

第十讲 电子质子射线照相检验 技术与辐射测量技术

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

ELECTRON RADIOGRAPHY, PROTON RADIOGRAPHY AND RADIOMETRY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 电子射线照相检验技术

1.1 概述

1897年J.J. Thomson发现了电子。

从1858年起,一些科学家在研究真空放电时就发现,在真空管的负极上有一种射线射出,并称其为阴极射线。1879年W. Crookes发现这种射线在磁场中会发生偏转,证明阴极射线是一种带电粒子束。Thomson测定了阴极射线的荷质比,确定阴极射线由带负电的粒子组成,这就是电子。

电子是人类发现的第一个基本粒子,它揭示了原子具有复杂的结构。

大多数物质在X射线照射下将发射电子,电子射线照相技术就是利用这些电子来进行射线照相的技术。电子的穿透能力很低,因此电子射线照相技术主要用于低原子序数、很薄材料的射线照相检验,如纸张上的水迹、纸张的纤维分布、印章痕迹及邮票、油画、纸币等内部结构、组成的分析。也可对厚物体的表面层进行逆射式电子射线照相。

1.2 电子与物质的相互作用

电子通过物质时,可以与物质的原子、原子中的电子及原子核发生复杂的相互作用,作用过程决定于电子的能量及电子与作用粒子的最近距离。主要的作用过程有电离与激发、韧致辐射及弹性散射,此外还有湮没辐射、契伦科夫辐射及核反应等。当作用的最近距离大于原子线度时,库仑力是主要作用力,原子作为整体与电子作用,引起原子的激发或电离;当作用的最近距离等于原子线度时,电子与原子的一个电子作用,导致原子发射具有相当能量的电子和原子电离;当作用的最近距离小于原子线度时,电

子与原子核的电场作用产生辐射,主要是韧致辐射。

当电子与正电子发生相互作用时,电子消失,辐射两个能量为 0.511MeV 的光子,这就是湮没辐射。在透明的介质中,当电子以高于光在该介质中的传播速度运动时,电子的部分能量将以蓝色光的形式辐射出来,这种辐射称为契伦科夫辐射。契伦科夫辐射分布在沿电子运动向前方向的一个角度内。

1.2.1 电离与激发

电子与原子的轨道电子相互作用,将部分能量转移给轨道电子,如果轨道电子获得的动能可以克服原子的束缚,脱离原子的轨道成为自由电子,则此过程称为电离。如果轨道电子获得的能量不足以克服原子的束缚,而仅是从低能级跃迁到高能级,使原子处于激发态,则此过程称为激发。处于激发态的原子不稳定,跃迁至高能级的电子将自发地跃迁回低能级,同时辐射特征X射线,使原子回到基态。

在上述相互作用过程中,电子与轨道电子发生库仑作用而损失能量,这一过程称为电离损失。电离损失通常以单位路径长度上电离损失的平均能量描述,其主要特点是 电离损失与电子的速度(能量)成反比。电子速度越小,作用时间越长,转移给轨道电子的能量越多。因此,电子在停止运动前的一段路程上电离损失达到最大值。 电离损失与物质的电子密度成正比。

1.2.2 弹性散射

电子与原子核的库仑场相互作用,作用前后体系的动能和动量不变,电子的运动方向发生改变,这种作用过程称为弹性散射。在弹性散射过程中,电子散射到某一角度的几率,与散射物质的原子序数的平方成正比,与电子速度的平方成反比。电子在穿过

一定厚度的物体时都要经历多次散射, 它所产生的净偏转角服从高斯分布。

1.2.3 韧致辐射

高速电子在通过原子核附近时, 与原子核的库仑场发生相互作用, 其部分动能或全部动能将转变为连续谱电磁辐射, 这就是韧致辐射过程。电子在韧致辐射过程中损失的能量称为辐射损失。辐射损失正比于物质的原子序数, 反比于电子质量的平方。

电子初始能量转变为韧致辐射的份额 F 为

$$F = KZE$$

式中 K ——比例系数

$$K = 0.4 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3} (1/M \text{ eV}, \text{ 实验测定})$$

E ——电子初始能量

单能电子束入射到厚靶上时

$$F = 5.8 \times 10^{-4} ZE$$

在单位长度路径上, 辐射损失的平均能量与电离损失的平均能量之比近似为 $ZE/800$ 。可见, 当电子能量较低时, 更重要的是电离损失, 只有在电子能量较高时, 辐射损失才会占有较大的比例。

