

无损检测培训参考教材

射线检测

中国无损检测学会 编译

机械工业出版社

目 录

编译者的话

1	原 理	1
1.1	X射线、 γ 射线的性质、作用及测试	1
1.1.1	X射线及 γ 射线的性质	1
1.1.2	X射线及 γ 射线的衰减	5
1.1.3	射线的测试和测试仪器	8
1.2	射线的产生	11
1.2.1	X射线的产生	11
1.2.2	γ 射线的产生	15
2	检测技术、检测仪器、辅助器材	20
2.1	概述	20
2.1.1	成象技术原理	20
2.2	X射线胶片、增感屏及其它辅助器材	23
2.2.1	X射线胶片的结构、特性及暗室处理	23
2.2.2	增感屏和暗盒	29
2.2.3	辅助器材	31
2.3	仪器设备	33
2.3.1	X射线机的结构和使用	33
2.3.2	γ 射线仪的结构和使用	36
2.4	检测技术	41
2.4.1	合理的检测技术	41
2.4.2	曝光表的使用	45
2.5	焊缝的射线检测	48
3	检测信息、分析评定、评定标准	55
3.1	影象质量和影象品质	55
3.1.1	影象质量	55
3.1.2	影象品质及透度计	57

3.2	分析评定	61
3.2.1	数据的记录	61
3.2.2	底片评定原则	63
3.2.3	缺陷的评定	66
3.3	其它无损检测法	68
3.3.1	超声检测法	68
3.3.2	磁粉检测法	69
3.3.3	涡流检测法	69
3.3.4	着色渗透检测法	69

附录:

1.	射线检测习题选集第一部分	70
2.	射线检测习题选集第二部分	84
3.	西德工业标准选	97
DIN 54111-1	金属材料焊缝的X和Y射线透照技术	97
DIN 8524-1	金属材料熔焊接头的缺陷分类、名称、说明	112
DIN 54109-1	金属材料射线照相的影象品质术语、透度计、影象品质因数	136
DIN 54109-2	金属材料射线照相的影象品质等级划分的准则	141
DIN 54116-1	射线透照底片的观察 观察条件	144
DIN 54116-2	射线透照底片的观察 观察灯	146
DIN 54112	X射线和Y射线用胶片、增感屏、暗盒尺寸	152

1 原 理

1.1 X 射线、 γ 射线的性质、作用及测试

1.1.1 X射线及 γ 射线的性质

X射线是被高速电子撞击阳极靶，由X射线管或其它相似的器件产生出来的；而 γ 射线则是放射性物质在其衰变过程中产生的。X射线和 γ 射线本质上没有什么不同，区别仅在于它们的产生和形成的方式有所不同而已。

X射线和 γ 射线同属于电磁辐射范畴，例如可见光和红外线就是我们所熟悉的这个范畴的不同类型。包括X射线和 γ 射线在内的这些不同种类的射线就它们的本质来说都是一样的，但它们各自又有明显不同的特性（如：可见度），而其原因只有一个，就是射线能量不同。

这里说的能量既不随射线强度（剂量率）也不随射线量（剂量）的大小而发生变化。可以用一个简单的例子加以说明：照相机里的胶片会由于曝光而发黑，但不会因无线电波作用而发黑，这就是能量的问题。同种胶片在室内照相时发黑的程度较之在露天照相发黑的程度要差一些（即感光不足），这就是强度不同造成的结果。而曝光时间长的胶片比曝光时间短的胶片更黑一些，这就是射线量不同的结果。

图1说明各类电磁波按其能级的不同而依次排列的简图。这种图表可以用几种不同的度量单位标出，而一般是以电子伏特(eV)为单位。为了说明射线的性质常用射线的波长来代替能量（射线同时具有波动辐射和粒子辐射的性质）。波长以一定的比例随能量的减低而增长。

除能量以外，用来表示X射线和 γ 射线性质的另一个量是射线强度，在射线检测中射线强度被称为剂量率，其单位为每小时的伦琴数，简称为R/h，还有一些单位是mR/h, R/min等等，它们之间的换算见表1。

