



武汉理工大学

Wuhan University of Technology

无损检测技术

射线检测技术

机电工程学院测控系

主讲人：魏 莉

射线检测的物理基础

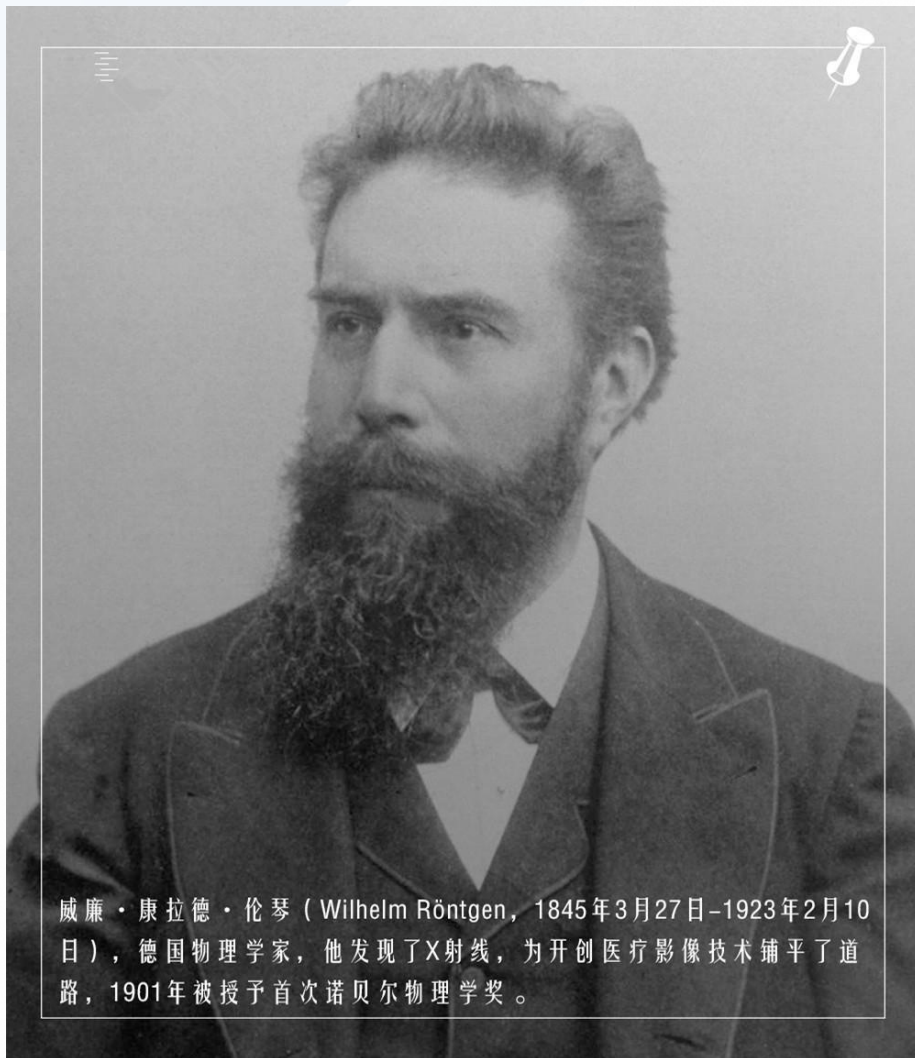
一、射线的种类和频谱

在射线检测中应用的射线主要是X射线、 γ 射线和中子射线。X射线和 γ 射线属于电磁辐射，而中子射线是中子束流。

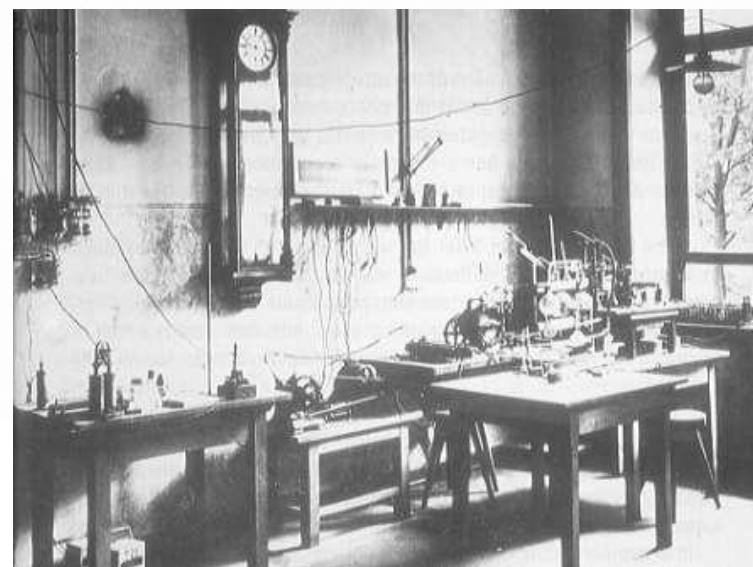
► X射线

X射线又称伦琴射线，是射线检测领域中应用最广泛的一种射线，波长范围约为0.0006 ~ 100 nm。在X射线检测中常用的波长范围为0.001 ~ 0.1 nm。X射线的频率范围约为 $3 \times 10^9 \sim 5 \times 10^{14}$ MHz。

射线检测的物理基础

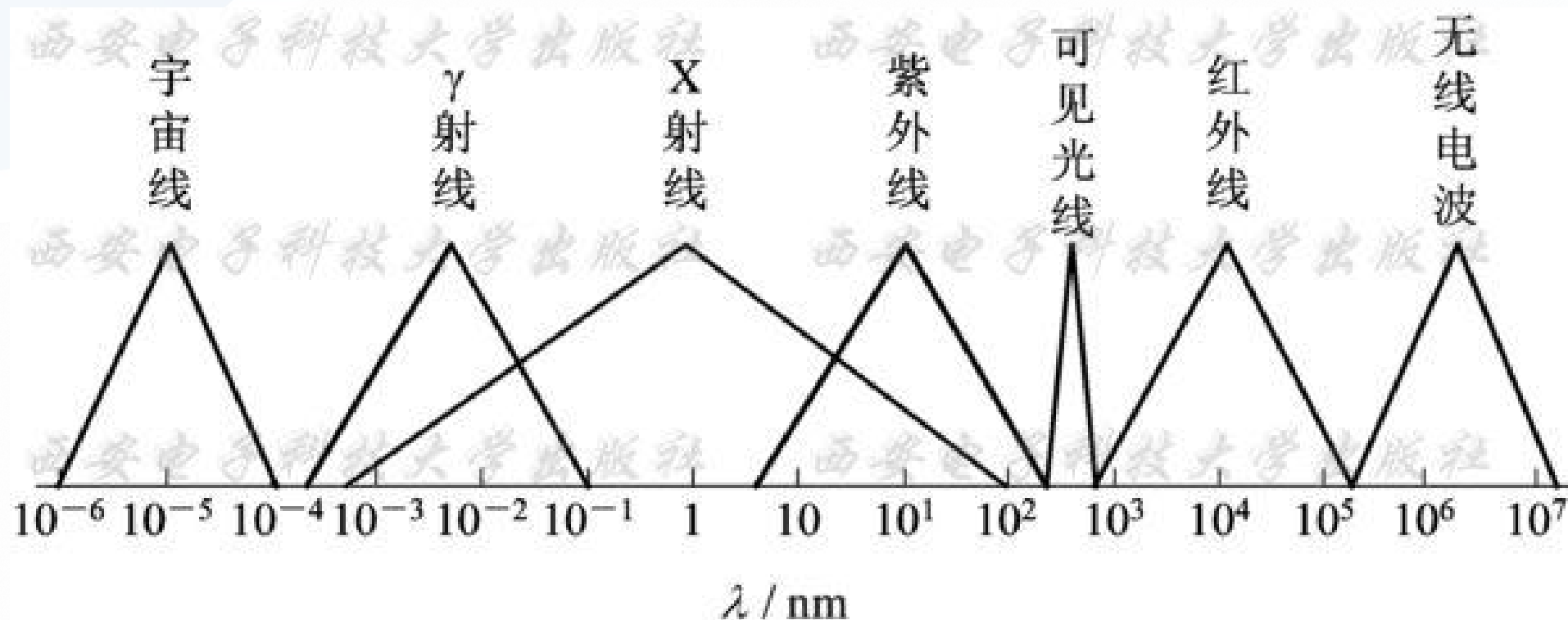


伦琴夫人的手骨X光照片



伦琴发现X射线的实验室

射线检测的物理基础



射线的波长分布

射线检测的物理基础

► γ 射线

γ 射线是一种波长比X射线更短的射线，波长范围约为0.0003 ~ 0.1 nm，频率范围约为 $3 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{15}$ MHz。

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 γ 射线常被用来对厚度较大和大型整体工件进行射线照相。

射线检测的物理基础

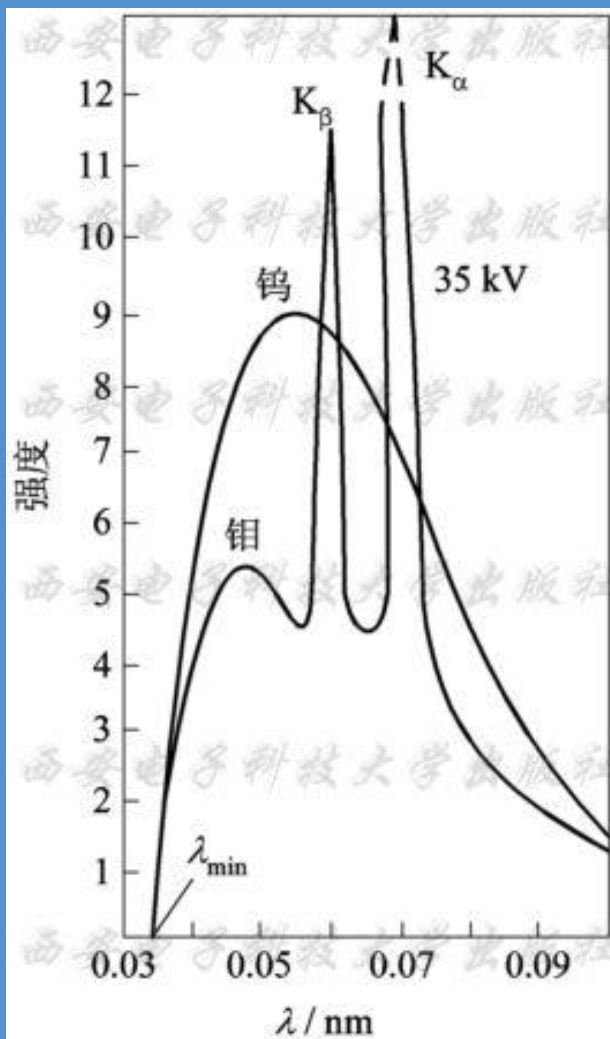
► 中子射线

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高速中子所产生的。

工业上常用**人工同位素**、**加速器**、**反应堆**来产生中子射线。在无损检测中中子射线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。

射线检测的物理基础

钨与钼的X射线谱



二、X射线的产生

X射线是一种波长比紫外线还短的电磁波，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。它能使一些结晶物体发生荧光、气体电离和胶片感光。X射线通常是将高速运动的电子作用到金属靶(一般是重金属)上而产生的。

射线检测的物理基础

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。

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。

射线检测的物理基础

(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} ，且有

$$\lambda_{\min} = \frac{1.24}{U} \quad (\text{nm})$$

式中： U 为X射线管的管电压，单位为kV。

射线检测的物理基础

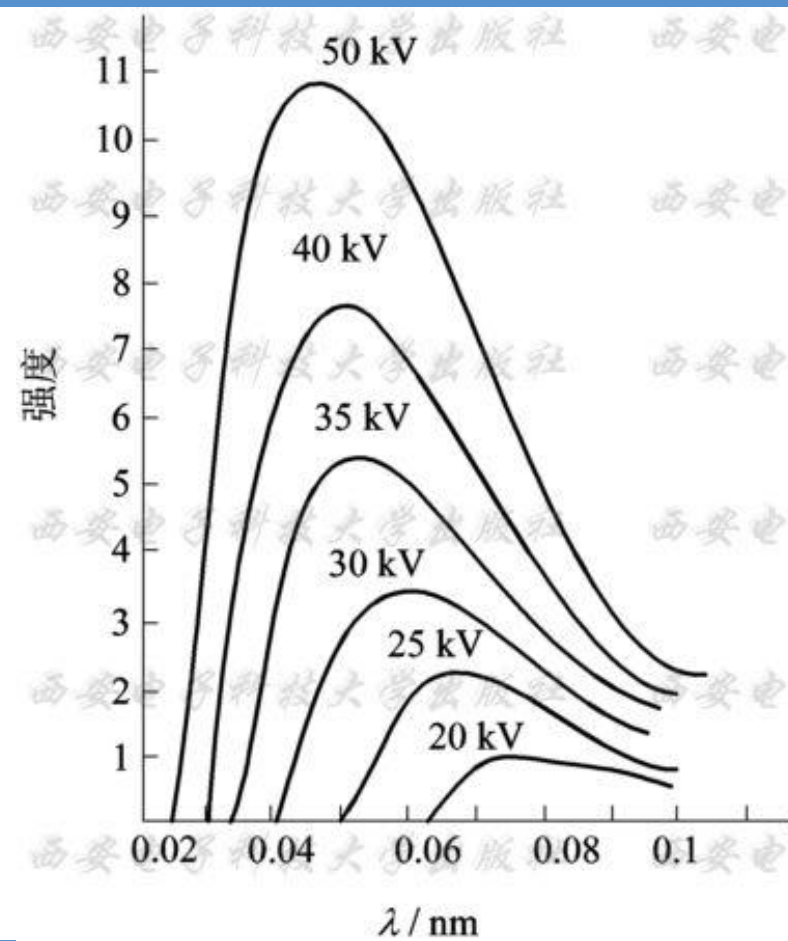
(3) X射线管的效率为

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

式中： $P=\alpha ZIU^2$ 为连续X射线的总功率； $P_0=IU$ 为输入功率； Z 为阳极的原子序数； U 为管电压，单位为kV； α 为常数，约等于 $1.1-1.4 \times 10^{-6}$ 。

射线检测的物理基础

(4) 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 λ_{\min} 愈向短波方向移动，如图所示。



不同管电压下钨靶连续X射线

射线检测的物理基础

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，高速运动的电子到达阳极靶时将产生连续X射线。如果电子的动能达到相当的数值，可足以打出靶原子(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。

这种X射线与靶金属原子的结构有关



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。

射线检测的物理基础

3

射线的主要特点

- (1)真空中光速直线传播，不受电场磁场影响
- (2)具有波粒二象性
- (3)在界面处发生反射、折射，但是与可见光有很大区别
- (4)可发生干涉、衍射现象，但只在孔很小时才能观察到
- (5)人眼不可见，但具有穿透性
- (6)射入物体时，会发生复杂的物理化学作用
- (7)具有辐射生物效应

射线检测的物理基础

三. 射线通过物质的衰减定律

1

射线与物质的相互作用



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他原子；此外，还有少量的汤姆逊效应。

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。

射线检测的物理基础

(1) 光电效应。

普朗克
概念

每束射线都具有能量为 $E=h\nu$ 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，若撞击时光子释放出全部能量，并将原子电离。

光电
效应

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，于是该电子可能又在物质中引起新的电离。

射线检测的物理基础

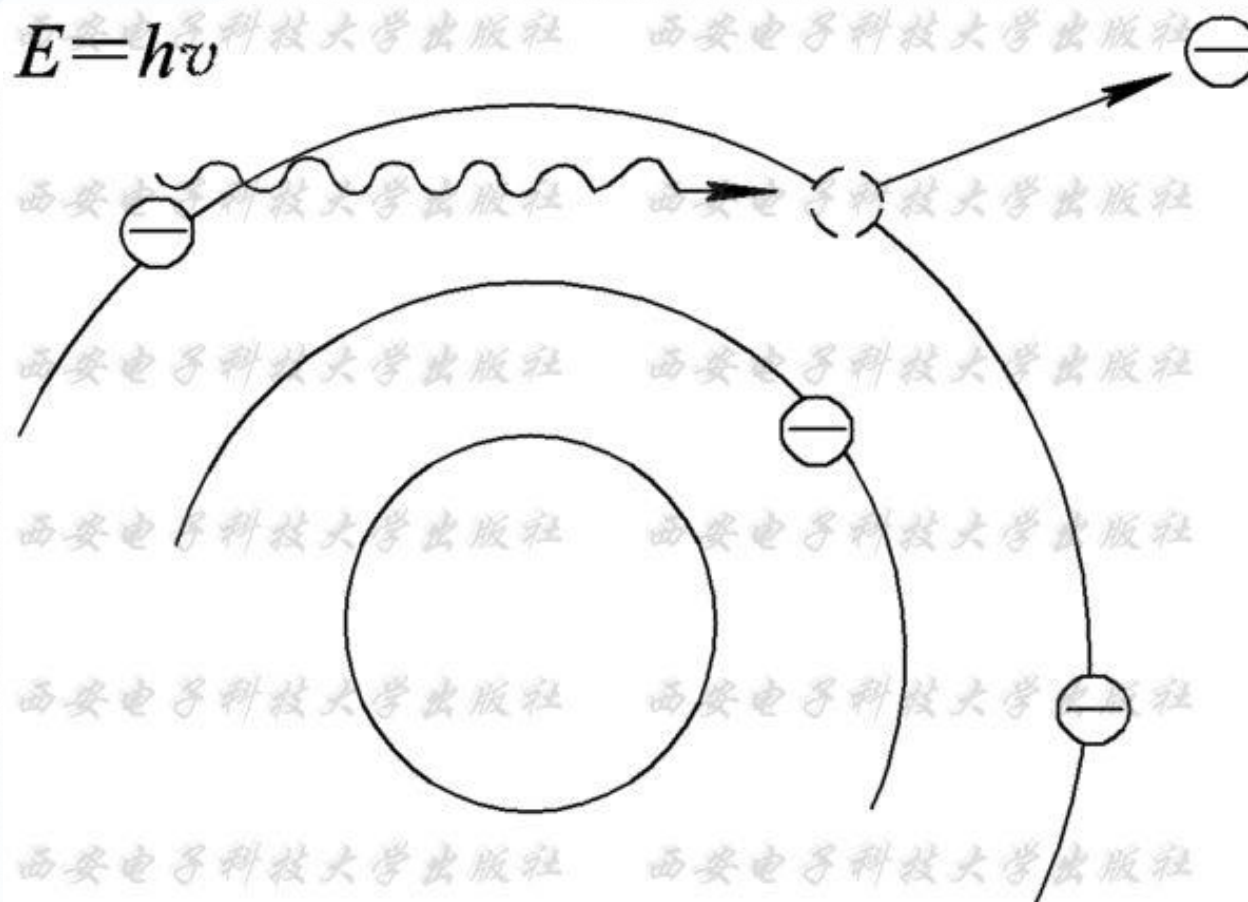
(1) 光电效应。

当光子的能量低于1 MeV时，光电效应是极为重要的过程。

光电效应更
容易在原子序数
高的物质中产生

在铅($Z = 82$)中产生光电效应的程度比在铜
($Z=29$)中大得多。

射线检测的物理基础



光电效应

射线检测的物理基础

(2) 康普顿效应。

在康普顿效应中，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射线初始方向成 θ 角的方向上散射，而电子则在和初始方向成 φ 角的方向上散射。

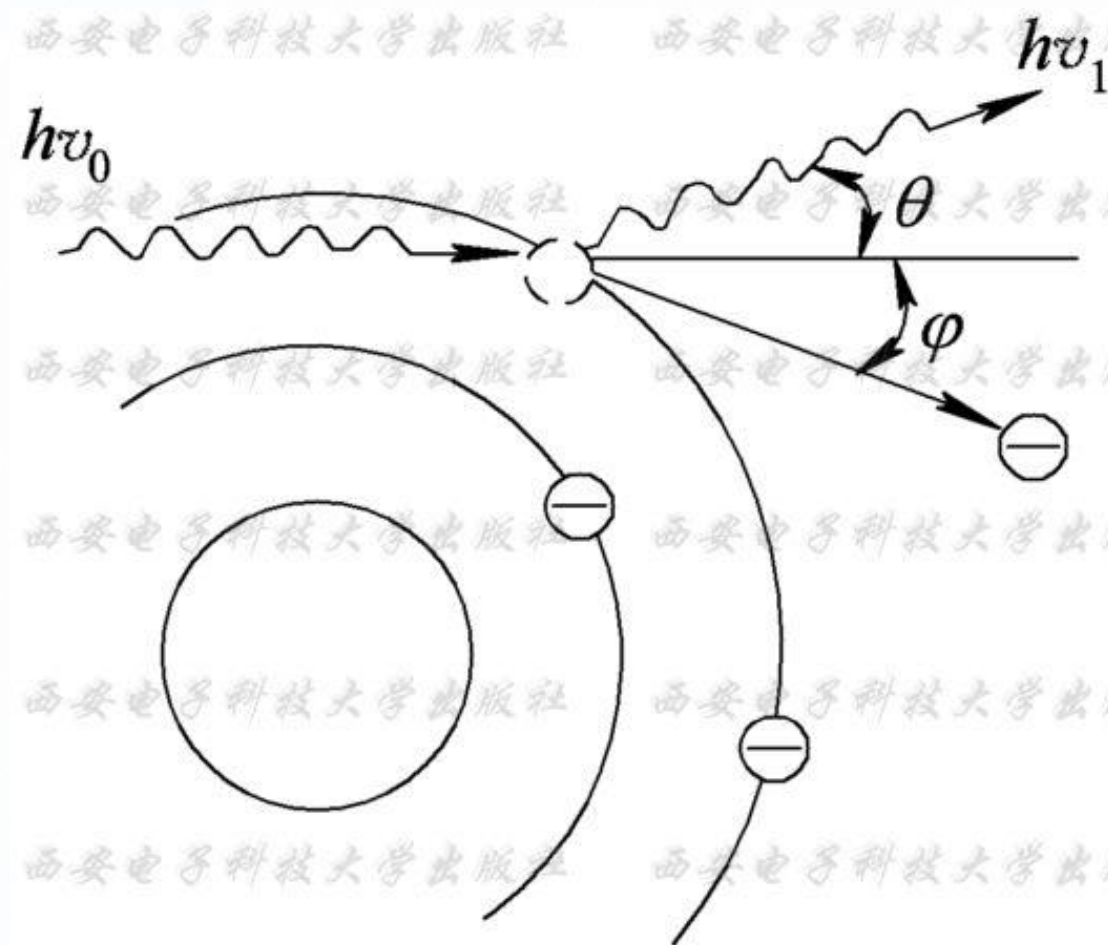
这一过程同样服从能量守恒定律，即电子所具有的动能为入射光子和散射光子的能量之差，最后电子在物质中因电离原子而损失其能量。

射线检测的物理基础

(2) 康普顿效应。

在绝大多数的轻金属中，射线的能量大约在 $0.2 \sim 3 \text{ MeV}$ 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中原子的电子数。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。