在一般能量范围 ($E < 10M \text{ eV}$) 内, 电子与物质相互作用造成电子能量损失的主要是电离损失和辐射损失。其它损失相对于这两种损失可忽略不计。

1.2.4 电子在物质中的射程

在电子与物质的相互作用中, 电子的能量不断损失, 因此, 电子在物质中只能穿行一段距离。按规定, 电子沿入射方向从进入物质到被物质吸收所经过的最大直线距离为电子在物质中的射程。射程与电子的初始能量和吸收物质的性质有关。单能电子束在某种物质中, 由于电子不同其能量损失的概率不同, 因此, 电子的射程将分布在很宽的范围内。

1.3 电子射线照相技术

物体受 X 射线照射时, 由于光电效应将释放出电子, 即光电子。当入射光量子的能量较低时, 光电子主要分布在与光量子方向相垂直的方向。随着入射光量子能量的增高, 光电子逐渐集中在光量子入射方向。

按电子产生的方法, 电子射线照相技术分为透射电子射线照相技术和发射电子射线照相技术。

透射电子射线照相技术的基本透照布置如图 10-1 所示。X 射线通过较厚的滤波板后照射到样品上面的铅箔上, 在相互作用中产生的电子穿过样品, 在胶片上形成影象。在此过程中一次射线也穿过样品, 入射到胶片上, 使胶片感光。由于电子的穿透能力低, 所以透射电子射线照相技术只适宜于密度低、

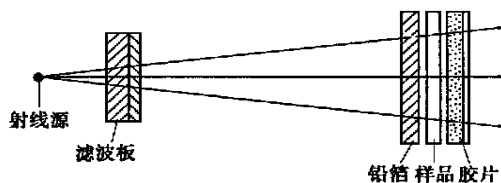


图 10-1 透射电子射线照相示意图

厚度很小的物件的射线照相, 如邮票和纸张等。

从上述过程可见, 电子射线照相技术须解决的问题是减少一次射线对胶片的感光作用, 否则将不可能得到电子射线照相的影象。为此, 在电子射线照相中采取的主要技术措施是:

(1) 采用能量较高的 X 射线, 并严格进行滤波。通常, X 射线的透照电压 $> 250kV$, 经较厚的铜板滤波后, 一次射线产生的感光作用可以忽略。为吸收铜板产生的特征 X 射线和散射线, 通常还需在铜板面向样品侧另加一定厚度的铝滤波板。

(2) 采用单面乳剂的低感光度射线胶片。这种胶片对一次射线的吸收将大大降低。

(3) 胶片的乳剂面应面向样品, 样品与胶片之间应直接接触, 紧密贴合, 以尽量减少电子散射产生的影响, 一般采用真空暗盒。

(4) 覆盖在样品上的铅箔应平整、均匀、表面光洁, 并与样品紧密贴合。

发射电子射线照相的基本透照布置如图 10-2 所示。经严格滤波的 X 射线首先穿过胶片, 然后照射到样品上, 在射线与样品的相互作用过程中产生电子。如果样品不同点的物质不同, 则产生的电子数量和能量也将不同, 其中与一次射线方向相反的那部分电子将入射至胶片, 使胶片感光, 形成影象。

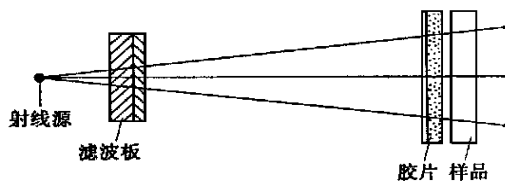


图 10-2 发射电子射线照相示意图

发射电子射线照相技术可用于很薄样品的射线照相, 如检查印刷品, 能无损伤地鉴别印刷油墨的成分(金属颜料或苯胺类有机染料), 也可用于厚样品表面层的射线照相。进行发射电子射线照相时, 也须采用透射电子射线照相技术的主要技术措施。

表 10-1 给出了电子射线照相实例的有关数据。

2 质子射线照相检验技术

表 10-1 电子射线照相实例数据*

物品	照相方法	电压 kV	焦距 mm	电流 mA	曝光时间 t/min	铅箔厚度 μm
树叶	透射	250	700	5	1	25
纸币	透射	250	700	5	1	25
邮票	透射/发射	250	700	5	2	25

* 滤板厚度均为 Cu 1mm, A 1.5mm.

