

第3章 射线检测基础

3.1 工业射线检测中的射线

3.1.1 射线检测概述

射线检测利用 X 射线、 γ 射线和中子射线易于穿透物质，但在穿透物质过程中受到吸收和散射而衰减的性质，在感光材料上获得与被检测试件内部结构和缺陷相对应的黑度不同的图像，从而检测出试件内部缺陷的种类、大小、分布状况，并做出评价。

相对于其他无损检测技术，射线检测具有以下特点。

① 射线检测对缺陷成像直观，因而对缺陷的尺寸和性质判断比较容易。如用计算机辅助断层扫描可了解缺陷的断面情况，用胶片可长期保存，用图像处理还可使评定分析自动化。

② 由于射线检测是依靠射线穿透物质后衰减程度的不同来进行检测的，因此适用于所有材料，不管是金属材料还是非金属材料。

③ 能有效检测与射线束方向平行的厚度或密度上的明显差异。对平面型缺陷（如裂纹）的检测能力取决于被检测试件是否处于最佳辐射方向；而在所有方向上都可以检测体积型缺陷（如气孔、夹杂等）。

④ 由于可选用不同波长的射线，因此既可检测薄如树叶的钢材，也可检测厚达 500mm 的钢材。

⑤ 射线检测对被检测试件既不破坏也不存在污染，但射线对人体有害，故在检测中必须妥善防护。

⑥ 相对于其他几种无损检测，射线检测的费用较高。

3.1.2 射线的分类

本章重点讨论在工业射线检测中应用的射线。了解各种射线的性质对掌握射线与物质的相互作用过程、射线的衰减规律，从而选择、应用射线检测具有重要意义。

3.1.2.1 按电离性质分类

物理学上的射线也称辐射。按由射线与物质的相互作用所引起的电离情况分类，辐射可分为两类：（致）电离辐射和非（致）电离辐射。任何与物质的相互作用（包括直接作用或间接作用）可引起物质电离的辐射都称为电离辐射，不能引起物质电离的辐射称为非电离辐射。电离辐射包括直接致电离粒子、间接致电离辐射。直接致电离粒子如电子、 β 射线、质子、 α 射线等带电粒子，间接致电离辐射如 X 射线和 γ 射线，与物质作用

时能释放直接致电离粒子或引起原子核变化。非电离辐射包括红外线、微波等，能量较低，不能引起物质的电离。

3.1.2.2 按带电性质分类

按带电性质分类，射线可分为带电粒子和中性辐射。带电粒子又可分为快电子和重带电粒子：快电子包括核衰变中发射的正 β 粒子或负 β 粒子，以及其他过程中产生的具有相当能量的电子；重带电粒子包括质子、核衰变中产生的 α 粒子及其他重带电离子，不仅具有一个或多个原子质量单位，还具有一定能量。

中性辐射又可分为电磁辐射和中子辐射：电磁辐射包括轫致辐射、原子的壳层电子跃迁过程中发射的特征 X 射线和核能级跃迁中发射的 γ 射线；中子辐射通常在自发裂变和核反应中产生。

3.1.3 X 射线

X 射线曾被称为伦琴射线，是德国物理学家伦琴于 1895 年发现的。当时他正在研究阴极射线，偶然发现放在阴极射线管附近的荧光屏上发出了荧光。经查找，其证实是阴极射线管壁发出的新射线使荧光屏发光的，这种新射线就是 X 射线。

X 射线是一种波长很小的电磁波，波长 λ 为 $0.001 \sim 10\text{nm}$ ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。由于 X 射线波长小，能量高，因此对物质有良好的穿透性。图 3.1 所示为电磁波谱图。