射线射到材料上所产生的效果以射线量表示。射线照相的射线量称作剂量，它可以从X射线或 γ 射线在一定时间内作用于某材料的剂量率计算出来。即：

剂量 = 剂量率 $\times$ 时间

剂量单位为伦

琴，简称为R；还有其他一些单位如：mR, μ R等。

从图1可以看出X射线或 γ 射线是能量最高的射线。这类射

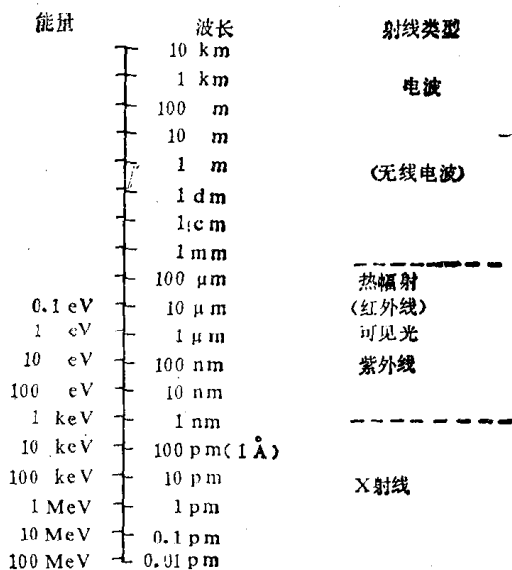


图1 各类电磁波

表1 剂量率的换算

剂量率	$\frac{\text{mR}}{\text{h}}$	$\frac{\mu\text{R}}{\text{S}}$	$\frac{\text{R}}{\text{h}}$	$\frac{\text{R}}{\text{min}}$	$\frac{\text{R}}{\text{S}}$
$1 \frac{\text{mR}}{\text{h}}$	1	0.28	0.001	0.000017	0.00000028
$1 \frac{\mu\text{R}}{\text{S}}$	3.6	1	0.0036	0.00006	0.000001
$1 \frac{\text{R}}{\text{h}}$	1000	278	1	0.017	0.00028
$1 \frac{\text{R}}{\text{min}}$	60000	16667	60	1	0.017
$1 \frac{\text{R}}{\text{S}}$	3600000	1000000	3600	60	1

线能够在一定程度上透过固体物质。这种穿透能力就是射线照相的基础。只有通过这类射线人们才能象观察透明的物体那样观察那些不透明的东西（如焊缝）。此外，还有一个值得重视的特点，就是它们是直线传播的。图2表示不同能量的X射线和γ射线的性质，一般用“软”，“硬”等字来简要地表示，它与穿透能力有直接的关系。软射线穿透能力小，硬射线穿透能力强，穿透能力随能量的升高而增大。透过工件射出的射线只是射入工件射线的一部分，也就是说，射线能变小了，而它失掉的那部分射线能就是射入工件和射出工件的射线能之间的差值。用专业术语来讲就是射线“衰减”。而这种衰减对于射线检测恰是一种很重要的特性。衰减是由于射线在物质内部被吸收或散射造成的。对于X射线或γ射线当它们被吸收之后就完全不存在了。而射线的散射则可以用可见光来作比喻，当可见光碰上某种物体时，只要没有射入物体内部，它就会向四面八方发生散射。正是由于这种散射的光才使人们能从各个方面看到这个物体。X射线或γ射线中的一部分也会在它们所接触物体的那个部分发生散射，但这不仅仅限于物体表面，而且如上所述，由于它们具有穿透能力，因此也能在物体内部发生散射。这种散射线所具有的能量一般比原来射线所具有的能量要低一些，它在工业射线照相技术中是人们最不希望出现的，但又是不可避免的现象，为此，不得不采取各种复杂的解决措施。

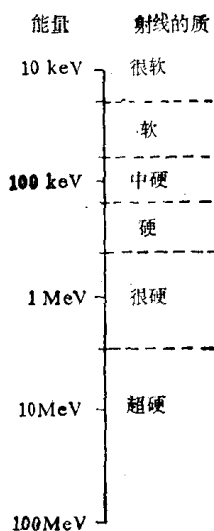


图2 不同能量的X射线及γ射线的“硬度”标志

X射线和γ射线以其本身巨大的能量把它们所接触的物质电子从原子的电子轨道上分离出来（图3）。从一个原子的电子轨道上分离出一个或数个电子（带负电）后，就剩下一个带正电的被称作正离子的剩余部分。这种过程叫作电离。通过这种

