

高等学校通用教材

无损检测基础

刘福顺 汤 明 编著



北京航空航天大学出版社
<http://www.buaapress.com.cn>

无损检测基础

刘福顺 汤 明 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

全书分为绪论和第一章射线检测、第二章渗透检测、第三章磁粉检测、第四章超声波检测、第五章涡流检测和第六章无损检测新技术。

第一章到第五章分别重点介绍了各种检测技术的原理和方法,以及对检测结果的分析 and 应用实例。第六章简要介绍了无损检测新技术,包括激光全息无损检测、声振检测法、微波无损检测和声发射检测。每章都有概述,简要介绍本检测方法的特点和发展过程。每章都有复习题(含计算题)。最后以附录形式列出了本书的实验指导(说明)书。

本书主要面向材料科学和材料加工专业的大学本科学生,也可作为机械等其它专业师生和在职无损检测高级人员进行系统培训的参考教材,还可供从事工程设计、技术管理、安全防护管理人员和广大无损检测工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测基础/刘福顺等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2002.9

ISBN 7-81077-233-3

I. 无… II. 刘… III. 无损检验—基本知识
IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 063310 号

无损检测基础

刘福顺 汤 明 编著

责任编辑 刘宝俊

.*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话(010)82317024 传真(010)82328026

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

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

北京密云华都印刷厂印制 各地书店经销

.*

开本:787×1 092 1/16 印张:11 字数:282 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 7-81077-233-3 定价:13.00 元

前 言

本书主要面向材料研究和材料加工专业的大学本科学生,也可作为机械等其它专业师生和在职无损检测高级人员进行系统培训的参考教材,还可供从事工程设计、技术管理、安全防护管理人员和广大无损检测工作者阅读参考。

全书分为绪论和第一章射线检测、第二章渗透检测、第三章磁粉检测、第四章超声波检测、第五章涡流检测和第六章无损检测新技术。

为了适应大学本科教育扩大知识面、淡化专业、强化素质教育等教学改革的需要,本书在编写时对于每一种检测技术,只简单介绍其检测原理和检测方法,重点放在对检测结果的分析 and 应用实例的介绍上。由于学时有限,对有些检测设备的工作原理、技术条件、制造方法等介绍较少。目的是使大学本科学生能在较短的时间内,获得有关无损检测的基本理论和检测方法的基础知识。

本书由北京航空航天大学刘福顺、汤明编写,实验指导书由范学涛编写。

鉴于编者水平有限和时间仓促,缺点和错误在所难免。恳请同行和读者给予批评指正,在此深表感谢。

编 者

2002 年 5 月

目 录

绪 论	1
第一章 射线检测	3
1.0 概 述	3
1.1 射线检测的物理基础	3
1.2 射线检测的基本原理和方法	9
1.3 射线照相探伤技术	18
1.4 射线感光胶片和暗室处理	29
1.5 常见的缺陷影像特征及判断	35
1.6 射线探伤设备	39
1.7 中子照相	42
1.8 射线的安全防护	45
1.9 复习题	48
第二章 液体渗透检测	51
2.0 概 述	51
2.1 液体的一些物理化学现象	51
2.2 液体渗透探伤原理和影响探伤灵敏度的主要因素	55
2.3 液体渗透探伤法的分类和检测方法	58
2.4 渗透检测的发展	63
2.5 复习题	64
第三章 磁粉检测	65
3.0 概 述	65
3.1 磁粉检测的基本原理	65
3.2 磁粉检测方法	67
3.3 磁粉探伤的应用与磁痕分析	77
3.4 磁粉探伤过程	82
3.5 复习题	85
第四章 超声波检测	86
4.0 概 述	86

4.1	超声波检测的特点与应用	87
4.2	超声场及介质的声参量简介	88
4.3	超声波的传播	90
4.4	超声波在介质中的传播特性	92
4.5	超声波换能器	98
4.6	超声波探伤仪	100
4.7	超声波检测方法	104
4.8	缺陷的定位、定量和定性	108
4.9	超声波检测应用实例	115
4.10	复习题	120
第五章	涡流检测	122
5.0	概 述	122
5.1	涡流探伤的特点	122
5.2	涡流检测的原理	124
5.3	复习题	126
第六章	无损检测新技术	127
6.0	概 述	127
6.1	激光全息无损检测	127
6.2	声振检测法	132
6.3	微波无损检测	138
6.4	声发射检测	142
6.5	复习题	154
附 录		155
附录 1	无损检测实验指导书	155
附录 2	国内外部分常用无损检测标准	161
附录 3	国内外部分重要无损检测期刊	166
参考文献		167