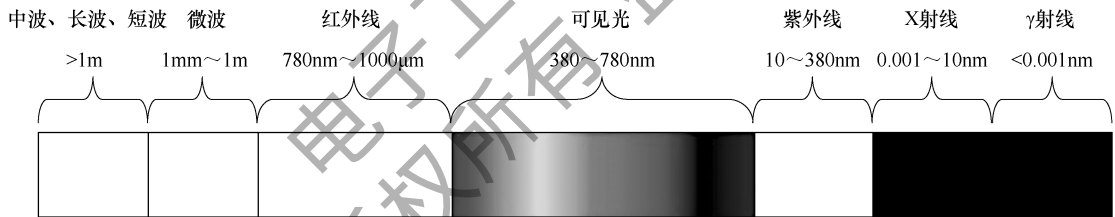


图 3.1 电磁波谱图

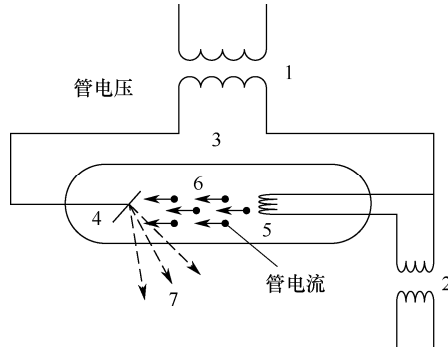
用于金属材料检测的 X 射线的波长为 $0.005 \sim 0.1\text{nm}$ 。X 射线的波长越小，X 射线的光子能量越大，穿透能力越强，可以检测越厚、越重的材料。一般称波长小于 0.1nm 的 X 射线为硬 X 射线，波长大于 0.1nm 的 X 射线为软 X 射线。

作为一种电磁波，同可见光等一样，X 射线具有波动和量子的双重特性。描述波动特性的参数有波速 c ($3 \times 10^8\text{m/s}$)、波长 λ 、频率 ν ($\nu = c/\lambda$)。

当将 X 射线作为量子流时，扫描量子(光子)的特性参数有光子质量 $h\nu/c^2$ 、动量 $h\nu/c$ 、能量 $h\nu$ 。其中， $h \approx 6.626 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常量。光子能量 ($h\nu$) 是描述 X 射线特性的一个重要参数，常以电子伏 (eV) 为单位： $1\text{eV} \approx 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

产生 X 射线常用的办法是：在射线管两极高电压的作用下，从阴极发出的电子会加速，高速运动的电子在受到阳极靶的阻遏时将产生轫致辐射，使一部分能量转换成 X 射线，而绝大部分则以热能形式释放出来。伦琴在当年的试验中用高速电子打在阴极射线管的玻璃

壁上，从玻璃壁发出 X 射线。图 3.2 所示为 X 射线产生装置的简单示意图。在一个真空管里装有灯丝电极（阴极）和靶（阳极），灯丝通电加热后会发出电子，电子经两极间的高电压（几十千伏至几百千伏或更高）加速后打到阳极上，就能产生 X 射线。



1—高压变压器；2—灯丝变压器；3—X 射线管；4—阳极（靶）；5—阴极（灯丝电极）；6—电子；7—X 射线

图 3.2 X 射线产生装置的简单示意图

3.1.4 γ 射线

3.1.4.1 放射性衰变

核衰变现象是 1896 年贝克勒尔 (Becquerel) 首先从铀盐中发现的，此后居里夫妇发现了钋和镭，并研究了其放射性，从此开始研究原子核自发衰变。到目前为止，人们已认识了近 2000 种核素，其中绝大多数核素是不稳定的，会自发地放出射线，由一种状态的原子核变为另一种状态的原子核，这种现象称为原子核衰变或放射性衰变。试验发现，天然放射性元素衰变的类型有 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变三种。

α 衰变是从原子核中自发地放出 α 射线的过程， α 粒子就是氦原子核，所以 α 射线在磁场或电场中会发生偏转。

β 衰变是从原子核中自发地放出 β 射线的过程， β 射线就是高能电子流，在磁场或电场中也会发生偏转，但偏转方向与 α 射线相反。

γ 衰变（或 γ 跃迁）是原子核从激发态自动跃迁到较低能态时放出 γ 射线的过程， γ 射线就是高能光子流，在磁场或电场中不发生偏转。

3.1.4.2 γ 射线概述

1897 年，卢瑟福发现，铀放出的射线由两种成分组成：一种是易被吸收的射线，称为 α 射线；另一种是穿透性强的射线，称为 β 射线。同时他还根据试验预言，可能存在一种穿透能力更强的射线，这就是后来发现的并由他命名的 γ 射线。1900 年，法国科学家 P. U. 维拉德 (Paul Ulrich Villard) 将含镭的氯化钡通过阴极射线，从照片记录上看到辐射穿过 0.2mm 的铅箔，至此发现 γ 射线。