射线检测的物理基础



康普顿效应

射线检测的物理基础

(3) 电子对的产生。

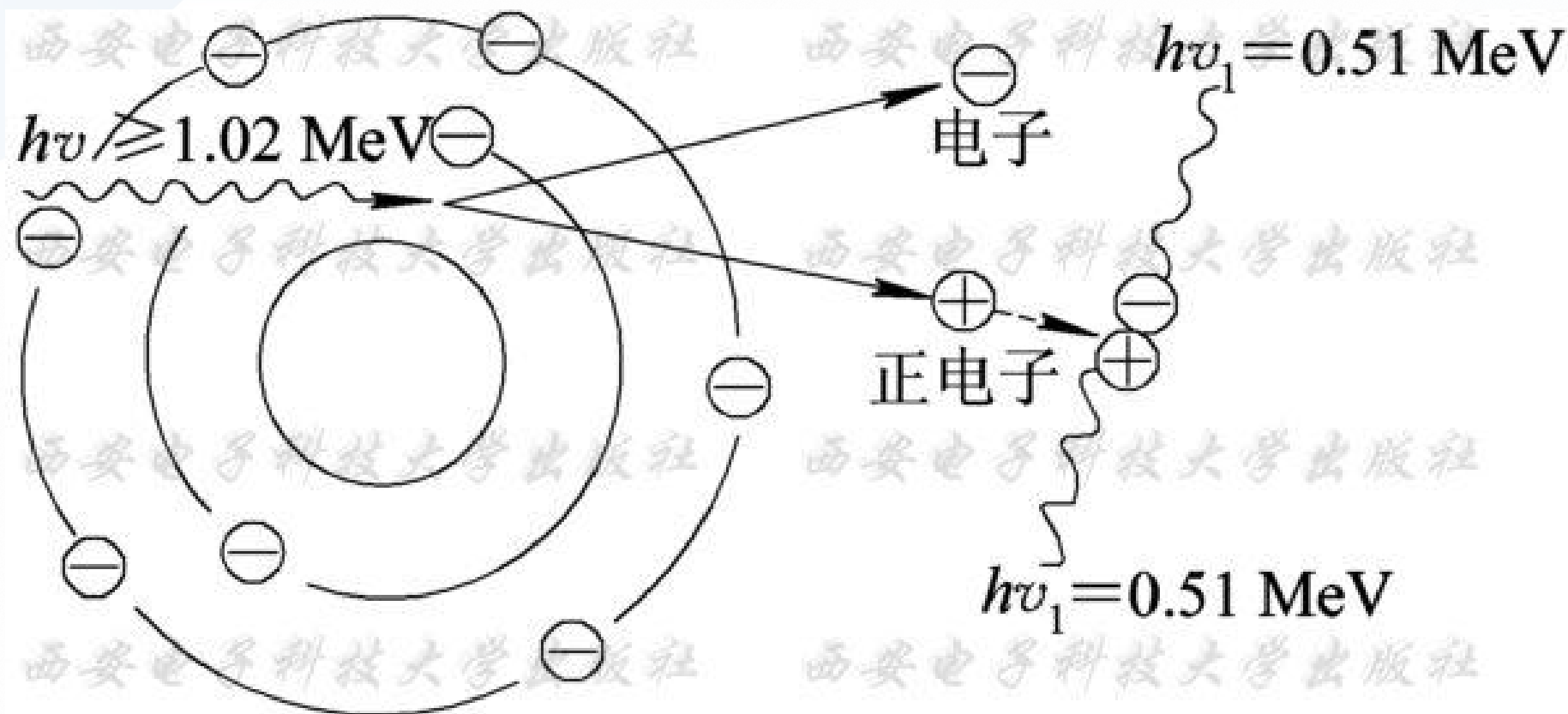
一个具有足够能量的光子释放出它的全部动能而形成具有同样能量的一个电子和一个正电子，这样的过程称为电子对的产生。产生电子对所需的最小能量为0.51 MeV，所以光子能量 $h\nu$ 必须大于等于1.02 MeV。

射线检测的物理基础

光子的能量一部分用于产生电子对，一部分传递给电子和正电子作为动能，另一部分能量传给原子核。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成为能量各为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求不小于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。

射线检测的物理基础

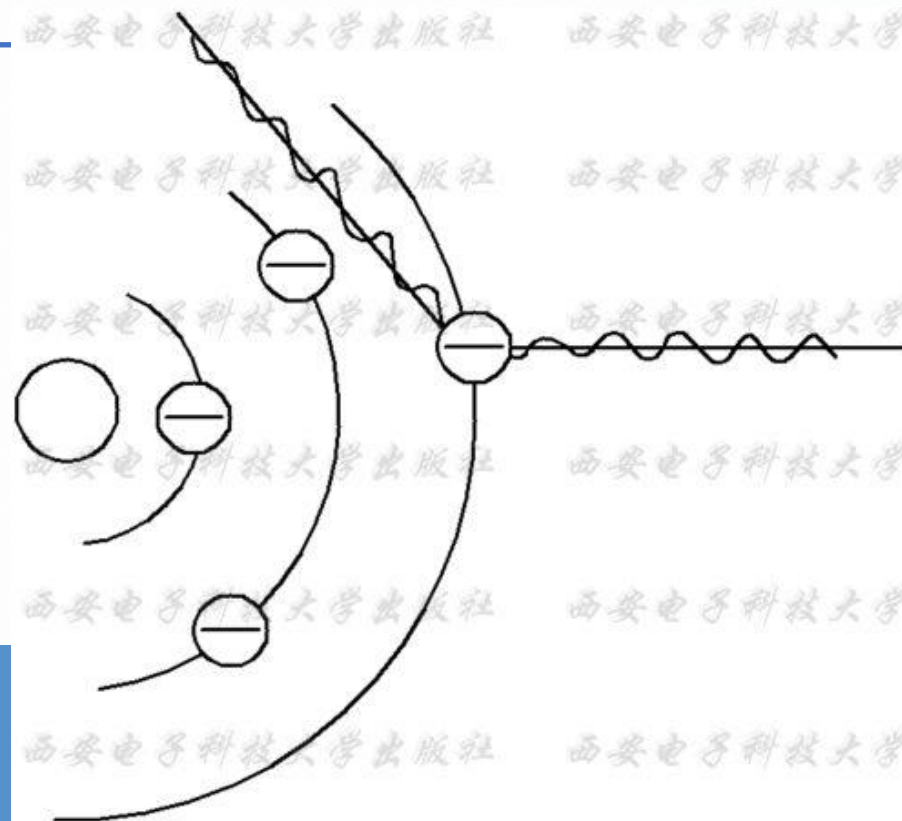


电子对的产生和消失

射线检测的物理基础

(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的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，如图所示。



汤姆逊效应

射线检测的物理基础

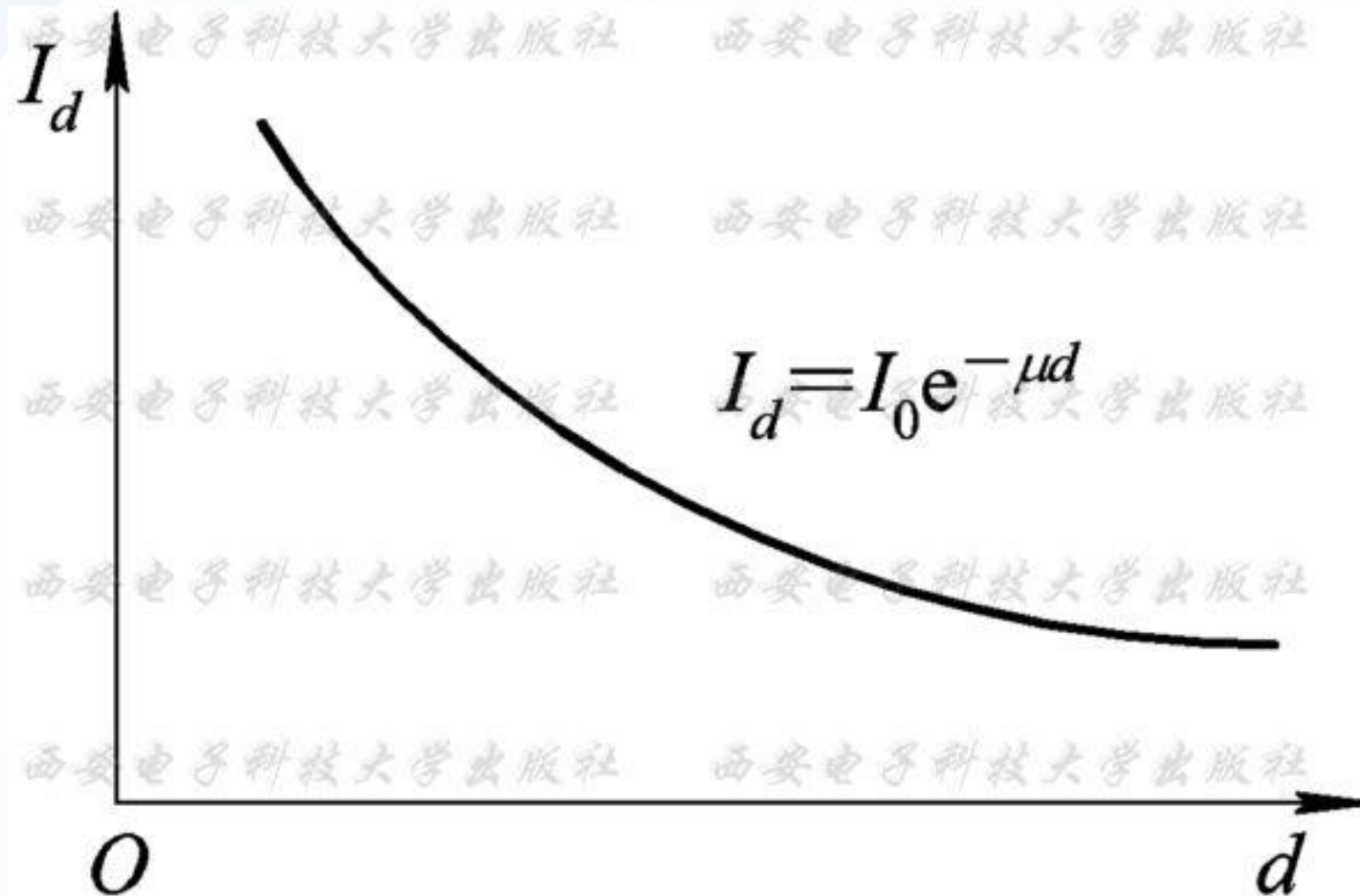
2

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，物质愈厚，则射线穿透时的衰减程度也愈大。

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愈大，衰减也愈大。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。

射线检测的物理基础



宽束射线的衰减曲线

射线检测的物理基础

设入射线的初始强度为 I_0 ，通过物质的厚度为 d ，射线能量的线衰减系数为 μ ，那么射线在透过物质以后的强度 I_d 为

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}$$

因为射线的衰减包括吸收和散射，所以射线的衰减系数 μ 是吸收系数 τ 和散射系数 σ 之和，即 $\mu = \tau + \sigma$ 。

由于物质密度愈大，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，即

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho}$$

式中： ρ 为物质的密度； τ/ρ 为质量吸收系数； σ/ρ 为质量散射系数。

射线检测的物理基础

射线的质量吸收系数和散射系数表示如下：

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

$$\frac{\sigma}{\rho} = 0.4 \cdot \frac{Z}{A}$$

式中： C 为常数； A 为元素的原子数； Z 为元素的原子序数； λ 为射线的波长。

射线检测的物理基础

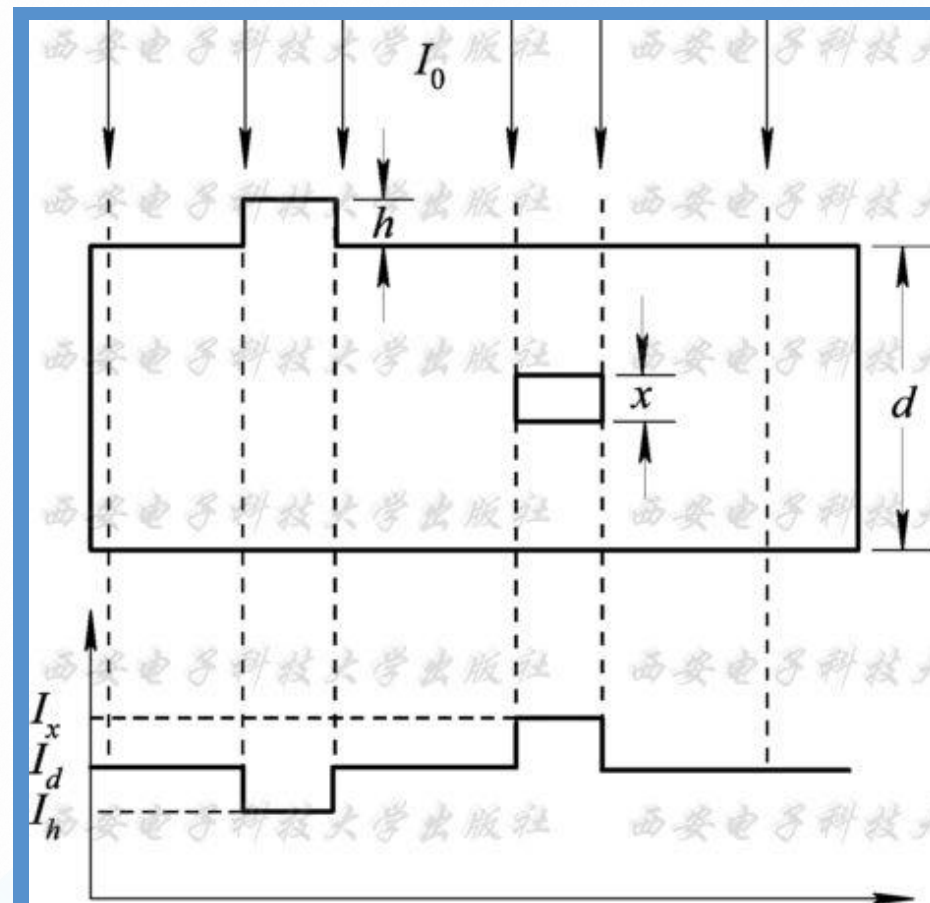
当低能射线透过重元素(轻元素和波长很短的射线除外)物质时, 射线的衰减主要表现为吸收, 由射线散射所引起的衰减可忽略不计, 则

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

X射线检测的基本原理和方法

一、X射线检测的基本原理

X射线检测是利用X射线通过物质衰减程度与被通过部位的材质、厚度和缺陷的性质有关的特性，使胶片感光成黑度不同的图像来实现的，如图所示。



X射线检测原理

X射线检测的基本原理和方法

当一束强度为 I_0 的X射线平行通过被检测试件(厚度为 d)后, 其强度 I_d 为

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}$$

若被测试件表面有高度为 h 的凸起时, 则X射线强度将衰减为

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

X射线检测的基本原理和方法

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

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

若有缺陷的吸收系数小于被测试件本身的线吸收系数，则 $I_x > I_d > I_h$ ，于是，在被检测试件的另一面就形成一幅**射线强度不均匀的分布图**。通过一定方式将这种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，达到无损检测的目的。

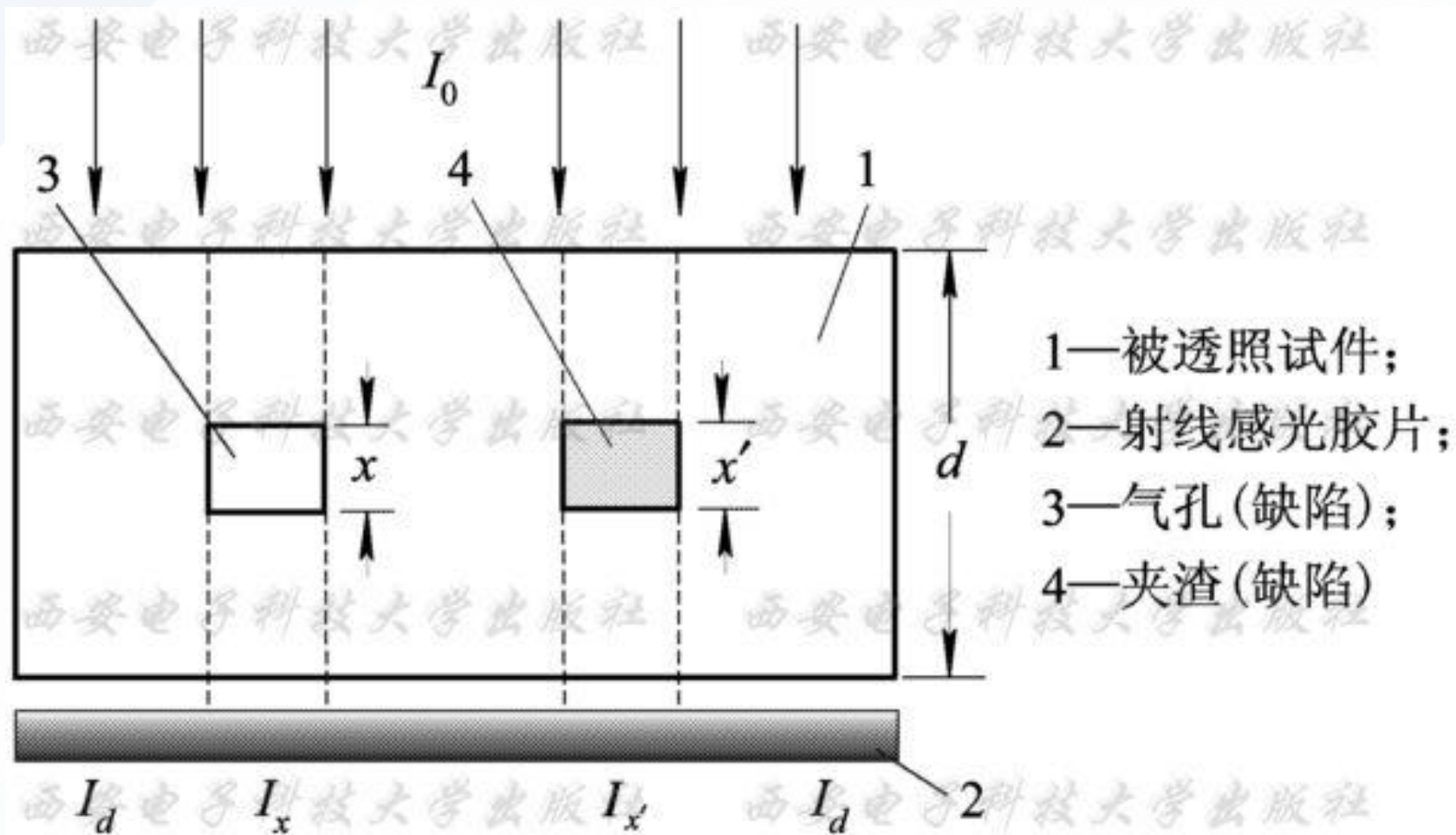
X射线检测的基本原理和方法

二、X射线检测方法

X射线检测常用的方法是照相法，即利用射线感光材料(通常用射线胶片)，放在被透照试件的背面接受透过试件后的X射线。胶片曝光后经暗室处理，就会显示出物体的结构图像。根据胶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X射线检测法中应用最广泛的一种常规方法。由于生产和科研的需要，还可用放大照相法和闪光照相法以弥补其不足。放大照相可以检测出材料中的微小缺陷。

X射线检测的基本原理和方法



X射线照相原理示意图

X射线照相检测技术

一、照相法的灵敏度和透度计

1 灵敏度

灵敏度是指发现缺陷的能力，也是检测质量的标志。

通常用两种方式表示：一是绝对灵敏度，是指在射线胶片上能发现被检测试件中与射线平行方向的最小缺陷尺寸；二是相对灵敏度，是指在射线胶片上能发现被检测试件中与射线平行方向的最小缺陷尺寸占试件厚度的百分数。若以 d 表示为被检测试件的材料厚度， x 为缺陷尺寸，则其相对灵敏度为

$$K = \frac{x}{d} \cdot 100\%$$

X射线照相检测技术

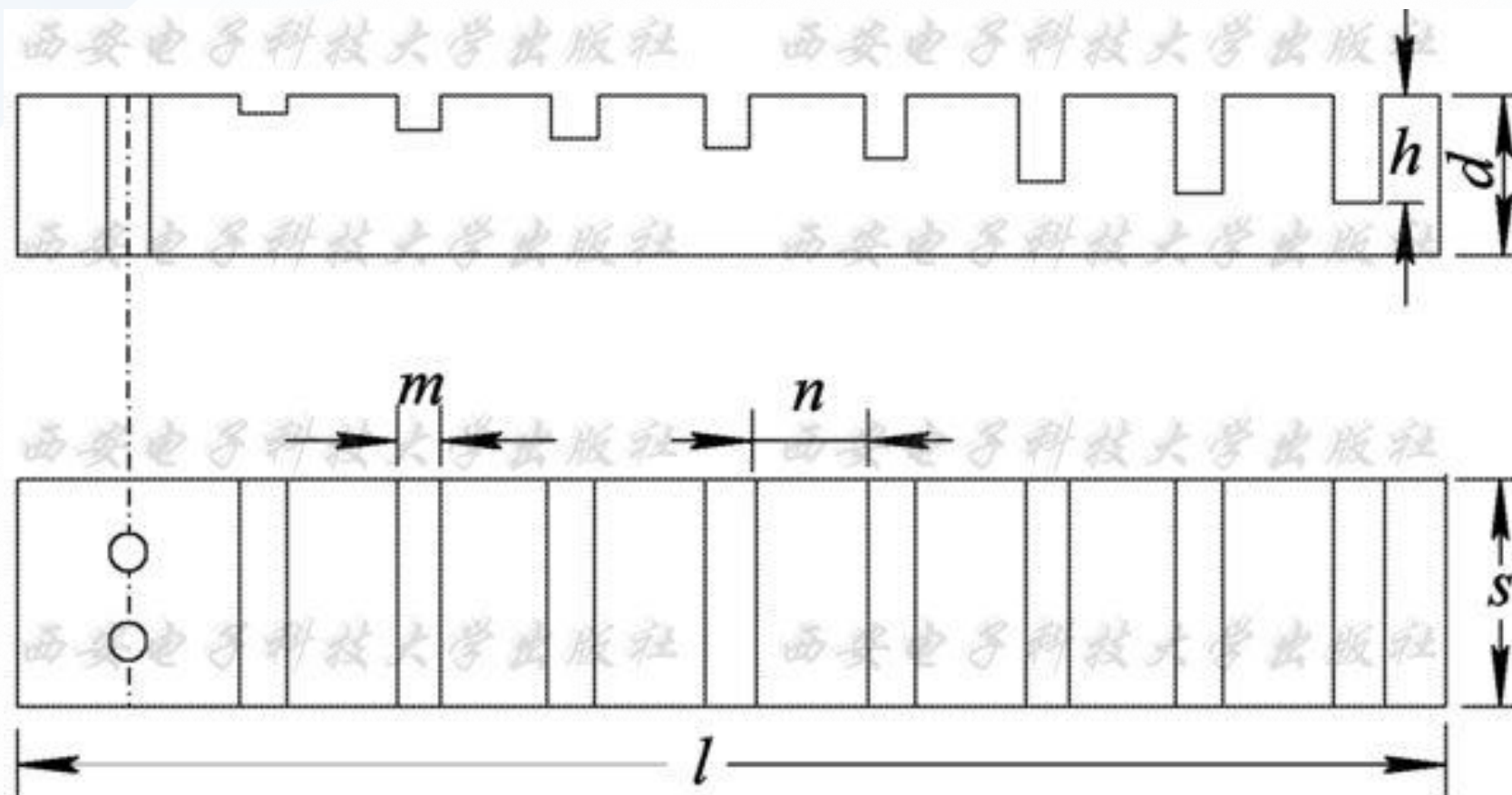
2 透度计

透度计又称像质指示器。在透视照相中，要评定缺陷的实际尺寸是困难的，因此，要用透度计来做参考比较。同时，还可以用透度计来鉴定照片的质量和作为改进透照工艺的依据。透度计要用与被透照工件材质吸收系数相同或相近的材料制成。常用的透度计主要有两种。