绪 论

随着我国科学和工业技术的迅速发展,无损检测技术的应用范围十分广泛,已在机械制造、石油化工、造船、汽车、航空、航天和核能等工业中被普遍采用。所采用的材料从原来的一般材料逐渐被耐高温、难切削、重金属以及复杂合金、复合材料等特殊材料所代替。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、不改变使用性能的检测方法,对产品进行百分之百的检测(或抽检),以确保产品的安全可靠,这种技术就是无损检测。

无损检测以不损害被检验对象的使用性能为前提,应用多种物理原理和化学现象,对各种工程材料、零部件、结构件进行有效地检验和测试,借以评价它们的连续性、完整性、安全可靠性及某些物理性能。无损检测包括:在探测材料或构件中是否有缺陷,并对缺陷的形状、大小、方位、取向、分布和内含物等情况进行判断;还能提供组织分布、应力状态以及某些机械和物理量等信息。

无损检测技术的理论基础是材料的物理性质,其发展过程利用了世界上几乎所有物理研究的新成就、新方法,可以说材料的物理性质研究的进展与无损检测技术的发展是一致的。

1. 无损检测技术的主要功能

(1) 无损探伤 对产品质量作出评价,无论是锻件、铸件、焊接件、钣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面或内部的缺陷,并能对缺陷进行定性或定量分析。

(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。

(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测者以实行监控。

2. 采用无损检测技术可以达到的目的

(1) 降低产品成本。

(2) 提高安全可靠。

(3) 改进制造工艺。

3. 无损检测技术的发展

长期以来,无损检测有 3 个阶段,即 NDI(Non-destructive Inspection)阶段、NDT(Non-destructive Testing)阶段和 NDE(Non-destructive Evaluation)阶段。目前一般统称为无损检测(NDT)。

20 世纪 70 至 90 年代是国际无损检测技术发展的兴旺时期,其特点是微机技术不断向无损检测领域移植和渗透,无损检测本身的新方法和新技术不断出现,而使得无损检测仪器的改进得到很大提高。

随着现代化水平的提高,我国无损检测技术已取得了很大的进步。已建立和发展了一支训练有素、技术精湛的无损检测队伍。已形成了一个包括中等专业教育、大学专科、大学本科(或无损检测专业方向)和无损检测硕士、博士生培养方向等门类齐全的教育体系。与此同时,我国已有一批生产无损检测仪器设备的专业厂,主要生产常规无损检测技术所需的仪器、设备。

无损检测技术的发展,首先得益于电子技术、计算机科学、材料科学等学科的发展,因此才不断产生了新的无损检测方法。同时,也由于该技术广泛采用在产品设计、加工制造、成品检验以及在役检测等阶段,并都发挥了重要作用,因而愈来愈受到人们的重视并对其给予有效的经济投入。有资料认为,目前世界上无损检测技术最先进者当属美国,而德国、日本是将无损检测技术与工业化实际应用协调得最为有效的国家。

4. 无损检测的方法

无损检测的方法很多,最常用的有射线检测 RT(X-Radiography Testing)、渗透检测 PT(Penetrant Testing)、磁粉检测 MT(Magnetism Testing)、超声波检测 UT(Ultrasonic Testing)和涡流检测 ET(Eddy Testing)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。

虽然近几十年来无损检测技术发展很快,已成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。

第一章 射线检测

1.0 概 述

1895年11月8日,德国科学家伦琴(1845—1923)利用气体放电管在实验室中发现了一种可以穿透物体的贯穿性辐射,由于当时对这种辐射的性质还不了解,所以被命名为X射线。后来,人们为了纪念伦琴这一伟大的贡献,又把这种射线命名为伦琴射线。时隔一年,由亨利·贝克勒耳(1852—1908)在利用铀盐和感光板进行实验时,发现了铀能够发射一种类似于X射线的辐射线。经过进一步研究,表明产生辐射是某些元素具有的特性,并存在一定的定量关系,特别是产生这种辐射的原子以它特有的速率衰变成新的原子,这种辐射就是 γ 射线。