γ 射线是一种比 X 射线波长更小的电磁波，与 X 射线一样能穿透物质，使胶片感光，

使气体电离或杀死生物细胞等。其除可应用于材料、产品的工业射线检测外，还可应用于许多领域，如活化分析、计量、医学诊断与治疗等。

γ 射线是放射性同位素经过 α 衰变或 β -衰变后，在激发态向稳定态过渡的过程中从原子核内放出的。X 射线与 γ 射线从本质和性质上讲没有区别，只是产生方式有所不同：X 射线通过高速电子轰击金属物质原子而产生，因此其强度和能量都能控制与调节； γ 射线则与 X 射线完全不同，其是放射性原子核在衰变之后放出来的，因此 γ 射线的能量和强度是无法通过仪器设备进行控制和调节的。

3.1.5 X 射线与 γ 射线在无损检测应用中的比较

3.1.5.1 X 射线与 γ 射线的性质

X 射线与 γ 射线的性质有：

- ① 不可见，在真空中以光速直线传播，本身不带电，不受电场和磁场的影响；
- ② 具有波粒二象性；
- ③ 在媒质界面上只能发生漫反射，而不能像可见光那样发生镜面反射；
- ④ X 射线、 γ 射线的折射系数非常接近 1，所以折射方向改变不明显；
- ⑤ 可以发生干涉和衍射现象，但只能在非常小的光栅（如晶体组成的光栅）中发生；
- ⑥ 在穿透物质的过程中，会与物质发生复杂的物理作用和化学作用，如电离作用、荧光作用、热作用及光化作用等；
- ⑦ 具有可穿透物质和在物质中衰减的特性；
- ⑧ 具有辐射生物效应，能够杀伤生物细胞、破坏生物组织。

工业无损检测应用 X 射线、 γ 射线进行探伤，主要应用以上第①~⑦条性质，第⑧条性质是在使用 X 射线、 γ 射线进行探伤时需要防护的依据。

3.1.5.2 X 射线与 γ 射线的对比

X 射线与 γ 射线在无损检测应用中的比较如下。

① X 射线和 γ 射线的产生机理不同。X 射线是由高速运动的电子被阻遏时的跃迁产生的， γ 射线是由放射性同位素在自发衰变时原子核能级之间的跃迁产生的。

② X 射线可通过调节管电压、管电流来调节射线的能量与透照厚度；而 γ 射线的能量只取决于源的种类，对于同种源来讲射线能量和穿透能力一般是固定的。

③ 与 X 射线相比， γ 射线的波长更小，穿透能力更强。但是物质对 γ 射线的吸收要比 X 射线弱，所以用 γ 射线拍出的底片的对比度小。

④ γ 射线源的焦点就是放射性同位素的几何尺寸，所以其焦点通常比 X 射线机的焦点大，得到底片的几何不清晰度较高。

⑤ γ 射线源发出的射线在整个空间中都有，而 X 射线机，即使是周向机也只有一个环周上有射线。所以对于大型容器，尤其是球形容器， γ 射线可以一次透照整个容器，在这

种情况下，其效率比 X 射线机的效率高。

⑥ X 射线机受电力支配，而 γ 射线源无须电源，无须冷却，所以对于缺少电源、自来水的现场工地， γ 射线比 X 射线更加方便，更因为 γ 射线源比一般 X 射线机小巧，所以对一些形状特殊的试件，用 γ 射线探伤可显示出其更好的优越性。

⑦ γ 射线设备不能随意关闭，与 X 射线机相比，在安全因素上对环境污染与操作方面、防护与管理上的要求也更高。

⑧ γ 射线照相得到的射线底片的灵敏度和清晰度都远不及 X 射线照相，所以现在常规使用的仍然是 X 射线照相。

3.1.6 中子射线

中子是构成原子核的基本粒子，中子射线是由某些物质的原子在裂变过程中逸出的高速中子产生的。中子射线不是电磁波，具有巨大的速度和强穿透能力，与 X 射线和 γ 射线相比有很大的不同之处。通过前几节的介绍可知，X 射线由 X 射线机产生， γ 射线由放射性原子核产生，中子则通过原子核反应产生。中子源通常有以下几种。

