



中国机械工程学会无损检测分会 RT培训讲义

本讲义由学会常务委员 晏荣明 编写
(仅供参考)

中国机械工程学会无损检测分会 深圳市无损检测人员培训中心

电话: 021-65550277

电话: 13538291001

邮箱: chsndt2008@163.com

邮箱: yanrongming@126.com

第二章 射线检测系统

Chapter 2

Testing System of RT

内 容 Contents

- X射线机
- γ 射线机
- 加速器
- 工业射线胶片
- 射线照相辅助设备器材

X射线机 X-ray Machine

- X射线机的种类
- X射线机的基本结构
- X射线机主要技术条件
- X射线机使用及维护

X射线机的种类 ——按结构分

Classification for X-ray machine

- 便携式X射线机:

由射线机头和控制箱组成，用低压电缆连接；采用半波自整流电路,射线管和高压发生器同在射线机头内。体积小、质量轻,适合高空和野外作业。技术进展：小型化、自动化、高可靠性.

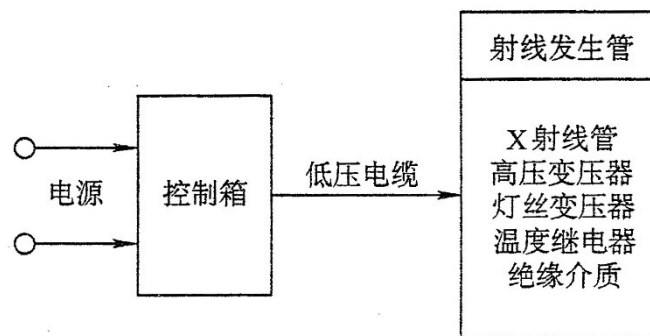


图 2—1 携带式 X 射线机结构图

X射线机的种类 ——按结构分

Classification for X-ray machine



X射线机的种类 ——按结构分

Classification for X-ray machine

- 移动式X射线机:

高压发生器和射线管分开，用高压电缆连接；
体积较大、质量较重，适合半固定场合使用；用
油循环冷却。

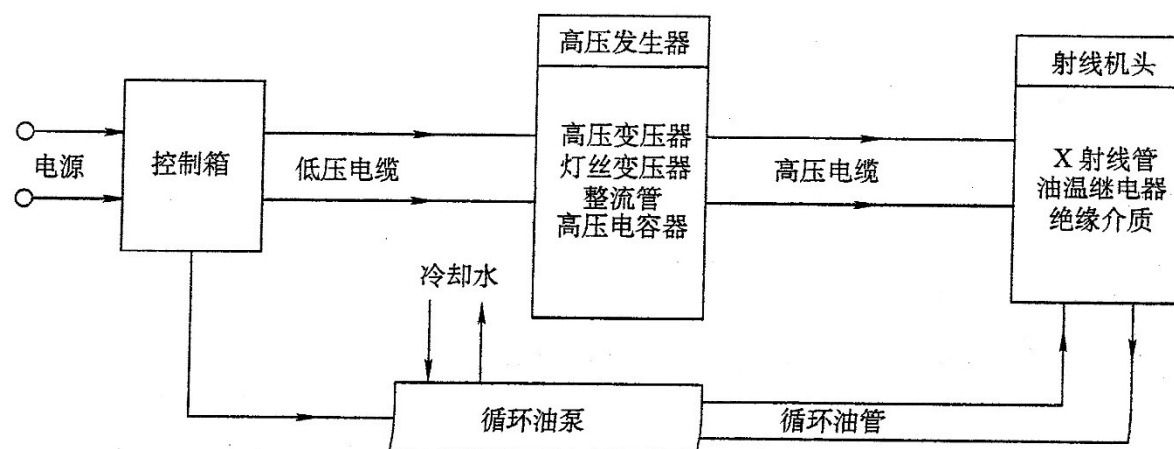
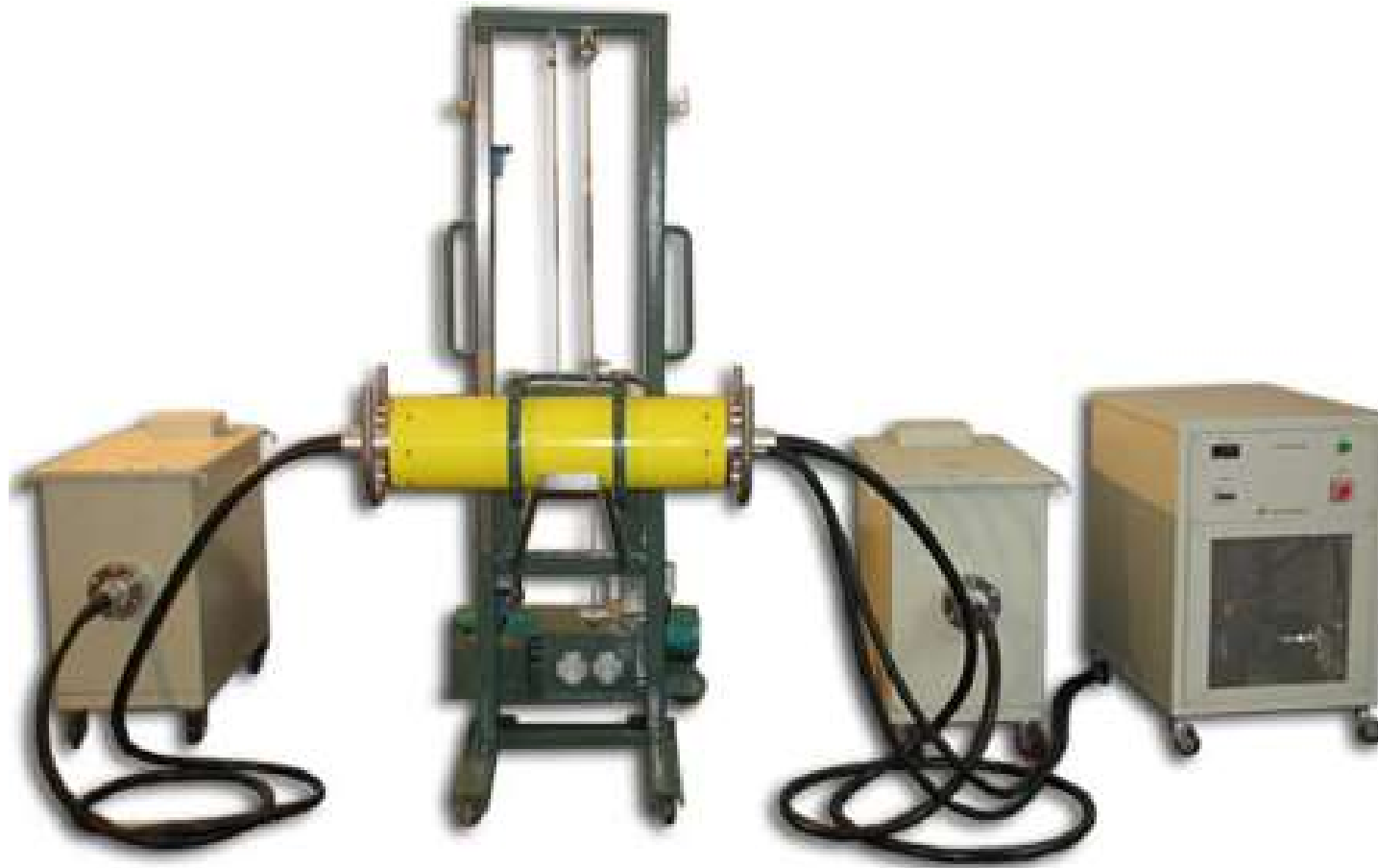


图 2—2 移动式 X 射线机结构图

X射线机的种类 ——按结构分

Classification for X-ray machine



X射线机的种类 ——按工作电压分

Classification for X-ray machine

- 恒压X射线机
- 脉冲X射线机

X射线机的种类——按频率分

Classification for X-ray machine

- 工频X射线机： 频率： 50 ~ 60Hz
- 变频X射线机： 频率300 ~ 800Hz
- 恒频X射线机： 频率约200Hz
- 规律： 在相同管电流管电压下， 穿透力：
恒频最大， 变频其次， 工频最小。

X射线机的种类——按使用性能分

Classification for X-ray machine

- 定向X射线机：产生的X射线的辐射角为 40° 锥角，用于定向单张拍照。
- 周向X射线机：产生的X射线向 360° 辐射，用于大口径管道或容器的环缝检测。
- 管道爬行器：用于长距离管道环缝检测，用一个小同位素射线源定位。

X射线机的种类——按绝缘介质分

Classification for X-ray machine

- 油绝缘X射线机：
用变压器油作绝缘介质。
- 气绝缘X射线机：
用气体SF6作绝缘介质。

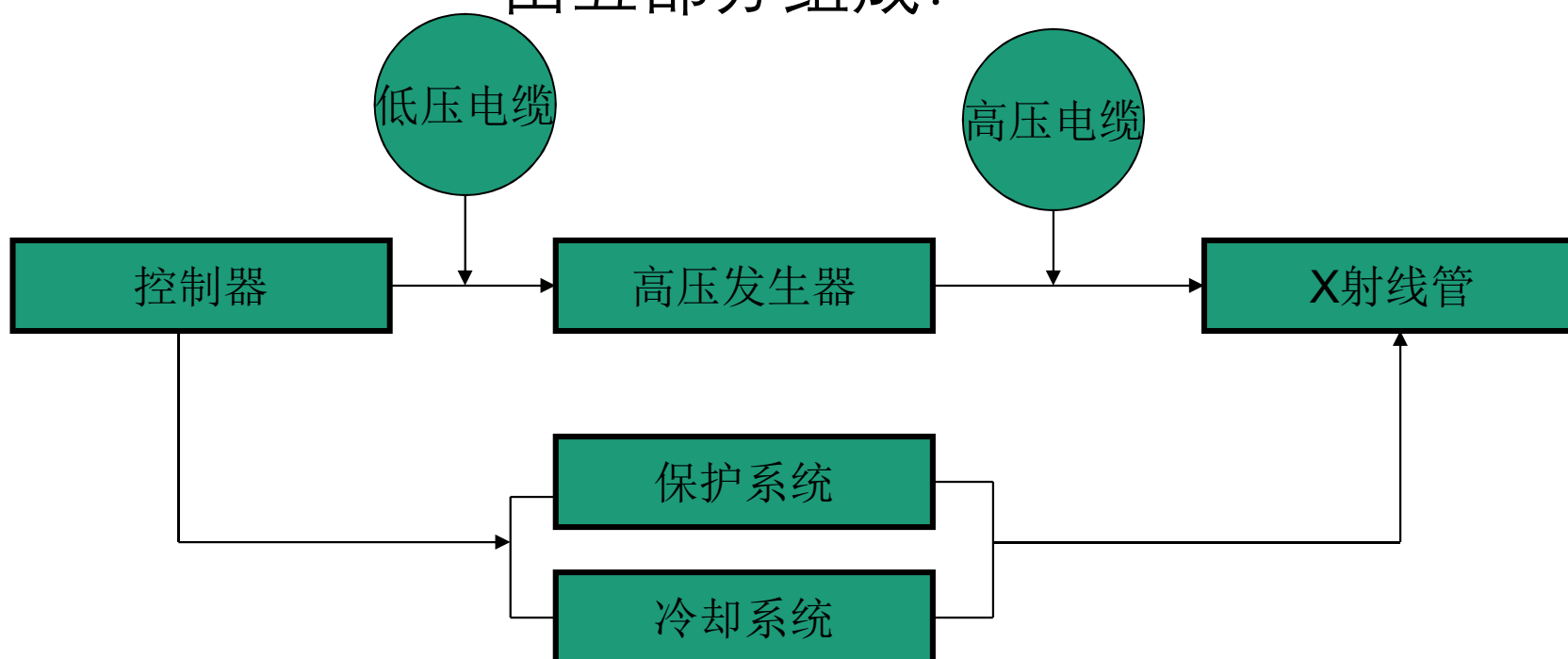
X射线机的基本结构

Configuration for X-ray machine

- 总体结构
- X射线管
- 高压发射器
- 高压电缆
- 冷却系统
- 控制系统

总体结构

由五部分组成：



X射线管——结构

- 由阴极和阳极以及外壳组成，其真空度为 $1.33 \times (10^{-4} \sim 10^{-5}) \text{Pa}$ ($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{mmHg}$)。