(1) 槽式透度计。

槽式透度计的基本设计是在平板上加工出一系列的矩形槽，其规格尺寸如图所示。对不同厚度的工件照相，可分别采用不同型号的透度计。

X射线照相检测技术



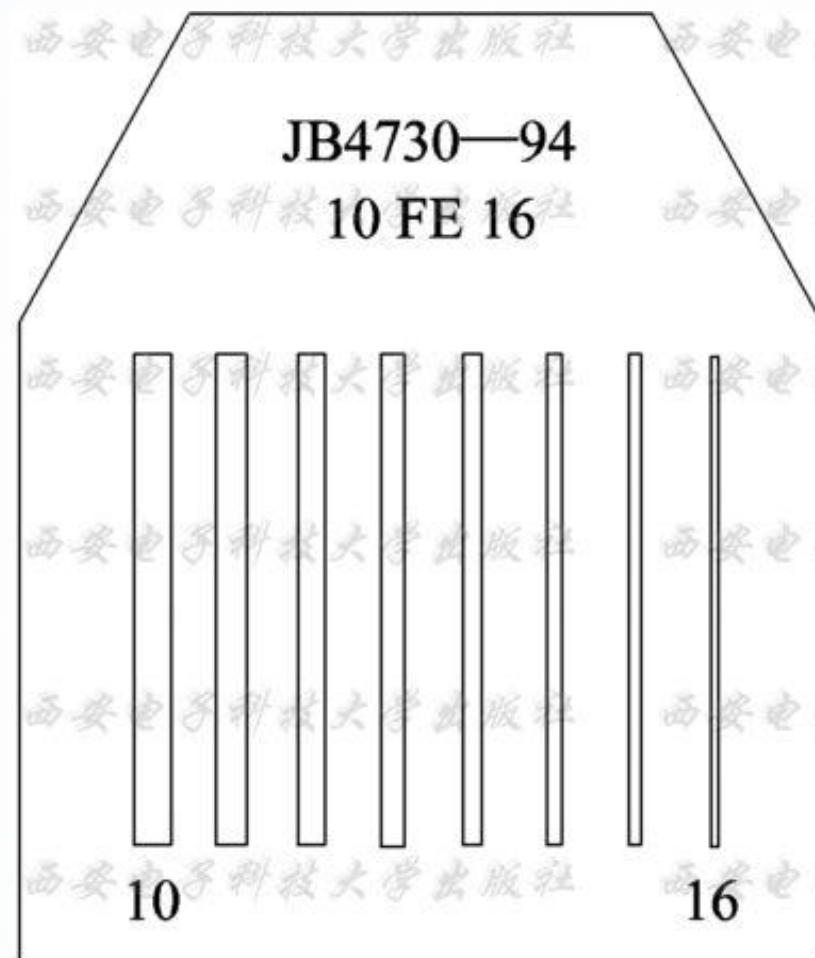
槽式透度计示意图

X射线照相检测技术

(2) 金属丝透度计。

金属丝透度计是以一套（7~11根）不同直径（0.1~4.0 mm）的金属丝均匀排列，粘合于两层塑料或薄橡皮中间而构成的。为区别透度计型号，在金属丝两端摆上与号数对应的铅字或铅点。金属丝一般分为两类，透照钢材时用钢丝透度计，透照铝合金或镁合金时用铝丝透度计。下图为金属丝透度计的结构示意图(图中JB表示“机械工业部标准”)。

X射线照相检测技术



金属丝透度计示意图

X射线照相检测技术

使用金属丝透度计时，应将其置于被透照工件的表面，并使金属丝直径小的一侧远离射线束中心。这样可保证整个被透照区的灵敏度达到如下计算数值：

$$K = \frac{\varphi}{d} 100\%$$

式中： φ 为观察到的最小金属丝直径； d 为被透照工件部位的总厚度。

X射线照相检测技术

二、增感屏及增感方式的选择

由于X射线和 γ 射线波长短、硬度大，对胶片的感光效应差，一般透过胶片的射线，大约1%就能使胶片中的银盐微粒感光。为了增加胶片的感光速度，利用某些增感物质在射线作用下能激发出荧光或产生次级射线，从而加强对胶片的感光作用。在射线透视照相中，所用的增感物质称为增感屏，其增感系数为

$$K = \frac{\text{在摄影密度为} D \text{时，无增感所需曝光量}}{\text{产生相同的摄影密度} D \text{时，用增感屏所需曝光量}}$$

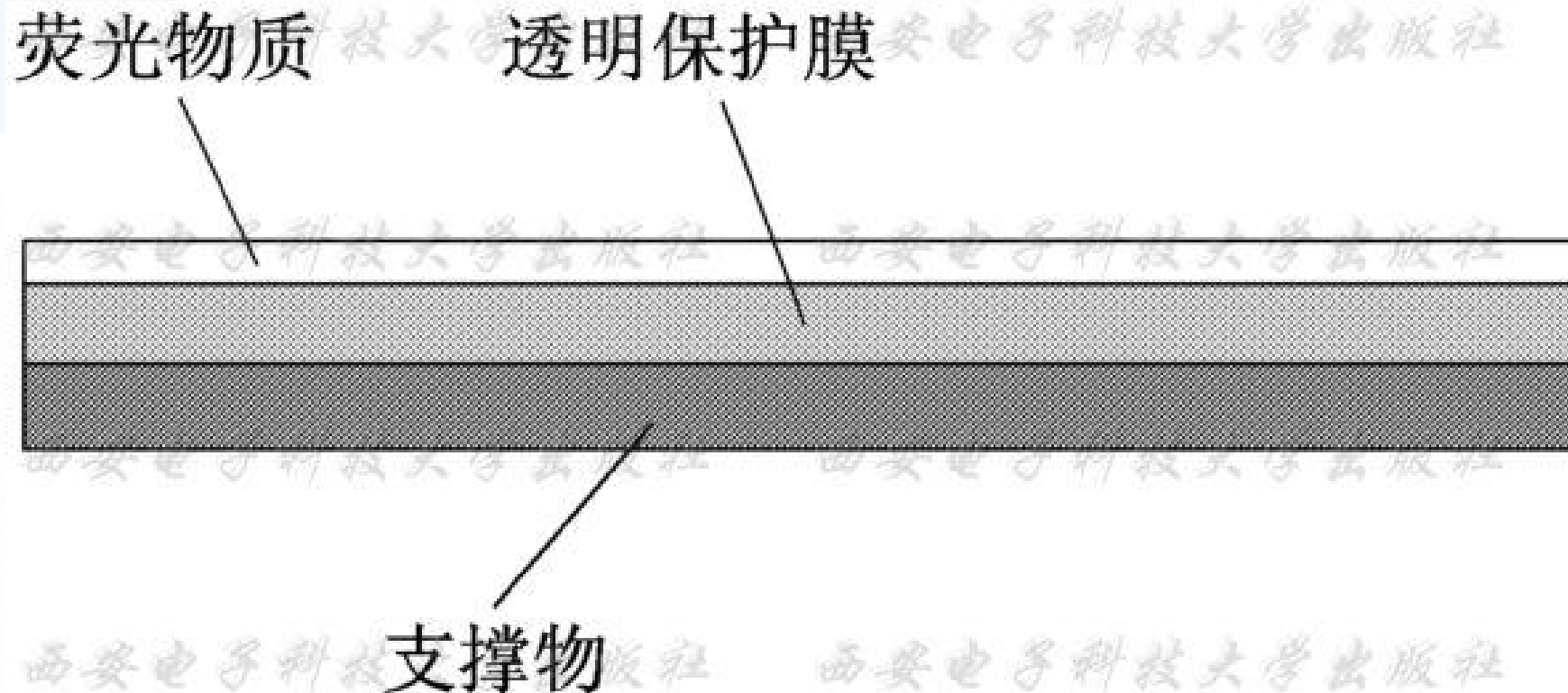
X射线照相检测技术

1

荧光增感屏

荧光增感屏是利用荧光物质被射线激发产生荧光实现增感作用的，其结构如图所示。它是将**荧光物质**均匀地涂布在质地均匀而光滑的支撑物(硬纸或塑料薄板等)上，再覆盖一层薄薄的透明保护层组合而成的。

X射线照相检测技术



荧光增感屏构造示意图

X射线照相检测技术

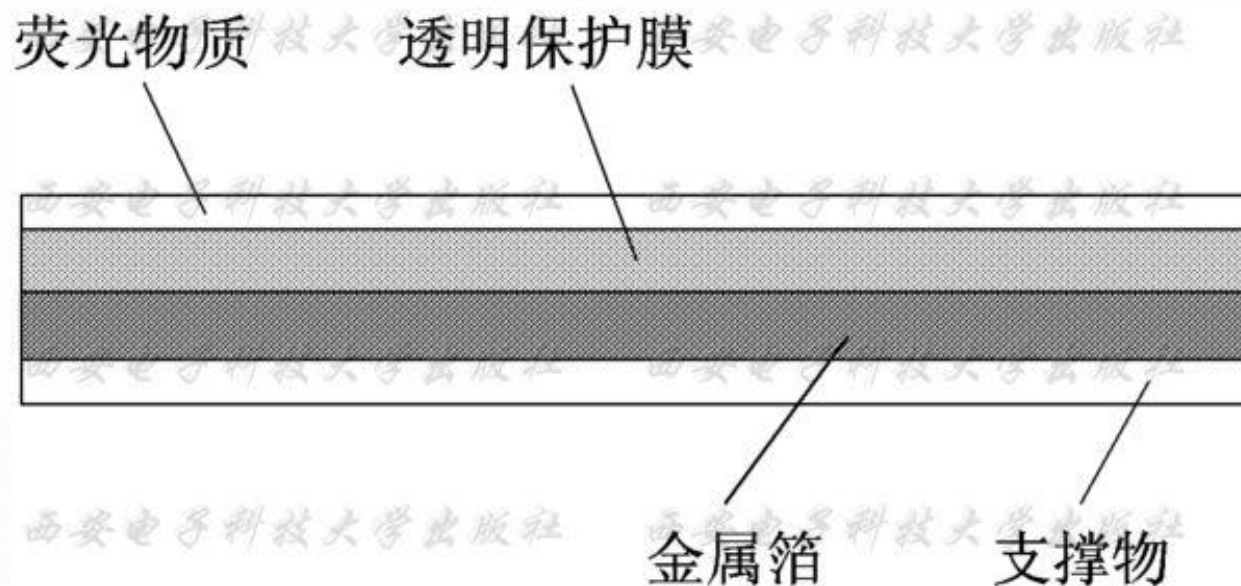
2 金属增感屏

金属增感屏在受射线照射时产生 β 射线和二次标识X射线对胶片起感光作用。其增感较小，一般只有2~7倍。金属屏的增感特性通常是，原子序数增加，增感系数上升，辐射波长愈短，增感作用越显著。但是原子序数越大，激发能量也要相应提高，如果射线能量不能使金属屏的原子电离或激发，则不起增感作用，相反还会吸收一部分软射线。如铅增感屏，当管电压低于80 kV时，则基本上无增感作用。在生产实践中，多采用铅、锡等原子序数较高的材料作金属增感屏，因为铅的压延性好，吸收散射线的能力强。

X射线照相检测技术

3 金属荧光增感屏

金属荧光增感屏是在铅箔上涂一层荧光物质组合而成的。它具有荧光增感的高增感系数，又有吸收散射线的作用。



金属荧光增感屏结构示意图

X射线照相检测技术

4 增感方式的选择



增感方式的选择通常考虑三方面的因素

1 产品设计对检测的要求

2 射线能量

3 胶片类型

X射线照相检测技术

三、曝光参数的选择

1 射线的硬度

射线硬度是指射线的穿透力，由射线的波长决定。波长越短硬度越大，则穿透力就越强，对某一物质即具有较小的吸收系数。X射线波长的长短由管电压所决定，管电压愈高，波长愈短。射线硬度对透照胶片影像的质量有很大关系。因此，选择射线的硬度尤为重要。

例如：当一束强度为 I_0 的射线，通过被透照厚度为 d 的物体后，其强度将衰减为 I_d ；通过一厚度为 x 的缺陷后，其强度为 I_x 。 I_x/I_d 称为对比度或主因衬度，即

$$\frac{I_x}{I_d} = e^{(\mu - \mu')x}$$

X射线照相检测技术

假设缺陷内为空气，则 μ' 可忽略不计。因而

$$\frac{I_x}{I_d} \approx e^{\mu x}$$

在工业射线透照中，总是希望胶片上的影像衬度尽可能高，以保证检测质量。因此，射线硬度尽可能选软些。但是，如果希望在材料的厚薄相邻部分一次曝光，则要选用较硬的射线。

为了提高某些低原子序数、低密度和薄壁材料的检测灵敏度，应采用软射线，即低能X射线照相法。通常将60 ~ 150 kV定为中等硬度X射线，60 kV以下定为软X射线。

X射线照相检测技术

2 射线的曝光量

射线的曝光量通常以射线强度*I*和时间*t*的乘积表示，即 $E=It$ ，*E*的单位为mCi·h(毫居里·小时)。对X射线来说，当管压一定时，其强度与管电流成正比。因此X射线的曝光量通常用管电流*i*和时间*t*的乘积来表示，即

$$E = i t$$

其单位为mA·min(毫安·分)或mA·s(毫安·秒)。

X射线照相检测技术

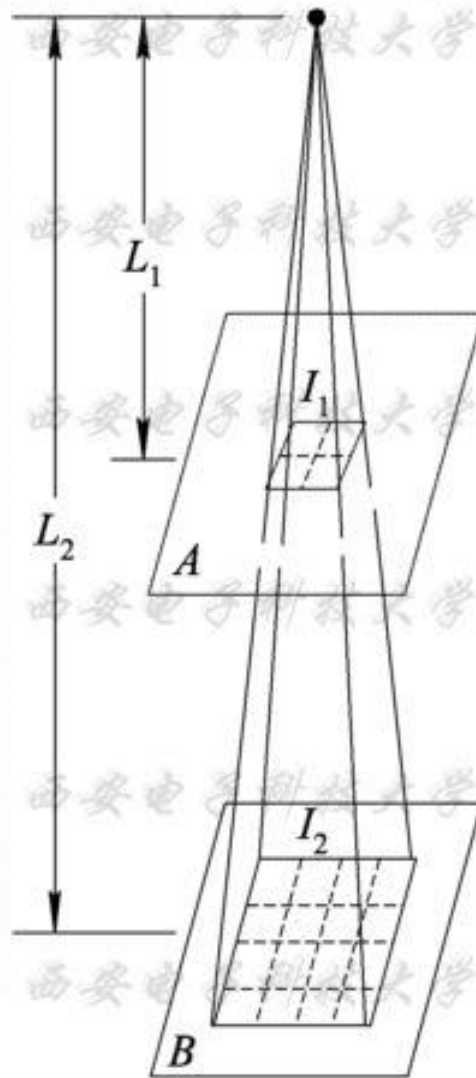
在一定范围内，如果E为常数，则*i*与*t*存在反比关系：

$$E = i_1 t_1 = i_2 t_2$$

一般在选用管电流和曝光时间时，在射线设备允许范围内，管电流总是取得大些，以缩短曝光时间并减少散射线的影响。此外，X射线从窗口呈直线锥体辐射，在空间各点的分布强度与该点到焦点的距离平方成反比。即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(L_2)^2}{(L_1)^2}$$

X射线照相检测技术



曝光距离与射线强度的关系

X射线照相检测技术

3 射线照相对比度

射线照片上影像的质量由**对比度**、**不清晰度**、**颗粒度**决定。影像的对比度是指射线照片上两个相邻区域的黑度差。如果两个区域的黑度分别为 D_1 、 D_2 ，则它们的对比度为： $\Delta D = D_1 - D_2$ 。影像的对比度决定了在射线透照方向上可识别的细节，影像的不清晰度决定了在垂直于射线透照方向上可识别的细节尺寸，影像的颗粒度决定了影像可记录的细节最小尺寸。

X射线照相检测技术

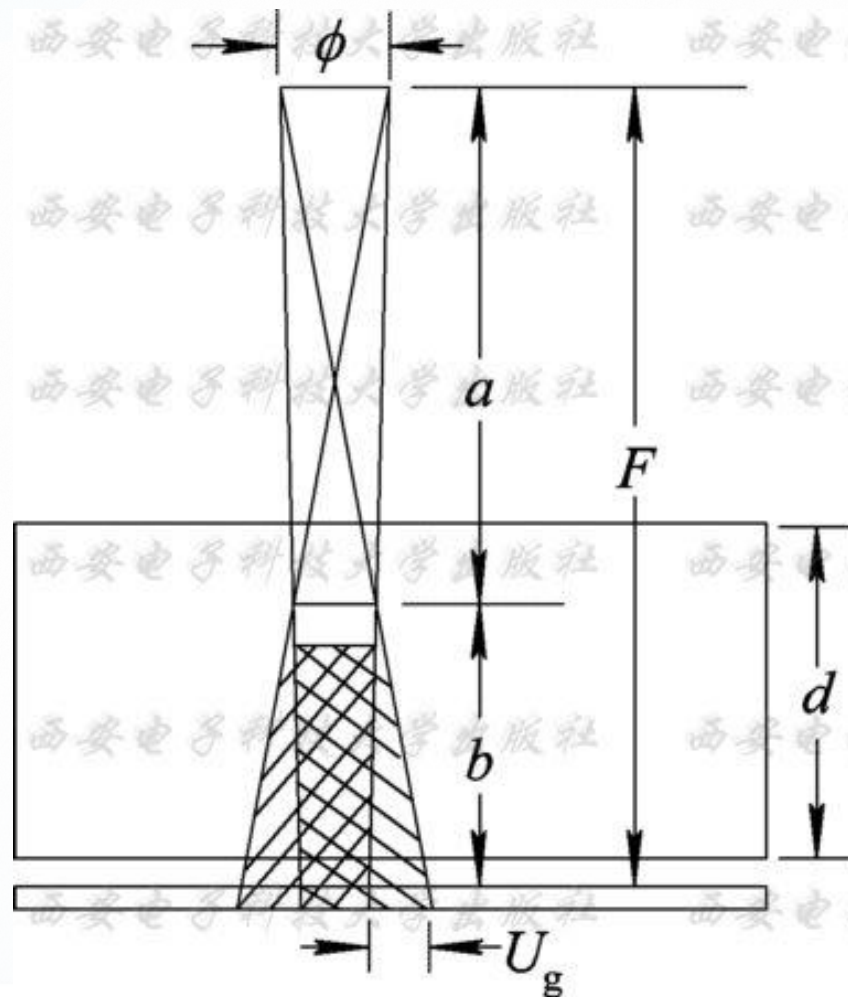
4 焦距的选择

焦距是指从放射源(焦点)至胶片的距离。焦距选择与射线源的几何尺寸和试件厚度有关。由于射线源有一定的几何尺寸，从而产生几何不清晰度 U_g ，如图所示。由相似三角形关系，可以求出：

$$U_g = \frac{\phi \cdot b}{F - b}$$

式中： ϕ 为射线源的几何尺寸； F 为焦点至胶片的距离； a 为焦点至缺陷的距离； b 为缺陷至胶片的距离。

X射线照相检测技术



$$U_g = \frac{\phi \cdot b}{F - b}$$

透照影像几何不清晰度

X射线照相检测技术

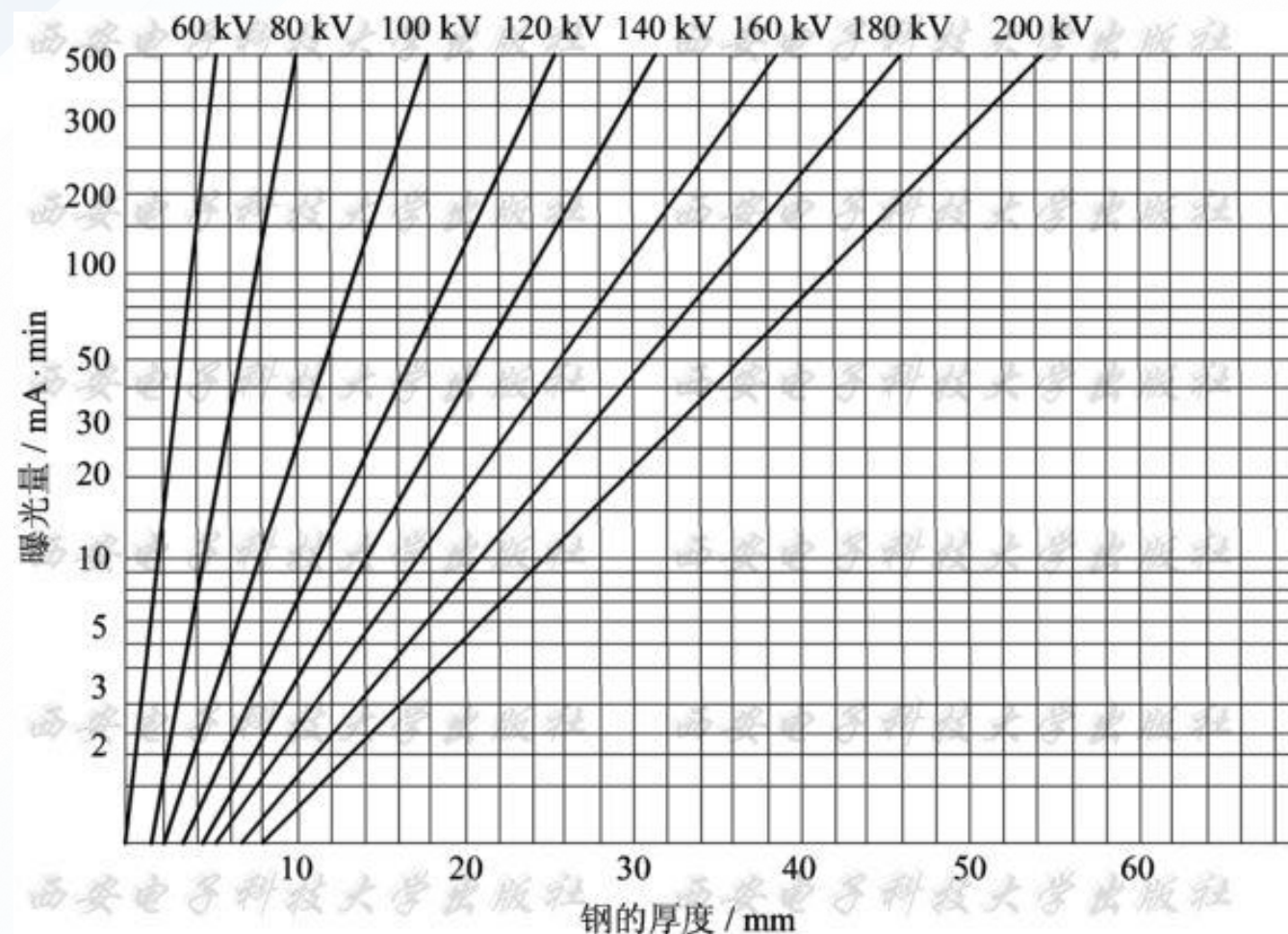
5 曝光曲线

1 不同管电压下，材料厚度与曝光量的关系曲线，材料厚度 d 与曝光量 x 的关系为：

$$x = \mu d + C''$$

式中： μ 为吸收系数；为常数。 x 与 d 呈线性关系。若以 x 为纵轴， d 为横轴，当焦距一定时，则给定一个厚度 d ，对应于某一管电压可以求得一个 x 值。用各种不同的电压试验时，就可以得出一组斜率逐渐变化的曲线，如图所示。