分离过程可使气体等非导体变为导体，其导电能力随裂变过程的次数增多而变大。由于这种电离作用是由射线的强度决定的，所以就可证实射线的存在并测出其强度。由于X射线和 γ 射线具有产生电离作用的能力，因此它们也被称为“电离射线”。

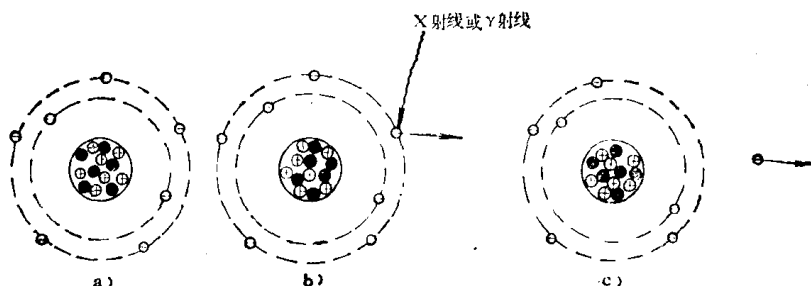


图3 原子的电离过程

a) 电离前 中性原子（内：原子核；外：电子及其轨道） b) 电离时 X射线或 γ 射线把电子从电子轨道上分离出去 c) 电离后 原子不再呈中性而变成离子，失去一个或几个电子

电离是射线与物质作用时所产生的一些现象的关键，其中最重要的是荧光作用、照相效应和生物效应。顾名思义，荧光是在X射线或 γ 射线作用下的一种可见光（光发射），当然，只能从少数物质中看到这种现象，例如硫化锌（ ZnS ）或钨酸钙（ CaWO_4 ）。电离辐射可以转换为光，这一现象不仅可用来进行X射线透照而且也可用于射线的测量。

X射线和 γ 射线（经过电离作用）也能产生化学效应，如有机物的变化或毁坏以及玻璃的变色（老化的X射线管）。最重要的作用之一是对照相感光乳剂的影响，如同光的作用一样，X射线和 γ 射线能使感光乳剂发黑。这种照相感光作用是射线照相的基础。

射线对生物细胞、尤其对人体细胞的影响也应重视。这种生物效应以各种不同的方式，主要是以造成危害的方式表现出来，因而不得不采取防护措施。

综上所述，可概括如下：

X射线和γ射线的特性是通过以下两点表现出来的:

- 1) 能量;
- 2) 剂量率。

其效能可以借助剂量以数字来说明。

对射线检测来说最重要的性能是:

- 1) 直线传播;
- 2) 穿透能力;
- 3) 衰减——吸收、散射;
- 4) 电离——荧光作用、光化学效应、生物效应。

其中穿透能力和衰减关系密切,而衰减是由吸收和散射造成的。

1.1.2 X射线及γ射线的衰减

X射线和γ射线具有穿透一切物质的能力,就是说射入物体的射线有一部分能够从物体的另一面穿透出来。这一部分射线强度的大小一方面取决于物体的厚度、密度及其化学成分;更主要的是取决于射线能量的大小。根据这些就可以进行区分。低能(即穿透能力差的)为软射线;高能(即穿透能力强的)为硬射线。厚度和原子序数小的物质,如有机物、塑料和轻金属易穿透;而厚度和原子序数大的物质,如铅和其它重金属就难以穿透。射线的能量愈低,物质的厚度、密度和原子序数愈大,则射线的衰减也就愈大,即其穿透能力愈小。完全不能穿透的物质是没有的。

可以用所谓半衰减层厚度(HWS)来表示衰减的情况。这种半衰减层厚度是指当射线透过某物质时,它的强度被减少到原射线的一半时所需的厚度(图4)。这时穿透度 $N = 1/2(50\%)$ 。由于射线的衰减

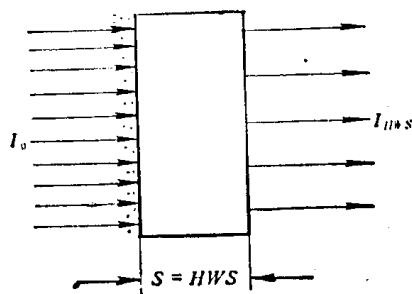


图4 半衰减层概念示意

HWS—半衰减层厚度 I_0 —投射射线强度(材料厚度=零) I_{HWS} —透过射线强度(材料厚度=HWS)