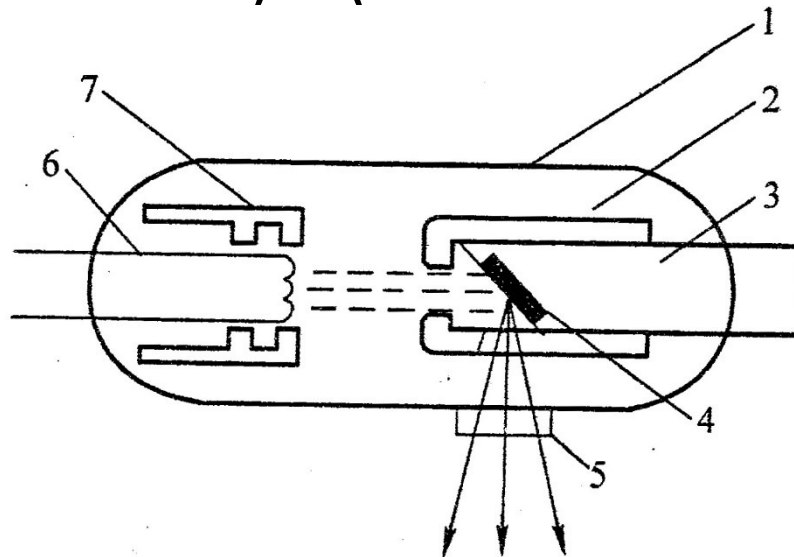


图 2—3 X 射线管示意图

1—玻璃外壳 2—阳极罩 3—阳极体
4—阳极靶 5—窗口 6—灯丝 7—阴极罩

X射线管——结构——阳极

- 组成： 阳极靶 + 阳极体 + 阳极罩

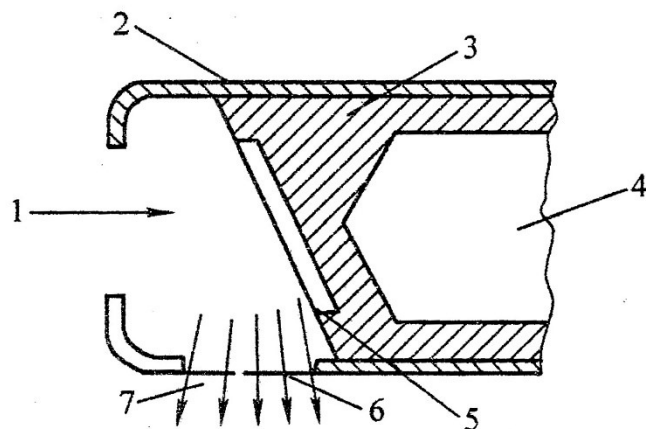


图 2—5 X 射线管的阳极

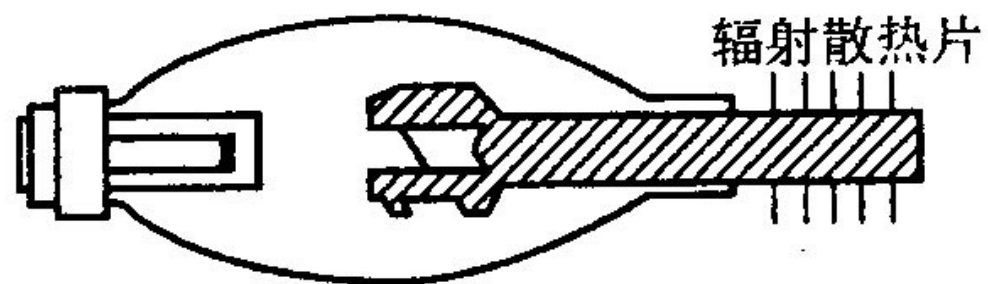
1—电子入射方向 2—阳极罩 3—阳极体
4—冷却油空腔 5—阳极靶 6—窗口 7—射线束

X射线管——结构——阳极

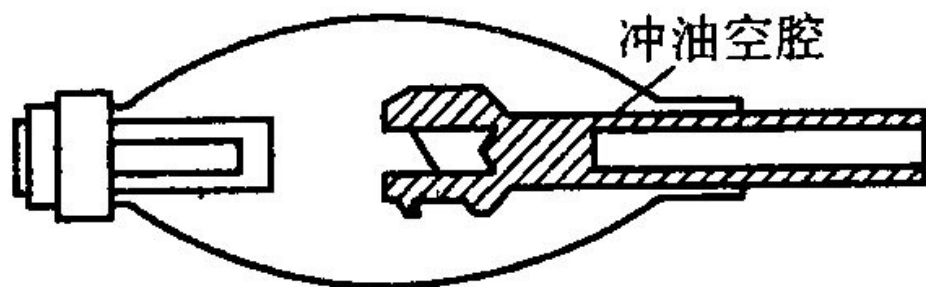
- 阳极体：
应散热好，常用无氧铜；阳极靶镶在阳极体上。
- 阳极靶：应耐高温；高原子序数，常用W；表面磨成镜面，并与管轴线的垂直线成一定角度——靶面角。
- 阳极罩：用于吸收二次电子，常用铜；有两个窗口，一个朝阴极，让高速运动的电子进入，另一个让X射线输出，用Z很低的铍板覆盖。

X射线管——结构——阳极

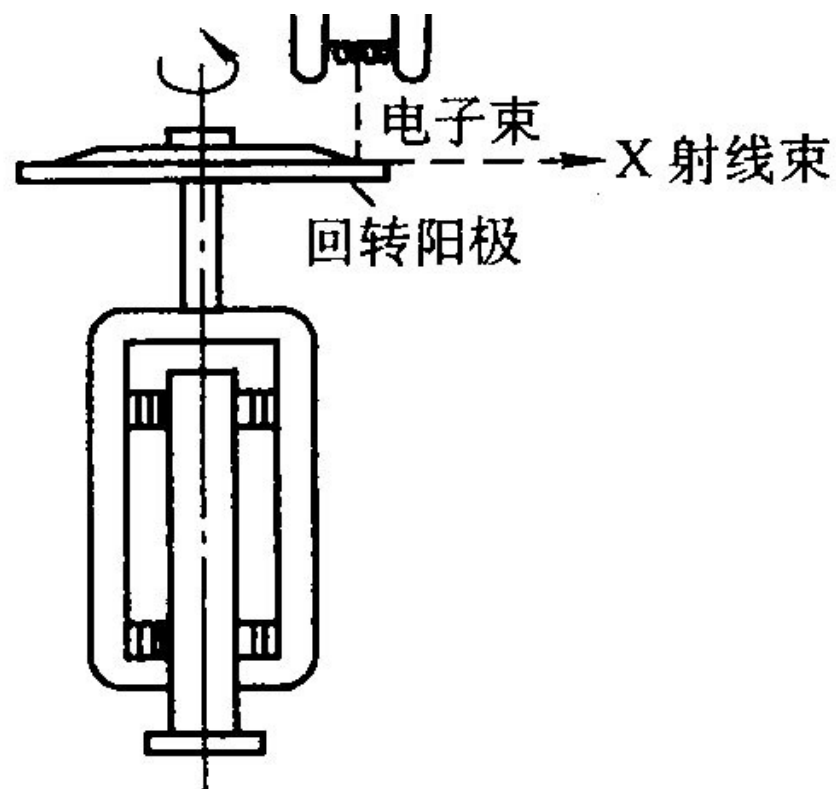
- 阳极散热方式：三种



辐射散热



冲油冷却



旋转阳极冷却

X射线管——结构——阳极

- 阳极类型:

定向——与管轴线倾斜的阳极靶

周向——锥形或平面形阳极靶

旋转——散热好， 负荷高

X射线管——结构——阴极

- 组成： 灯丝 + 聚焦杯
二者的形状、大小、相对位置决定焦点大小

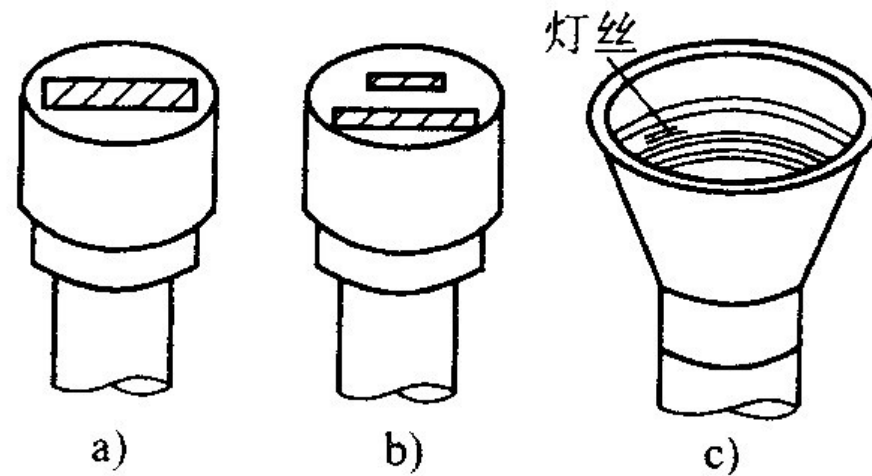


图 2—4 X 射线管的阴极

a) 线焦点阴极 b) 双线焦点阴极 c) 圆焦点阴极

X射线管——结构——阴极

- 灯丝：尖端放电产生电子，常用W丝，
工作温度：2000℃
- 聚焦杯：使电子聚焦，常用金属铜制作

X射线管——种类

- 玻璃X射线管：

管壳由玻璃与金属组成，寿命400 – 500H。

- 金属陶瓷X射线管：

管壳由陶瓷与金属组成，抗震性能好，真空度高，电性能好，寿命长，寿命>1000H。

X射线管——一种类型

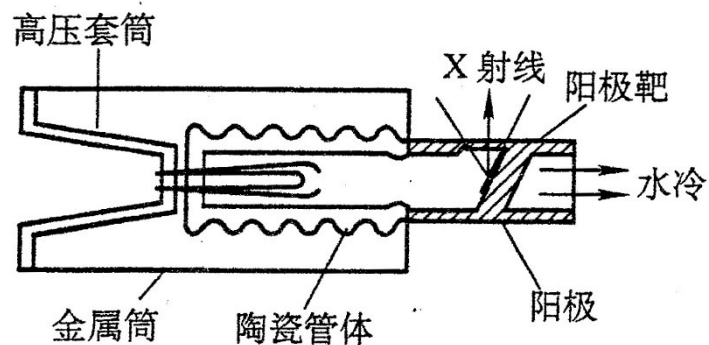


图 2—9 100~160 kV 金属陶瓷 X 射线管

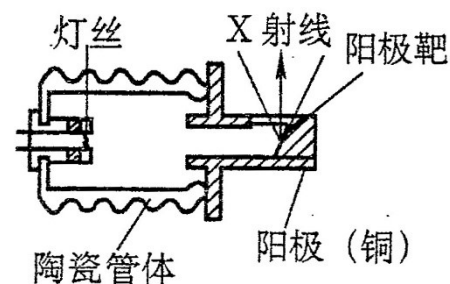


图 2—10 200~300 kV 金属陶瓷 X 射线管

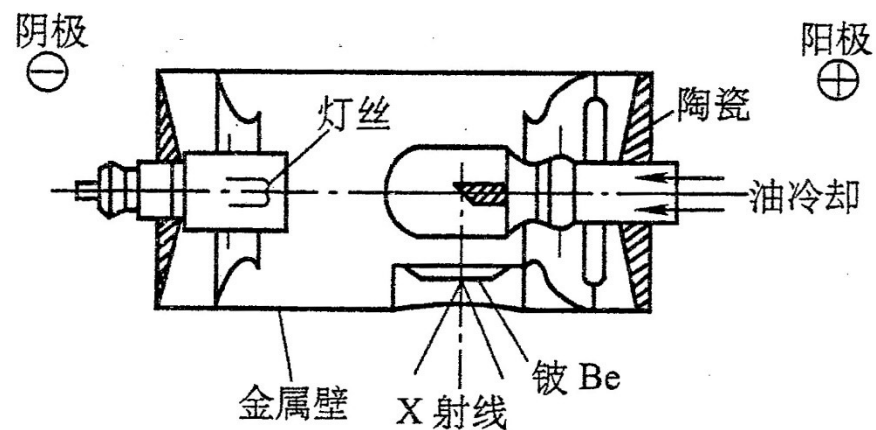


图 2—11 320~470 kV 金属陶瓷 X 射线管

X射线管——种类

- 周向辐射X射线管：
散热好，但射线中心有倾斜，对环缝纵向裂纹检测有影响。

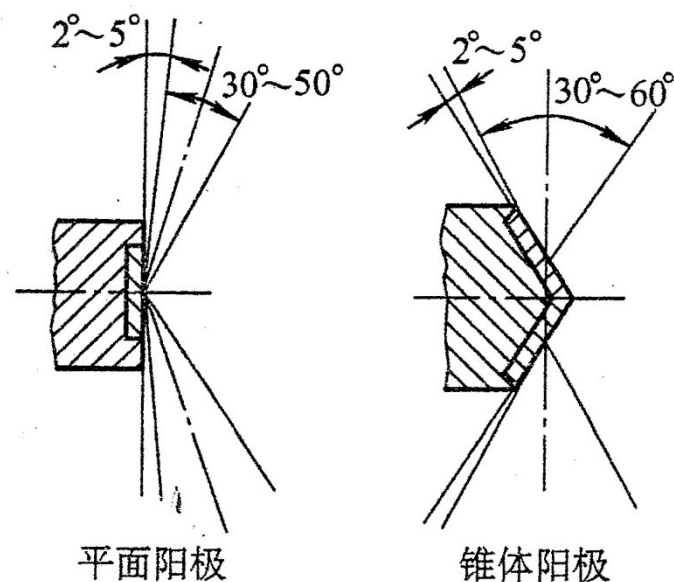


图 2—12 周向辐射 X 射线管阳极靶

X射线管——种类

- 小焦点X射线管：

通过圆筒式聚集栅将电子束聚集成一束，可获得小于0.1mm微小焦点

- 棒阳极X射线管：

棒状阳极可伸进小口径管内作环缝周向检测。

X射线管——技术性能——真空度

- 真空度：

必须在高真空度 ($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{mmHg}$) 工作, 否则导致气体电离, 影响电流稳定性、正常工作及寿命, 决定 $KV_{\max}$