X射线照相检测技术



材料厚度与曝光量的关系曲线

X射线照相检测技术

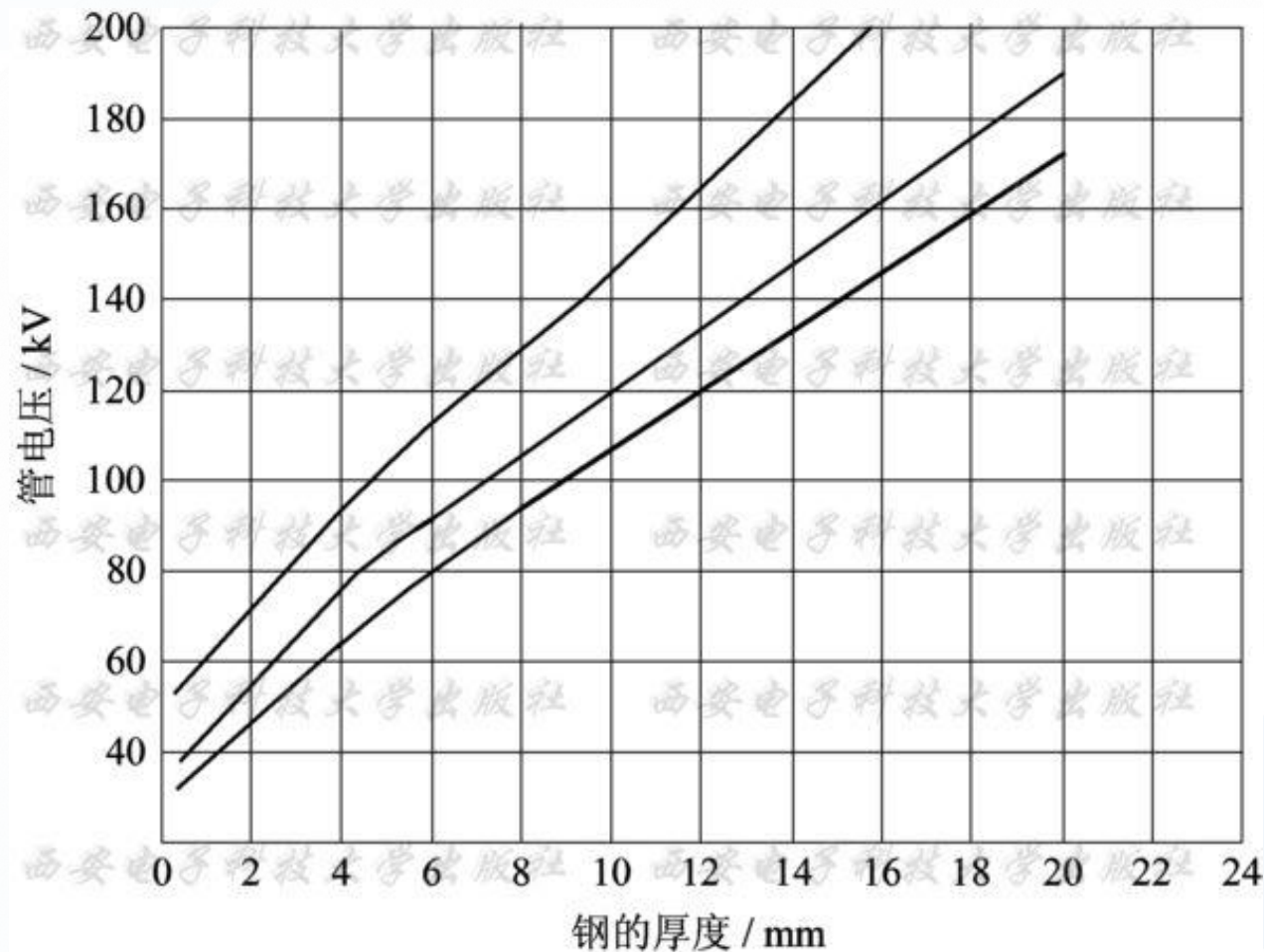
2

不同焦距下，材料厚度与管电压的关系曲线。由于底片黑度要求一定，所以 x 为一常数，如果被透照的材料固定，则 d 增大时 μ 必须减小，所以管电压要相应增大。

$$\lambda \sim \frac{1}{U}$$

若以材料厚度 d 为横轴，管电压 U 为纵轴，则在一定焦距下的厚度所对应的管电压可以连成一条曲线。以不同的焦距试验时，就可得到一组曲线，如图所示。

X射线照相检测技术



材料厚度与管电压的关系曲线

X射线照相检测技术

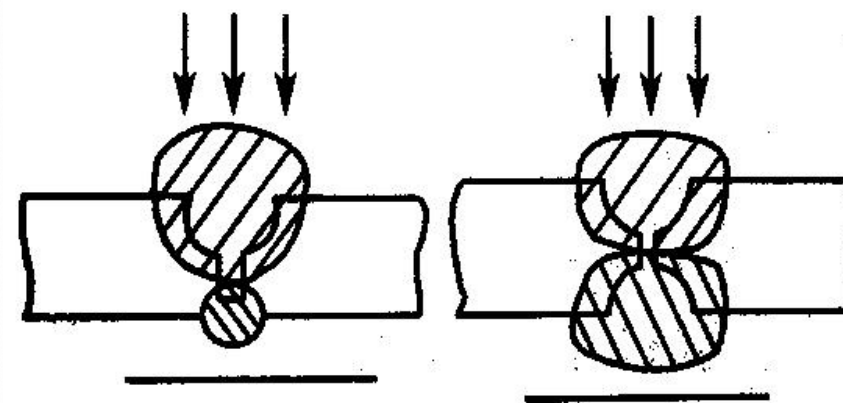
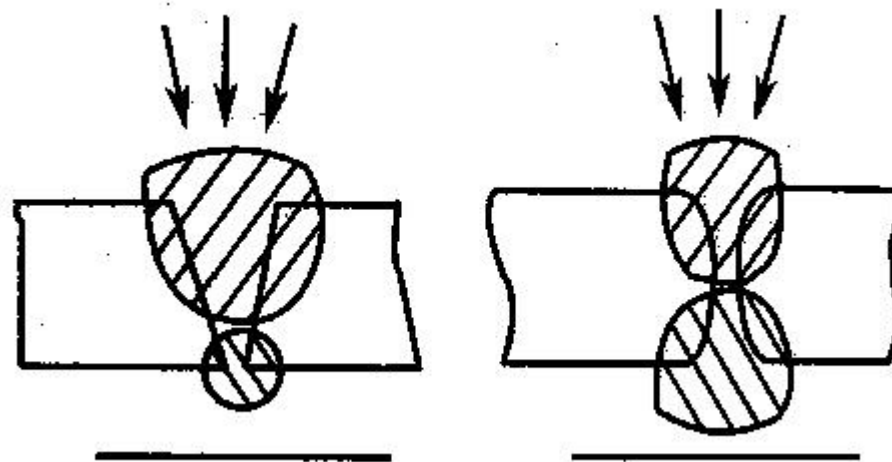
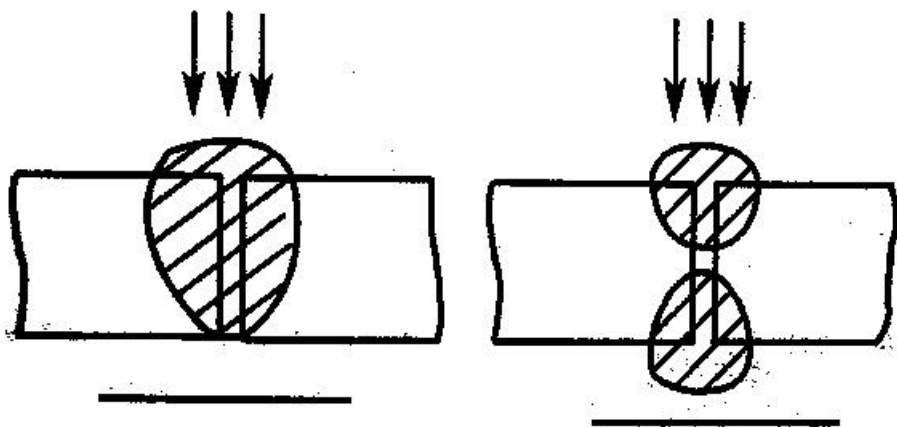
6 等效系数

两块不同厚度的不同材料在入射强度为 I_0 的射线源照射下，若得到相同的出射强度 I_x ，则称二者为“等效”。它们的厚度之比称为材料的“等效系数”。根据等效系数的定义，可以从一条常用材料的曝光曲线上查出另一种材料的等效厚度所对应的管电压。

X射线照相检测技术

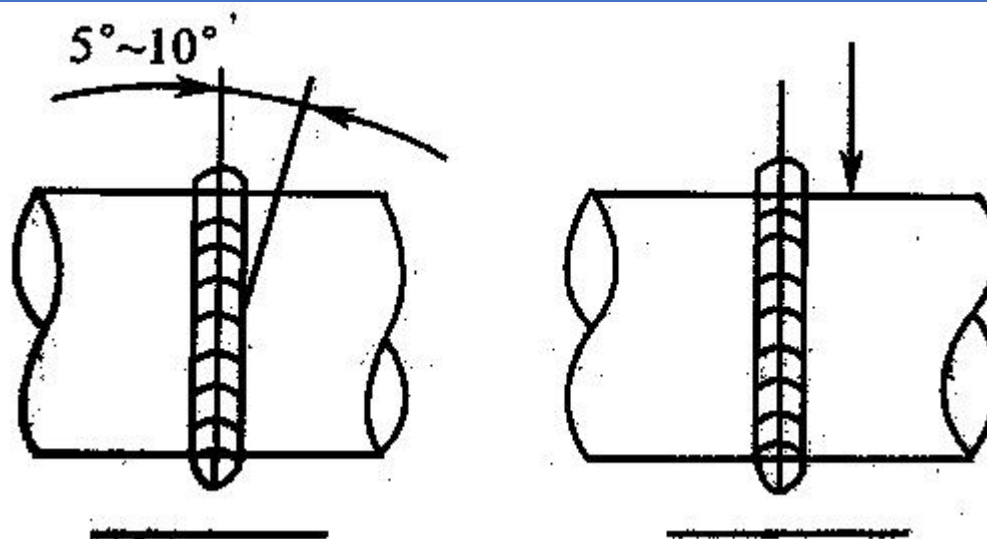
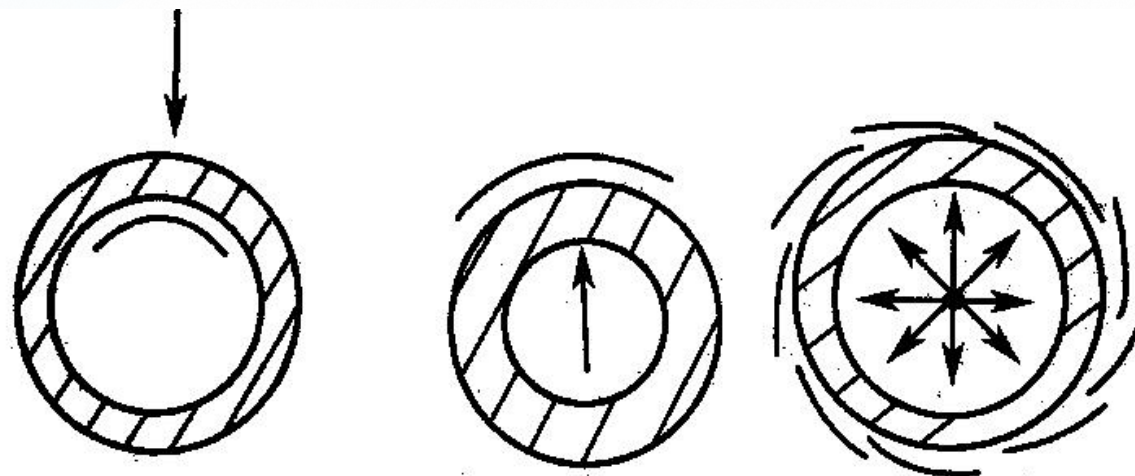
四、透照方向的选择

1 平板形工件



X射线照相检测技术

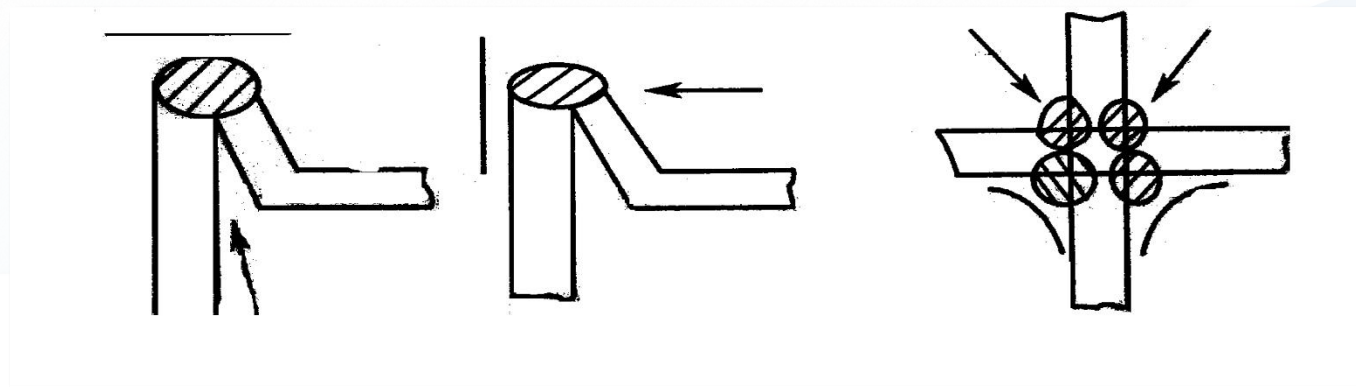
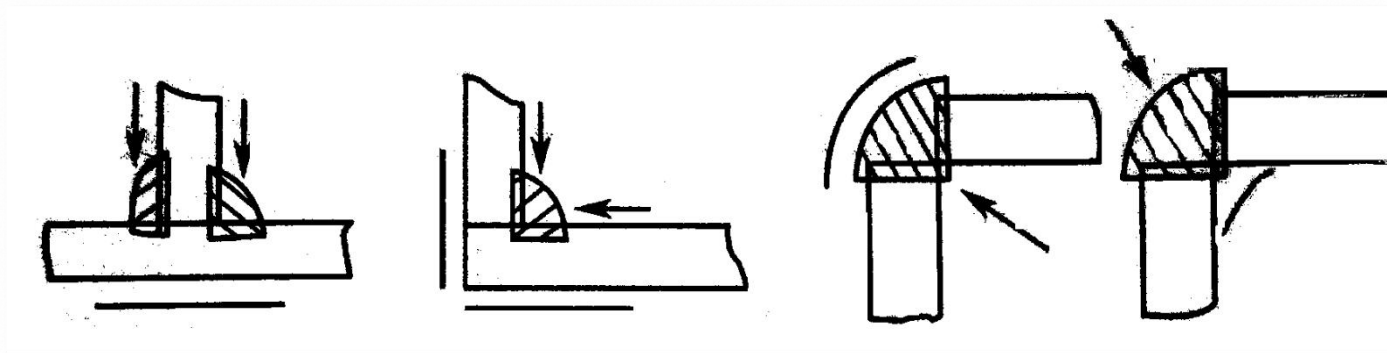
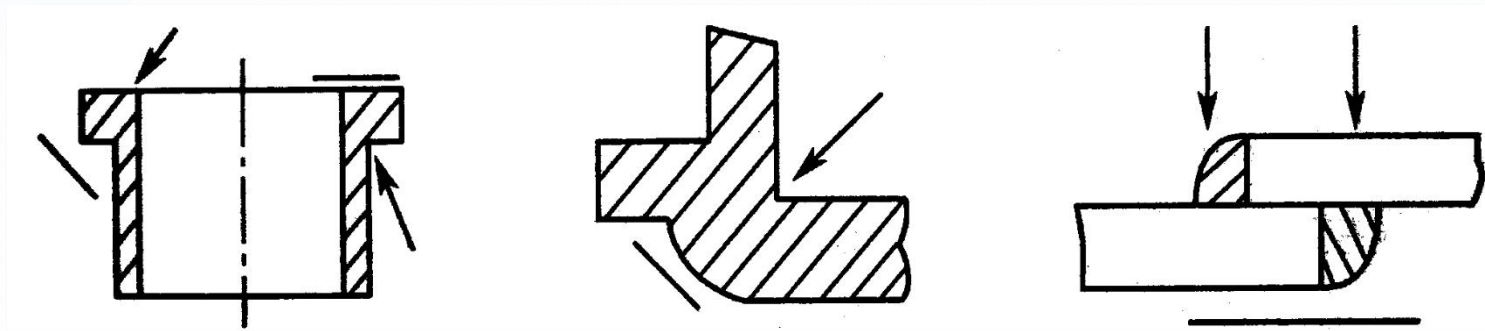
2 圆管



X射线照相检测技术

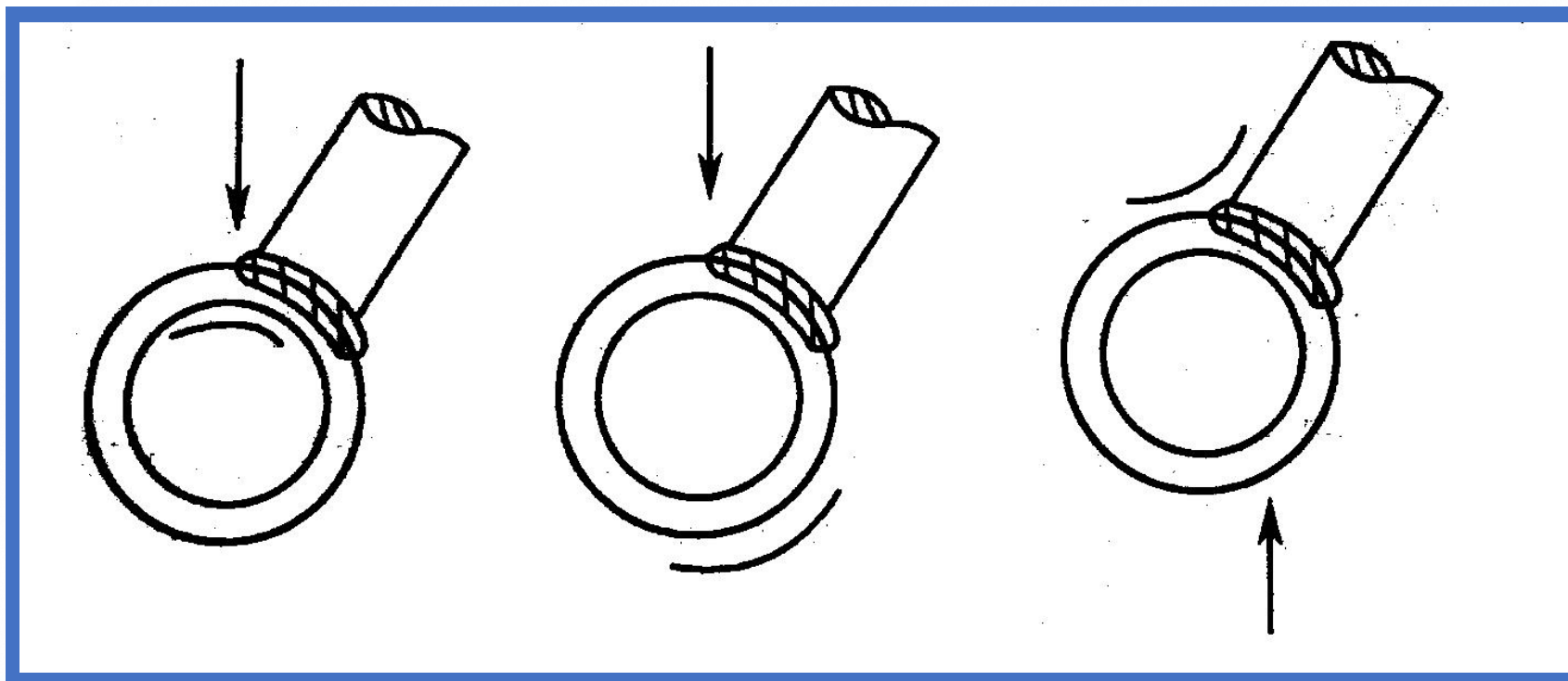
3

角形工件



X射线照相检测技术

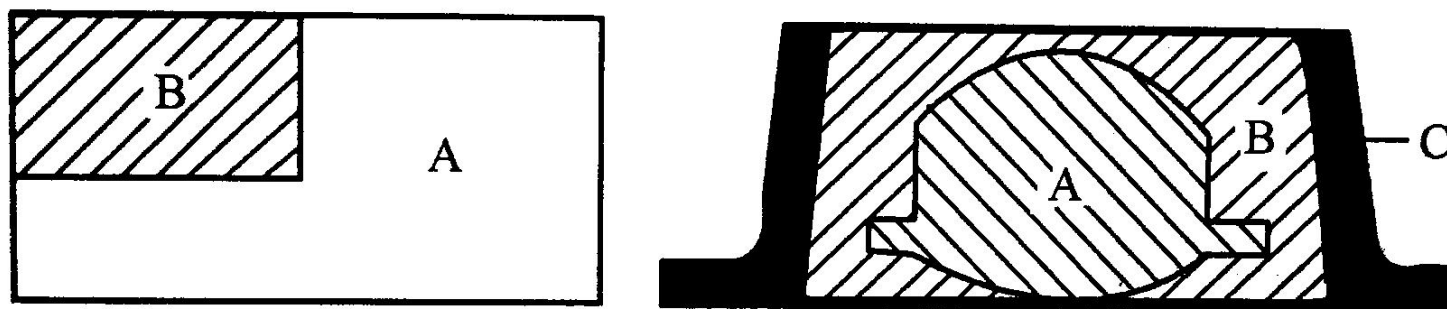
4 管接头焊缝



X射线照相检测技术

5 圆柱体

6 厚度变化剧烈的工件

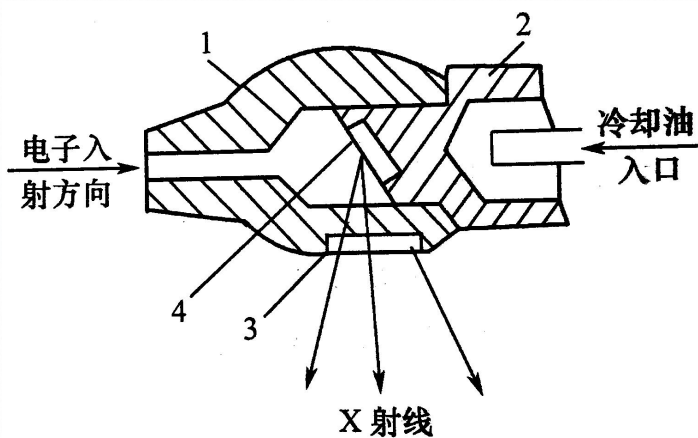
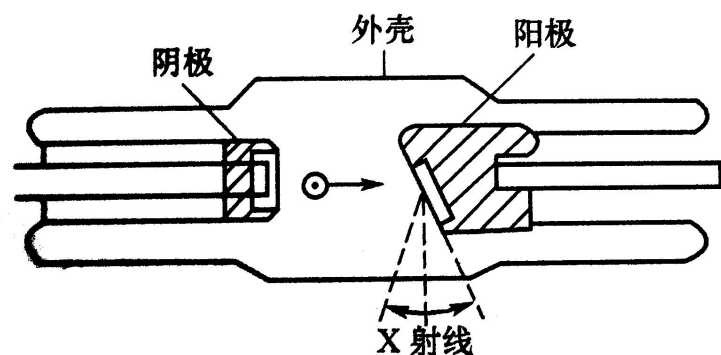