1911年德国米勒博士成功地制造了世界上第一只X光管,提供了产生X射线的基本元件和设备。1915年开始利用X射线和 γ 射线去透照物体并在感光板上获得物体的影像,这就是最早的射线照相技术。

第二次世界大战期间,随着飞机等军事工业的发展,苏联、美国等工业先进的国家,为了保证战斗飞机的质量,在飞机制造过程中广泛开始利用X射线和 γ 射线对飞机的重要零部件进行射线照相,使这一技术逐步成熟并趋向实用。

经过几十年发展,射线探伤已经是一门比较成熟的无损检测技术。它与超声波探伤、磁粉探伤、液体渗透探伤和涡流探伤并列为无损检测的五大常用技术。

射线检测(探伤)有X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的射线的衰减程度的不同,使底片感光成黑度不同的图像来观察的。射线检测用来检测产品的气孔、夹渣、铸造孔洞等立体缺陷。当裂纹方向与射线平行时就能被检查出来。

射线检测的优点是检测结果可作为档案资料长期保存,检测图像较直观,对缺陷尺寸和性质判断比较容易。因此,射线探伤已在化工、炼油、电站设备制造以及飞机、宇航、造船等工业中得到极为广泛的应用,对控制和提高产品的制造质量起了积极的作用,在现代工业中已成为一种必不可少的无损检测方法。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,对工件中平面型缺陷(裂纹未熔合等缺陷)也具有一定的检测灵敏度,但与其它常用的无损检测技术相比,对微小裂纹的检测灵敏度较低,并且生产成本高于其它无损检测技术,其检验周期也较其它无损检测技术长,并且射线对人体有害,需要有防护设备。

1.1 射线检测的物理基础

1.1.1 射线的种类和频谱

X射线和 γ 射线是一种电磁辐射。在射线探伤中应用的射线主要是X射线、 γ 射线和中

子射线。

1.1.1.1 X射线

X射线又称伦琴射线。X射线是在射线探伤领域中应用最广泛的一种射线。

X射线的波长范围约在 $0.0006 \sim 100 \text{ nm}$ 之间,在X射线探伤中常用的波长范围约在 $0.001 \sim 0.1 \text{ nm}$ 之间。X射线的波长范围较紫外线的波长短,所以X射线的频谱在紫外线之前,它的频率范围约在 $3 \times 10^9 \sim 5 \times 10^{11} \text{ MHz}$ 之间(见图 1.1)。

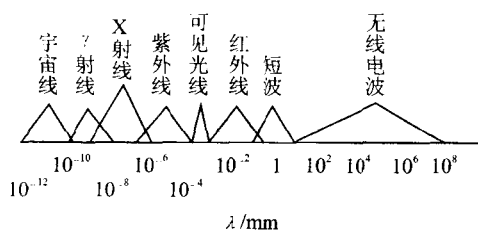


图 1.1 射线的频谱

1.1.1.2 γ射线

γ射线是一种波长比X射线更短的射线,它的波长范围约在 $0.0003 \sim 0.1 \text{ nm}$ 之间,它的频率范围约在 $3 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{15} \text{ MHz}$ 之间(见图 1.1)。

工业上广泛采用人工同位素产生γ射线,由于γ射线的波长比X射线更短,所以具有更大的穿透力。在无损检测中常被用来对厚度较大的工件进行射线照相。

1.1.1.3 中子射线

中子射线是中子束流。中子是构成原子核的基本粒子,是由某些物质的原子在裂变过程中逸出高速中子所产生。它的波长与热平衡的绝对温度有关。在热中子射线中 0°C 和 100°C 时的波长分别为 0.152 nm 和 0.130 nm 。

工业上常用人工同位素、加速器、反应堆来产生中子射线,在无损检测中常被用来对某些特殊部件(如放射性核燃料元件)进行射线照相。

1.1.2 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 $60 \sim 10^{-3} \text{ nm}$ 。它具有光的特性,例如具有反射、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)上猝然停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;二类是: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,还叠加上一线状光谱,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。对钨的曲线,表示在 35 kV 的电压下操作时,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叠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。