是由能量的高低所决定，所以一定材料的半衰减层厚度也必定取决于射线能量的高低。亦即能量越高，半衰减层愈厚。所以，一定的射线能量就相应地有一个半衰减层厚度。

现在我们可以设想一下由叠在一起的几个半衰减层组成的材料，其中每一个半衰减层让入射的射线透过一半，（见图5）。假设射入物体前的射线强度 $I_0 = 100\%$ ，那么，透过第一个半衰减层后 $\left(N = \frac{1}{2}\right)$ 就剩下50%；透过第二个半衰减层就剩下25% $\left(N = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}\right)$ ；透过第三个半衰减层后就剩下12.5%

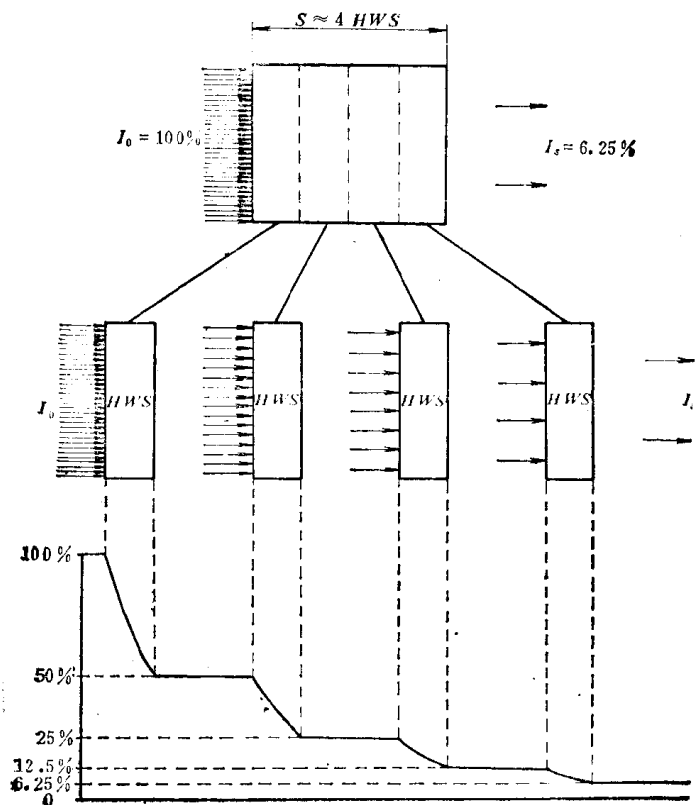


图5 按衰减层对一工件作假想，说明衰减分布情况

$\left(N = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8} \right)$ 。可以这样依次类推。因此可以看出衰减程度和材料的厚度有着很明显的关系。

严格地说，这种看法只适用于一定能量的射线。一般说来，X射线管的射线总是由不同能量的射线混合组成的（即连续X射线谱）。

当然也可以对这种混合射线定一个半衰减层厚度。但必须注意所透过的射线能量在不同厚度上的分布与入射的原射线是不一样的，因为在一定厚度的条件下能量低的（软的）那部分要比能量高的（硬的）那部分衰减得更多，所以半衰减层厚度只适用于其能量的平均值。因此，对于这样一种连续X射线来说，工件后面射出的射线总要比工件前面入射的射线为硬。这种情况称作射线的硬化或射线的过滤。硬化的结果是第二个半衰减层必须衰减一个更硬的射线，因而它也就必然比第一个半衰减层更厚一些（这样就必须区分第一、第二半衰减层之间的不同）。但厚度大到一定程度之后，许多个半衰减层厚度也就保持不变了（见图6）。