① 放射性中子源。放射性中子源是利用放射性核素衰变时放出的一定能量的射线轰击某些靶物质，发生核反应而放出中子的装置。由于激发的射线不一样，其又分成 α 放射性中子源、光中子源和自发裂变中子源。

② 加速器中子源。加速器中子源利用各种带电粒子的加速器加速某些粒子，如质子和氘等，用其轰击物质的原子核并产生中子。这种中子源的特点是在较广阔的能区获得单能中子。

③ 反应堆中子源。反应堆中子源利用重核裂变，在反应堆内形成链式反应，不断地产生大量的中子。这种中子源的特点是中子通量大，谱形比较复杂。反应堆中子源的强度用每秒进入某一截面单位面积上的中子数来表示，称为中子通量。反应堆中子源是强度较大的一种中子源，应用于中子照相检测技术，优点是照相速度快、质量好；缺点是不可移动，运行技术较为复杂，需要较高的建造、运行和维修费用。反应堆中子源是目前中子射线照相装置中应用最广泛的一种中子源。

④ 中子管中子源。中子管中子源属于加速器中子源的另一种形式。中子管中子源结构紧凑、体积小、便于携带、使用方便，已成为一种很实用的中子源。

3.2 X 射线的物理特性

3.2.1 X 射线的波动性和粒子性

X 射线是一种电磁波，与无线电波、可见光和 γ 射线等无本质上的区别，只是波长不同。X 射线在传播过程中发生的干涉、衍射现象突出地表现了波动性，即 X 射线具有一定的波长 λ 和频率 ν 。同时，X 射线在空间传播时也具有粒子性，即 X 射线是由

大量以光速运动的光子组成的。在 X 射线与物质相互作用交换能量时，就突出地表现了粒子性。

3.2.2 X 射线的产生及技术参数

X 射线是在电场中被加速的高速电子撞击到高原子序数材料的靶上，由于电子急速减速而辐射的电磁波（轫致辐射）。

图 3.3 是一种金属陶瓷 X 射线管，阴极是产生热电子的钨丝，钨丝装在一个电子聚焦杯中，使电子在 X 射线管的高压电场作用下形成一个良好的线束，打击到阳极的靶上。靶的材料一般为钨，其基座为高导热材料（如铜）并以循环的油或空气对靶冷却。由于高速电子束的能量只有百分之几转换成射线能量，大部分变成靶的热能，因此对靶进行冷却是十分必要的。阴极、阳极封装在电真空壳体之中。

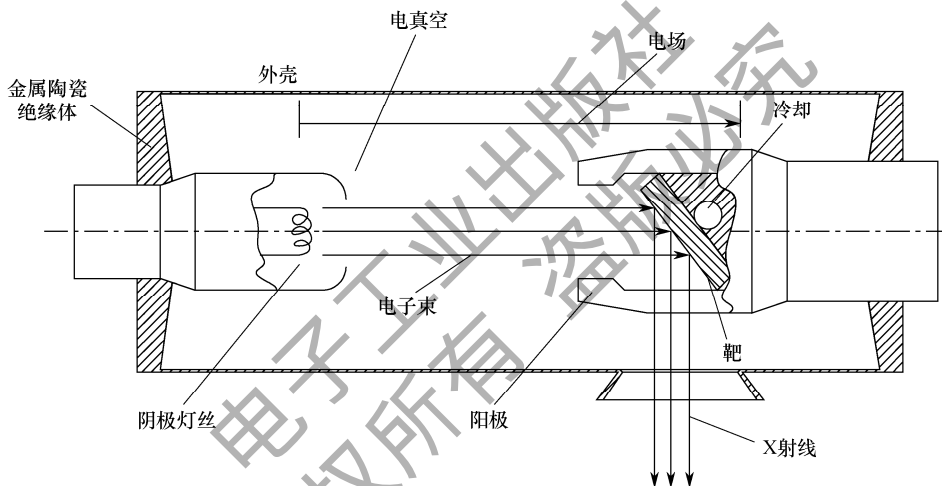


图 3.3 X 射线管结构图

X 射线管的主要技术参数如下。

① 管电压。管电压是加在 X 射线管的阴极、阳极之间的高压，提供使灯丝电子加速的电场，决定了打靶的电子速度 v 和产生射线光子的最大能量（对应最小波长） λ_{\min} ，所以管电压高，产生射线光子的能量也高。