- 原因：

阳极金属过热时会释放气体, 真空度降低, 发生气体放电现象, 管电流减小, 严重时导致被击穿。

- 训机：高温金属离子吸收气体, 提高真空度提高寿命。

X射线管——技术性能——阳极特性

- 规律：KV $\uparrow$ $\rightarrow$ i $\uparrow$ ，趋于饱和；在饱和区工作的射线管只有改变加热电流才能改变管电流。

- 灯丝电流 $\neq$ 管电流

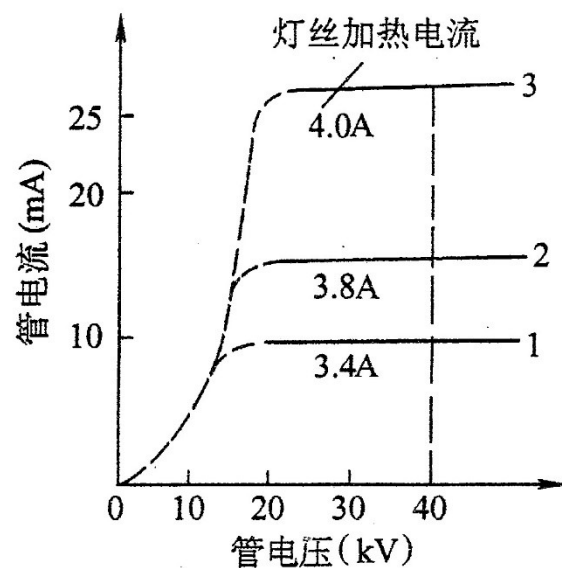


图 2—14 X 射线管电流与管电压关系曲线

X射线管——技术性能——阴极特性

- 规律：灯丝温度变化引起较大电流变化。

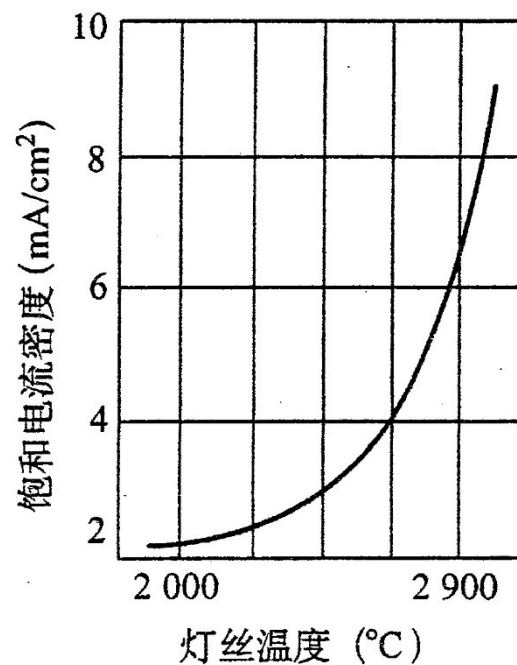


图 2—13 管电流与灯丝温度的关系曲线

X射线管——技术性能——管电压

- 定义：X射线管承载的最大峰值电压，以kVp表示，注意，表头指示的是有效值。

- 作用：影响穿透力

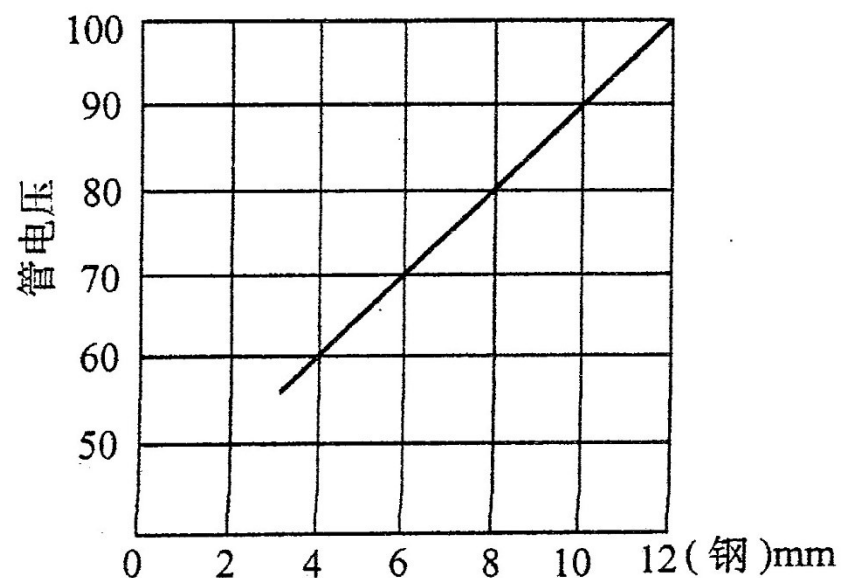


图 2—15 射线穿透能力示意图

X射线管——技术性能——焦点

- 定义：

取决于阴极灯丝的形状、大小，聚集杯的形状及安装位置；管电压和管电流对焦点也有一定影响。

- 实际焦点：电子束撞击靶面积。

- 有效焦点：实际焦点在与管轴垂直方向的投影。

- 影响：焦点大利于散热和承受大管电流；焦点小影像清晰度好、检测灵敏度高。

X射线管——技术性能——焦点

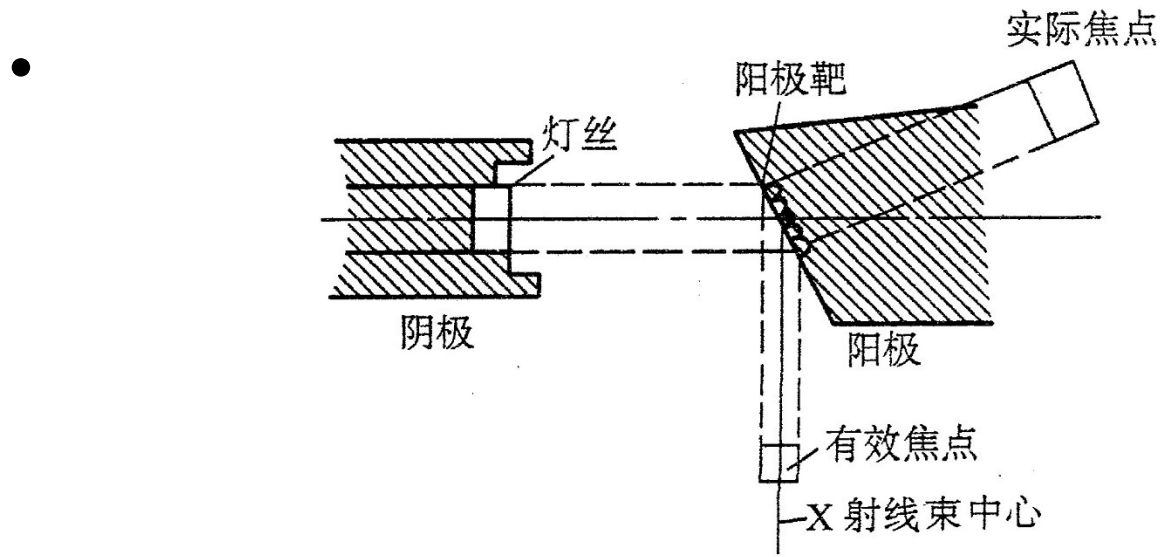


图 2—16 实际焦点和有效焦点

- 焦点测量：针孔法；几何不清晰度法

X射线管——技术性能——辐射场分布

- 分布:

阳极靶与管轴线呈
 20° 角, 射线束呈
 40° 圆锥角。

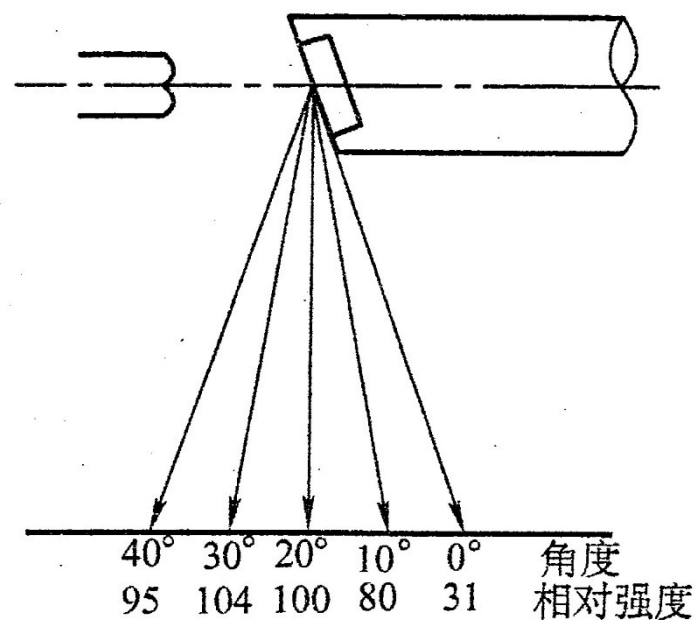


图 2—19 不同角度上 X 射线的强度分布

X射线管——技术性能——寿命

- 定义

辐射计量率降低到初始值的80%时的累计工作时限。

- 提高寿命措施

送高压前灯丝必须预热、活化；

使用负 荷应控制在最高管电压的90%以内；

保证阳极冷却，如工作和休息时间：1：1；

严格训机。

高压发生器——高压变压器

- 作用：把市网电压提高到射线管所需高压（几百千伏）；
- 特点：功率不大（约几千伏安）；
- 要求：须作绝缘处理。

高压发生器——灯丝变压器

- 作用：
把市网电压降低到灯丝所需低压（5~20V），
提供加热电流；
- 特点：
加热电流较大（十几A）；
- 要求：须注意绝缘。

高压发生器——高压整流管

- 种类：
玻璃外壳二极整流管、高压硅堆。
- 常用：
高压硅堆，质量小、尺寸小。

高压发生器——高压电容

- 金属外壳、耐高压、容量较大的纸介电容。

高压发生器——高压发生电路

- 按电压波形分：
半波整流、全波整流、
倍压整流、恒压整流。
- 按接地方式分：
中间接地、阳极接地。

高压发生器

——高压发生电路——半波整流

- 中间接地（油绝缘便携式常用）

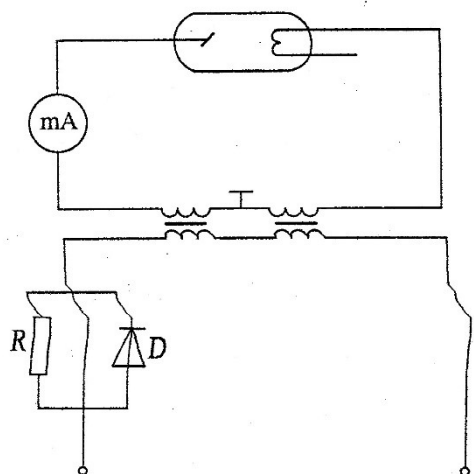


图 2—20 带有逆电压降低器的半波自整流线路

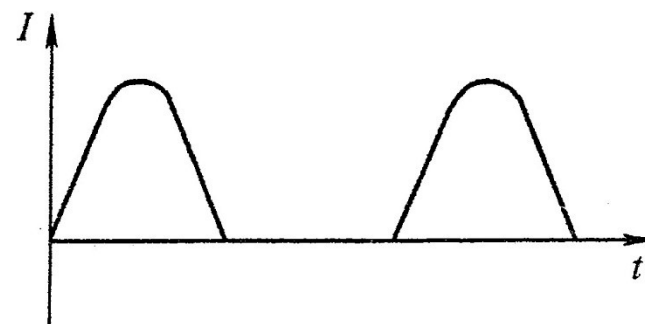


图 2—21 半波整流通过 X 射线管的电流波形

高压发生器

——高压发生电路——半波整流

- 阳极接地（气体冷却便携式常用）：
冷却效率高。

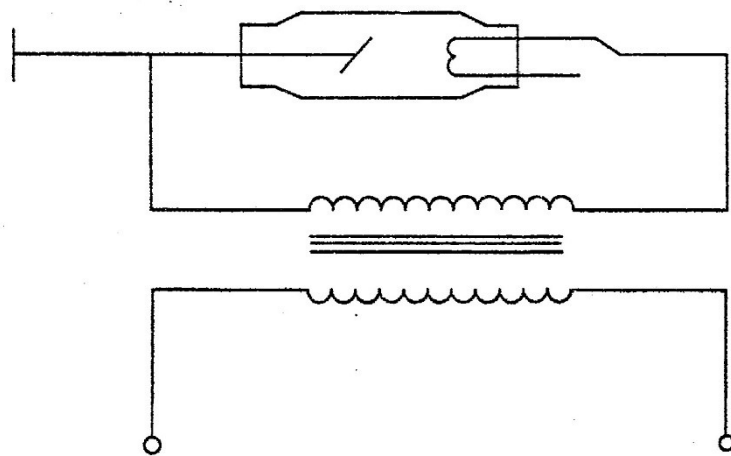


图 2—23 阳极接地自整流电路

高压发生器

——高压发生电路——全波整流电路

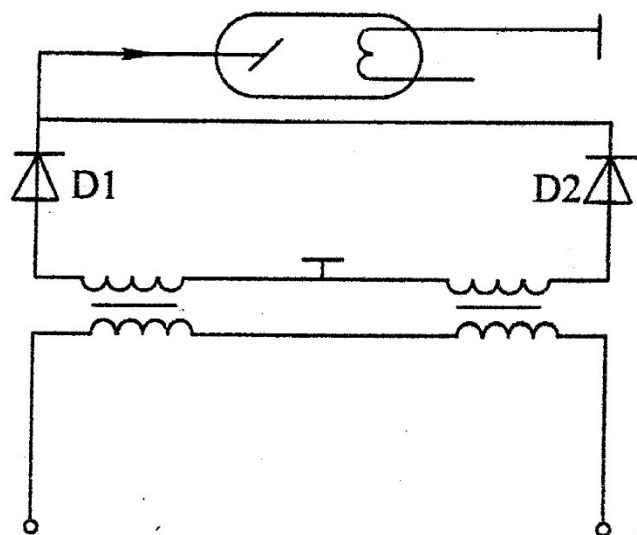


图 2—25 双管全波整流电路

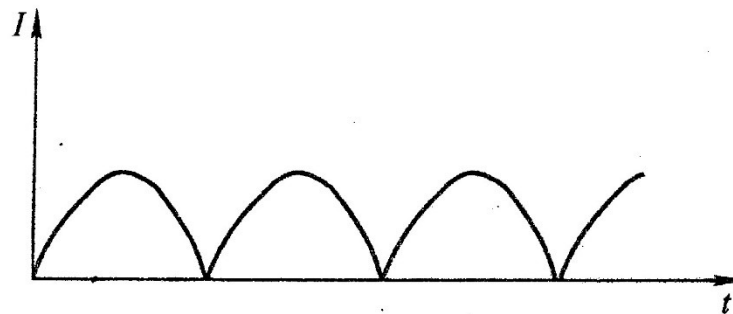


图 2—26 全波整流通过 X 射线管的电流波形

高压电缆

- 作用： 给X射线管输送高压电源。

- 结构：

保护层——最外层；

金属网层——接地，保护人身安全；

半导体层——可导电，消除主绝缘层与金属网层之间的电场；

主绝缘层——隔离芯线与金属接地之间的高压；

芯线——两根同心芯线，传送阳极或灯丝电流。

高压电缆

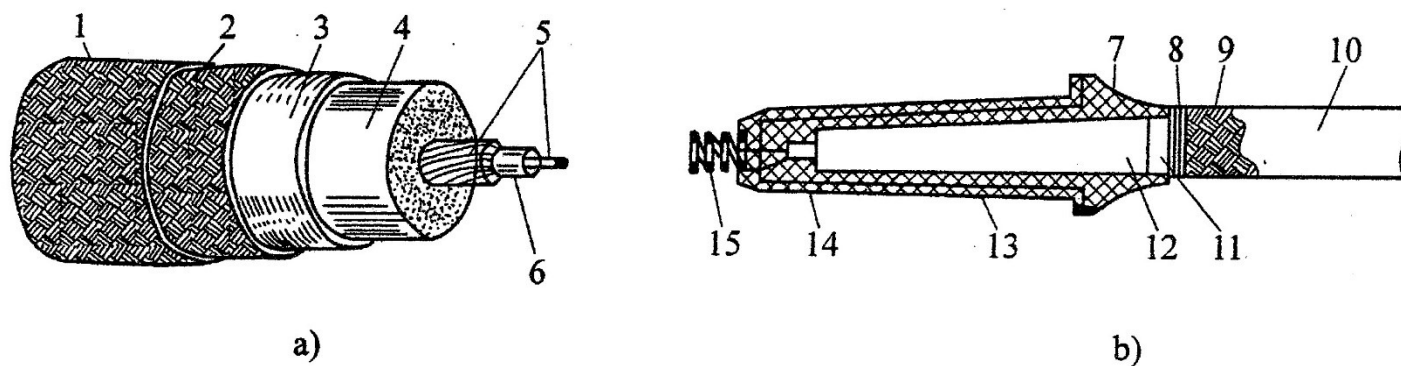


图 2—32 高压电缆的构造

a) 高压电缆解剖图 b) 高压电缆头的结构示意图

- 1、10—保护层（塑料或棉纱网） 2、9—接地金属网层 3—半导体橡皮层 4—主绝缘层
5—同心芯线 6—绝缘层 7—接地金属罩 8—细铜裸线 11—电缆半导体层
12—电缆主绝缘锥体 13—插头套筒 14—填充料 15—连接触头

冷却系统

- 冷却不足的后果

阳极因过热而损伤;

高压变压器因过热绝缘变坏击穿;

缩短射线管寿命。

- 冷却的作用

降低射线管温度;

延长寿命。

冷却系统

- 自冷式——油绝缘便携式X射线机常用
方法：机头内油循环冷却。
- 辐射散热——气绝缘便携式常用
方法：阳极接地，阳极端装散热器风扇冷却。
- 油循环外冷——移动式X射线机常用
方法：循环变压器油冷却阳极，循环水冷却变压器油。

冷却系统

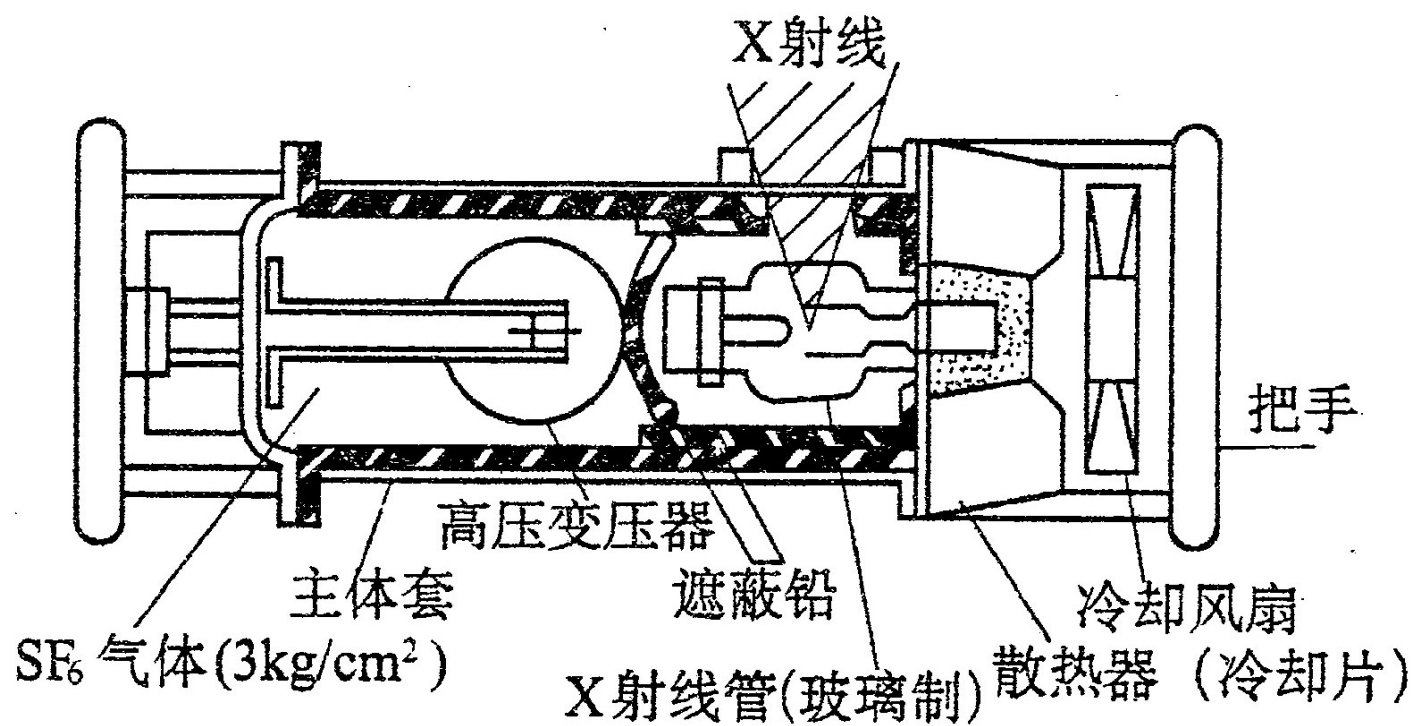


图 2—33 阳极接地气体冷却 X 射线机

保护系统

- 每一独立电路的短路过流保护；
- 射线管阳极冷却保护；
- 射线管过载保护（过压、过流）；
- 接地保护；
- 零位保护。

控制系统——管电压调节

- 调节方式：
调节高压变压器初级自耦变压器。

- 影响：管电流mA。

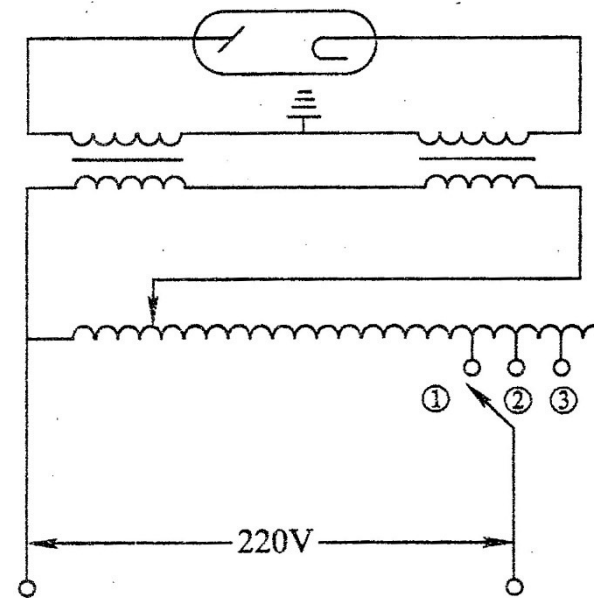


图 2—35 管电压调节电路

控制系统——管电流调节

- 调节原理：调节灯丝加热电流。

- 调节方式：

调节灯丝加热电流的可变电阻。

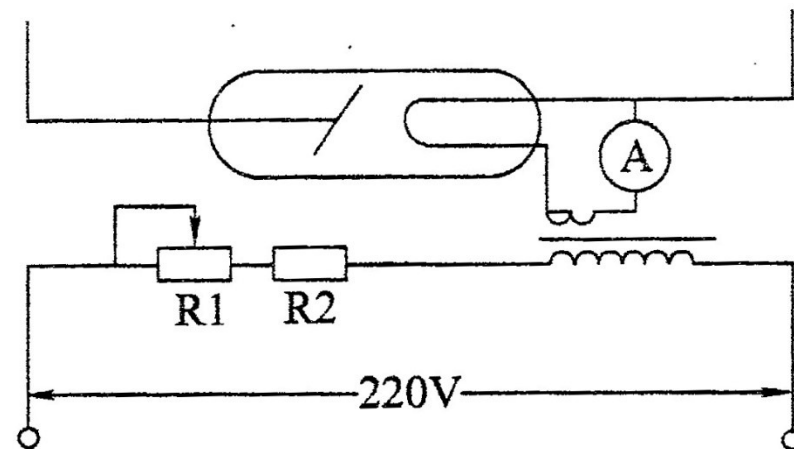


图 2—36 灯丝加热调节电路

控制系统——操作指示

- 电源开关
- 高压通断开关
- 电压、电流调节旋钮
- 电压、电流指示表
- 计时器

X射线机技术条件——电气性能要求

Specifications for X-ray machine

- 输入电压波动 $\leq \pm 10\%$, 输出电压波动 $\leq \pm 2\%$;
- 计时器误差 $\leq 5\%$
- X射线机保护接地电阻 $\leq 0.5\Omega$;
- 温度继电器的值为 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$
- 低压电路绝缘电阻 $> 2\text{M}\Omega$;
- 气绝缘机头内SF6气压 $< 0.34\text{MPa}$ 时高压应断开;
- 过压、过流保护。

X射线机技术条件——使用性能要求

Specifications for X-ray machine

- 穿透力不低于规定值；
- 透照灵敏度应不低于1.8%（对Q235钢）；
- 产生的X射线应在辐射范围内，辐射场不应有缺圆；周向机辐射场应均匀，中心平面内黑度差小于0.4，辐射角偏差 $\leq \pm 5^\circ$ 。