要估算较厚材料的衰减时，如果只用半衰减层就常常感到很麻烦。因而往往还要采用十分之一衰减层（ZWS），其穿透度 N

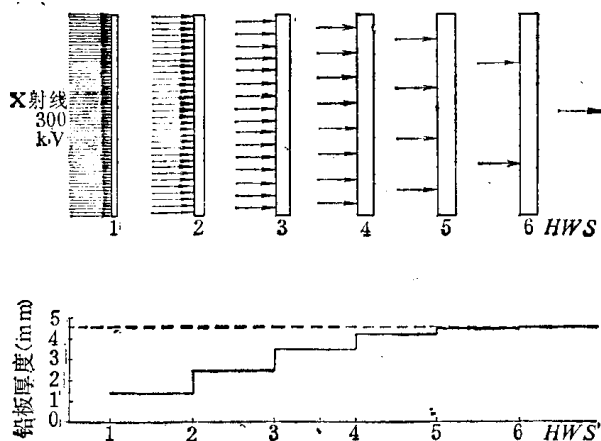


图6 半衰减层厚度随着射线硬化而增加的情况（例如：对于300kV的X射线来说，从第5个HWS起厚度就不变了）

$=1/10$ (10%)。十分之一衰减层厚度大约是半衰减层厚度的3.3倍。但这个换算值还需取决于射线能量的大小。

如1.1.1所述,射线强度的衰减是由射线被吸收和散射引起的。射线被吸收时,射线由一种形式的能量转换成另一种形式的能量,例如转换成热能或光能。被透射的材料厚度、密度和原子序数愈大,则吸收也愈大;而射线的能量愈大则吸收就愈小。所谓散射也就是射线传播的方向发生变化而能量减弱。为了区别散射射线和没有散射的射线就得使用“原射线”这个概念。“原射线”就是指工件前面、工件内部和工件后面直接从射线源发出投射到工件这个方向的所有射线。其它射线都是散射射线(图7)。散射射线,也就是射向四面八方的射线。能量较低的射线其散射现象尤为明显。

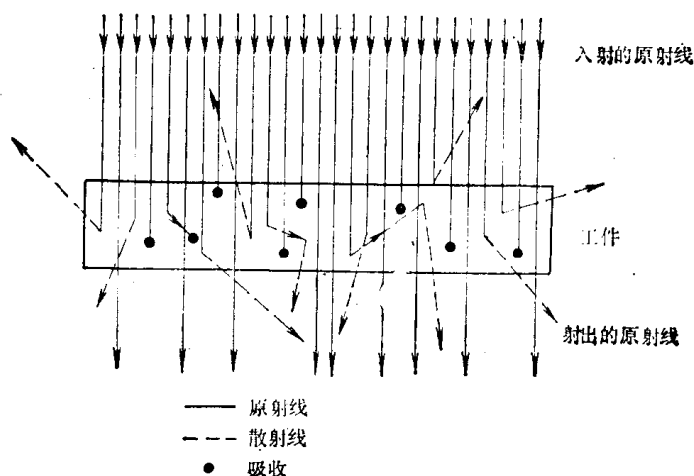


图7 由于散射线形成而出现的射线衰减

工件材料愈厚,出现的散射射线的强度愈大。所以遇到材料厚度大的、射线能量处于中、小程度的情况时,散射线的影响就更不能忽视。

1.1.3 射线的测试和测试仪器

人们虽然不能直接觉察到X射线和γ射线的存在,但是,充

分利用说明射线作用存在的那些现象如使气体电离、光化学效应和荧光作用等，还是能找到测试射线的方法的。用这些方法不仅能显示射线是否存在，而且还能以数字表示出射线强度（即剂量率）或射线量（即剂量）的大小。首先我们要讨论使用电离效应和化学作用的剂量测定法。因为剂量的测定对射线防护具有特别重大的意义。在射线检测中采用自动曝光装置（曝光继电器）是相当重要的，因为在进行X射线照相时就是用这种自动曝光装置来决定剂量的大小的。当射线达到一定值时，这种自动装置使X射线管自动断电。

以光化学为基础的剂量测定的最简单方法是对一张X射线底片进行黑度测量，因为，射线剂量和底片黑度之间有一定的关系。这种测量仪器就叫作底片剂量计。一般是用它来对长期工作人员接受的剂量进行测试，其测试时间通常为一个月，测试范围在 $0.04R$ 到 $0.05R$ 之间。

根据另一种电离效应制成所谓的固体剂量计（热激发光剂量计，光激发光剂量计）。在这种剂量计里有一种类似玻璃的物质，受到照射时，其结构就会发生变化。用一些特殊的计值法可以测得剂量结果。固体剂量计目前尚处于研制阶段，就其性能来说，在应用方面，是很有前途的。