1.1.2.1 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 射线的波长与阳极的材料无关。

(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 $\lambda_{\min}$ (见图 1.2),且有

$$\lambda_{\min} = \frac{1.24}{U} \text{ nm} \tag{1.1}$$

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 $P_0=IU$ 。因此,X 射线管的效率为

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{\alpha ZIU^2}{IU} = \alpha ZU \tag{1.2}$$

式中: 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的角分布规律,即它与 $\frac{\sin^2 \theta}{\left(1-\frac{v^*}{c}\cos \theta\right)^2}$ 有关。当电子速度 $v^* \ll$ 光速 c 时,分布仅与 $\sin^2 \theta$ 有关。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。

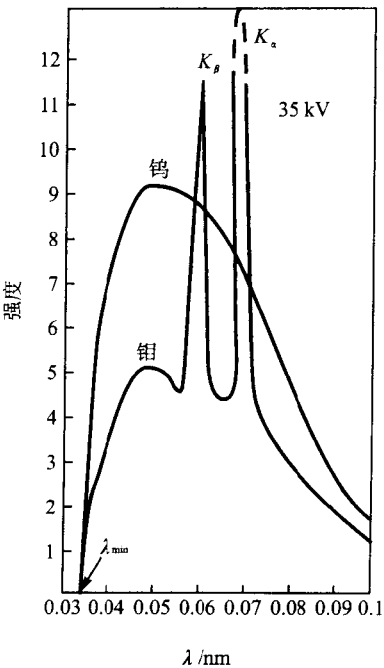


图 1.2 钨与钼的 X 射线谱

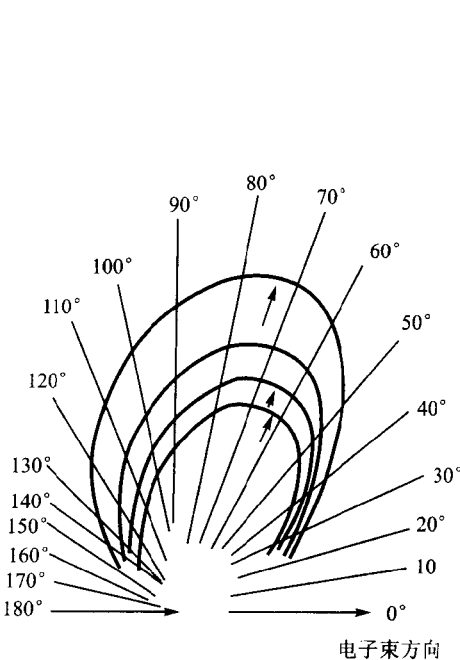


图 1.3 连续 X 射线强度的空间分布

(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。

1.1.2.2 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,当它回复到原来的状态时,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,这样就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。

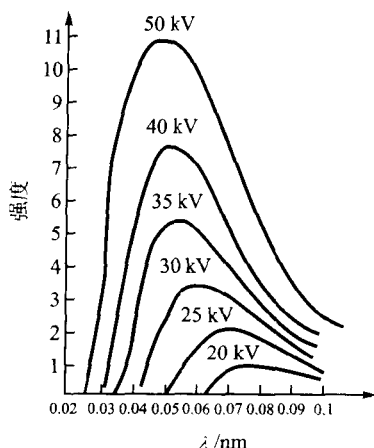


图 1.4 不同管压下的钨靶连续 X 射线

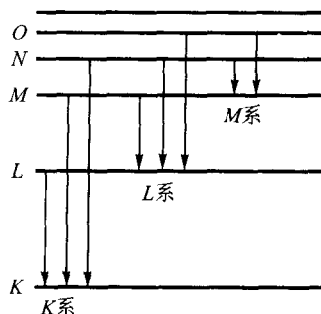


图 1.5 标识 X 射线能级图

1.1.3 射线与物质的相互作用和衰减定律

射线透过物质后就失去了一部分能量,这种现象称为射线的衰减。

1.1.3.1 射线与物质的相互作用

射线与物质的相互作用主要有三种主要过程:光电效应、康普顿效应和电子对的产生。这三种过程的共同点是都产生电子,然后电离或激发物质中的其它原子。此外,还有少量的汤姆逊效应。