表 2—5 允许漏射线剂量率

管电压 (kV)	<150	150~200	>200
距焦点 1 m 处泄漏空气比释动能率	$\leq 1 \text{ mGy/h}$	$\leq 2.5 \text{ mGy/h}$	$\leq 5 \text{ mGy/h}$

X射线机技术条件——使用性能要求

Specifications for X-ray machine

• 测试方位

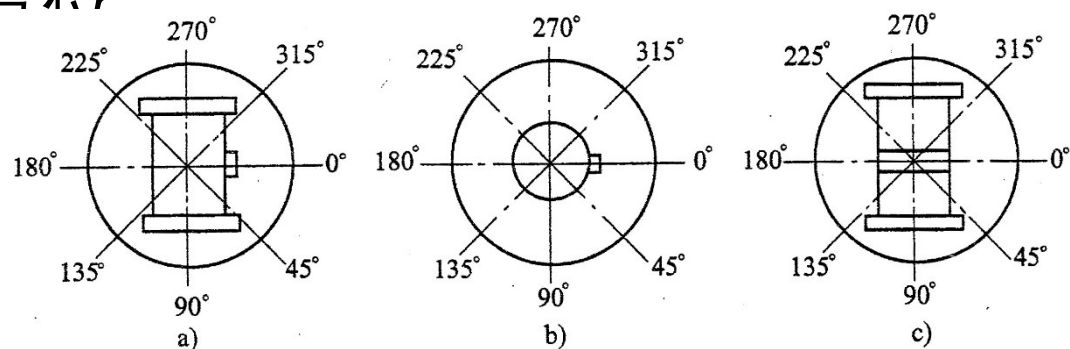


图 2—37 漏射线剂量率测试

a) 定向机管头纵向测试方位 b) 定向机管头横向测试方位 c) 周向机管头测试方位

• 窗口屏蔽铅当量

表 2—6

屏蔽 X 射线窗口铅罩的铅当量

额定管电压 (kV)	100	150	200	250	300	350	400
铅当量 (mmPb)	1.4	2.1	3.6	6.3	9.3	11.8	14.0

X射线机的使用及维护 Operation and maintenance of X-ray machine

- X射线机的使用

- X射线机的维护

X射线机的使用 —— 操作程序

Operation of X-ray machine

- **通电前准备：**
- 连接控制箱、机头、高压发射器、冷却系统，保证接触良好；
- 检查电源电压是否为220V；
- 控制箱可靠接地。

X射线机的使用 —— 操作程序

Operation of X-ray machine

- 通电后：
调压器带电；
冷却系统开始工作；
灯丝加热发射电子，X射线机处于预热状态。
- 检查：
控制箱电源指示灯亮；
冷却系统工作（油绝缘机油泵工作或其绝缘机
机头风扇转动）。

X射线机的使用 —— 操作程序

Operation of X-ray machine

- **曝光准备**
- **油绝缘机：**
将“KV”和“mA”调到零； 将“时间”设置到预定值。
- **气绝缘机：**
将 “KV”和“时间”设置到预定值。

X射线机的使用 —— 操作程序

Operation of X-ray machine

- **曝光**
- 按下高压开关，红灯亮，高压接通。高压变压器工作，阴阳两极加高压，电子被加速，产生X射线。
- 油绝缘机：均匀调节“KV”和“mA”到规定值。
- 气绝缘机：调节“KV”到预定值。
- 冷却系统必须可靠工作。
- 如发现异常，切断高压。

X射线机的使用 —— 操作程序

Operation of X-ray machine

- 曝光结束

- 油绝缘机:

当蜂鸣器响, 均匀调节“KV”和“mA”回零, 红灯灭, 高压断开, “时间”复位。

- 气绝缘机:

当蜂鸣器响, “KV”和“mA”灯灭, 高压断开, “时间”复位。

X射线机的使用 —— 注意事项

Operation of X-ray machine

- 训机
- 目的：吸收管内气体，提高真空度。
- 方法：按照说明书。
- 玻璃管：电压从额定管电压的 $\frac{1}{3}$ ，电流从2~3mA开始，逐步将管电压和管电流升到额定值。如“mA”不稳定，则应降低管电压重新训练；如反复数次仍不行，说明射线管真空度不良，不能使用。

X射线机的使用 —— 注意事项

Operation of X-ray machine

表 2—7

玻璃管训机升压速度规定

停用时间	8~16 h	2~3 天	3~21 天	21 天以上
升压速度	10 kV/30 s	10 kV/60 s	10 kV/2.5 min	10 kV/5 min

- 金属陶瓷管射线机：对训机要求更严格。

表 2—8

金属陶瓷管训机规定

终止使用时间	训机方法
1 天	只需自动训机到使用电压值，若使用电压较前一天高，可自动训机至前一天值后手动按 10 kV/min 升至使用值
2~7 天	手动训机，从最低值开始，按 10 kV/min 升至最高值（到 210 kV 时，需休息 5 min，然后继续训练）。训练完毕，放置在使用值上
7~30 天	手动训机，从最低值开始，每 5 min 升一级，至最高值。每训机 10 min，休息 5 min
30~60 天	手动训机，从最低值开始，每 5 min 升一级，至最高值，每升一级休息 5 min
60 天以上	按上述方法进行，但需增加休息时间和训练次数

X射线机的使用 —— 注意事项

Operation of X-ray machine

- 可靠接地：为避免漏电和感应电的影响，控制箱和高压发生器都应可靠接地。
- 检查电源的波动性： $\leq \pm 10\%$ 。
- 提前预热：灯丝预热>2分钟。
- 全过程冷却。
- 间息时间： 1： 1。

X射线机的维护

Maintenance for X-ray machine

- 应摆放在通风干燥处，切忌潮湿、高温、腐蚀等环境，以免接地绝缘性能；
- 运输时要采取防震措施；
- 保持电缆头接触良好；
- 经常检查机头是否漏油、漏气。

γ 射线机 γ -ray Machine

- γ 射线机的类型 **Classification**
- γ 射线机的结构 **Configuration**
- γ 射线机的主要特性 **Main Performance**
- X射线机与 γ 射线机比较
Comparison of X-ray with γ -ray machine
- γ 射线机的操作 **Operation**

γ 射线机的类型

- 按同位素按分：

Co-60、Cs-137、Ir-192、Se-75、Tm-170、Yb169 γ 射线机；

- 按机体结构分：

直通道形式、S通道形式 γ 射线机；

- 按使用方式分：

手提式(P类)，移动式(M类)，固定式(F类)、管道爬行器。

γ 射线机的类型

- 常用：
手提式 Ir-192、Se-75 γ 射线机；
移动式Co-60 γ 射线机；
Tm-170、Yb169 γ 射线机：轻金属、薄壁。
- 源容器泄漏比释动能率

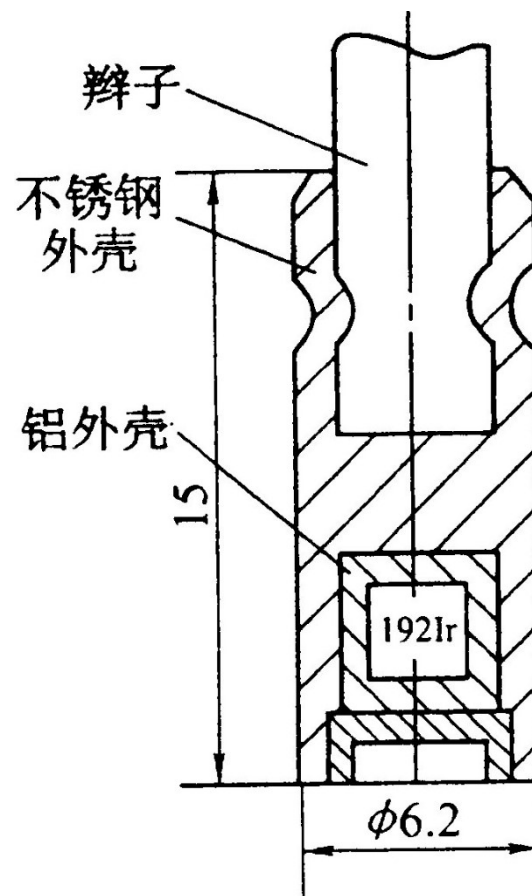
源容器类型	源容器外表面	距外表面50mm	距外表面1m
手提式	$\leq 2\text{mGy/h}$	$\leq 0.5\text{mGy/h}$	$\leq 0.02\text{mGy/h}$
移动式	$\leq 2\text{mGy/h}$	$\leq 1\text{mGy/h}$	$\leq 0.05\text{mGy/h}$
固定式	$\leq 2\text{mGy/h}$	$\leq 1\text{mGy/h}$	$\leq 0.10\text{mGy/h}$

γ 射线机的结构

- 源组件
- 探伤机机体
- 输源管
- 驱动机构
- 附件

γ 射线机的结构——源组件

- 组成：
由放射源、
包壳和辫子组成。



源组件结构示意图

γ 射线机的结构——探伤机机体

- 组成：屏蔽容器，其内部有直通道和S形通道。
- 屏蔽材料：贫化铀（去除可裂变的U-235，只剩U-238） 比铅的体和小 质量小。

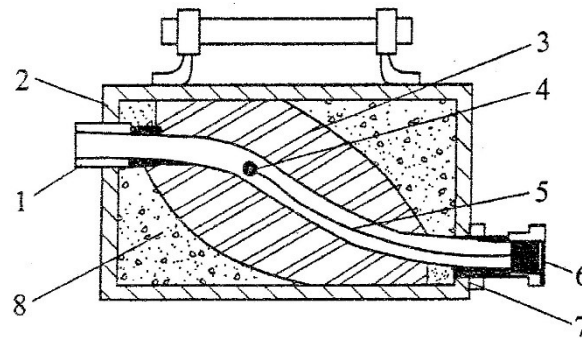


图 2—39 S 通道 γ 射线机源容器的基本结构示意图
1—快速连接器 2—外壳 3—贫化铀屏蔽层 4— γ 源组件
5—源托 6—安全接插器 7—密封盒 8—聚氨酯填料

γ 射线机的结构

——探伤机机体——两种通道比较

- S通道：与直通道比，防护好、输源管弯曲半径小；
- 直通道：与S通道比，体积小、质量小、屏蔽复杂，弯曲半径大，不小于500mm。

γ 射线机的结构

——探伤机机体——安全联锁装置

- 当源不在安全屏蔽中心时，无法锁上，保证源始终处于最佳屏蔽位置；
- 当控制缆与源辫未连接好，保证无法将源输出。

γ射线机的结构

——探伤机机体——规定程序

- 只有专用钥匙才能打开安全锁；
- 只有打开安全锁才能旋转选择环；
- 只有选择环到“连接”位置才能卸下端盖；
- 只有卸下端盖才能使控制缆和源辫的阴阳对接；
- 只有阴阳接头连接无误，选择环才能转动到工作位，源才能输出。

γ 射线机的结构——驱动机构

- 类型：手动和电动。
- 手动驱动：包括控制缆导管、连接机体结构、控制手柄（装有源位指示器）。
- 电动驱动：可以预置送源延迟时间和曝光时间

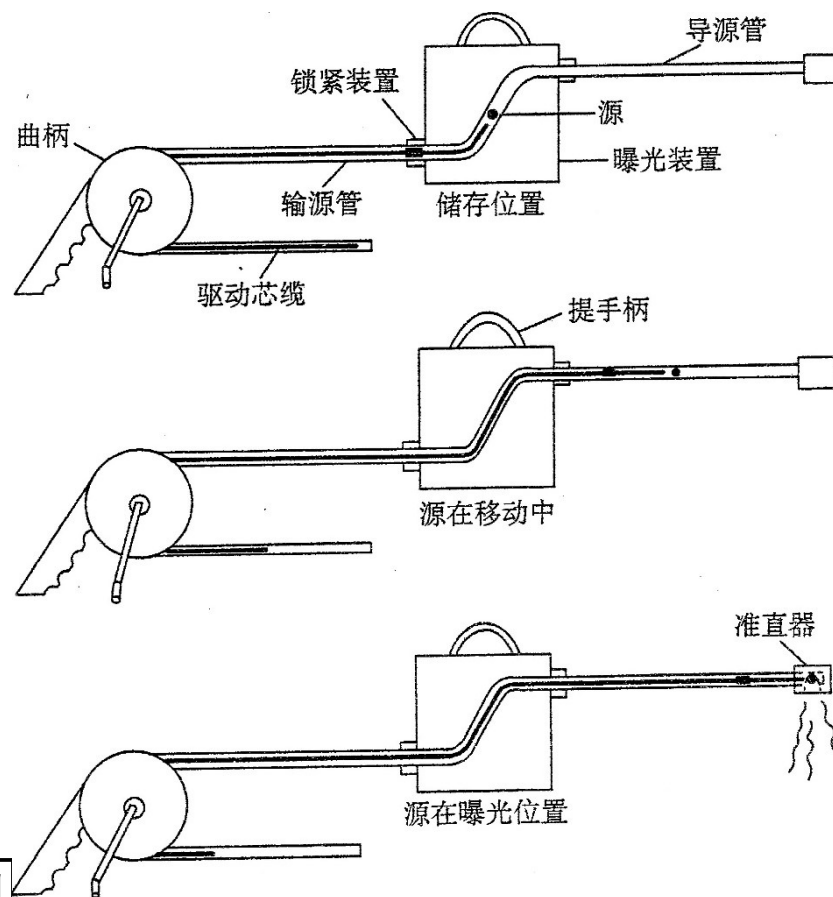


图 2—40 γ 射线设备及驱动机构工作情况示意图

γ 射线机的结构——输源管

- 组成：由一根或多根软管连接一个一头封闭的包塑不锈钢软管制成。连接源容器与定向架。
-

γ 射线机的结构——附件

- 准直器：缩小或限制辐射范围，减少辐射；
- 射线检测仪、个人剂量计、音响报警；
- 定向架：固定输源管的照相头；
- 曝光计算尺：根据胶片感光度、源种类、源龄、工件厚度、源活度、焦距、黑度，快速曝光时间。
- 换源器：用于换新源、运输。