零件补偿示意图

A—被检工件；B—吸收系数与 A 相近的介质；C—铅制光阑。

X射线照相检测技术

五、X射线管工作原理



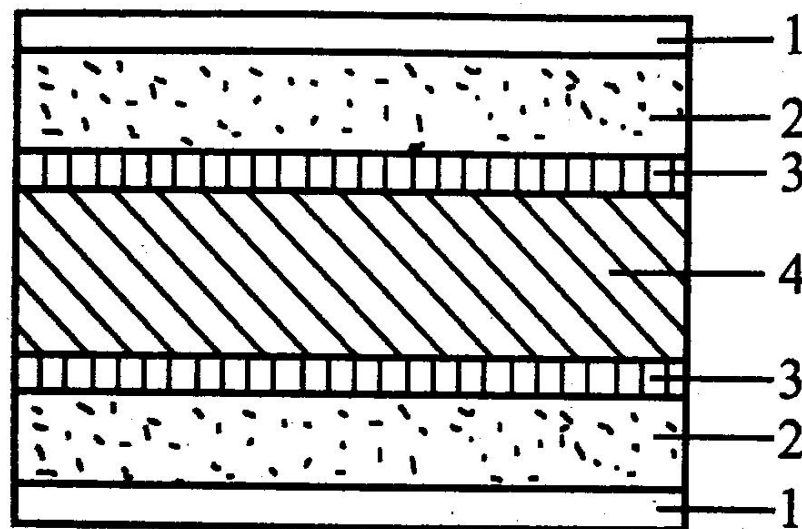
抽真空容器，
阴极K，阳极A，
也叫对阴极，由
金属(铜,钼,钨)制
成，K、A间加高
压。

工作过程：X射线是由阴极加
发射出(热)电子，经高速电压加速，
获得能量，运动速度很大，这种高
速电子去撞击阳极A，而发射出X
射线。

A ~ K间加几万伏高压，加速
阴极发射的热电子。

X射线照相检测技术

六、射线胶片



射线胶片结构示意图

1—保护层；2—感光乳剂；
3—结合层；4—片基。

■ 常见缺陷及其影像特征

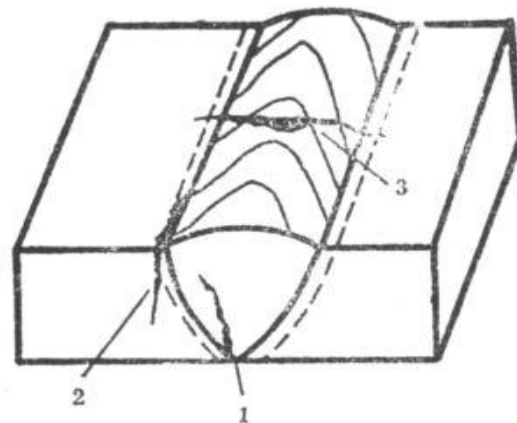
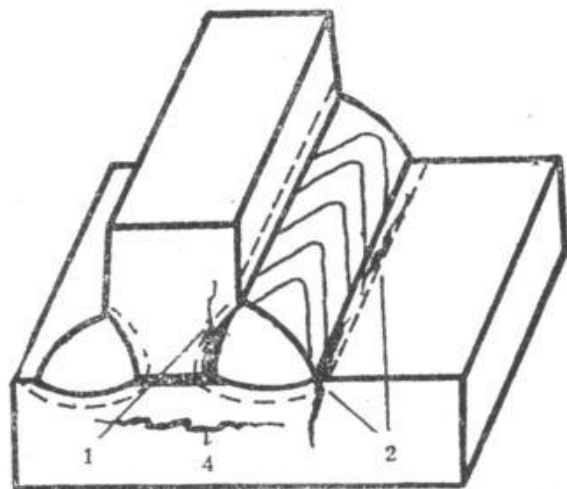
1 焊件中常见的缺陷

◀ (1) 裂纹

裂纹主要是在熔焊冷却时因热应力和相变应力而产生的，也有在校正和疲劳过程中产生的，是危险性最大的一种缺陷。裂纹影像较难辨认。因为断裂宽度、裂纹取向、断裂深度不同，使其影像有的较清晰，有的模糊不清。常见的有纵向裂纹、横向裂纹和弧坑裂纹，分布在焊缝上或热影响区。

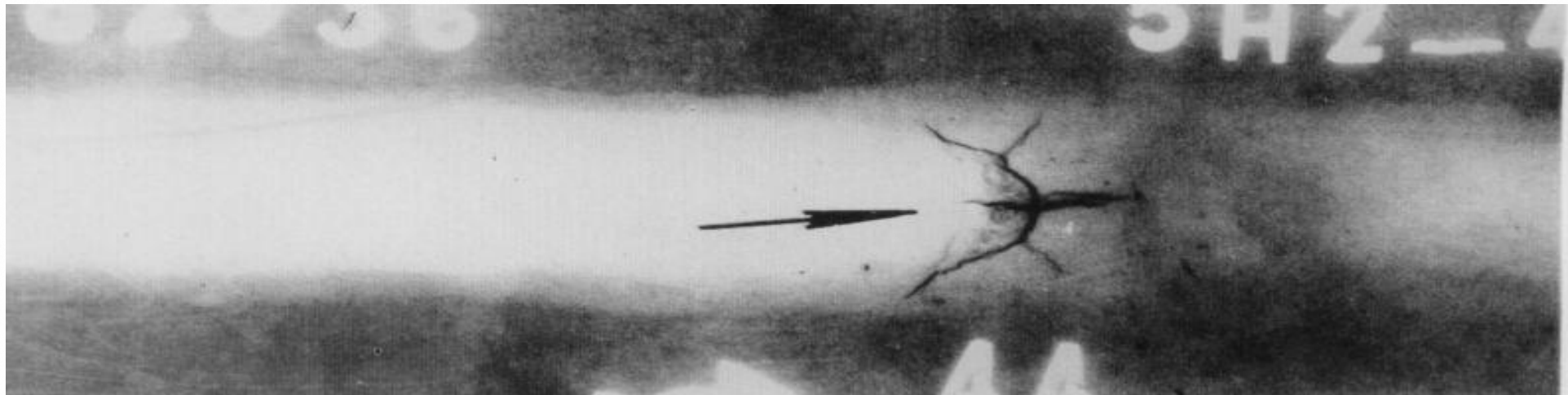
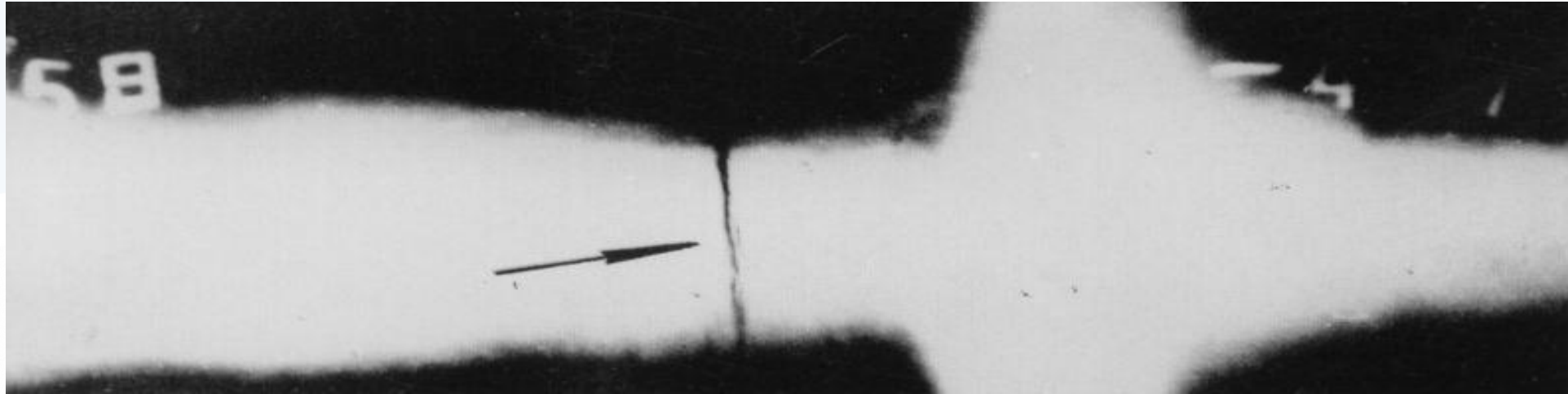
■ 常见缺陷及其影像特征

■ 焊接接头裂纹分布示意图

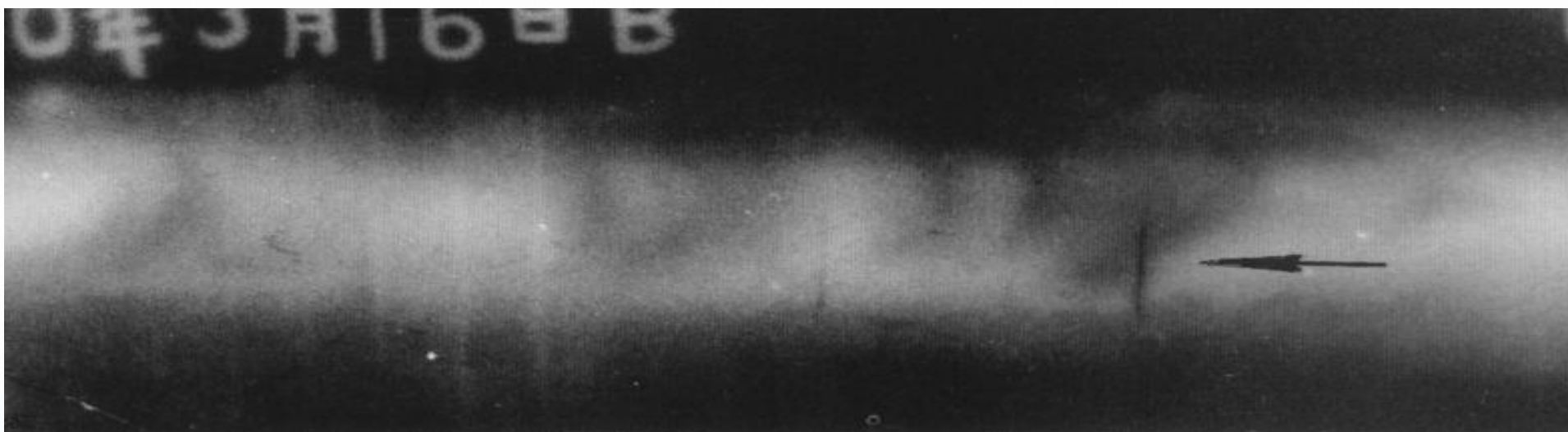
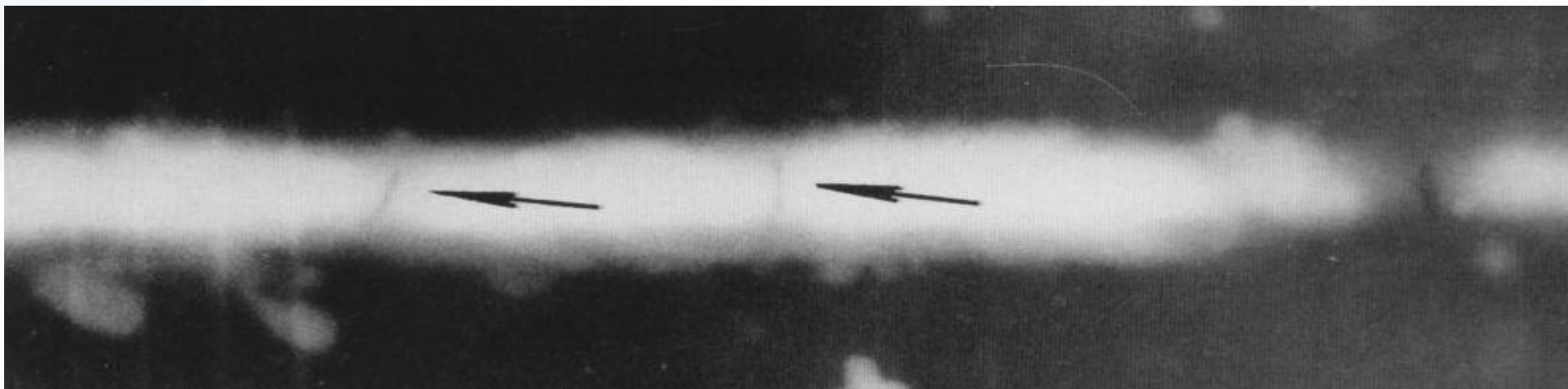


1. 近焊区根部裂纹(延迟裂纹)
2. 焊趾处纵向裂纹(延迟裂纹)
3. 焊缝中的横向裂纹(延迟裂纹)
4. 层状撕裂

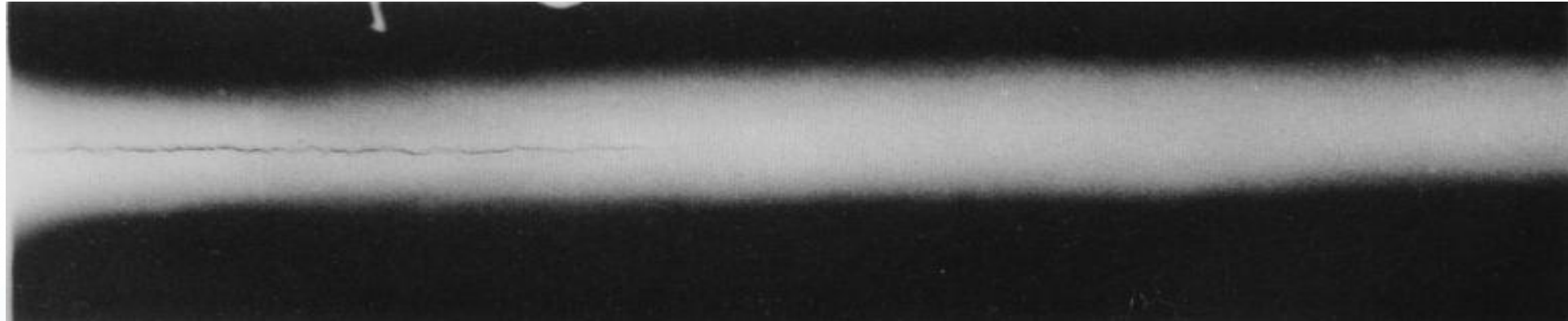
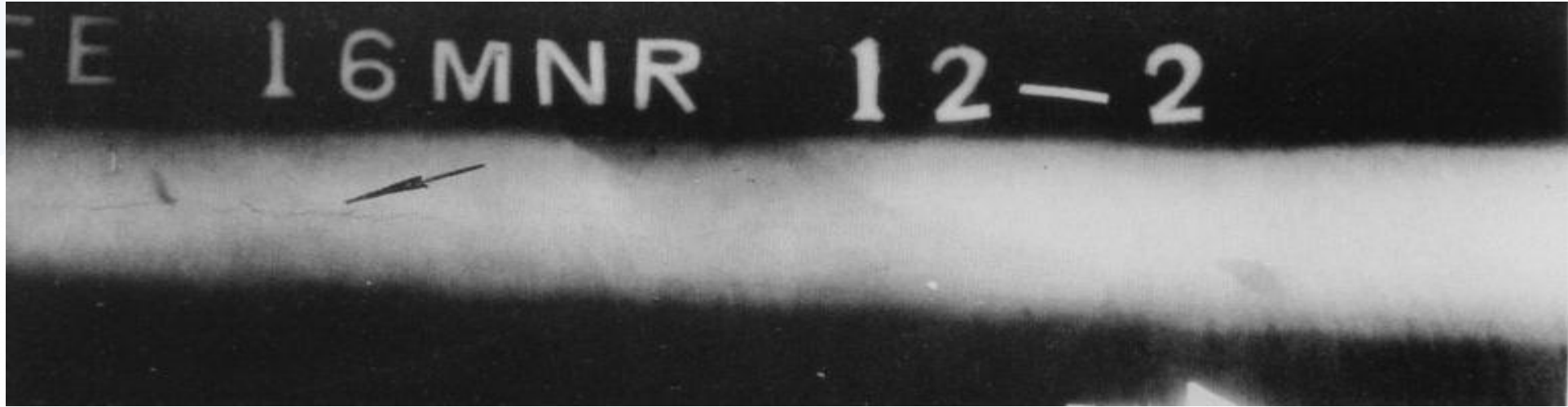
■ 常见缺陷及其影像特征



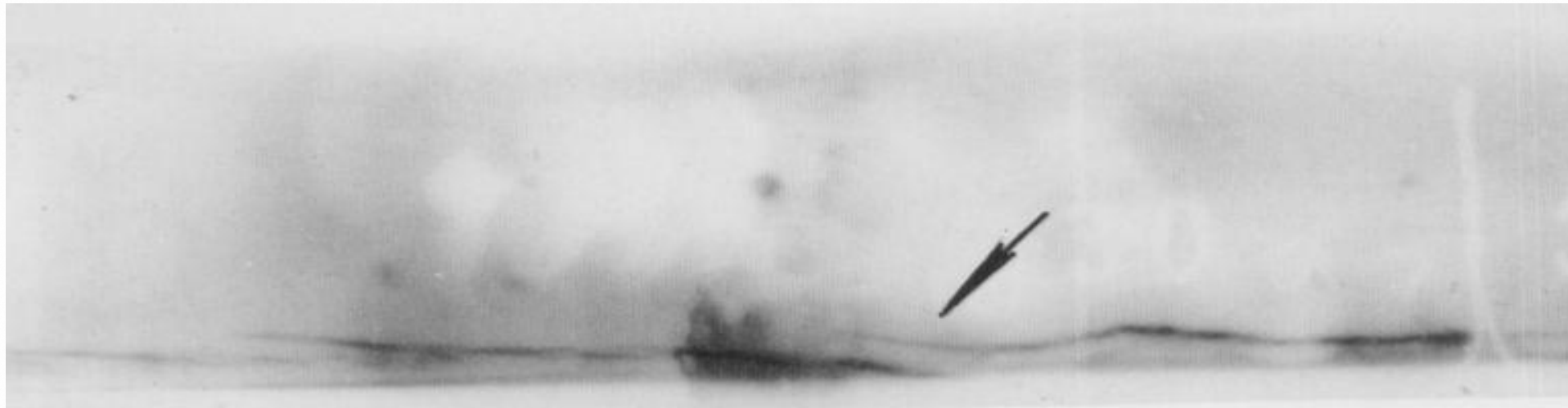
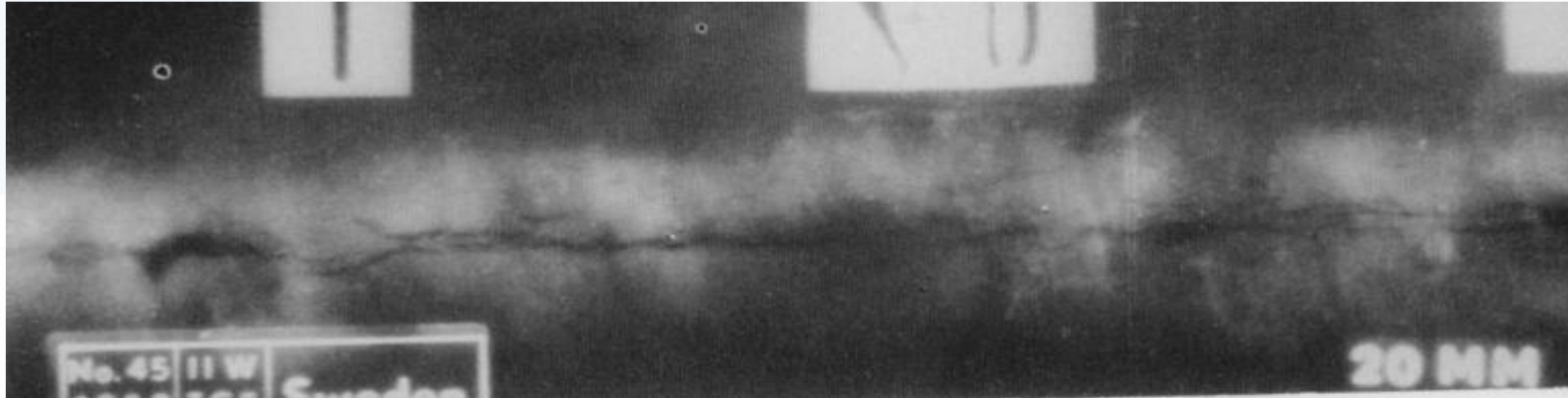
■ 常见缺陷及其影像特征