1. 光电效应

在普朗克概念中每束射线都是一个具有能量为 $E=h\nu$ 的光子。光子运动时保持着它的全部动能。光子能够撞击物质中原子轨道上的电子,在光电效应(见图 1.6)时释放出全部能

量。光子的一部分能量把电子从原子中逐出去,剩余的能量则作为电子的动能被带走,于是该电子又在物质中引起新的电离。

当光子的能量低于 1 MeV 时,光电效应是极为重要的过程。另外光电效应更容易在原子序数高的物质中产生,如在铅($Z=82$)中产生光电效应的程度比铜($Z=29$)中大得多。

2. 康普顿效应

在康普顿效应(见图 1.7)中,一个光子撞击一个电子时只释放出它的一部分能量,结果光子的能量减弱并在和初始方向成 θ 角的方向上散射,而电子则在和射线初始方向成 φ 角的方向上散射。这一过程同样服从于能量守恒定律,即电子所具有的动能为入射光子和散射光子的能量之差,最后电子在物质中因电离原子而损失其能量。

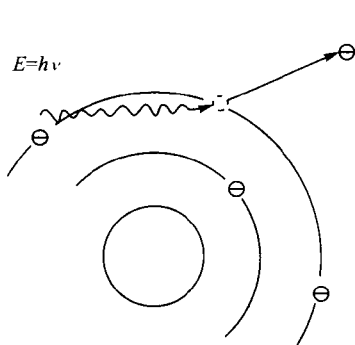


图 1.6 光电效应

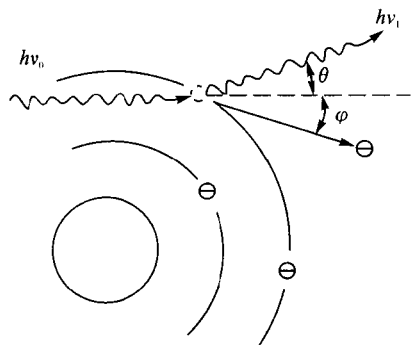


图 1.7 康普顿效应

在绝大多数的轻金属中,射线的能量大约在 0.2~3 MeV 范围时,康普顿效应是极为重要的效应。康普顿效应随着射线能量的增加而减小,其大小也取决于物质原子中的电子数。在中等原子序数的物质中,射线的衰减主要是由康普顿效应引起,在射线防护时主要侧重于康普顿效应。

3. 电子对的产生

一个具有足够能量的光子释放出它的全部动能而形成一个电子和一个正电子,这样的过程称为电子对的产生。电子对的产生发生在原子核附近(见图 1.8),因为只有这样才能使能量守恒。由于产生电子对所需最小的能量为 0.51 MeV,所以光子能量 $h\nu$ 必须大于 1.02 MeV。

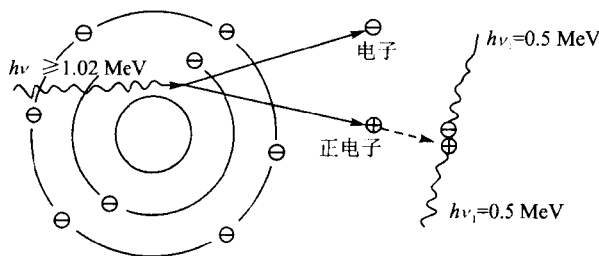


图 1.8 电子对的产生和消失

当能量超过 1.02 MeV 的光子把能量一部分用于产生电子对,剩下的传递给电子和正电子作为动能时,一部分能量传给原子核以满足动量守恒。在物质中电子和正电子都是通过原

子的电离而损失动能,在消失过程中正电子和物质中的电子相作用从而各成为能量为 0.51 MeV 的两个光子,它们在物质中又可以通过光电效应和康普顿效应进一步相互作用。

由于产生电子对的能量条件要达到 ≥ 1.02 MeV,所以电子对的产生只有在高能射线中才是重要的过程,该过程正比于吸收体的原子序数的平方,所以高原子序数的物质电子对的产生也是重要的过程。