质子, 即氢原子核, 是在发现电子后不久观察到的另一种基本粒子。

质子可列为带电的重粒子, 它与物质相互作用的基本过程与电子相同, 即可与物质的原子、原子的电子及原子核发生复杂的相互作用。其主要作用过程有电离与激发、韧致辐射和弹性散射, 此外还有湮没辐射、契伦科夫辐射和核反应等。能量损失的主要过程是电离损失和辐射损失。当质子的能量 $E < 10\text{MeV}$ 时, 辐射损失远小于电离损失。电离损失的主要特点是它与质子的速度(能量)成反比。因此, 质子在停止运动前的一段路程上电离损失达到最大值。它与物质的电子密度成正比。

在弹性散射过程中, 质子一般不发生明显散射, 小角度散射的概率远大于大角度散射。多次散射所产生的净偏转角服从高斯分布。

质子能量损失过程的特点决定了具有一定能量的质子和电子一样在物质中也具有一定的射程, 这也使质子射线强度的衰减主要出现在其射程的 90% 以后的路程上。质子与物质作用过程的特点, 即小角度散射和强度衰减特点, 形成了质子射线照相检验技术的特点, 即利用质子的小角度散射, 可得到物体内部边界清晰的图象。利用质子射线强度的衰减主要出现在其射程的 90% 以后的路程上的特点, 质子射线照相检验技术与按指数规律衰减的 X 和 γ 射线照相检验技术相比, 可检出更小的厚度差变化。例如, 质子射线照相检验技术可容易地检出 0.05% (甚至 0.003%) 的厚度差, 而 X 射线照相检验技术一般可检出的厚度差为 0.5% ~ 1.0%, 图

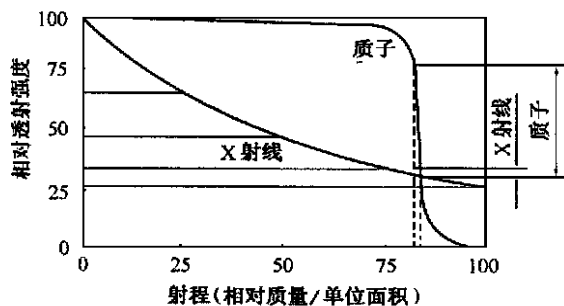


图 10-3 质子透射与 X 射线透射比较

10-3 给出了这种差异的说明。在采用质子射线照相检验技术时, 必须特别注意射线能量的选取, 能量必须与厚度相匹配, 否则难于检出小缺陷。

3 辐射测量技术

3.1 辐射探测器

辐射测量技术是利用射线与物质的相互作用来测量物体厚度、密度或成分等的无损检测技术, 也称非成像射线检测技术。射线源可为 γ 射线(包括 X 射线)、 β 射线和中子等。以下简要介绍有关辐射测量技术的一些基本内容。

辐射探测器可分气体电离探测器、闪烁探测器和半导体探测器三类。

3.1.1 气体电离探测器

射线与物质相互作用可引起电离, 电离的程度与射线能量相关, 也与被电离的物质相关。对空气和大部分气体, 产生一个电子-离子对需要的平均能量约为 34eV。在气体电离室中, 所产生的电离作用还与施加在电离室两极间的电压相关, 其关系如图 10-4 所示。气体电离探测器主要有电离室、正比计数器和盖革计数器三类, 其主要特点见表 10-2。

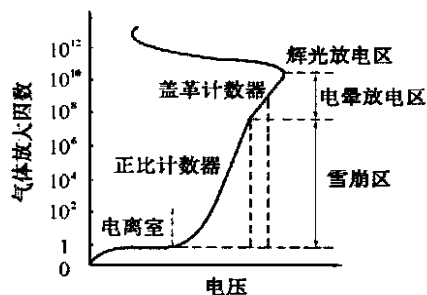


图 10-4 室电压对气体放大因数的影响

表 10-2 气体电离探测器特点比较

类别	工作电压/V	气体放大因数	分辨时间/s
电离室	200	1	—
正比计数器	600~900	$10^3 \sim 10^5$	10^{-6}
盖革计数器	1000~1500	$10^8 \sim 10^9$	2×10^{-4}

3.1.2 闪烁探测器

闪烁探测器由闪烁体和光电倍增管构成, 其基本结构见图 10-5。闪烁体在射线作用下发射可见光, 其光输出经光电倍增管转换为电脉冲, 从而实现辐射的检测。实际应用中一般采用固体闪烁体, 因而具有较高检测效率。常用闪烁体性能见表 10-3。