② 管电流。管电流是指打到靶上的电子流，决定了打靶的电子数，进而决定了靶辐射的光子数。由于 X 射线管功率一定，因此管电流随管电压的增大而减小。

③ 射线焦点尺寸。射线成像基于点光源照射的投影影像，并非光学成像，因此从射线出射方向观察，靶上辐射的射线焦点尺寸越小，影像越清晰，故射线焦点尺寸是一个重要的参数，如图 3.4 所示。

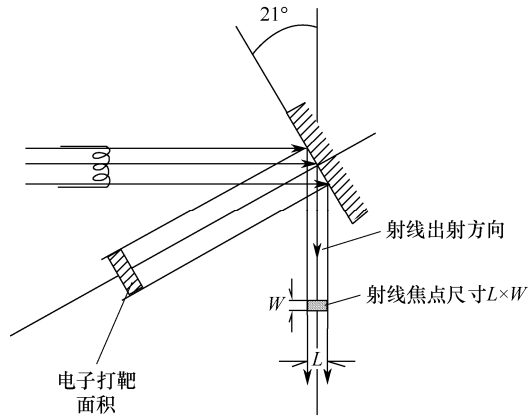


图 3.4 射线焦点产生示意图

3.2.3 X 射线谱

X 射线谱是描述 X 射线强度 I 与波长 λ 的关系曲线，由两部分构成：连续谱和标识谱（或称特征谱）。连续谱由波长连续变化的谱线构成，由电子的动能直接转换而来。标识谱由谱线分立的线状谱线构成，分立谱线所构成的 X 射线称为特征 X 射线，由电子的动能间接转换而来。

对于确定的阳极材料，当外加电压小于某一限度，即加速电子的动能小于某个数值时，阳极上只发射连续的 X 射线，其强度随波长连续变化；当外加电压超过某一限度，即加速电子的动能超过某一数值时，会在连续谱线的背景上叠加一些细锐的线状谱线，这种谱线可表征阳极材料的特征，故称标识谱。阳极材料不同，产生线状谱线所需的外加电压也不同。

图 3.5 (a) 所示为外加电压 $U=50\text{kV}$ 和 $U=20\text{kV}$ 时，阳极材料为钨的 X 射线谱，图 3.5 (b) 所示为外加电压 $U=35\text{kV}$ 时，阳极材料为钨的 X 射线谱。图中， K_α 、 K_β 为波长最短的 K 线系的谱线。对比可见，钨只有连续谱，而钨则在连续谱的基础上叠加两条标识谱。为得到钨的标识谱，需要将外加电压增至 70kV 以上。下面分别讨论连续谱和标识谱的一些特点。

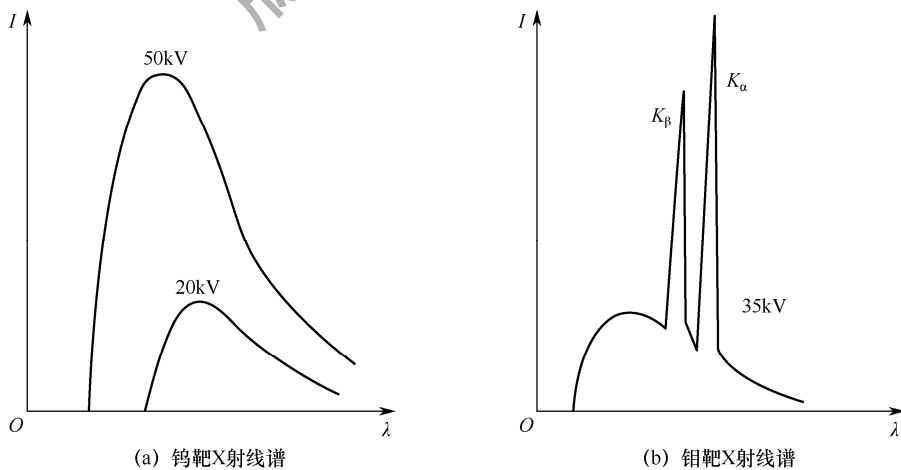


图 3.5 X 射线谱

3.2.3.1 X射线的连续谱

具有连续波长的 X 射线强度随波长连续变化的曲线为 X 射线的连续谱。连续谱的一个显著特点是在不同管电压下的连续谱的短波端都有一个突然截止的极限波长 λ_{SWL} ，称为短波限，短波限只与 X 射线管的外加电压有关，而与电流强度及阳极靶材无关。