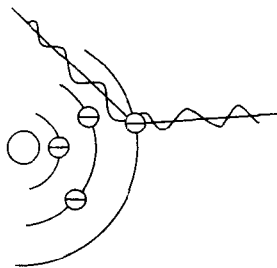


图 1.9 汤姆逊效应

4. 汤姆逊效应

射线与物质中带电粒子相互作用,产生与入射波长相同的散射线现象叫做汤姆逊效应。这种散射线可以产生干涉,能量衰减十分微小,如图 1.9 所示。

光电效应、康普顿效应、汤姆逊效应和电子对的产生是射线和物质相互作用的主要方式。光电效应和康普顿效应随射线能量的增加而减少,电子对的产生则随射线能量的增加而增加,四种效应的共同结果是使射线在透过物质时能量产生衰减。

1.1.3.2 射线的衰减定律和衰减曲线

射线的衰减是由于射线光子与物体相互作用产生光电效应、康普顿效应、汤姆逊效应或电子对的产生,使射线被吸收和散射而引起的。由此可知,当射线通过物质时随着贯穿行程的增加,则射线的衰减愈严重,亦即物质愈厚,则穿透它的射线衰减的程度也愈大。

射线衰减的程度不仅与透过物质的厚度有关,而且还与射线的性质(波长)、物体的性质(密度和原子序数)有关。一般来讲,射线的波长愈小,衰减愈小,物质的密度及原子序数增大,射线衰减也增大。但它们之间的关系并不是简单的直线关系,而是成指数关系的衰减。

设入射线的初始强度为 I_0 ,通过物质的厚度为 d ,那么射线在透过物质以后的强度 I_d 为

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.3)$$

式中: e ——自然对数的底($e \approx 2.72$);

μ ——射线能量的线衰减系数;

d ——被通过物质的厚度;

I_0 ——射线的初始强度。

由于射线的衰减包括吸收和散射,所以射线的线衰减系数 μ 当是吸收系数和散射系数之和。即

$$\mu = \tau + \sigma \quad (1.4)$$

式中: τ ——吸收系数;

σ ——散射系数。

因为物质密度愈大,射线在物质中传播时碰到的原子也愈多,因而射线衰减也愈大。为便于比较起见,通常采用质量衰减系数 $\frac{\mu}{\rho}$ 。即

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} \quad (1.5)$$

式中: ρ ——物质的密度;

τ/ρ ——质量吸收系数;

σ/ρ ——质量散射系数。

射线的质量吸收系数和散射系数由式(1.6)、(1.7)表示:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{C}{A} \cdot Z^4 \lambda^3 \quad (1.6)$$

$$\frac{\sigma}{\rho} = 0.4 \frac{Z}{A} \quad (1.7)$$

式中: C ——常数;

A ——元素的原子数;

Z ——元素的原子序数;

λ ——射线的波长。

当低能射线透过重元素(轻元素和很短波长的射线除外)物质时,射线的衰减主要表现为吸收,由射线散射所引起的衰减可忽略不计,所以

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} = \frac{C}{A} \cdot Z^4 \lambda^3 \quad (1.8)$$

从式(1.3)中可以清楚看出,射线的衰减并不是呈直线比例,而是呈指数规律衰减的。图 1.10 所示是宽束射线的衰减曲线。

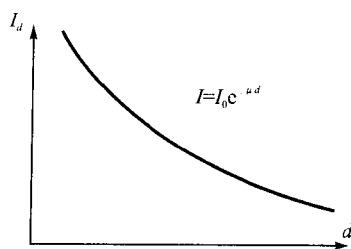


图 1.10 宽束射线的衰减曲线

1.2 射线检测的基本原理和方法

射线检测的方法,主要有透视照相法、电离检测法、X 射线荧光屏观察法和电视观察法以及正在发展的 X 射线计算机层析摄影等。其基本原理相同,都是利用射线通过物质时的衰减规律,即当射线通过物质时,由于射线与物质的相互作用发生吸收和散射而衰减。其衰减程度,则根据其被通过部位的材质、厚度和存在缺陷的性质不同而异。如图 1.11 所示。当一束