■ 常见缺陷及其影像特征



常见缺陷及其影像特征

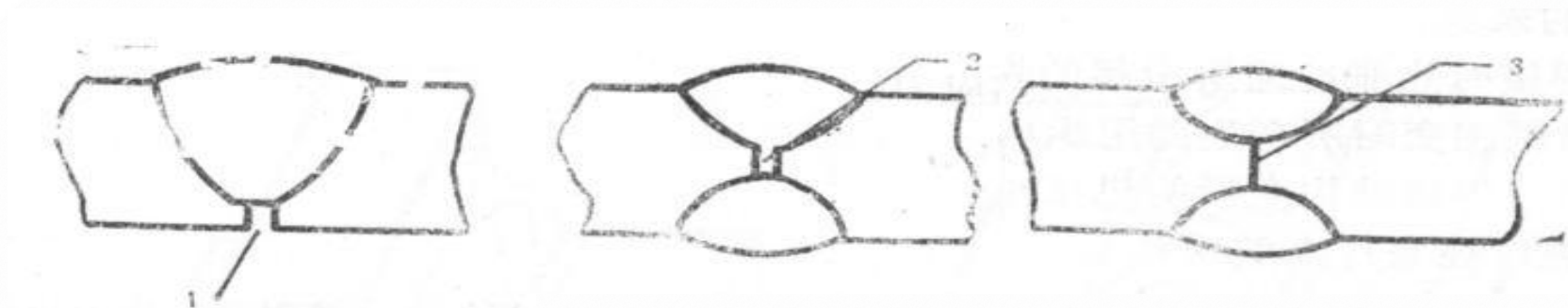


■ 常见缺陷及其影像特征

◀ (2) 未焊透

未焊透是熔焊金属与基体材料没有熔合为一体且有一定间隙的一种缺陷。在胶片上的影像特征是连续或断续的黑线，黑线的位置与两基体材料相对接的位置间隙一致。

■ 常见缺陷及其影像特征

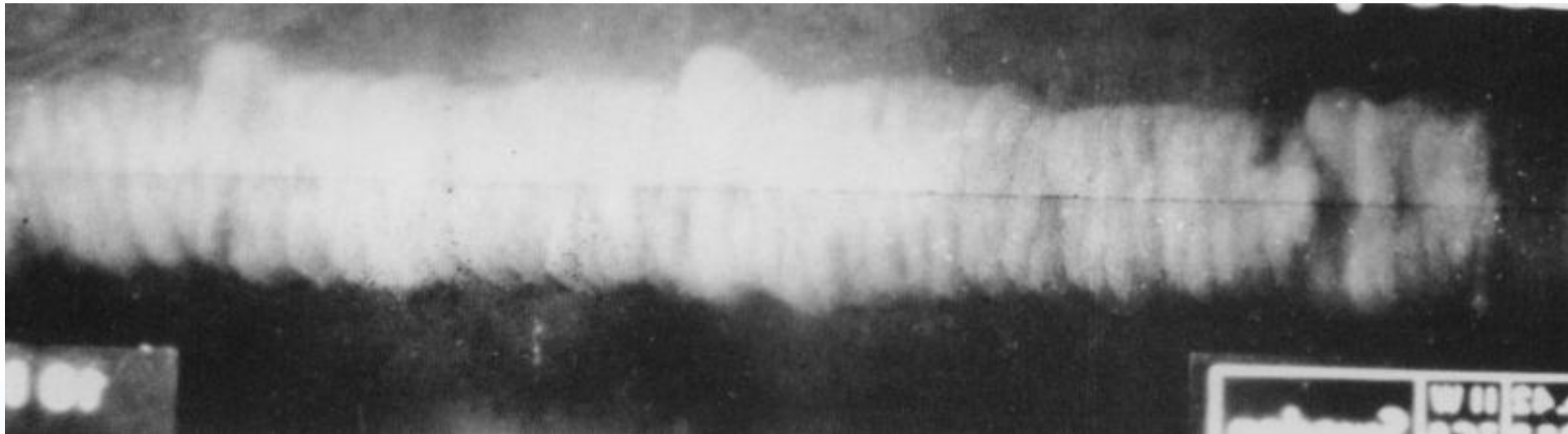


1. 单V坡口未焊透

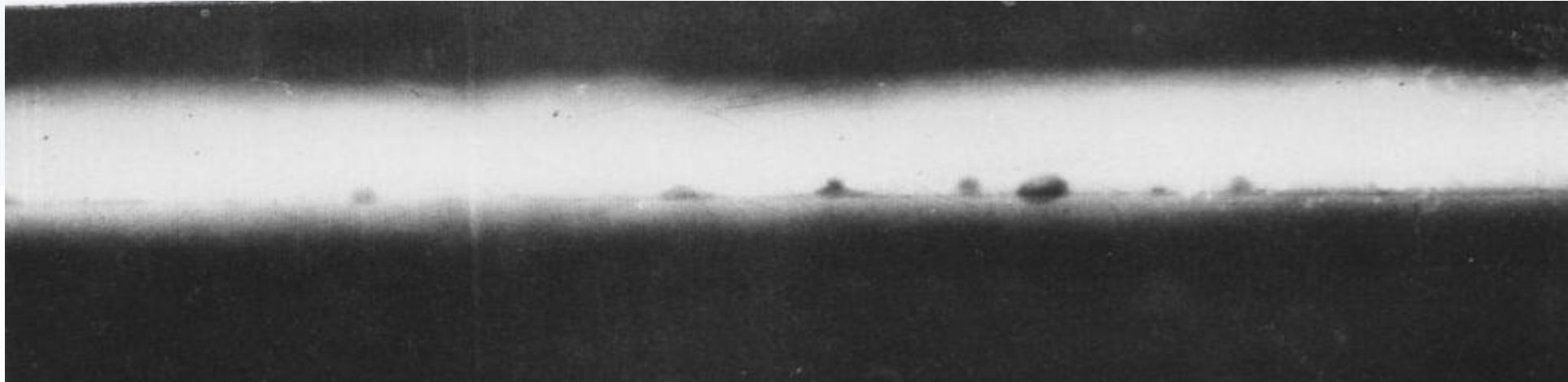
2. X坡口未焊透

3. 无坡口未焊透

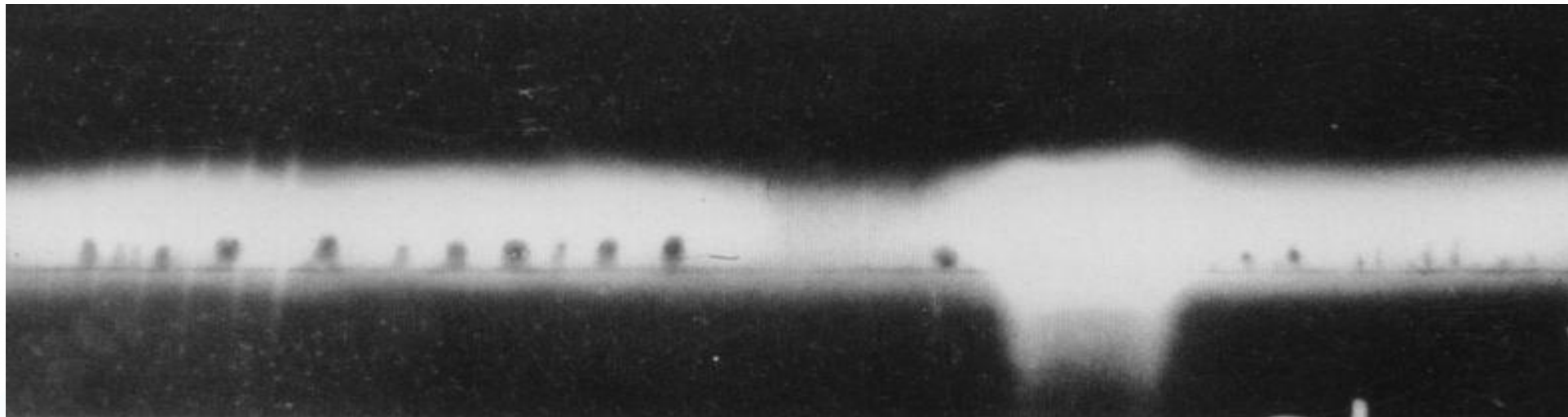
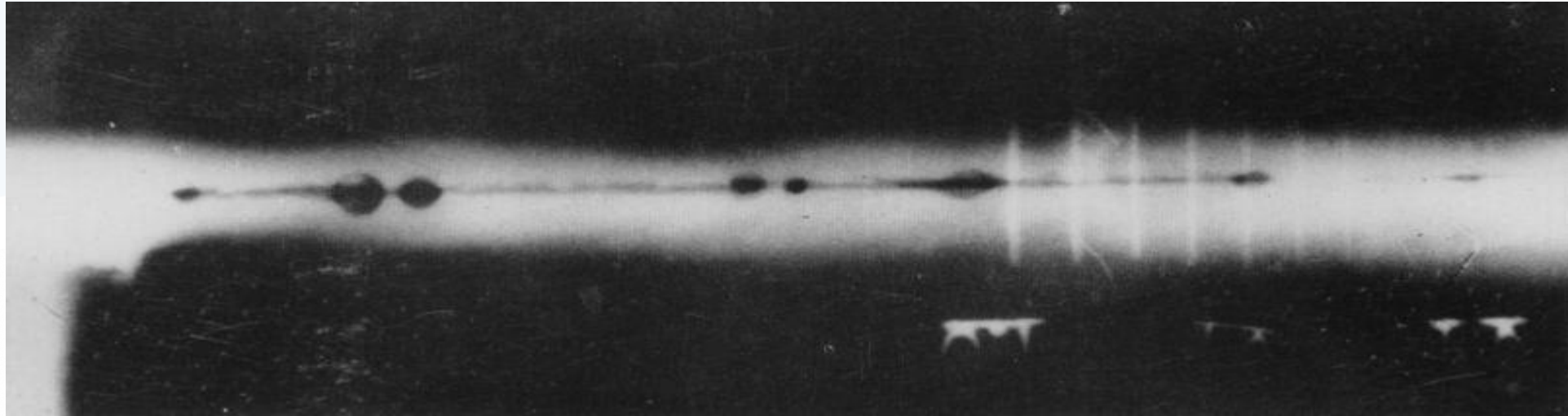
■ 常见缺陷及其影像特征



常见缺陷及其影像特征



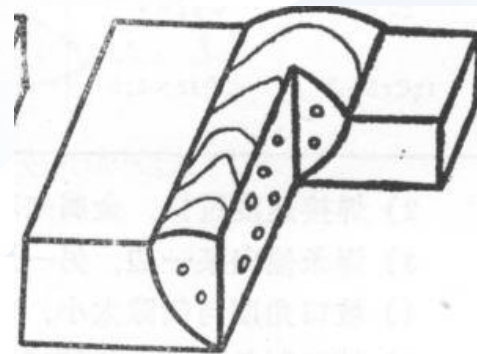
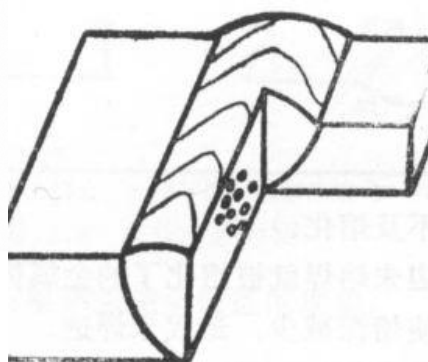
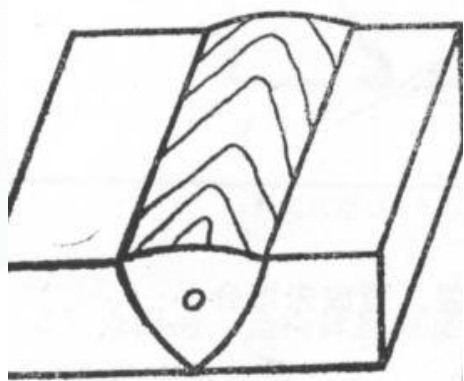
常见缺陷及其影像特征



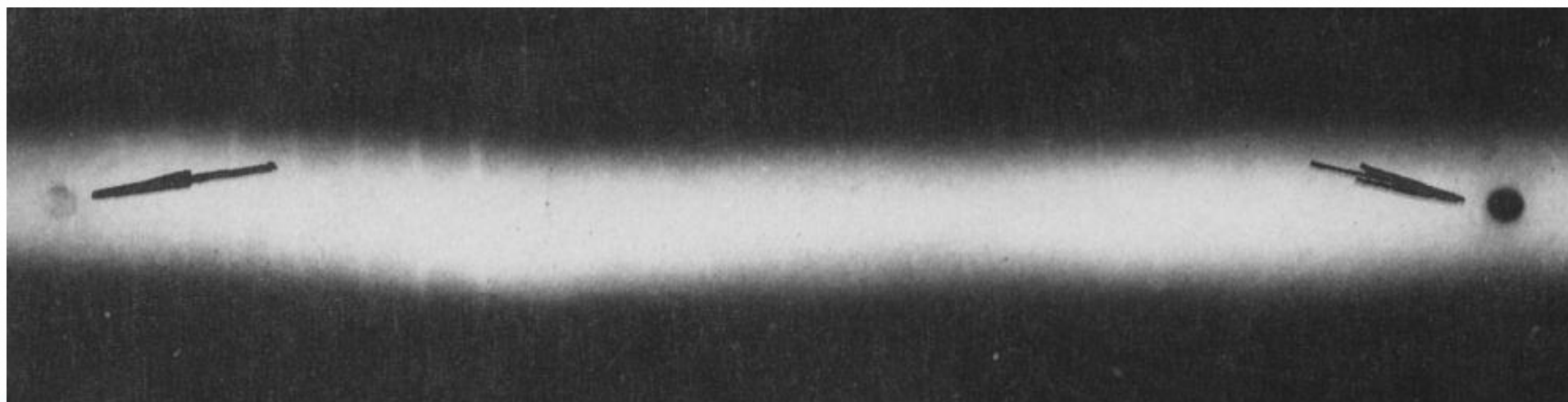
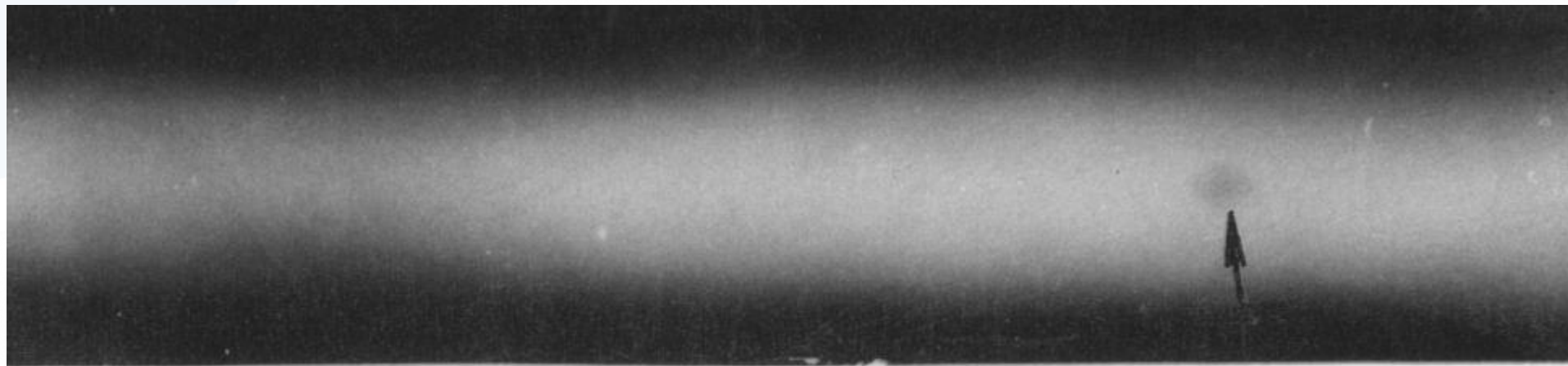
常见缺陷及其影像特征

(3) 气孔

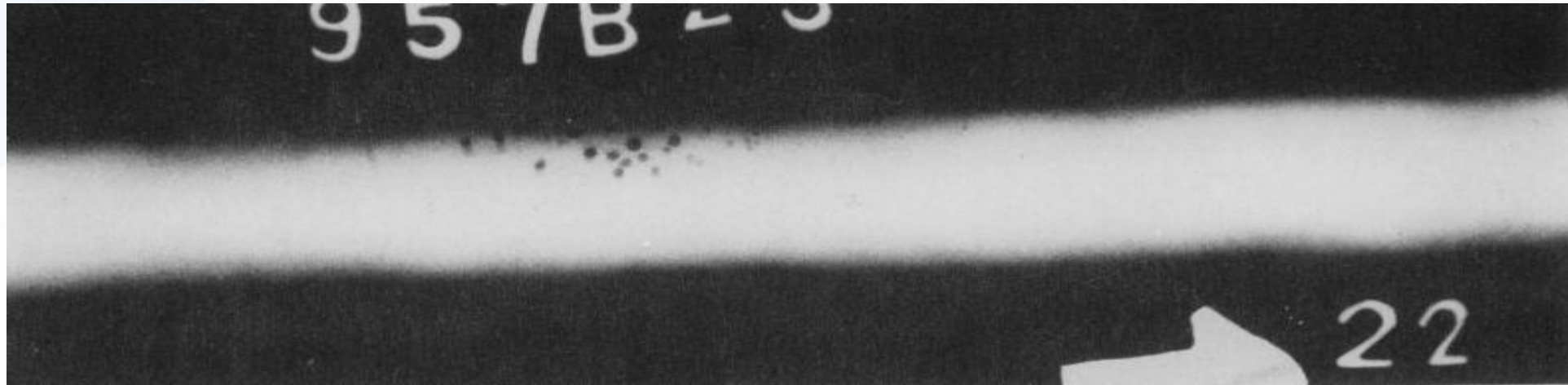
气孔是在熔焊时部分空气停留在金属内部而形成的缺陷。气孔在底片上的影像一般呈圆形或椭圆形，也有不规则形状的，以单个、多个密集或链状的形式分布在焊缝上。在底片上的影像轮廓清晰，边缘圆滑，如气孔较大，还可看到其黑度中心部分较边缘要深一些。



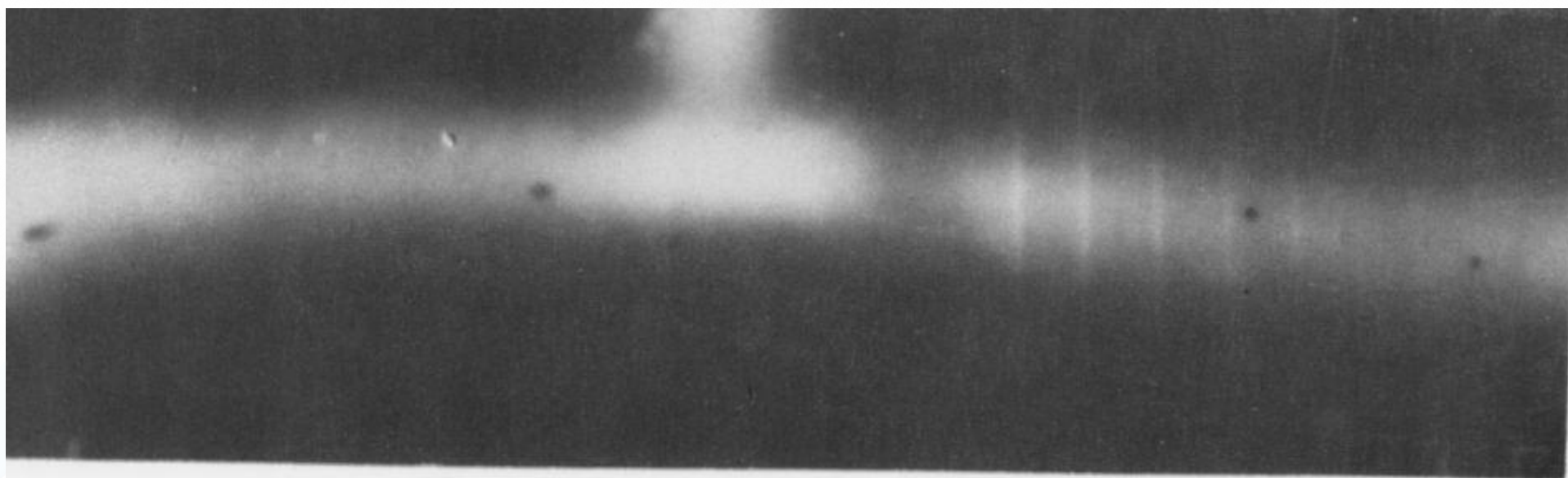
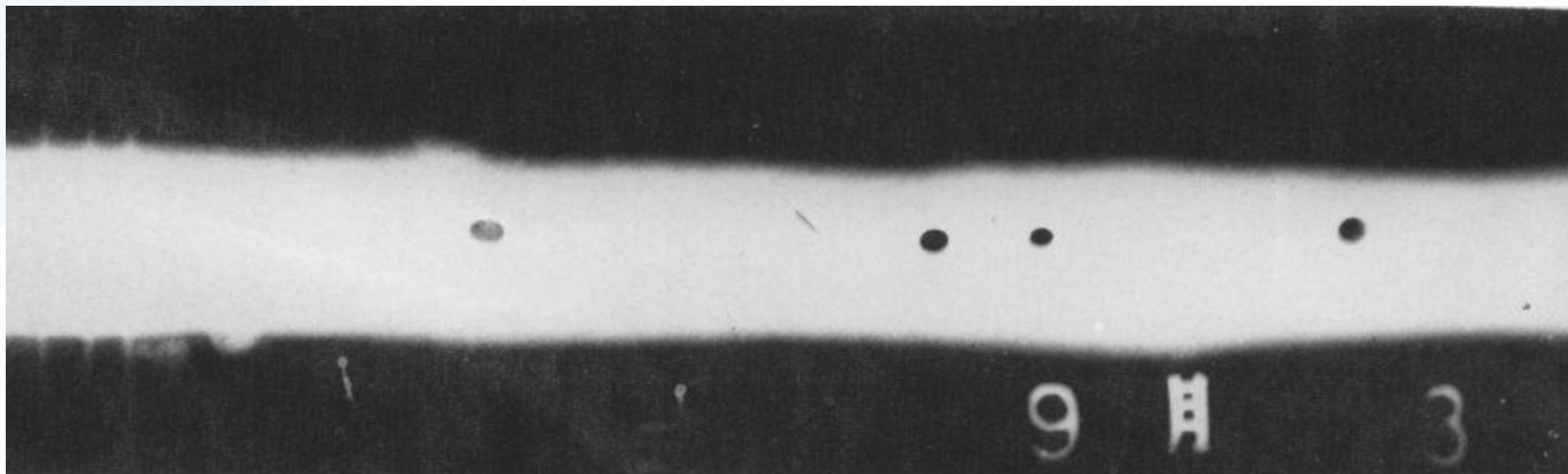
常见缺陷及其影像特征



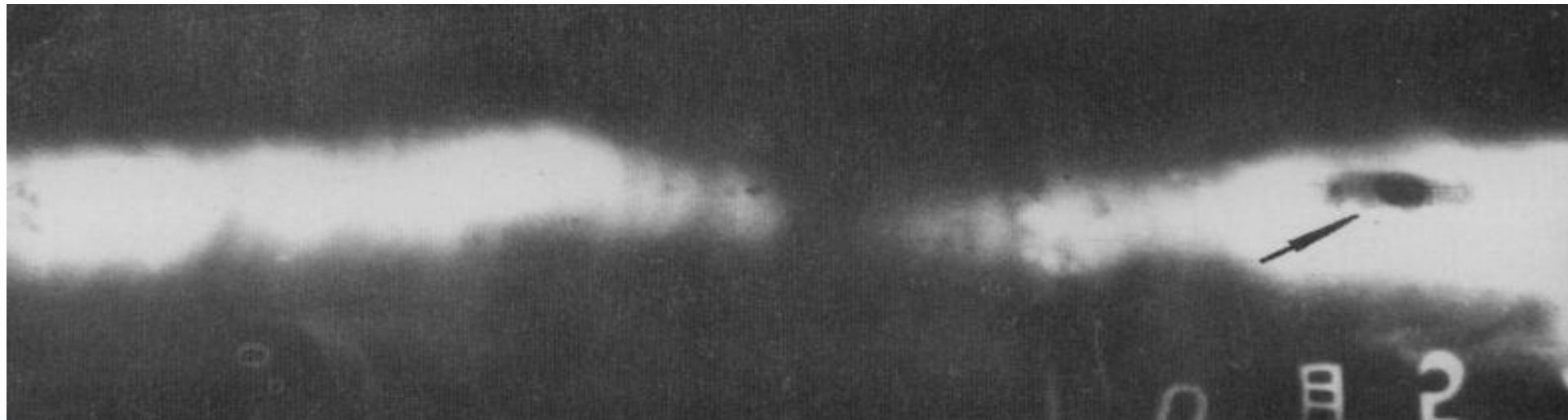
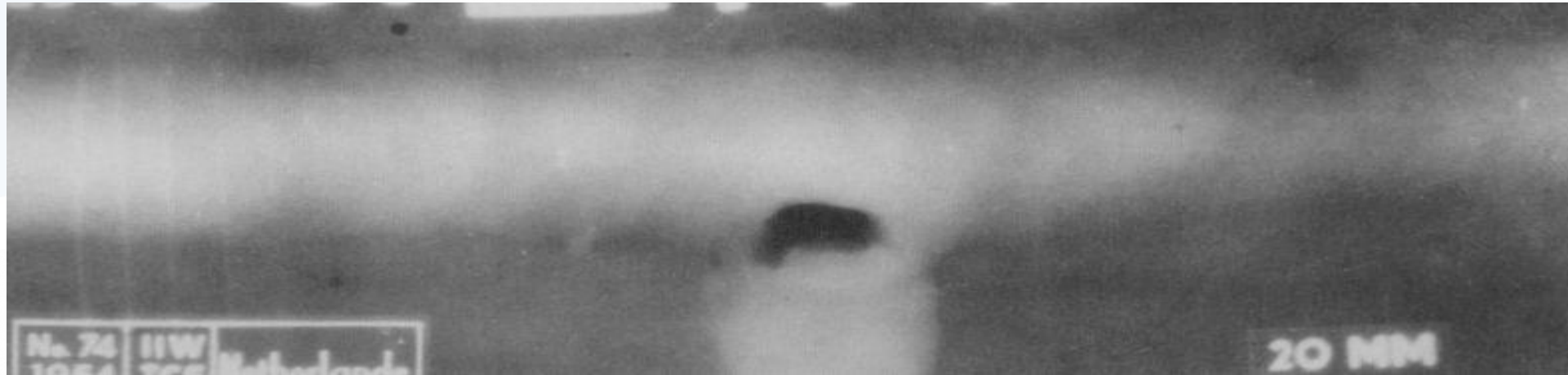
■ 常见缺陷及其影像特征