用量子理论很容易解释短波限 λ_{SWL} 的问题，即如果在外加电压 U 的作用下，击靶时电子的最大动能是 eU ，极限情况是电子在一次碰撞中将全部能量转换为一个光子 $E = eU = h\nu_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{SWL}}}$ ，这个具有最高能量的光子的波长就是短波限 $\lambda_{\text{SWL}} = \frac{hc}{eU}$ ，其中， e 是电子电荷， h 是普朗克常量， c 是真空中光速。

图 3.6 所示的 3 幅图分别分析了管电压、管电流和阳极靶原子序数对 X 射线连续谱的影响。从图 3.6 (a) 可以看出，当管电压升高（管电流、阳极靶原子序数不变）时，各波长的 X 射线强度增大，短波限 λ_{SWL} 和强度最大值对应的波长 λ_m 减小；从图 3.6 (b) 可以看出，当管电流增大（管电压、阳极靶原子序数不变）时，各波长的 X 射线强度增大，短波限 λ_{SWL} 和强度最大值对应的波长 λ_m 不变；从图 3.6 (c) 可以看出，当阳极靶原子序数增大（管电压、管电流不变）时，各波长的 X 射线强度增大，短波限 λ_{SWL} 和强度最大值对应的波长 λ_m 不变。连续谱中强度最大值对应的波长 λ_m 与短波限 λ_{SWL} 之间有如下近似关系：

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \lambda_{\text{SWL}}。$$

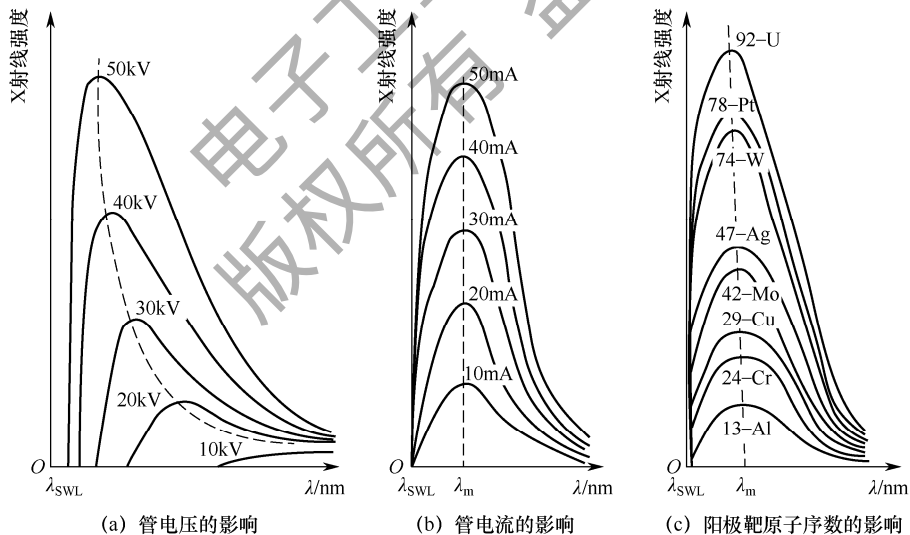


图 3.6 管电压、管电流和阳极靶原子序数对 X 射线连续谱的影响

3.2.3.2 连续谱的 X 射线强度

连续谱的 X 射线强度 I 与管电流 i 、管电压 U 、阳极靶原子序数 Z 存在如下关系： $I = \alpha i Z U^2$ ，其中， $\alpha = 1.1 \times 10^{-9} \sim 1.4 \times 10^{-9}$ 为常数。此式说明，连续谱的 X 射线强度与管电流 i 、阳极靶原子序数 Z 及管电压 U 的平方成正比。管电压增大时，虽然电子数目未变，