3) 原子中的电子原则上从第 $n = 1$ 层开始排布, 布满第一层布第二层……依次类推, 同时考虑到服从最低能量原理, 即电子的分布, 将尽可能地使体系的能量为最低。凡是布满了 $2n^2$ 个电子的壳层称为闭合层, 重原子的内壳层通常都是闭合层, 内壳层上的电子称为内电子。

二、X射线的产生

X射线是一种比紫外线波长还短的电磁波, 其波长大约为 $60 \text{ \AA} \sim 10^{-2} \text{ \AA}$ 。它具有光的特

性,例如反射、折射、干涉、衍射,散射和偏振等现象,还具有光谱的结构。它能使一些结晶物体发生荧光,气体电离,胶片感光。

X 射线通常是以一块金属靶(一般是重金属)在高速运动的电子作用下产生的。这样产生的 X 射线分为二类。一类是:如果在金属靶(阳极)上猝然钉止的电子的能量不超过一定的限度时,只发射连续光谱的射线,这种辐射称为韧致辐射。如果电子的能量超过一定的临界值,则所发射的辐射,除连续光谱外,还迭加上一线状光谱,这种辐射称为标识辐射或特征辐射。同一种阳极会产生二种 X 射线。图1—2是钨靶与钼靶产生的典型的 X 射线光谱。纵轴表示强度,横轴表示波长,以埃($\text{\AA}$)为单位。对钨的曲线,表示在35千伏特(KV)的电压操作时,钨靶发射的连续光谱。对钼的曲线,表示在同样的条件下,除发射连续光谱之外尚迭加了两条钼的特征光谱,称为标识 X 射线,即 K_{α} 线和 K_{β} 线。要想得到钨的 K_{α} 线和 K_{β} 线,则电压必须加到70 KV 以上才行。

1. 连续 X 射线:

根据电动力学理论,具有加速度的带电粒子将产生电磁辐射。在 X 射线管中,高压电场加速了阴极电子,当具有很大动能的电子达到阳极表面时,由于猝然停止,它所具有的动能必定转变为电磁波辐射出去。由于电子被停止的时间和条件不同,所以辐射的电磁波具有连续变化的波长。

高速电子在极短的时间内被停止,因而产生的电磁波就具有极短的波长,这些波长连续变化的电磁波就是连续 X 射线。在任何 X 射线管中,只要电压达到一定数值,连续 X 射线总是存在的。连续 X 射线具有以下特点:

(1) 连续 X 射线与阳极的材料无关;

(2) 连续 X 射线的波长在长波方向,理论上可以扩展到 $\lambda = \infty$;而在短波方向,实验证明具有最短波长 λ_{min} (图1—2),且有:

$$\lambda_{min} = \frac{12.40}{U} (\text{\AA}) \quad (1-6)$$

U 为 X 射线管的管电压,单位 KV 。

(3) 连续 X 射线的总功率为 $P = \alpha ZIU^2$,输入功率为 $P_0 = IU$ 。因此, X 射线管的效率为:

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{\alpha ZIU^2}{IU} = \alpha ZU \quad (1-7)$$

Z ——阳极的原子序数;

U ——管电压,单位 KV ;

α ——约等于 1.5×10^{-6}

(4) 连续 X 射线在空间的强度分布如图(1—3)所示。其空间的角分布符合电磁辐射

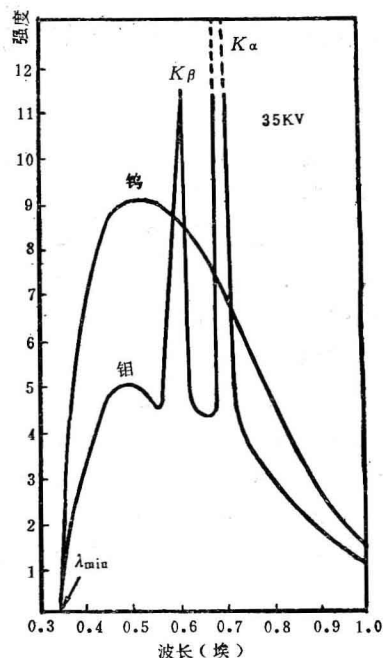


图1—2 钨与钼的 X 射线谱

的角分布规律, 即它与 $\frac{\sin^2 \theta}{\left(1 - \frac{V^*}{C} \cos \theta\right)^n}$ 有关。当电子速度 $V^* \ll$ 光速 C 时, 分布仅与 $\sin^2 \theta$ 有关, 此时在 $\theta = 90^\circ$ 时, $\sin^2 \theta = 1$, 即在与电子束垂直的方向上分布最大。当 $V^* \rightarrow C$ 时, $\frac{V^*}{C}$ 增大, 辐射最强方向逐渐向电子束方向移动。

(5) X射线管的管电压愈高, 其连续X射线的强度愈大, 而且其最短波长 $\lambda_{\min}$ 愈向短波方向移动。(如图1—4所示)