强度为 I_0 的射线平行通过被检测试件(厚度为 d)后,其强度将衰减为

$$I_d = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.9)$$

如果被测试件表面局部凸起,其高度为 h 时,则射线通过 h 部位后,其强度将衰减为

$$I_h = I_0 e^{-\mu(d-h)} \quad (1.10)$$

又如在被测试件内,有一个厚度为 x 线吸收系数为 μ' 的某种缺陷,则射线通过 x 部位后,其强度衰减为

$$I_x = I_0 e^{-[\mu(d-x) + \mu'x]} \quad (1.11)$$

式中如缺陷 x 的线吸收系数小于被测试件本身的材料线吸收系数,即 $\mu > \mu'$, 此时 $I_x > I_d > I_h$, 因而,在被检测试件的另一面就形成了一幅射线强度不均匀的分布图。通过一定方式将这种

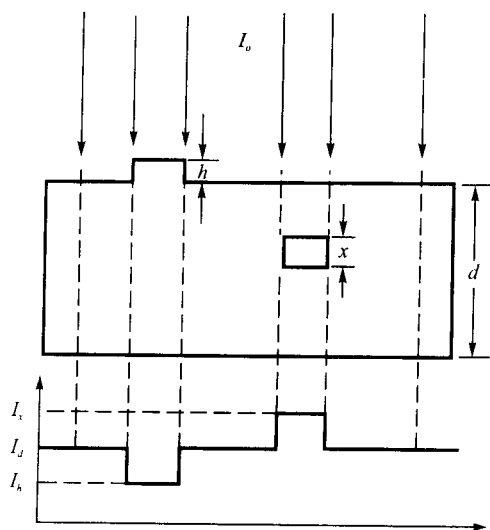


图 1.11 射线检测原理

不均匀的射线强度进行照相或转变为电信号指示、记录或显示,就可以评定被检测试件的内部质量,达到无损检测目的。

1.2.1 照相法

照相法是利用射线感光材料(通常用射线胶片),放在被透照试件的后面接受来自透过试件后不同强度分布的射线,如图 1.12 所示。因为射线强度与胶片乳剂的摄影作用,在正常条件下成正比,因而胶片在射线作用下形成潜影,经暗室处理后,就会显示出物体的结构图像。根据底片上影像的形状及其黑度的不均匀程度,就可以评定被检测试件中有无缺陷及缺陷的性质、形状、大小和位置。此法的优点是灵敏度高、直观可靠、重复性好,是射线检测法中应用最广的一种常规方法。本章将对其作重点介绍。由于生产和科研需要,还用放大照相和闪光照相法以弥补常规照相法的不足。

放大照相 放大照相是为了检测微小缺陷而设计的一种方法,分为接触式和投影式两种。

接触式放大照相法 是用常规射线照相方法结合光学放大原理,采用 10~50 倍显微镜观察获得底片放大影像,适用于薄壁试件。采用这种技术时,第一、在放大底片上总的几何不清晰度不能超过常规射线照相法的允许范围,大约 0.25 mm 左右,即放大后底片和没有放大的底片其几何不清晰度应基本相同。第二、射线感光胶片必须是细晶粒的、放大倍数一般为 3~10 倍,如采用超微粒胶片其放大倍数可达 200 倍,所以又称为显微照相。

投影式放大照相 此法是利用点光源投影角放大原理,如图 1.13 所示。只要调节胶片与试件间的距离或胶片与试件距离固定、调节焦距,就可以得到适当放大。它要求点光源,即微焦点 X 射线源,放大倍数在 30 以下。

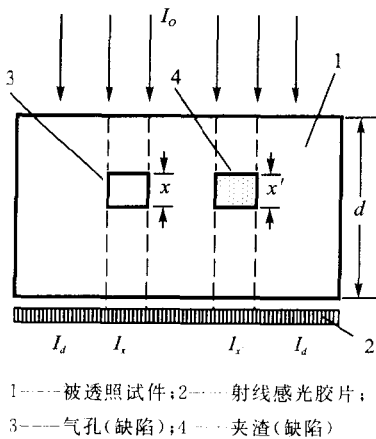


图 1.12 射线照相原理示意图

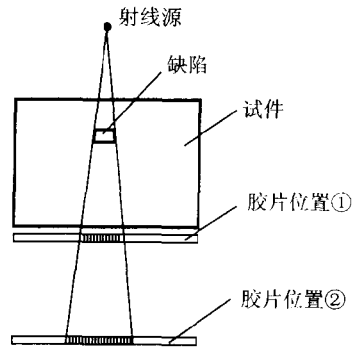


图 1.13 投影式放大照相原理

闪光照相 闪光照相是利用脉冲 X 射线发生器以得到大强度射线剂量进行照相的。单次发射脉冲以 ms 或 μ s 计,用以拍摄飞行中的子弹、爆炸过程或金属和水的运动情况等。在普通射线照相中,被检测物体在射线曝光过程中是不动的,即使利用图像增强器或光导摄像管的射线照相,被检测物也只能缓慢移动。这种照相方法的技术,除闪光 X 射线机外,还必须要有最快速胶片和增感屏配合。