γ射线机的主要特性

表 2—9

常用 γ 射线源的特性参数

γ 射线源		Co60	Cs137	Ir192	Se75	Tm170	Yb169
主要能量 (MeV)		1.17, 1.33	0.661	0.296, 0.308, 0.346, 0.468	0.121, 0.136, 0.265, 0.280	0.084, 0.052	0.063 1, 0.12, 0.193, 0.309
平均能量 (MeV)		1.25	0.661	0.355	0.206	0.072	0.156
半衰期		5.27 年	33 年	74 天	120 天	128 天	32 天
K _r 常数	[R · m ² / (h · Ci)]	1.32	0.32	0.472	0.204	0.001 4	0.125
	[C · m ² / (kg · h · Bq)]	9.2 × 10 ⁻¹⁵	2.23 × 10 ⁻¹⁵	3.29 × 10 ⁻¹⁵	1.39 × 10 ⁻¹⁵	0.009 7 × 10 ⁻¹⁵	0.87 × 10 ⁻¹⁵
比活度		中	小	大	中	大	小
透照厚度 (钢 mm)		40~200	15~100	10~100	5~40	3~20	3~15
价格		高	高	较低	较高	中	中

γ射线机的主要特性

γ射线机型号	CTS-1	YTS-1	SETS-1
外形尺寸mm	530*390*310	421*242*287	240*110*180
主机重量kg	200	28	8.5
屏蔽材料 及重量kg	贫化铀,135	贫化铀,19	贫化铀,3.2
γ射线源	Co-60	Ir-192	Se-75
额定活度Ci	100	100	100
通道形式	S通道	S通道	直通道
输源方式	自动/手动	自动/手动	自动/手动

γ 射线机的主要特性

—— γ 射线机的选择

- 能量：保障穿透工件；
- 放射性比活度：单位质量放射性源的放射性活度，表示放射性源的品质和纯度。
- 半衰期：
- 源尺寸：

X射线机与 γ 射线机比较

	X 射线机	γ 射线机
能量	低，穿透力差；能量可调	高，穿透力强；能量不可调
强度	可调	依据半衰期不断衰减，不可调
效率	低	高
运行	受温度等因素影响	不受温度等因素影响，可连续运行
寿命	累计几年	受半衰期影响
使用	需要电源	不需要水电，适合野外和在役检测
质量	较好，灵敏度高	较差，固有不清晰度大，灵敏度低
辐射	辐射易控制，危害小	辐射难控制，危害大

γ射线机的操作——曝光操作程序

- 操作前的准备：检查设备是否损伤、卡死、剂量计及检测仪是否正常。
- 主机安装：离曝光点不远、平稳。
- 组装输源管：原则上不多于3根。
- 固定照相头：用定位架将输源管的端头定位并夹紧，使端头与焦点重合。

γ射线机的操作——曝光操作程序

- 铺设输源管：尽量使输源管伸直或弯曲半径不小于500mm。
- 连接输源管：把输源管连接到主机出口。
- 选择驱动机构操作位置（手动操作）：驱动机构对屏蔽容器最好成直线，使控制缆尽量放直，或半径不小于1m。
- 连接控制缆

γ 射线机的操作——曝光操作程序

- 计算曝光时间：用计算尺。
- 送出射线源：
- 收回射线源：
- 锁紧选择环：

γ 射线机的操作——换源操作要点

- 连接驱动机构与主机
- 将不带照相头的输源管分别与主机及换源器连接
- 摇动驱动机构手柄，将旧源送入换源器；

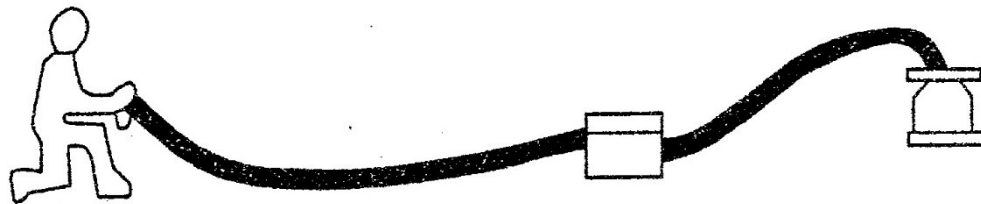


图 2—41 换源操作示意图

γ射线机的维护及故障排除

——维护

- 专人负责;
- 清洁输源管接头，每次使用完后应盖好两端封堵护套;
- 清洁摇柄、输源导管、软管;
- 润滑齿轮;
- 特别注意不压扁输源管。

γ射线机的维护及故障排除

——操作故障排除

表 2—10

γ射线探伤设备的操作故障及排除方法

故障类型	原因分析	排除故障
γ源送出时发生卡堵	1. 输源导管曲率半径过小 2. 控制缆导管曲率半径过小 3. 曝光头与输源导管连接不良	迅速收回，找出原因，排除故障，仔细操作
γ源收回时发生卡堵	1. 输源导管由于现场条件突然变化，发生曲率半径小于规定值的情况 2. 曝光头与输导管连接不良	1. 来回摇动手柄、试图收回 2. 快速上前把输源导管拉直，再收回
摇动手柄突感很轻松，摇动圈数超出规定圈数	输入输出端软管接头与γ射线探伤机接头没接好，摇动手柄时软管接头脱落，金属软轴脱在外面	1. 快速拆开摇柄与输送导管连接 2. 用手迅速把金属软轴拉回

γ射线机的维护及故障排除

——机械故障排除

- 安全联锁失灵
- 机械零件损坏
- 机体破碎

加速器 Accelerator

- 加速器原理 Principle
- 加速器类型 Classification
- 加速器性能 Performance

加速器工作原理

- 射线能量比较

X射线: $kV < 450keV$

γ 射线: $E < 2MeV$

高能X射线: $E = 10 \sim 20MeV$

- 原理

电子经加速器加速后轰击阳极靶，突然停止，发生轫致辐射，产生X射线。

加速器类型

- 电子感应加速器
- 电子直线加速器
- 电子回旋加速器

加速器性能

项目 \ 类型	电子感应加速器	电子直线加速器	电子回旋加速器
结构	电子在圆形轨道中加速	电子在圆柱形金属波导管中直线加速	电子在具有公切点的圆形轨道中加速
能量Mev	5~25	1~15	8~10
电子束流强度 μA	<1	200	几十~100
焦点mm	0.1X(0.3~0.4)	$\phi 1 \sim \phi 3$	$\phi 2 \sim \phi 3$
射线输出	弱	强	较强

射线照相胶片 RT Film

- 射线胶片的结构 **Configuration**
- 感光原理及潜影的形成 **Principle**
- 底片黑度 **Darkness**
- 射线胶片的特性 **Performance**
- 射线胶片的分类和选择
Classification & Selection
- 射线胶片的使用与保管 **Operation and storage**

射线胶片的结构——特点

- 特点：两面均为乳化剂层，增加感光，总厚度0.25-0.3mm。

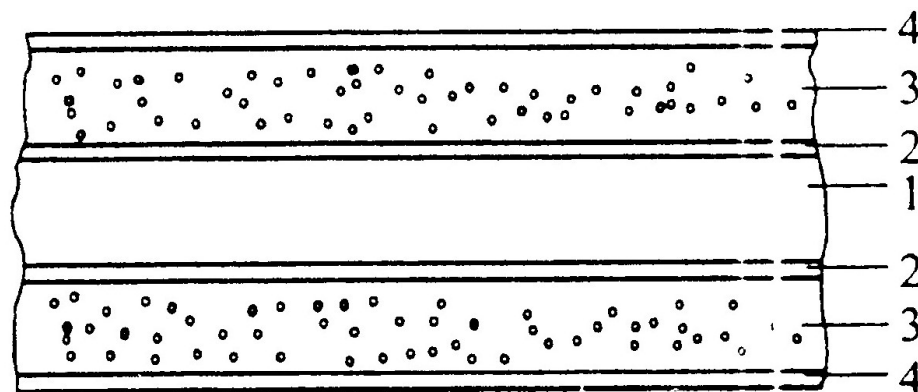


图 2—43 X 光胶片的构造

1—片基 2—结合层

3—乳剂层 4—保护膜

射线胶片的结构——组成——片基

- 作用：骨架。
- 材料：透明塑料，醋酸纤维或聚酯材料，为改善照明下的观察效果，采用淡蓝色。
- 厚度：0.175-0.30mm。

射线胶片的结构——组成——结合层

- 作用：把乳剂粘接在片基上。
- 组成：明胶、水、表面活性剂（润湿剂）、树脂（防静电剂）胶质。

射线胶片的结构——组成——乳化剂

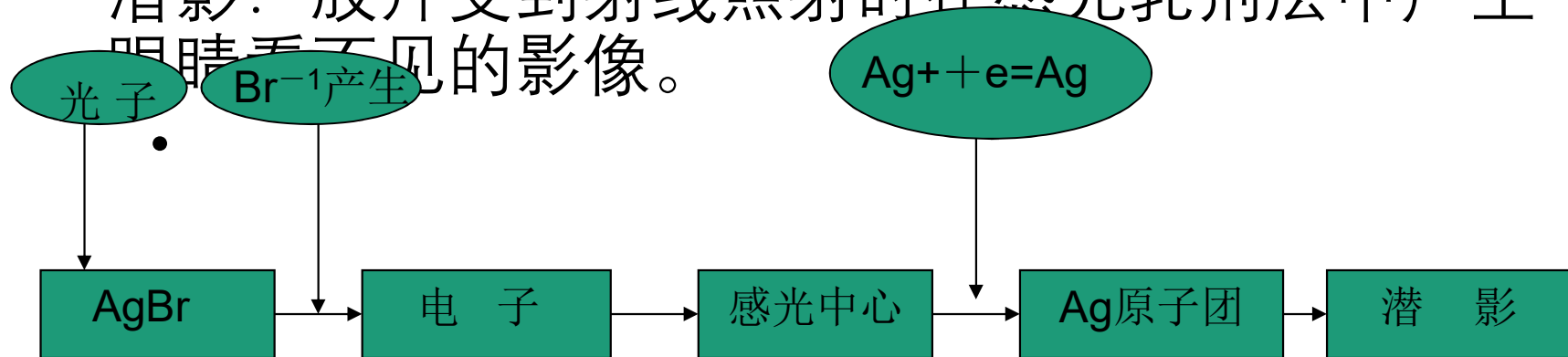
- 作用：感光。
- 组成：溴化银微粒在明胶中的混合体、增光剂（碘化银）防雾剂、稳定剂、坚膜剂。
- 颗粒： $1 - 5\mu\text{m}$ 。
- 厚度： $10 - 20\mu\text{m}$

射线胶片的结构——组成——保护膜

- 作用：防止感光剂受到污染和摩擦。
- 组成：明胶、坚膜剂、防腐剂、防静电剂。
- 厚度：1 – 2 μm 。

感光原理及潜影的形成

- 潜影：胶片受到射线照射时在感光乳剂层中产生眼睛看不见的影像。



感光原理及潜影的形成

- 化学方程

曝光前:



曝光后:

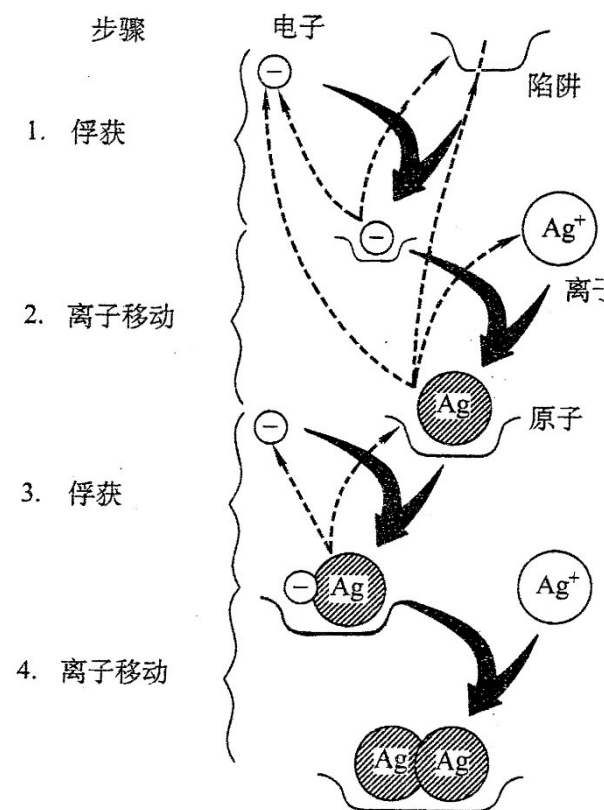
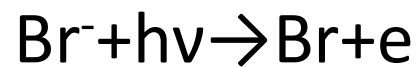


图 2—44 潜影形成示意图

底片黑度

- 底片光学密度（黑度） D ：底片不透明的程度

$$D = \lg(I_0/I)$$

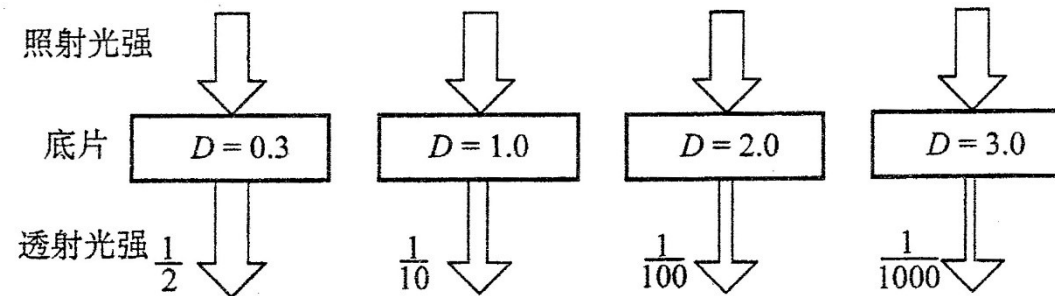
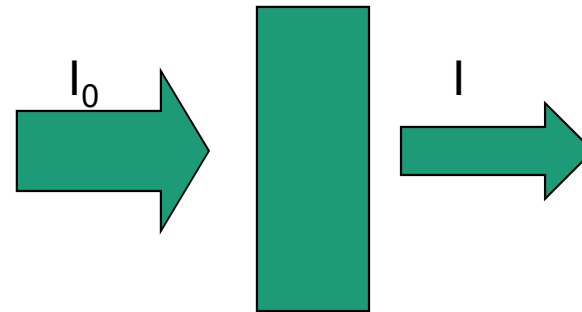


图 2—45 底片黑度不同时，透射光强与照射光强的关系

射线胶片的分类和选择

- 胶片选用一般原则：
质量与速度的折中
中等灵敏度：G3；
高灵敏度：G2；
一般不允许用G4

射线胶片的特性

- 感光度(S)
- 灰雾度(D0)
- 梯度(G)
- 宽容度(L)
- 最大密度(Dmax)

射线胶片的特性

——胶片特性曲线（增感型胶片）

- 曝光迟钝区AB
- 曝光不足区BC
- 曝光正常区CD
- 曝光过度区DE
- 反转区EF

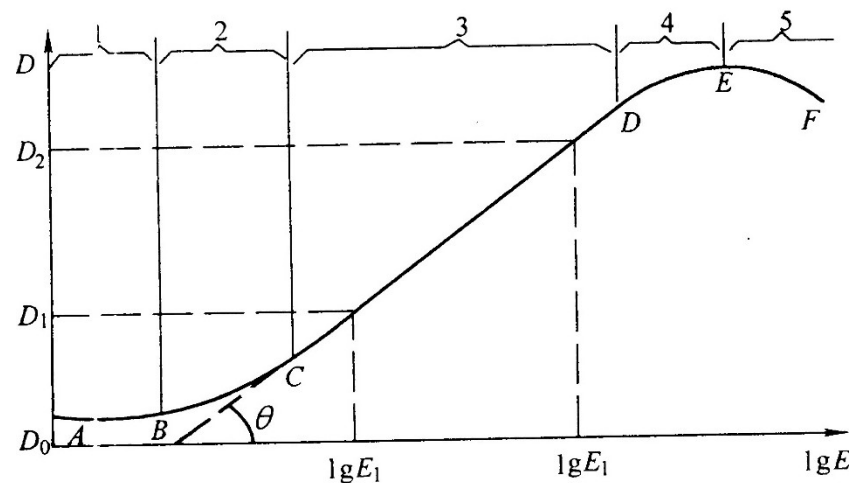


图 2—46 增感型胶片的特性曲线

1—迟钝区 2—曝光不足区 3—曝光正常区

4—曝光过度区 5—反转区（负感区）

线性部分： $D = G \lg E + K$

射线胶片的特性

——胶片特性曲线（非增感型胶片）

- 无明显的负

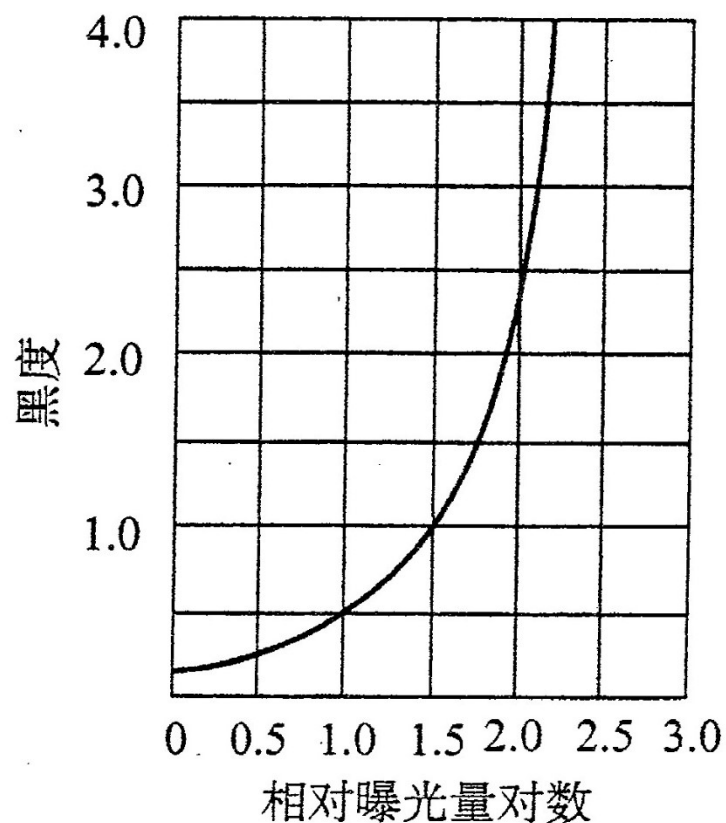


图 2—47 非增感型胶片特性曲线

射线胶片的特性——胶片特性曲线

- 胶片特性曲线影响因素：
与射线能量有关，感光特性曲线是在规定能量下的测量结果。

射线胶片的特性

——特性参数——感光度S

- 定义：达到规定黑度所需曝光量的倒数。

ISO7004：以达到净黑度（不包括胶片灰雾）
为2.0时所用曝光量（以戈瑞作单位）的倒数：

$$S=1/E_s$$

表 2—11

ISO 7004 感光度分级表

lgK _s	从	—3.05	—2.95	—2.85	—2.75	—2.65	—2.55	—2.45
	至	—2.96	—2.86	—2.76	—2.66	—2.56	—2.46	—2.36
ISO 感光度		1 000	800	640	500	400	320	250
lgK _s	从	—2.35	—2.25	—2.15	—2.05	—1.95	—1.85	—1.75
	至	—2.26	—2.16	—2.06	—1.96	—1.86	—1.76	—1.66
ISO 感光度		200	160	125	100	80	64	50
lgK _s	从	—1.65	—1.55	—1.45	—1.35	—1.25	—1.15	—1.05
	至	—1.56	—1.46	—1.36	—1.26	—1.16	—1.06	—0.96
ISO 感光度		40	32	25	20	16	12	10

射线胶片的特性

——特性参数——感光度S

- 影响因素:

感光乳剂颗粒度、形状、银的含量;

射线能量;

显影配方、时间、温度;

增感方式等。

对同种胶片，颗粒度越大，感光度越大。

射线胶片的特性

——特性参数——灰雾度 D_0 (本底灰雾度)

- 定义：未经曝光胶片显影后的黑度。
- 影响： $D_0 < 0.3$ 时对影像质量影响不大；
 $D_0 > 0.3$ 时损害影像对比度和清晰度。
- 组成：片基光学密度+乳剂固有光学密度。
- 影响因素：显影配方、时间、温度；胶片保存时间（越长， D_0 越大）；胶片类型（S越高， D_0 越大）。

射线胶片的特性

——特性参数——梯度G (反差系数)

- 梯度：感光特性曲线上任何一点的斜率。
- 平均梯度：胶片特性曲线上两点连线的斜率。

$$\bar{G} = \frac{D_2 - D_1}{\lg E_2 - \lg E_1}$$

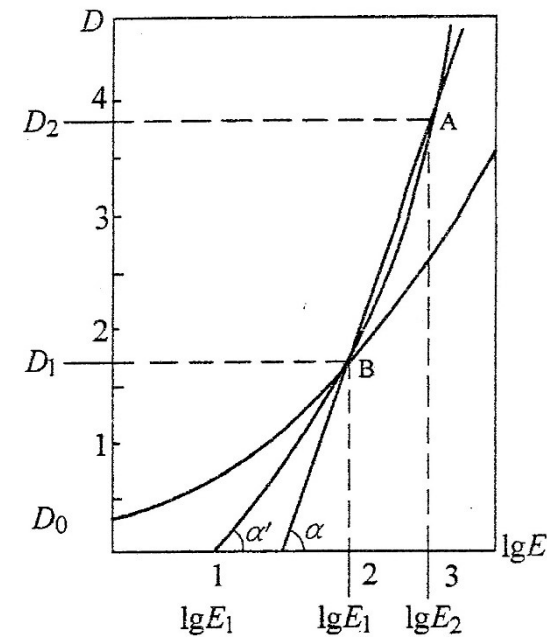


图 2—48 G 和 $\bar{G}$ 的求法

射线胶片的特性

——特性参数——梯度G (反差系数)

- ISO7004规定：平均梯度为底片净黑度1.5 ($D_1 = D_0 + 1.5$) 和净黑度3.5 ($D_2 = D_0 + 3.5$) 两点连线的斜率。

$$\bar{G} = \frac{2.0}{\lg E_2 - \lg E_1}$$

射线胶片的特性

——特性参数——梯度G (反差系数)

- ISO梯度分级

表 2—12

ISO 平均斜率分级

$\lg E_2 - \lg E_1$		ISO $\bar{G}$	$\lg E_2 - \lg E_1$		ISO $\bar{G}$	$\lg E_2 - \lg E_1$		ISO $\bar{G}$
从	至		从	至		从	至	
0.73	0.69	2.8	0.54	0.52	3.8	0.41	0.39	5.0
0.68	0.65	3.0	0.51	0.49	4.0	0.38	0.37	5.3
0.64	0.61	3.2	0.48	0.46	4.2	0.36	0.35	5.6
0.60	0.58	3.4	0.45	0.44	4.5	0.34	0.33	6.0
0.57	0.55	3.6	0.43	0.42	4.8	0.32	0.31	6.3

胶片的种类、型号;
显影配方、时间温度;
黑度。

射线胶片的特性

——特性参数——梯度G (反差系数)

- 对非增感型胶片：
 $D \uparrow \rightarrow G \uparrow$
- 对增感型胶片：
随着D的变化，
G存在极大值点。

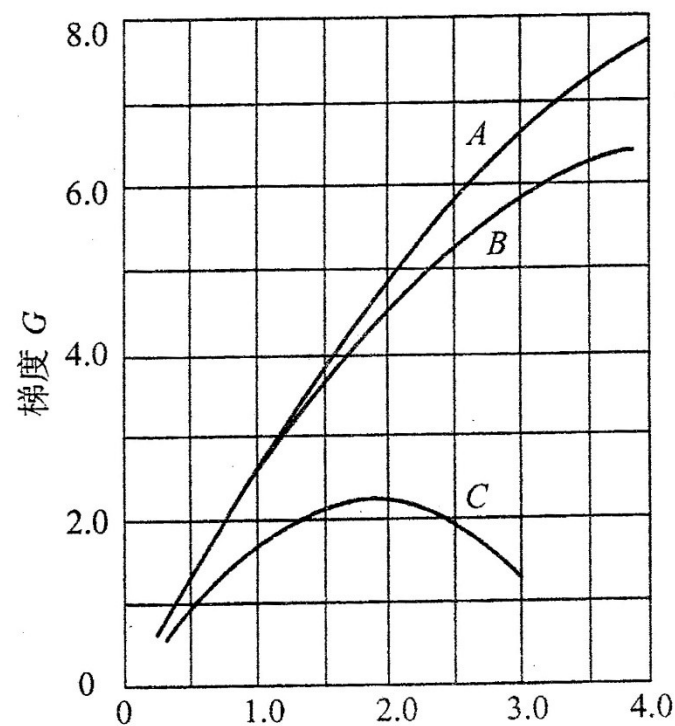


图 2—49 胶片 G 值与黑度 D 的关系

射线胶片的特性

——特性参数——梯度 G (反差系数)