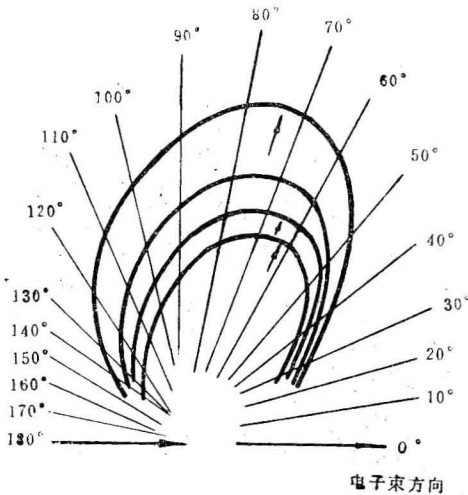


图 1—3 连续 X 射线强度的空间分布

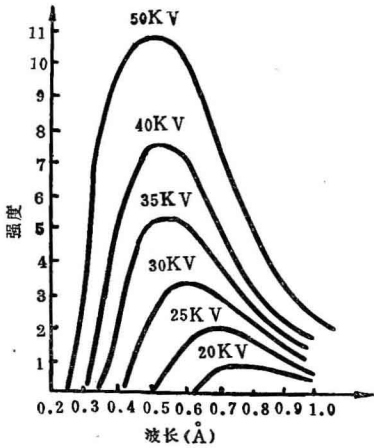


图 1—4 不同管压下的钨靶连续 X 射线

2. 标识X射线:

根据原子结构理论, 原子吸收能量后将处于受激状态, 受激状态原子是不稳定的, 当它回到原来的状态时, 将以发射谱线的形式放出能量。在X射线管内, 高速运动的电子, 达到阳极靶时将产生连续X射线, 如果此时电子的动能达到相当的数值, 即足以打出靶原子(通常是重金属原子)内壳层上的一个电子, 该电子或者处于游离状态, 或者被打到外壳层上的某一个位置上。于是原子的内壳层上有了一个空位, 邻近壳层上的电子便来填空。这样发生相邻壳层之间的电子跃迁, 这种跃迁将发射出线状的X射线, 显然这种X射线与靶金属原子的结构有关, 因此称其为标识X射线或特征X射线。标识X射线通常频率很高, 波长很短。标识X射线具有以下特征:

(1) 标识X射线与阳极材料有关, 每一元素具有自己特有的线状标识X射线;

(2) 标识X射线可以分为K系、L系、M系……。从L、M、N……等轨道层向K层跃迁产生K系X射线, 从M、N……等层向L层跃迁产生L系X射线, M等系依次类推。如图1—5所示。

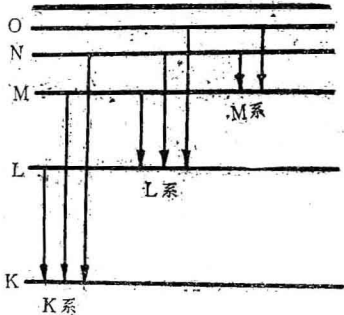


图 1—5 标识 X 射线能级图

三、X射线与物质的相互作用

X射线穿过物质时,有多种相互作用:如电离作用、热效应、光电效应,二次标识X射线,康—吴散射、相干散射等。对射线检测来说,影响较大的是二次标识X射线和康—吴散射。

1. 二次标识X射线:

当X射线穿过物体时,如果它的能量大到足以打出原子中的内电子而使原子处于激发状态,受激发原子回复到正常状态时,将发射出波长不同的标识X射线,因为它是由X射线的入射而产生的,因此称为二次标识X射线。它具有以下的特征:

(1) 二次标识X射线的波长必定大于入射X射线的波长;

(2) 任何元素的标识X射线不能激发出比此元素原子序数更大的元素(也包括同种元素的)同一系的二次标识X射线。

2. 康—吴散射:

X射线穿过物质时,它能引起原子中电子的强迫振动而产生散射。散射的X射线方向与原X射线方向夹角为 φ 。康普顿—吴有训在研究了实验现象后发现,在散射线里有与原射线波长 λ 相同的射线,也有波长为 $\lambda' > \lambda$ 的射线。即存在着波长移向长波方向的散射。这种散射现象即称康—吴散射。它与经典散射不同,经典散射时原波长 λ 是不变的。

康—吴散射具有以下规律:

(1) 对原子量小的物质,康—吴散射强;对原子量大的物质,康—吴散射弱;

(2) 当散射角增大时,康—吴散射的强度增加;

(3) 波长的变化随散射角而变,当散射角增加时,变化随着增加;

(4) 在同一散射角下,对所有散射物质,波长变化大小相同。

在康—吴散射中,X射线波长的变化如下:

$$\Delta\lambda = 0.0486 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (1-8)$$