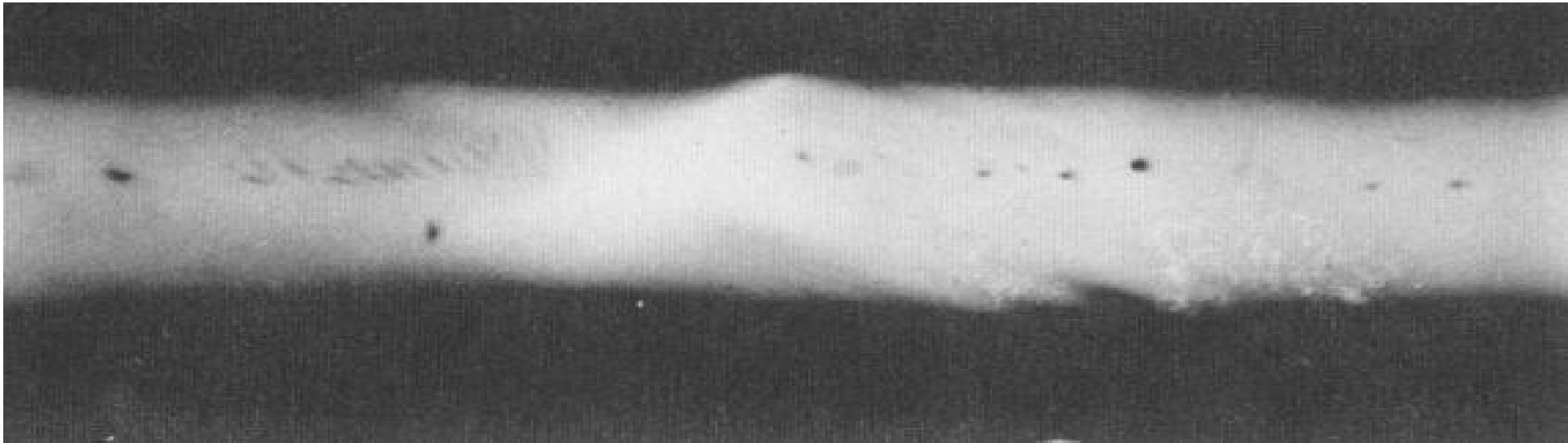
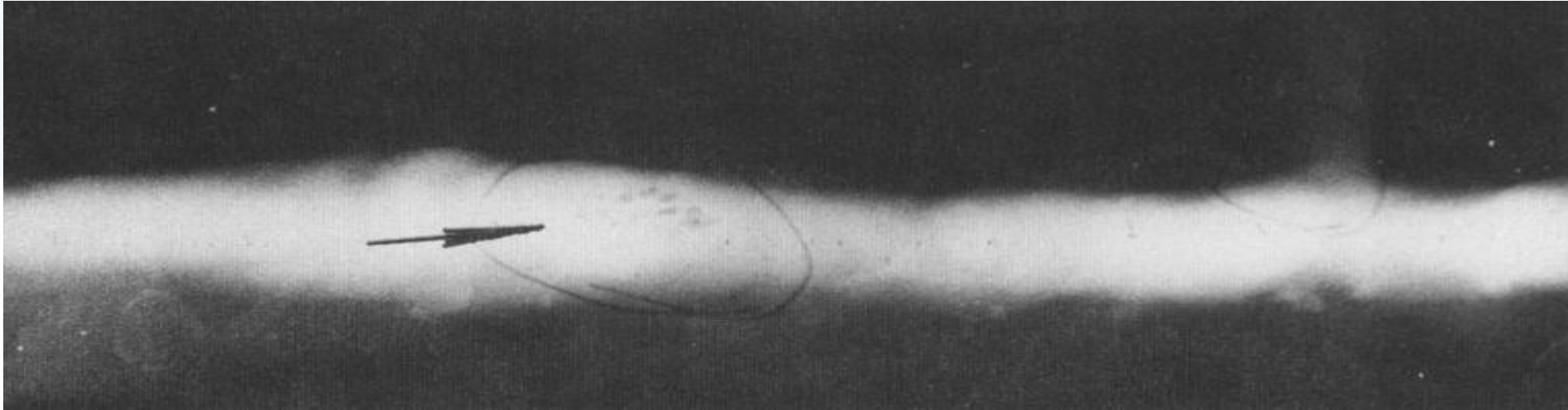
常见缺陷及其影像特征



■ 常见缺陷及其影像特征



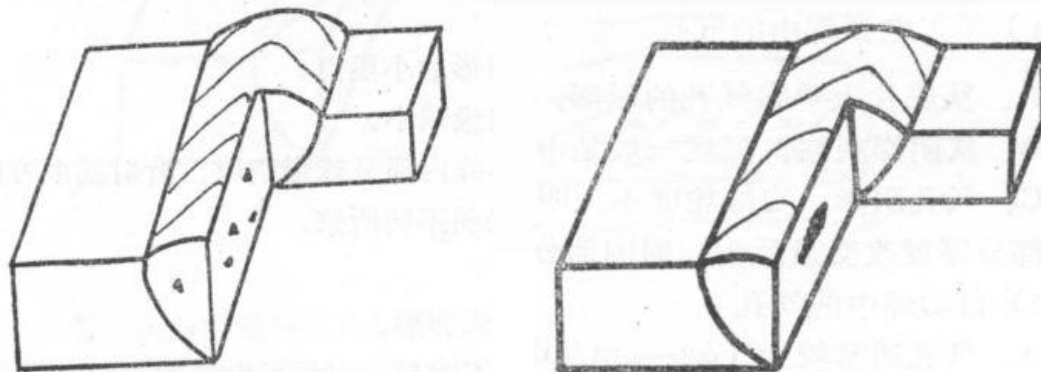
常见缺陷及其影像特征



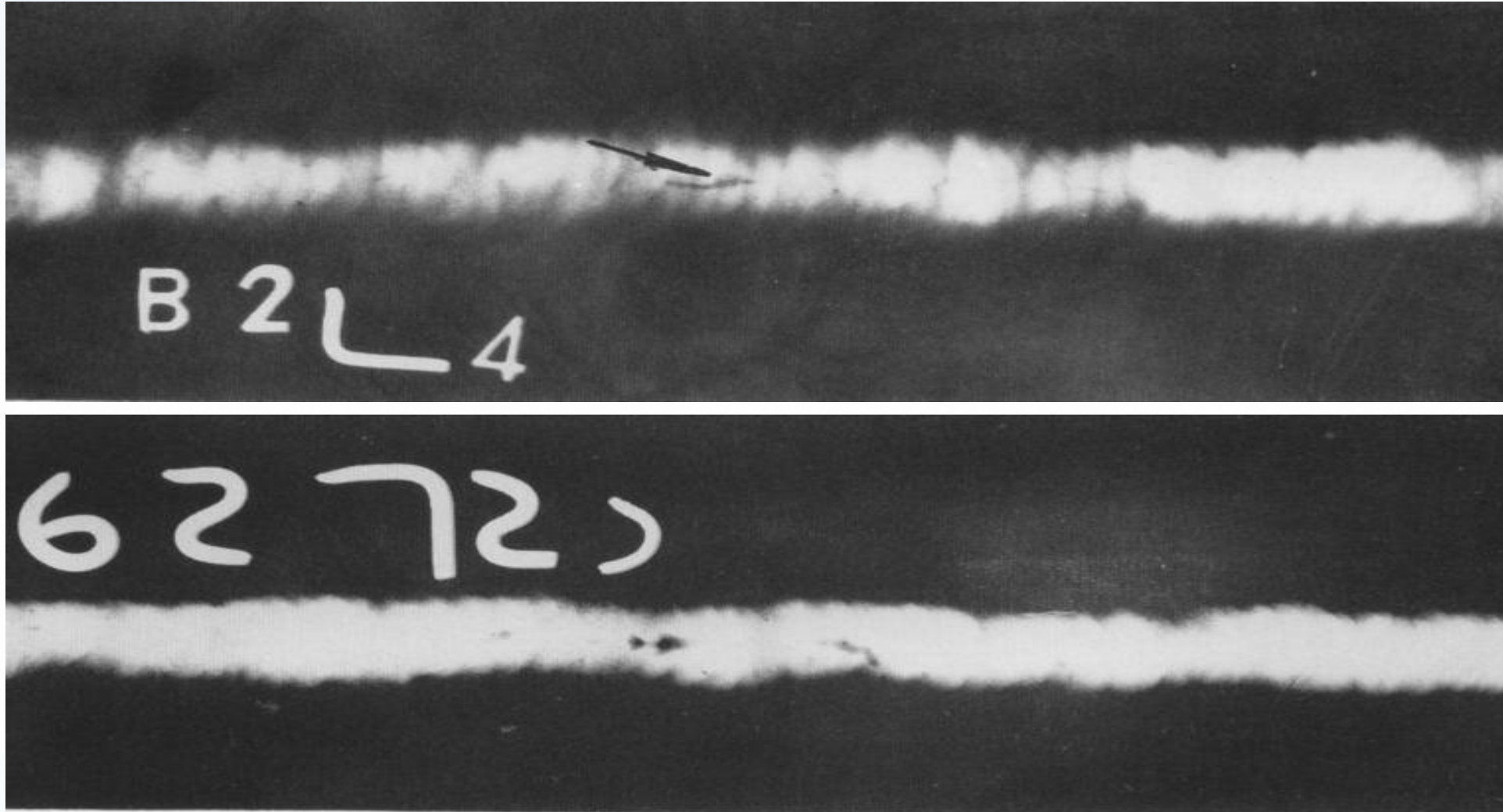
常见缺陷及其影像特征

(4) 夹渣

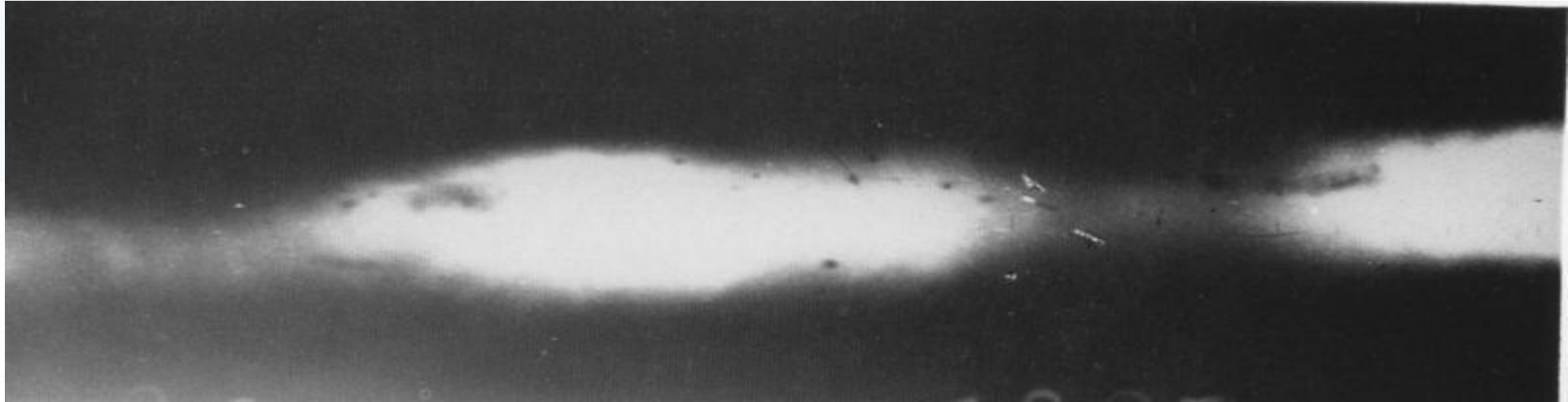
夹渣是在熔焊时所产生的金属氧化物或非金属夹杂物，因来不及浮出表面，停留在焊缝内部而形成的缺陷。在底片上其影像是不规则的，呈圆形、块状或链状等，边缘没有气孔圆滑清晰，有时带棱角，如图所示。



■ 常见缺陷及其影像特征



常见缺陷及其影像特征



常见缺陷及其影像特征



圆形缺陷

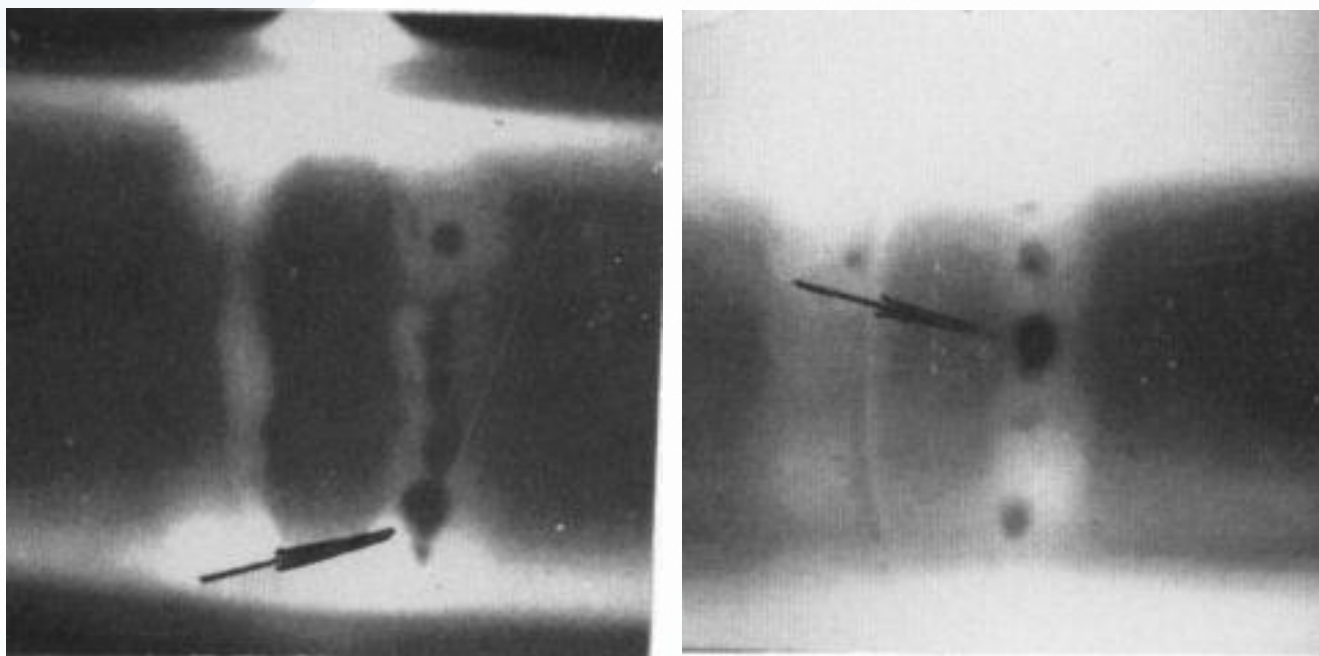
夹钨

圆形缺陷

夹钨

常见缺陷及其影像特征

(5) 烧穿



焊缝烧穿照片

在焊缝的局部，因**热量过大**而被熔穿，形成流垂或凹坑。在底片上的影像呈光亮的圆形(流垂)或呈边缘较清晰的黑块(凹坑)。

常见缺陷及其影像特征

2 铸件中常见的缺陷

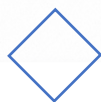
(1) 夹杂

夹杂是金属熔化过程中的熔渣或氧化物，因来不及浮出表面而停留在铸件内形成的。在胶片上的影像有球状、块状或其他不规则形状。其黑度有均匀的和不均匀的，有时出现的可能不是黑块而是亮块，这是因为铸件中夹有比铸造金属密度更大的夹杂物，如铸镁合金中的熔剂夹渣。

常见缺陷及其影像特征

(2) 气孔

因铸型通气性不良等原因，使铸件内部分气体排不出来而形成气孔。气孔大部分接近表面，在底片上的影像呈圆形或椭圆形，也有不规则形状的，一般中心部分较边缘稍黑，轮廓较清晰。



常见缺陷及其影像特征

(3) 针孔

针孔是指直径小于或等于1 mm的气孔，是铸铝合金中常见的缺陷。在胶片上的影像有圆形、条形、苍蝇脚形等。当透照较大厚度的工件时，由于针孔分布在整個横断面，针孔投影在胶片上是重叠的，此时就无法辨认出它的单个形状了。

常见缺陷及其影像特征

(4) 疏松

浇铸时局部温差过大，在金属收缩过程中，邻近金属补缩不良，产生疏松。疏松多产生在铸件的冒口根部、厚大部位、厚薄交界处和具有大面积的薄壁处。在底片上的影像呈轻微疏散的浅黑条状或疏散的云雾状，严重的呈密集云雾状或树枝状。

常见缺陷及其影像特征

(5) 裂纹

裂纹一般是在收缩时产生，沿晶界发展。在底片上的影像是连续或断续曲折状黑线，一般两端较细。

■ 常见缺陷及其影像特征

◀ (6) 冷隔

冷隔由浇铸温度偏低造成，一般分布在较大平面的薄壁上或厚壁过渡区，铸件清理后有时肉眼可见。在底片上的影像呈黑线，与裂纹相似，但有时可能中部细而两端较粗。

常见缺陷及其影像特征

3 缺陷埋藏深度的测定

根据缺陷在底片上的影像，只能判定缺陷在工件中的平面位置，也就是说，只能把缺陷位置以两个坐标表示出来。为了确定第三个坐标，即决定缺陷所在位置的深度，必须进行两次不同方向的照射。

4 缺陷在射线方向上的厚度测定

缺陷在射线束方向的厚度(如气孔直径或未焊透深度等)测定方法，可用测量缺陷在底片上的影像黑度来估计。

■ 常见缺陷及其影像特征

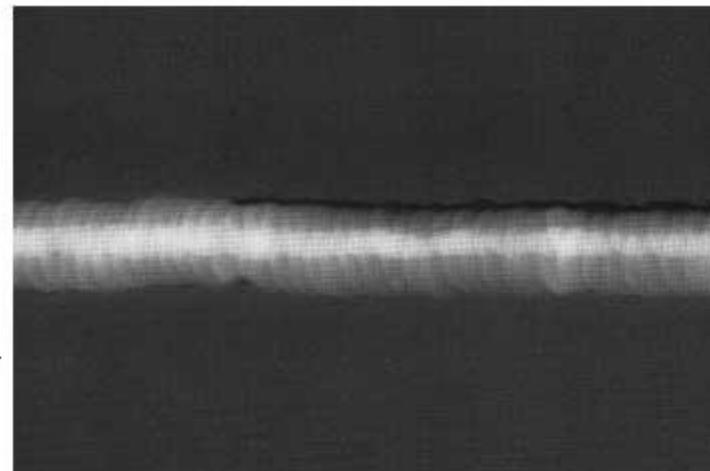
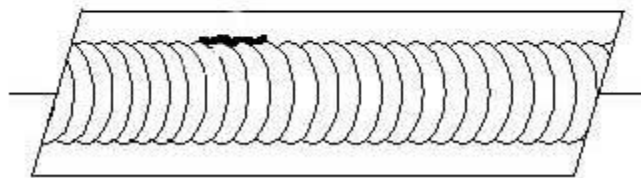
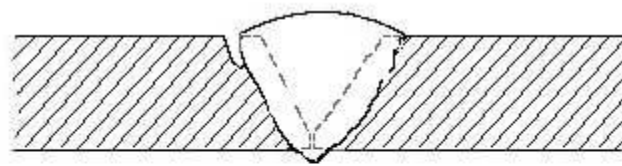
5 表面缺陷和伪缺陷

(1) 表面缺陷

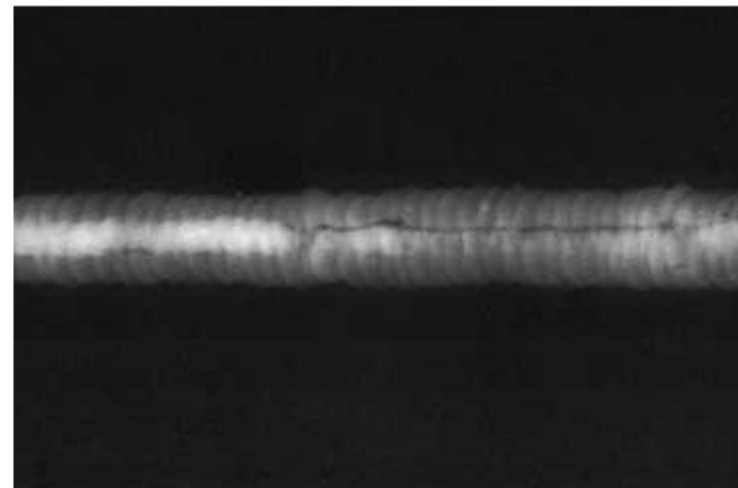
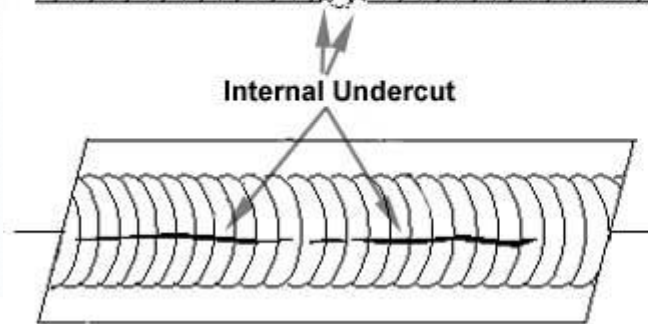
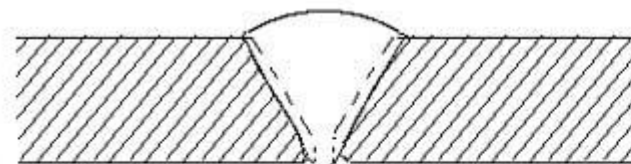
对于缺陷，主要应检查工件内部缺陷，但是各种表面缺陷在胶片上的影像和内部缺陷的影像并没有什么区别，表面缺陷有些是允许的。因此，在胶片上发现有缺陷影像后，**应与工件表面仔细查对**，最后得出结论。