另一种测试底片或人员所受剂量的仪器就是一种叫作标杆式或笔式剂量计，它是带有指示器（静电计）的电容器盒。顾名思义，它和电容器有一定关系。这种电容器的负荷状态是可以测得出来的。当射线透过这个电容器时，电容器片之间的空气发生电离（使导电），以致产生与原剂量相应的电容器放电，放电程度可在标出 R 或 mR 的指示器中读出。用这种剂量计可随时读出剂量值。原则上，这类仪器必须随时充电（满载时指针在0位）。

剂量计的测量范围各不相同，通常指示范围为 $0 \sim 200mR$ 。此外，也有一些测量范围很大的仪器（所谓事故剂量计）。值得注意的是，一个绝缘性好的电容器即使在没有射线作用的情况下也会随时有一些放电现象（自动漏电），这在长时间的测试中会导

致指示偏高。

剂量率的确定一般需要较多的费用还要接上电源（交流电或电池）。剂量率的测试除了对射线防护有它的重要性之外，对于射线检测也有很大的意义，如对半衰减层的确定、对X射线机效率的检验或对 γ 射线放射量的控制等。在特定的情况下它也能由测得的剂量来确定剂量率。就是把在一定地点一定时间里所得到的剂量除以这个时间。

电离室装置(见图8)

和上述仪器大体相似。但电容器片并不是一次充电，而是和一个直流电源接通。正常情况下，电容器断开直流回路，但通过电离而产生电荷交换时，就形成和射线强度成比例的电流，这种电流很容易测出（以 R/h 或 mR/h 作刻度）。根据这个原理工作的较为简单的仪器，专用来报警。当超过规定的剂量率时就发出音响信号（“袖珍报警器”）。

当施加于电容器的电压提高到一定值时（1000V）就能使电离效果增强。这样，在结构上作了一些改变的电离室就称作计数管，也称盖格计数管或盖格-缪勒计数管。最常见的剂量率测量仪，尤其是那些较小的测量仪就按这个原理进行工作，在测量较大剂量率的情况下，灵敏度很高。但是，当测量较小的剂量率时，读数就不够正确，个别甚至非常不稳定。

另一种灵敏度很高的装置是利用荧光作用的闪烁计数器，这种光的发射和电离作用与剂量率有一定的关系。其测量机构是一块闪烁晶体（或称荧光晶体）。它发射的光转换成电流，（原理跟曝光表相似，但更灵敏些），因而就可测得射线剂量值。闪烁

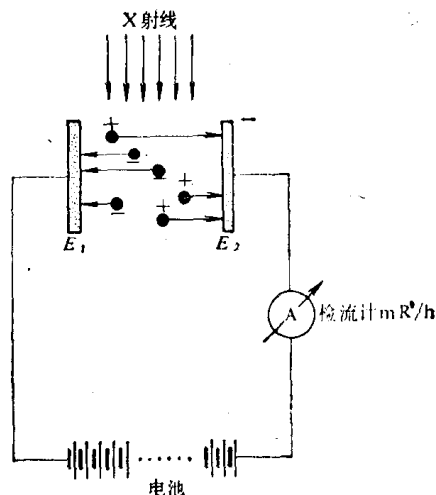


图8 电离室-剂量计的原理

计数器主要用于科学研究。

值得提及的还有标准荧光屏,其亮度同样也取决于剂量率。在暗室里进行观察,它比其它测量装置(X射线胶片也能进行这种工作)更有助于测定或者至少可以找到小的测试范围(防护墙上的射线泄漏、防护罩和其它地方的射线泄漏等)。

1.2 射线的产生

1.2.1 X射线的产生

X射线是由X射线管产生的。它的原理是:一群高速运动着的带电粒子(如电子)在其运动轨道上受到阻碍而突然被制止时,这些粒子就失去其动能,由于受阻其中一小部分动能转换成X射线,另外大部分动能转换成热。这种方式产生的X射线,其效率是很低的,因为只有总数的1%左右转换成X射线,而其余约99%的能量都转化成热了。