式中 φ 为 散 射 角

四、X射线通过物质时的衰减

尽管X射线由于波长短,因而穿透力很强。但当它通过物质时,物质仍然对它吸收现象。吸收与散射一样,将消耗X射线束的能量而使X射线遭到衰减。

1. X射线吸收:

物质对X射线的吸收主要发生在物质产生二次标识X射线的时候。从二次标识X射线产生过程中我们知道,当重原子的内电子从低能态跃迁到高能态时,必将大量地吸收X射线的能量,换句话说,物质对X射线的吸收系数将达到峰值。图1—6是吸收系数 μ 与X射线的波长 λ 的关系曲线。当X射线使物质产生K系二次标识X射线的时候,物质对波长为 λ_K 的X射线吸收很大。同理在产生L系、M系二次标识X射线的时候,物质对波长为 λ_L 、 λ_M 的X射线吸收很大。

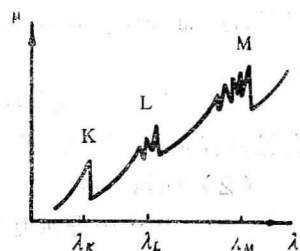


图 1-6 X射线的吸收曲线

2. X射线通过物质时的衰减:

X射线通过物质时, 由于吸收和散射, 将使其能量衰减。假设射到物质上X射线强度以 I_0 来表示, 而穿过厚达 d 厘米的吸收物质块以后X射线的强度以 I_d 来表示, 则衰减规律可用以下公式来表示:

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} \quad (1-9)$$

μ 为常数, 表示X射线穿过1厘米的某一物质时强度衰减的自然对数, 即 $\mu = \ln \frac{I_0}{I_1}$ (此时 $d = 1$)。 μ 称为X射线的线衰减系数。

通常用半衰减层 h 来表示某一物质对X射线的衰减能力。半衰减层是使X射线强度衰减一半的物质的厚度。以 $I_h = \frac{1}{2} I_0$ 代入(1-9)式, 并二边取对数则得:

$$h = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (1-10)$$

3. 吸收系数和吸收系数的突变:

前面讲到X射线通过物质时强度的衰减可以用线衰减系数 μ 来表示。强度的衰减主要原因是散射和吸收。因此线衰减系数 μ 又可以分为散射系数 σ 和吸收系数 $\bar{\mu}$, 即

$$\mu = \sigma + \bar{\mu} \quad (1-11)$$

X射线在任何物质中的线衰减系数与此物质的密度成正比, 即:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\bar{\mu}}{\rho} \quad (1-12)$$

式中 ρ 为物质的密度, 此时 $\frac{\mu}{\rho}$ 称为质量衰减系数, $\frac{\sigma}{\rho}$ 称为质量散射系数, $\frac{\bar{\mu}}{\rho}$ 为质量吸收系数。对于大部分元素来说, 在很大波长范围内的质量散射系数差不多为常数, 且有

$\frac{\sigma}{\rho} \approx 0.2$ 。在多数情况下, $\frac{\bar{\mu}}{\rho} \gg \frac{\sigma}{\rho}$, 则 $\frac{\mu}{\rho} \approx \frac{\bar{\mu}}{\rho}$ 。因此, 习惯上X射线的衰减程度常用质量吸收系数来表示。

质量吸收系数在很大的程度上取决于物质的原子序数 Z 和被吸收X射线的波长。其变化情况如图1-7所示。图1-7实际上就是图1-6的短波长部份。图中虚线为铜元素的 $\frac{\mu}{\rho} - \lambda$ 变化曲线, 实线为银元素的 $\frac{\mu}{\rho} - \lambda$ 变化曲线。对铜来说, $\frac{\mu}{\rho}$ 随着波长的减小而降低。

但对银来说, 曲线被分成二支, 当 $\lambda > \lambda_K$ 时, $\frac{\mu}{\rho}$ 随着波

长的减短而逐渐降低, 当 $\lambda = \lambda_K$ 时, 质量吸收系数突然

上升, 形成一个峰值, 而当 $\lambda < \lambda_K$ 时, $\frac{\mu}{\rho}$ 又随波长的减短而从峰值逐渐降低。在 λ_K 处所发生的现象称为吸收系数突变规律。吸收系数突变的原因正如上文中所指出的, 当 $\lambda = \lambda_K$ 时, 银原子被激发出K系二次标识X射线, 因此波长为 λ_K 的X射线被大量的吸收。除去K—突变之外, 在长波区还有L—突变和M—突变。铜的K—突变波

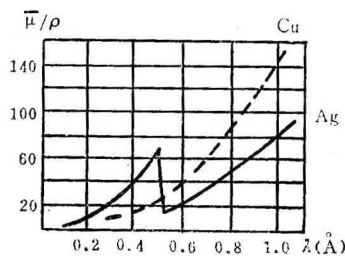


图 1-7 吸收系数的突变