1.2.2 电离检测法

X 射线通过气体时,撞击气体分子,使其中某些原子失去电子而变成离子,同时产生电离电流。如果让穿过工件的射线再通过电离室,那么在电离室内便产生电离电流,不同的射线强度穿过电离室后产生的电离电流也不相同。电离检测法就是利用测定电离电流的方法来测定 X 射线强度,根据射线强度的不同可以判断工件内部质量的变化。检测时,可用探头(即电离室)接收射线,并转换为电信号,经放大后输出。电离检测工作的基本原理如图 1.14 所示。

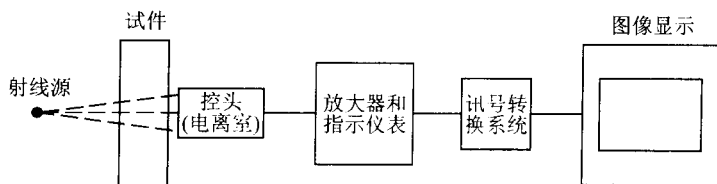


图 1.14 电离检测法检测原理

此法的特点是:能对产品进行连续检测,便于自动化操作,可采用多探头,效率高,成本低。但它只适用于形状简单、表面平整的工件,在一般情况下对缺陷性质判别较困难,因此,在探伤方面应用不很广泛。但可研制成各种专用的检测设备,如用于自动检查子弹壳的 X 射线装置,该装置由西德塞福特公司研制,用于分选子弹壳,每小时可检测子弹壳达 7 200 个。X 射线束通过铅制狭缝后,透过子弹壳的 X 射线由探头接收。探头采用闪烁探测器,由碘化钠晶体和光电倍增管组成。当遇到子弹壳壁有缺陷时,则壁厚变薄,探头便输出一个较强的电信号,触发分选机构,从而自动将废品分选出来。

1.2.3 荧光屏直接观察法

荧光屏观察法,是将透过被检测物体后不同强度的射线,投射在涂有荧光物质的荧光屏上,激发出不同强度的荧光来,成为可见影像,从荧光屏上直接辨认缺陷。它所看到的缺陷影像与照相法在底片上所得到的影像黑度相反。

荧光屏观察法的相对灵敏度,大约为 7% 左右。但它具有成本低、效率高、可连续检测等优点,适用于形状简单、要求不很严的产品探伤。近来,对此装置进一步采用了电子聚焦荧光辉度倍增管配合小焦点的 X 光机,使荧光屏上的亮度、清晰度有所增加,灵敏度达 2%~3%。

在荧光屏观察时,为了减少直射 X 射线对人体的影响,而在荧光屏后用一定厚度的铅玻璃吸收 X 射线,并将图像再经过 45° 度的二次反射后进行观察,如图 1.15 所示。从荧光屏上观察到的缺陷,如需要备查时,可用照相或录像法,将其摄录下来。

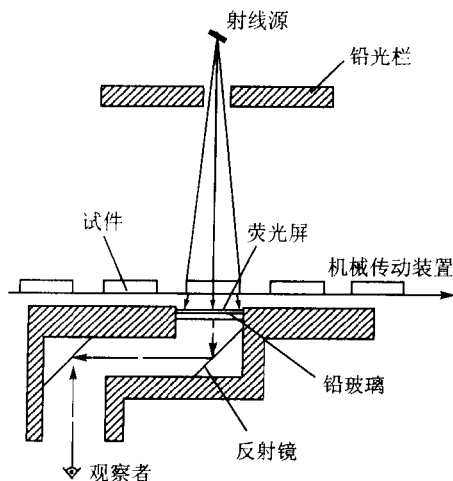


图 1.15 荧光屏观察法检测示意图