常见缺陷及其影像特征

表面咬边

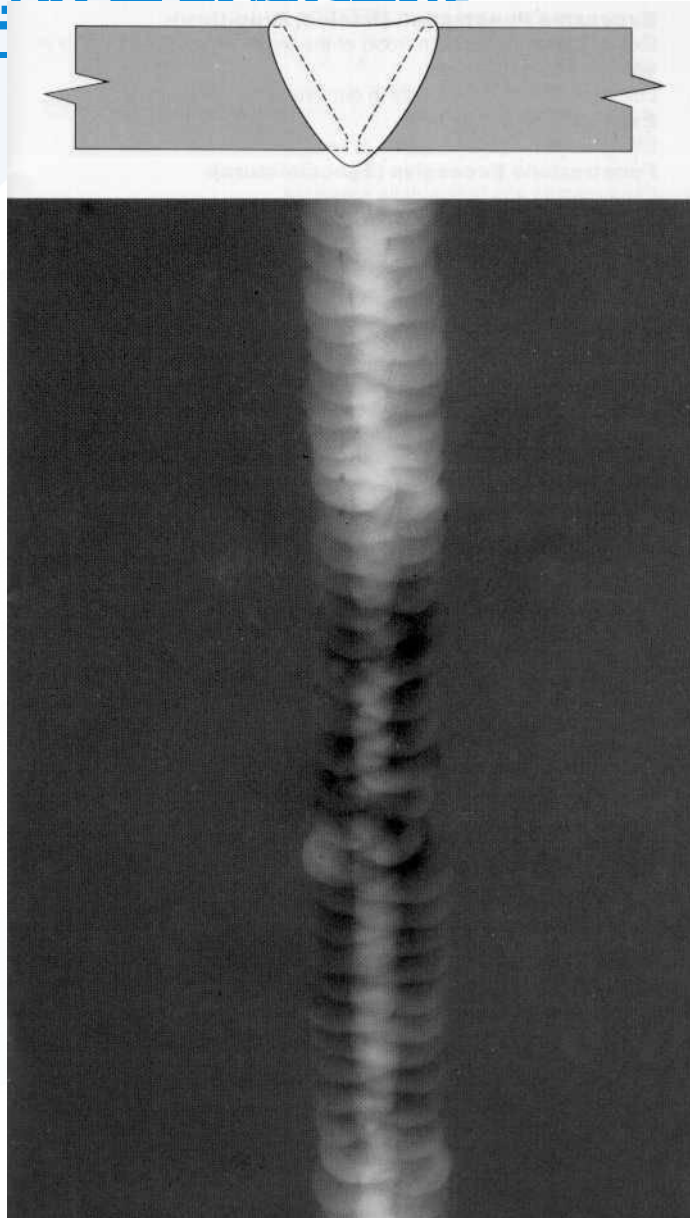


内咬边

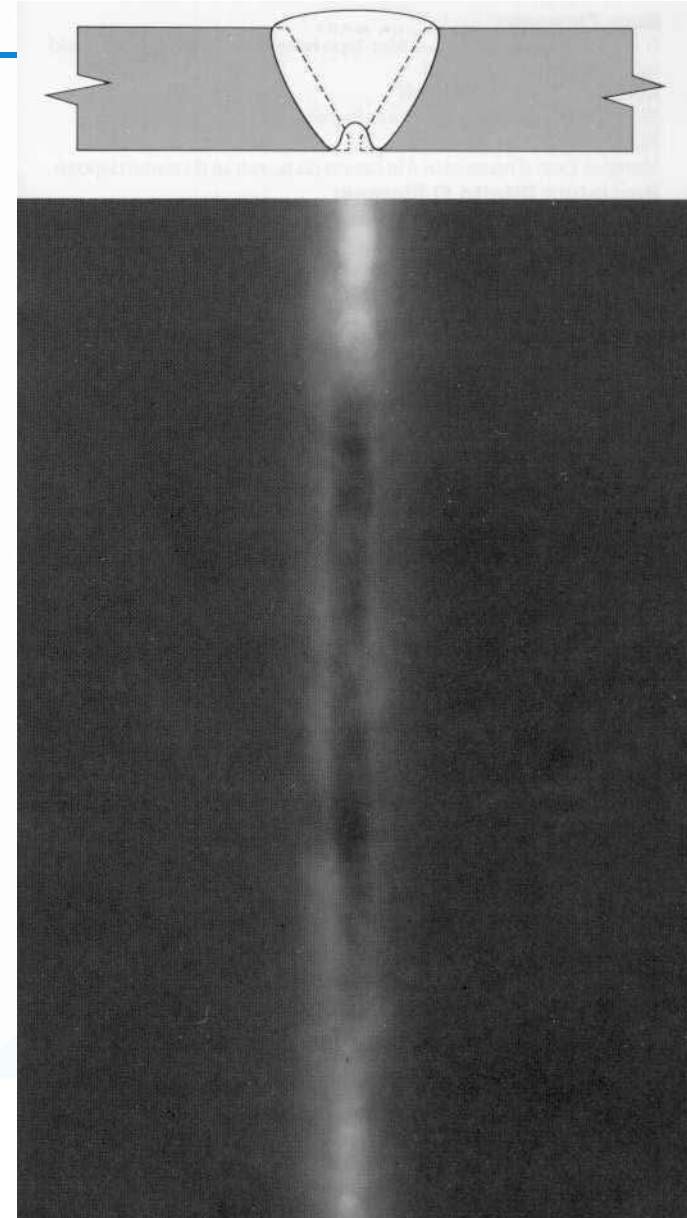


常见缺陷及其影像特征

表面内凹

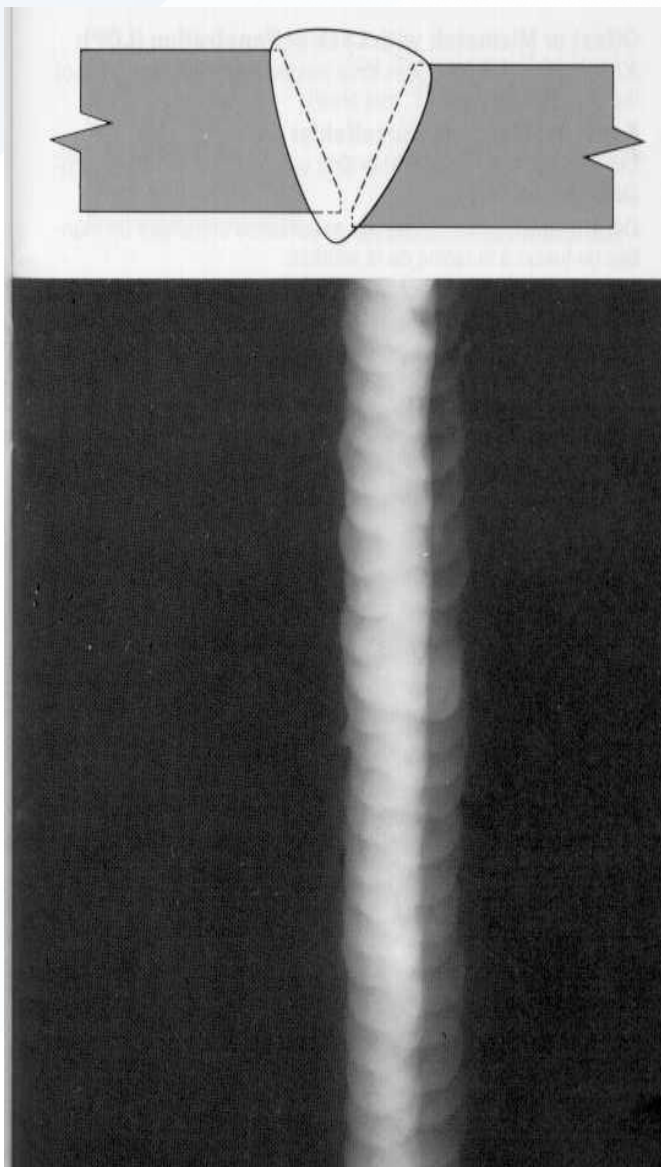


根部内凹

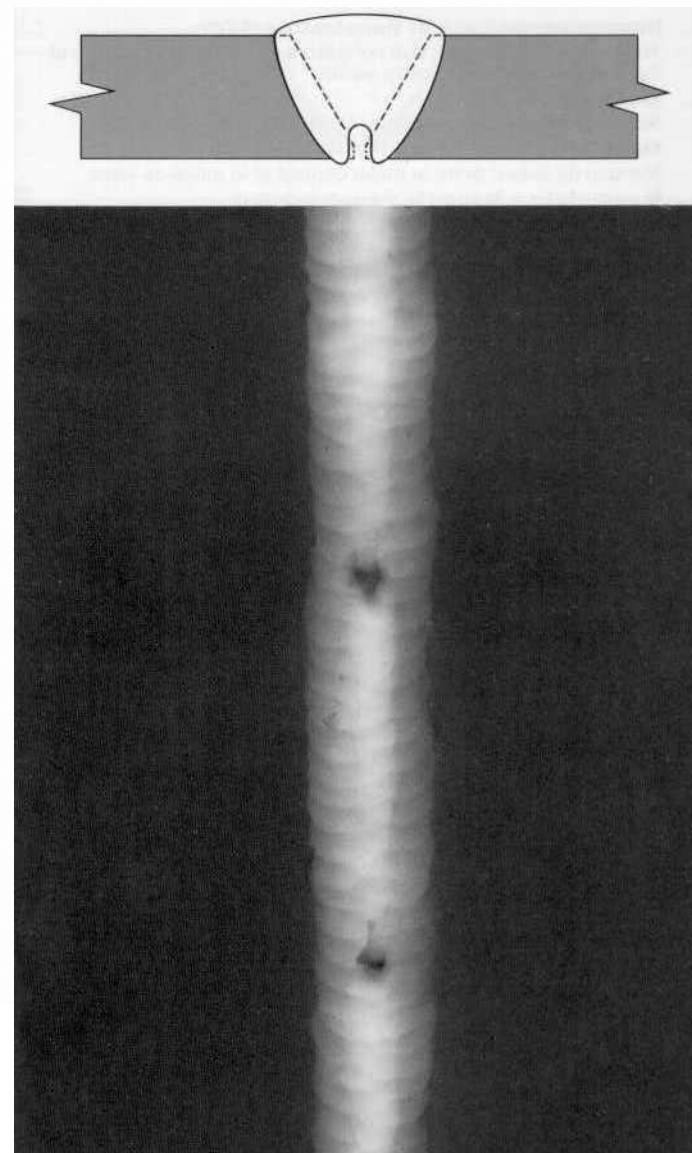


常见缺陷及其影像特征

错口



接头凹坑



■ 常见缺陷及其影像特征

(2) 伪缺陷

伪缺陷产生的原因很多，形状也多种多样，检测人员一般凭经验能识别大部分伪缺陷。也就是说，对缺陷影像**可根据缺陷影像的特征和产生的部位予以分析**。此外，还可以从胶片两侧利用反光或放大镜观察表面是否划伤来判断。如仍怀疑有缺陷，则必须重照复验。



■ 常见缺陷及其影像特征

压痕



常见缺陷及其影像特征

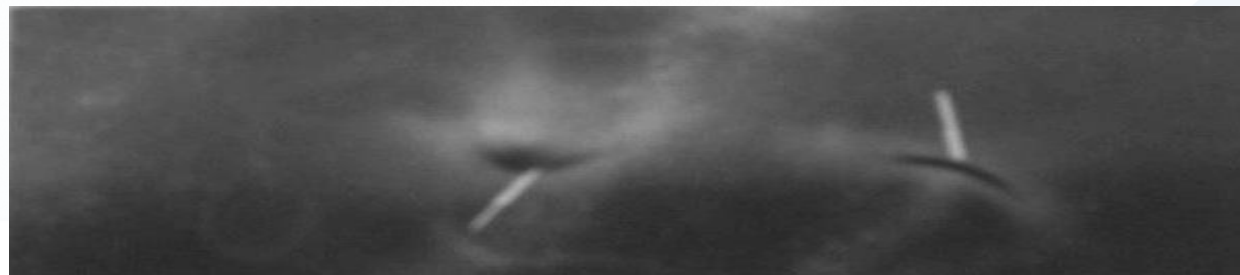
折痕



折痕 (曝光后) 1



折痕 (曝光后) 2



折痕 (曝光后) 3

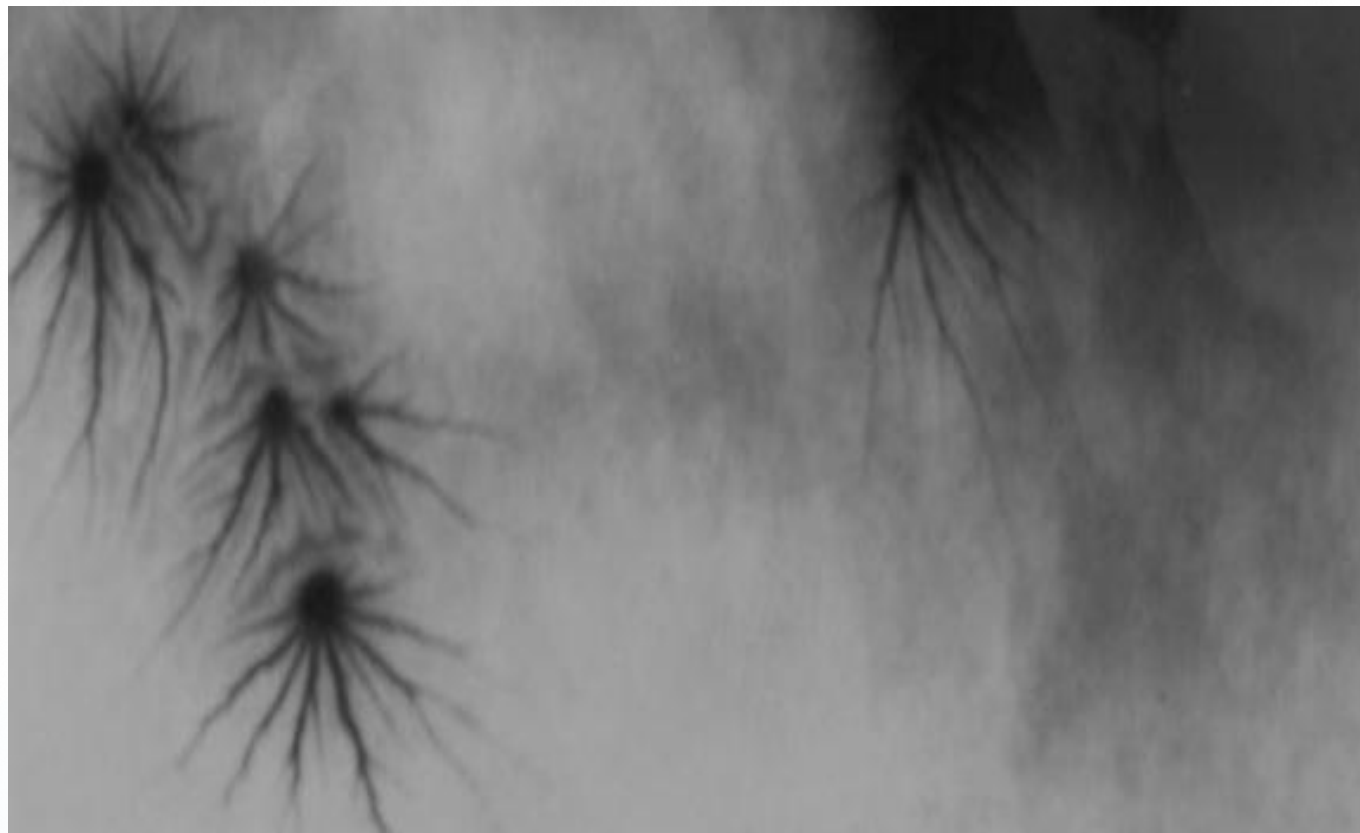
常见缺陷及其影像特征



静电斑纹

静电斑纹

■ 常见缺陷及其影像特征



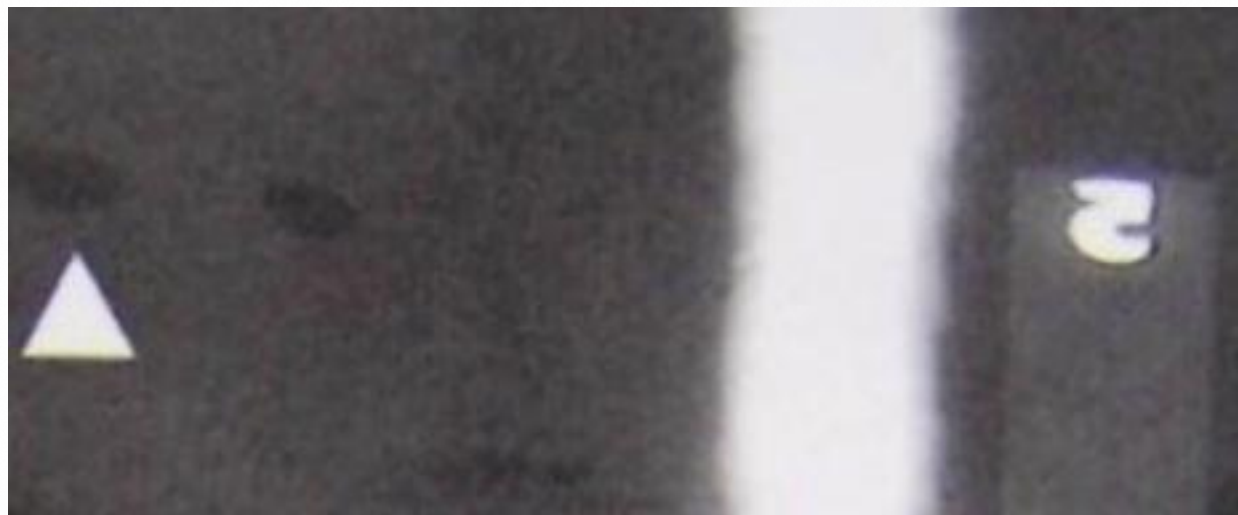
常见缺陷及其影像特征

定影液斑点



常见缺陷及其影像特征

显影液斑点



■ γ 射线检测及中子射线检测简介

一、 γ 射线检测的特点

γ 射线与X射线检测的工艺方法基本上是一样的，但是 γ 射线检测有其独特的地方。

(1) γ 射线源不像X射线那样，可以根据不同检测厚度来调节能量(如管电压)，它有自己的固定能量，所以要根据材料厚度、精度要求合理选取 γ 射线源。

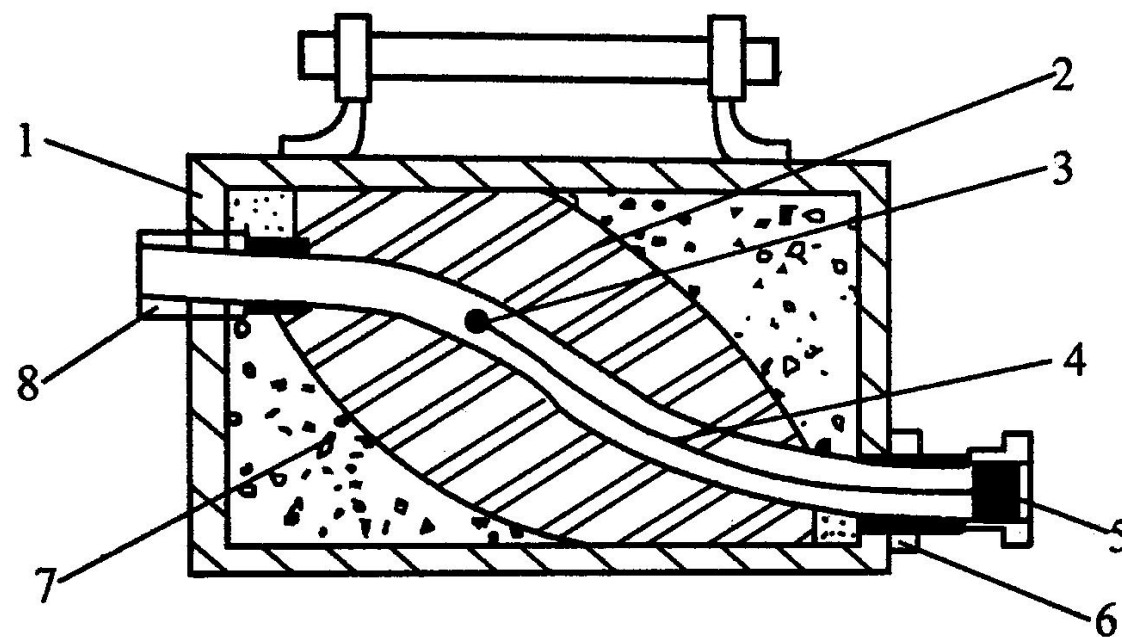
(2) γ 射线比X射线辐射剂量(辐射率)低，所以曝光时间比较长，曝光条件同样是根据曝光曲线选择的，并且一般都要使用增感屏。

γ射线检测及中子射线检测简介

(3) γ 射线源随时都在放射，不像X射线机那样不工作就没有射线产生，所以应特别注意射线的防护工作。

(4) γ 射线比普通X射线穿透力强，但灵敏度较X射线低，它可以用于高空、水下及野外作业。在那些无水无电及其他设备不能接近的部位(如狭小的孔洞或是高压线的接头等)，均可使用 γ 射线对其进行有效的检测。

γ射线检测及中子射线检测简介



S通道 γ 射线机源容器的基本结构

1—外壳；2—贫化铀屏蔽区；3— γ 源组件；4—源托；5—安全接插器；
6—密封盒；7—聚氨酯填料；8—快速连接器。

■ γ 射线检测及中子射线检测简介

二、中子射线照相检测的特点

中子射线照相检测与X射线照相检测、 γ 射线照相检测相类似，都是利用射线对物体有很强的穿透能力，来实现对物体的无损检测。对大多数金属材料来说，由于中子射线比X射线和 γ 射线具有更强的穿透力，对含氢材料表现为很强的散射性能等特点，从而成为射线照相检测技术中又一个新的组成部分。

射线的防护

一、屏蔽防护法

屏蔽防护法是利用各种屏蔽物体吸收射线，以减少射线对人体的伤害，这是射线防护的主要方法。一般根据X射线、 γ 射线与屏蔽物的相互作用来选择防护材料，屏蔽X射线和 γ 射线以密度大的物质为好，如贫化铀、铅、铁、重混凝土、铅玻璃等都可以用作防护材料。但从经济、方便出发，也可采用普通材料，如混凝土、岩石、砖、土、水等。对于中子的屏蔽除能防护 γ 射线之外，还以特别选取含氢元素多的物质为宜。



射线的防护

二、距离防护法

距离防护在进行野外或流动性射线检测时是非常经济有效的方法。这是因为射线的剂量率与距离的平方成反比，增加距离可显著地降低射线的剂量率。若离放射源的距离为 R_1 处的剂量率为 P_1 ，在另一径向距离为 R_2 处的剂量率为 P_2 ，则它们的关系为：

$$P_2 = P_1 \frac{R_1^2}{R_2^2}$$

显然，增大 R_2 可有效地降低剂量率 P_2 ，在无防护或防护层不够时，这是一种特别有用的防护方法。

射线的防护

三、时间防护法



时间防护是指让工作人员尽可能的减少接触射线的时间，以保证检测人员在任一天都不超过国家规定的最大允许剂量当量(17mrem)。

人体接受的总剂量： $D = Pt$ ，其中， P 为在人体上接受到的射线剂量率， t 为接触射线的时间。

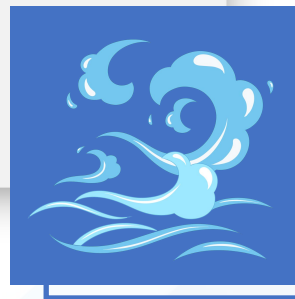
由此可见，**缩短与射线接触时间** t 亦可达到防护目的。如每周每人控制在最大容许剂量0.1rem以内时，则应有 $D \leq 0.1\text{rem}$ ；如果人体在每透照一次时所接受到的射线剂量为时，则控制每周内的透照次数 $N \leq 0.1$ ，亦可以达到防护的目的。

射线的防护

四、中子防护

(1) 减速剂的选择

快中子减速作用，主要依靠中子和原子核的弹性碰撞，因此较好的中子减速剂是原子序数低的元素如氢、水、石蜡等含氢多的物质，它们作为减速剂使用减速效果好，价格便宜，是比较理想的防护材料。



射线的防护

对于吸收剂要求它在俘获慢中子时放出来的射线能量要小，而且对中子是易吸收的。锂和硼较为适合，因为它们对热中子吸收截面大，分别为：71barn(靶)和759barn，锂俘获中子时放出 γ 射线很少，可以忽略，而硼俘获的中子95%放出0.7MeV的软 γ 射线，比较易吸收，因此常选含硼物或硼砂、硼酸作吸收剂。

(2) 吸收剂的选择

在设置中子防护层时，总是把减速剂和吸收剂同时考虑；如含2%的硼砂(质量分数，下同)、石蜡、砖或装有2%硼酸水溶液的玻璃(或有机玻璃)水箱堆置即可，特别要注意防止中子产生泄漏。



武汉理工大学
Wuhan University of Technology

谢谢观看！

机电工程学院测控系

主讲人：魏 莉