要在技术上实现这种规律性的转换,必须具备三个条件:
1) 产生电子; 2) 使电子高速运动; 3) 配置适当的障碍物以制止电子运动。为了产生电子,就要用一只灯丝变压器产生几伏灯丝电压,把一个绕得很紧的小型金属螺旋状灯丝加热到差不多白炽的程度(图9)。这时,螺旋状灯丝就开始发射电子。在离开灯丝一定距离处放上一片金属靶,在灯丝和金属靶之间加一个很高的直流电位差(从几万伏到几十万伏),将高压变压器的负极联到阴极(即螺旋状灯丝),正极联到阳极(即对面的金属靶片)。带负电的电子被阴极排斥而被阳极吸引,这样它们就从阴极冲向阳极,直到它们被制止而转化成X射线和热为止。由于会产生高热,阳极靶面必须选用高熔点金属,一般采用的材料是钨,而且,阳极还须加以冷却。同时,阳极的安装位置必须斜对电子运动的方向,以防止阳极上产生的X射线在发射X射线方向上造成不必要的减弱。为了防止电子和空气分子相互碰撞以致电子达不到阳极,必须把整个装置装在真空的玻璃管内,使阴极和阳极之间完

全保持真空状态。

电子集中撞击在被称作“实际焦点”的一个只有几平方毫米的很小范围内。由于其大小和X射线照相的影象的清晰度有关，所以它愈小愈好。由于阳极靶斜放，这时电子在阳极上所形成的实际焦点要显得小一些（射线发射方向大多垂直于电子运动方向）。实际焦点的投影就称为光学有效焦点。在射线检测中说的焦点通常就是指光学有效焦点。光学有效焦点随阴极构造的不同而有不同的形状。如螺旋状阴极就有圆形、椭圆形、矩形、条形。焦点大小从0.5毫米到5毫米。

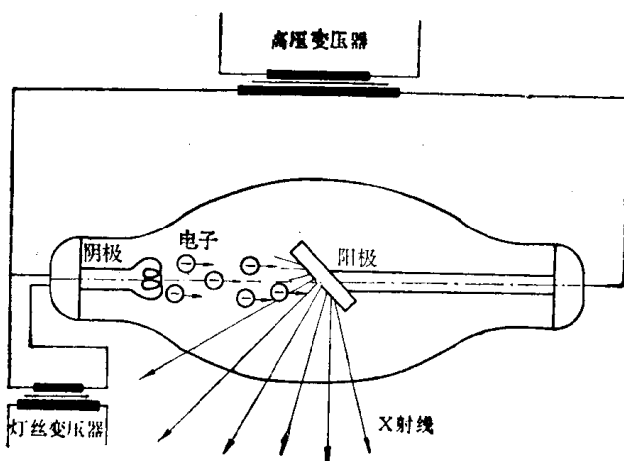


图9 X射线产生的原理

由于阴极和阳极之间的高压对电子撞击时的速度和能量起着决定性影响，所以人们就可以利用这点来调节所产生的X射线的能量及其穿透能力。电压增高，X射线的能量及其穿透能力就大。所产生的射线的强度、剂量率既取决于高压，也取决于电子流，即X射线管的电流强度。而这个电流强度是受螺旋状灯丝的加热电流控制的。X射线管的电压一般在50千伏到420千伏之间，而电流则在2到30毫安之间。人们一般用1毫安电流及最高电压时，在离焦点一米处的剂量率来说明一个X射线管的工作能力。这个数据称为剂量率常数；其单位为 $\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{mA}}$ 。例如：一个400千伏的设

备的典型值为 $300 \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{mA}}$ ，如果已知一个 X 射线管的剂量率常数

那么，也可用它来算出其它不同电流强度的剂量率，就是用剂量率常数乘以电流强度(毫安)。同样，也可用剂量率常数算出离开焦点不同距离的剂量率，即用距离的平方除以剂量率常数。剂量率常数单位中用的是 m^2 ，由此可见，必须用距离的平方值。另外用剂量仪测出的结果表明，射线源的剂量率是随其距离的增大而降低，而且是与距离的平方成反比。例如，电流强度为 10 毫安、距离为 1 米的 X 射线管的剂量率为 72R/h ；那么，距离为 2 米的剂量率只有其原剂量率的 $1/2^2$ ，即 $1/4$ ，亦即为 18R/h ；距离为 3 米时的剂量率为其原剂量率的 $1/3^2$ ，即 $1/9$ ，亦即为 8R/h ；距离为 10 米时的剂量率为原来的 $1/10^2$ ，即 $1/100$ ，亦即为 0.72R/h 。假如 X 射线管的电流强度为 5 毫安，则其剂量率的值减半，即距离为 1 米时是 36R/h ；距离为 2 米时是 9R/h ；距离为 3 米时是 4R/h ；距离为 10 米时是 0.36R/h 。这种规律性称为距离平方法则。