3.1.3 半导体探测器

半导体探测器可看作类似于气体电离探测器的

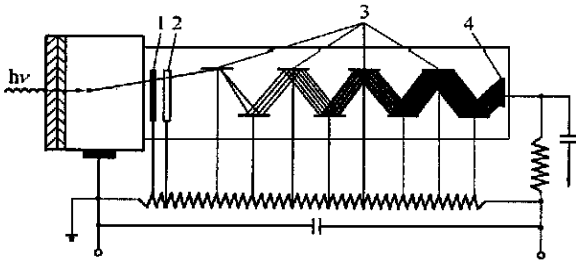


图 10-5 闪烁探测器基本结构

1 光阴极 2 聚焦板 3 倍增电极 4 收集极

表 10-3 常用闪烁体性能

闪烁体	相对发光效率/%	衰减时间/ns	发射波长/nm
NaI(Tl)	230	230	415
CsI(Tl)	95	1 100	540
ZnS(Ag)	300	11 000	450
塑料	40~ 50	2~ 3	390~ 423
蒽晶体	100	30	447

固态探测器。在半导体探测器中,电荷载体是辐射产生的电子-空穴对,在外电场的作用下电子-空穴对移动形成电流,收集电荷可测量射线的能量。

3.2 辐射测厚原理

X 和 γ 射线穿过物体时,由于与物质的相互作用,其强度将按如下规律衰减

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho T}$$

当 β 射线穿过物体的厚度比其射程小很多时,其强度的减弱也近似服从这一指数衰减规律,ρT 常称为

(上接第 441 页)

$$F_m = \frac{1}{\mu_0} B_m^2 S$$

若 $k_0 \ll 1$, 则 $\bar{F} \ll F_m$ 。即是说 \bar{F} 与 F_m 没有一个固定的关系,是随波形和脉冲的宽度而变化的。

还可将式(22)改写为

$$\bar{F} = \frac{1}{\mu_0} k_0 B_m^2 S \quad (23)$$

此式为一般情况下的通用关系式,表明 \bar{F} 是 k_0, B_m 和 S 三个因数的函数。

5 结语

(1) 本文讨论了电磁轭在几种情况下提升力与各影响因素的关系,并分析了其特点,从而提出了增大提升力的途径及其局限性,在实际应用中需特别注意。

(2) 由于磁粉探伤灵敏度与 B 的峰值有关^[3],因此,这里只考虑提升力与 B_m 的关系。由电磁轭提升力的通用关系式(式(23))可知,提升力 \bar{F} 不仅与

质量密度。

用透射法测厚,从上式可得

$$T = \frac{1}{\mu_m \rho} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

测量灵敏度为

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu_m \Delta(\rho T)$$

式中 Δ ——微分差

在散射法测厚中,由射线与物质的相互作用决定,在一定的厚度范围内,出射的散射线强度除了与入射射线的能量、强度和散射物体的原子序数有关外,还与物体的密度和厚度有关。因此,测量散射线强度,就可表征被测物体的密度和厚度。

3.3 常用的辐射测量技术

常用的辐射测量技术有 γ 射线衰减法,用于测量厚度和密度。荧光 X 射线分析,用于成分分析及涂层厚度测量。β 射线背散射法,用于测量涂层厚度。康普顿散射,用于测量厚度和密度。中子衰减和散射,用于测量氢含量和水分。其中 γ 射线衰减法应用最广。

辐射测量可通过测定透射射线、散射射线或激发的辐射强度和能量实现厚度、密度和成分等的测量,它可非接触、快速、准确、连续地进行。应根据测量要求和特点,采用不同的测量方式和探测器。

收稿日期: 2000-01-10

磁感应强度的峰值 B_m 有关,还与铁心截面积 S 及系数 k_0 有关,从而与励磁电流的波形有关。即是说, \bar{F} 不是 B_m 的单值函数,当 S 和 k_0 变化时,相同的 B_m 将会产生不同的 \bar{F} ,或者说,一定的 \bar{F} 并不反映一定的 B_m 。可见,在未限制参量 S 和 k_0 的条件下,用提升力来衡量一个电磁轭产生的 B_m 是困难的。

(3) 在分析提升力的过程中,还反映出了与 B_m 有关的因素,对设计人员来说,如何利用这些相关因素十分重要。如何更有效地反映电磁轭的性能,有待进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 林锡忠 关于采用电磁铁“提升力”来反映磁粉探伤灵敏度的讨论 水电部第三届无损检测技术讨论会论文集(八), 1984
- 2 俞大光 电工基础 第2版,北京:高等教育出版社,1964
- 3 林锡忠 无损检测, 1989, 11(12): 333- 335

收稿日期: 1999-11-30