在一定电压下产生的射线能量，最大也只是相当于电子的动能那么大。因为一个电子在通过 100 千伏的电位差时所具有的能量为 100 千电子伏特，所以，产生的 X 射线能量至多也只有这么大。而这种最大能量事实上只是其中很小的一部分。大部分射线能量是比较小的。因而，就出现一种包括有一个极限能量 E_{max} 的分布能量，即所谓的连续光谱（见图 10a）。图 10b 表示在 X 射线管的电流变化时能量的分布没有什么变化，而只是强度发生了变化。图 10c 表示在 X 射线管的电压发生变化时，连续光谱发生迁移，同时，强度也有所变化。

实际上人们所说的 100 千伏 X 射线（管电压为 100 千伏）就是指具有 100 千电子伏 (keV) 的极限能量的那种光谱，但其有效能量（平均能量），却要低得多。

通常给 X 射线管一个直流电压，负极接到阴极，正极接到阳极。假如不用直流电压而用交流电压，那么，射线总是在半波情

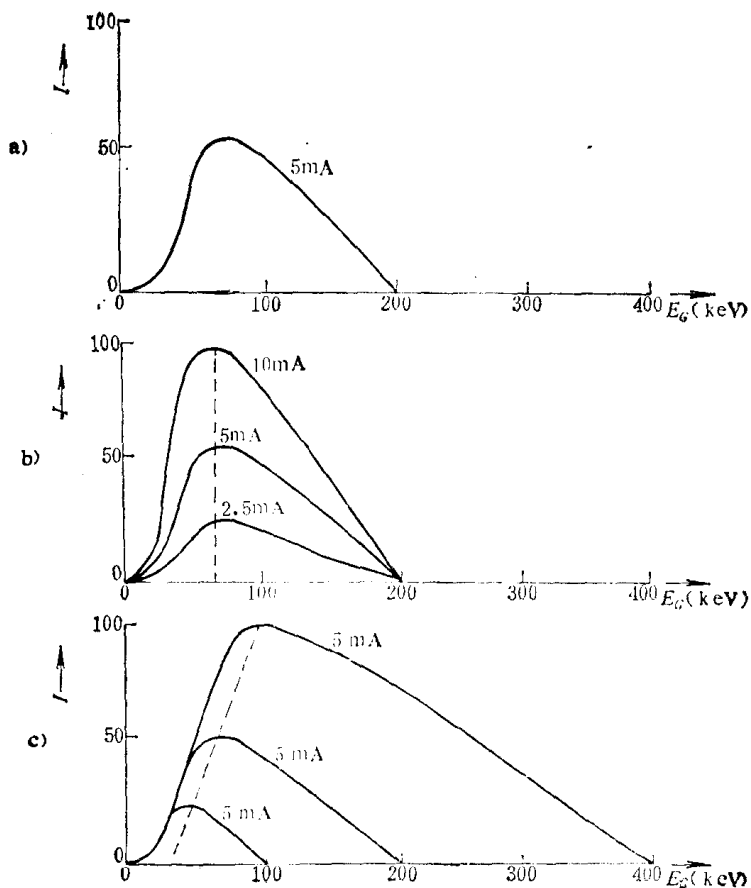


图10 X射线的能量分布(连续光谱)及其
随管电压和管电流而发生变化的情况

a) 在一定的管电压条件下的能量分布情况 b) 随管电流变化而出现的射线强度变化情况 (能量分布不变) c) 随管电压变化而出现的能量分布及强度变化情况

况下产生, 其射线量与完全用直流电压时相比就相对下降。尽管如此, 人们还是常常使用所谓的半波电路, 因为这是技术上最简易的方法 (体积小、重量轻)。此外也可使用成本较贵的直流电压电路。

因为在焦点大小和阳极容许负载这两方面的矛盾必须有一个解决办法, 所以就制成焦点大小可以选择的双焦点X射线管。细