- 显影温度越高，
梯度越大。

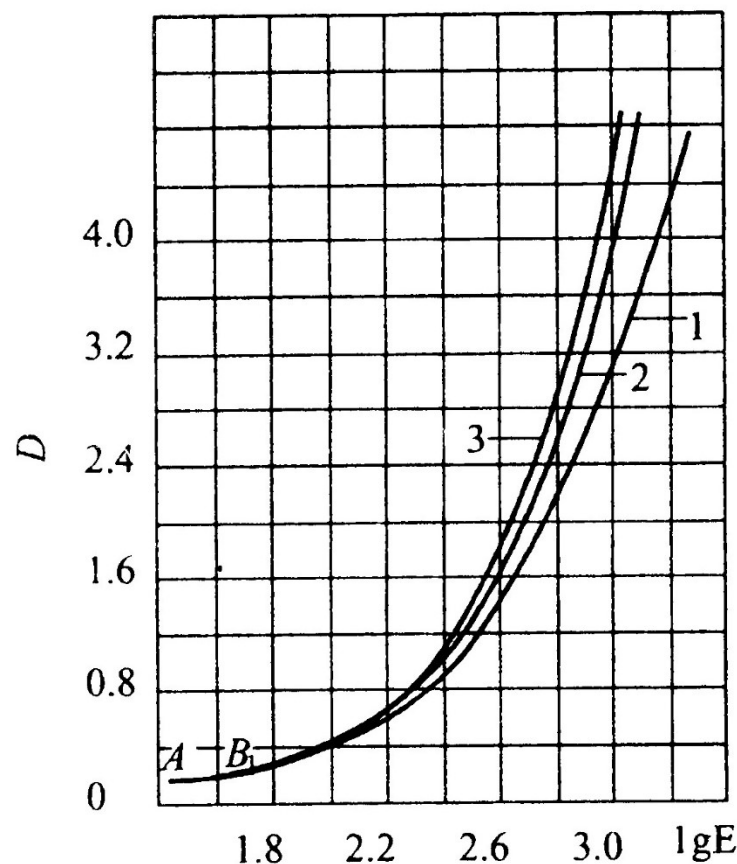


图 2—50 胶片 G 值与显影温度的关系

射线胶片的特性

——特性参数——宽容度L

- 定义：胶片有效黑度范围相对应的曝光范围，即特性曲线上与黑度许用下、上限对应的曝光量的倍数。

$$L = 10^{\lg E_2 - \lg E_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

- 规律：梯度越大，宽容度越小；
- 影响因素：射线能量。

射线胶片的特性

- AgBr颗粒度对感光特性的影响:

AgBr颗粒度 $\uparrow \rightarrow S\uparrow D_0\uparrow G\downarrow$



决定记录的最小细节

射线胶片的分类和选择

——以增感方式分类

- 增感型：

与荧光增感屏一起使用，一般不推荐；

- 非增感型：

与金属增感屏一起使用，或不用增感屏

射线胶片的分类和选择

——以感光乳剂粒度（速度）分类

胶片 类型	粒度/ μm		感光度 S		梯度 G		
	要求	尺寸	要求	相对值	要求	D=2.0	D=4.0
G1	微粒	0.1-0.3	很低	7	很高	>4	>8
G2	细粒	0.3-0.5	低	3	高	>3.7	>7.5
G3	中粒	0.5-0.7	中	1	高	>3.5	>6.8
G4	粗粒	0.7-1.1	高	0.5	中	>3	>6

射线胶片的分类和选择

- 识别细节的对比度要求:

$$|\Delta D| \geq (3-5) \sigma_D$$

即颗粒度是决定发现缺陷最小尺寸的基本限制

胶片自身的特性决定了检测灵敏度的最高水平

射线胶片的分类和选择——胶片系统

- 定义：

包括射线胶片、增感屏（材质、厚度）、冲洗条件（方式、配方、温度、时间）的组合。

- 分类依据：

最小梯度 最大颗粒度 最大梯度与最小

表 2—13

胶片的分类

系统分类	$G_{\min}$		$(\sigma_0)_{\max}$	$(G/\sigma_0)_{\max}$
	$D=2.0$	$D=4.0$	$D=2.0$	$D=2.0$
T1	4.3	7.4	0.018	270
T2	4.1	6.8	0.028	150
T3	3.8	6.4	0.032	120
T4	3.5	5.0	0.039	100

射线胶片的分类和选择——选择

- 依据：射线照相技术要求、射线的线质、工件厚度、材料种类等：

如像质要求较高，选择梯噪比较大的胶片；

在满足像质下，如需缩短时间，选择梯噪比较小的胶片；

工件厚度较小、材料等效系数较低、或射线线质较硬，选择梯噪比较大的胶片；

在环境湿度较高时选择抗潮性能好的胶片、在环境干燥时选择抗静电性能好的胶片。

射线胶片的使用与保管

- 胶片操作时应注意：
- 不可接近氨、硫化氢、煤气、乙炔和酸等有害气体，以免产生灰雾；
- 裁片时不要去掉衬纸、不要同时裁多张胶片，以免擦伤；
- 装片和取片时胶片与增感屏应尽量摩擦、弯曲，否则会产生擦伤、新月牙形影像；

射线胶片的使用与保管

- 开封后的胶片应尽快使用;
- 应在低温保存, $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 最好, 湿度 $55 \sim 65\%$ 之间, 太湿则容易粘接, 太干则容易静电感光;
- 应远离热源、射线、安全灯;
- 应竖放, 避免受压。

射线照相辅助设备器材

- 黑度计 Darkness gauge
- 增感屏 Intensifying Screen
- 像质计 Image Quality Indicator
- 其他辅助器材 Other accessories

黑度计（光学密度计）

- 工作原理：将接收到的模拟光信号转换成数字电信号，处理后显示底片黑度值。
- 分类：便携式、台式。
- 使用：校零。

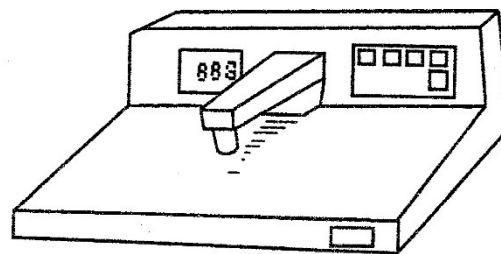


图 2—52 数显式黑度计

增感屏 Intensifying Screen

- 作用与类型 Function & Classification
- 金属增感屏 Metal Type Intensifying Screen
- 荧光增感屏
Fluorescent Type Intensifying Screen
- 金属荧光增感屏
Metal-Fluorescent Type Intensifying Screen
- 增感屏的操作 Operation

作用与类型——作用

- 增感效应：使乳剂吸收更多的射线，产生光化学作用形成影像。为此，采用双面药膜和较厚乳剂层。仅1%的射线被胶片吸收。
- 吸收效应：吸收散射线，提高对比度。
- 增感系数Q： $k = E_0/E$
 E_0 : 底片达到一定黑度不用增感屏时所需曝光量
 E : 底片达到一定黑度用增感屏时所需曝光量

作用与类型——类型

- 金属增感屏——影像质量最好
- 荧光增感屏——影像质量最差
- 金属荧光增感屏——影像质量居中

金属增感屏——结构与原理

- 结构:

厚度均匀平整的金属箔（铅、钨、钽、钼、铜、铁，最常用者为铅合金）与支撑物粘在一起

- 增感原理:

金属箔在射线照射下发射二次射线、二次电子能量很低，极易被胶片吸收，产生感光效应。

$k = 2 - 7$ 。

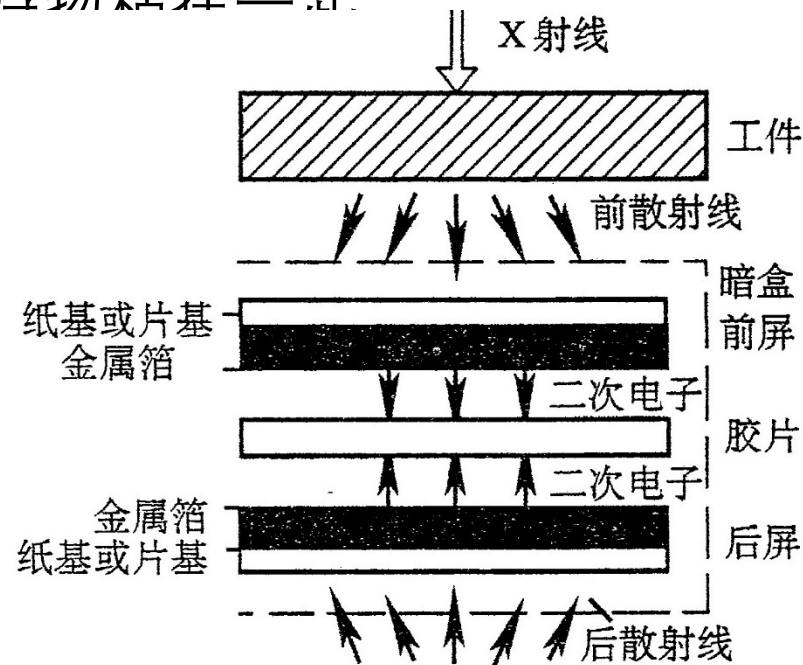


图 2—53 金属箔增感屏的构造和作用图

金属增感屏——影响因素

- 影响增感因素：

X射线能量 (<90KV时无增感) $\uparrow$ (γ 射线能量 $\downarrow$)、
原子序数 $\uparrow$ 、屏厚 $\downarrow \rightarrow \downarrow \uparrow$

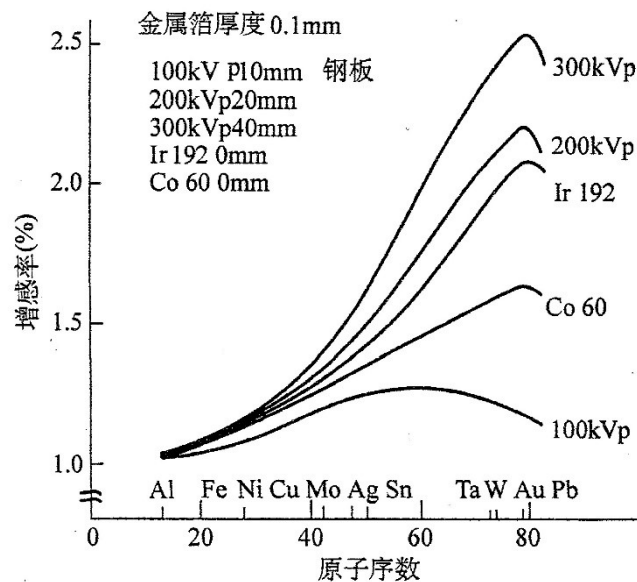


图 2—54 金属箔的材质和增感率的关系

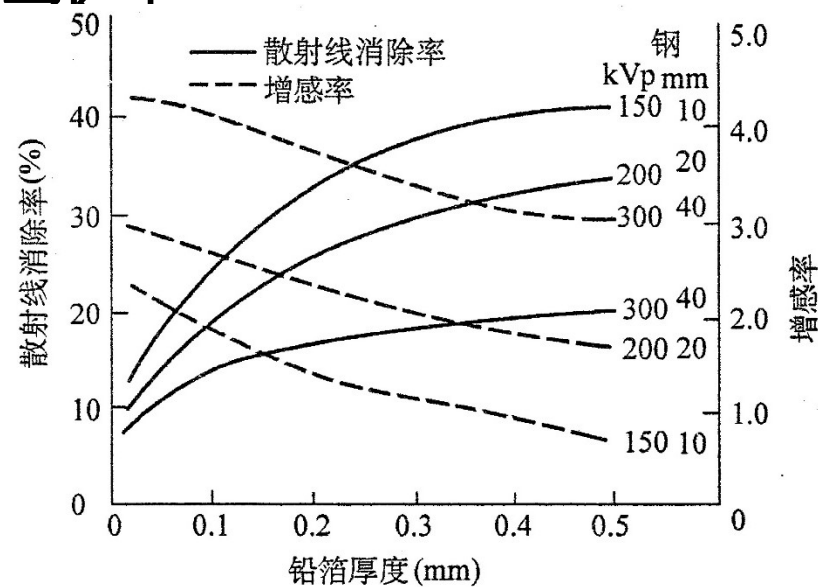


图 2—55 铅箔增感屏的增感率
和散射线消除率的关系

金属增感屏——选择

- 优点：影像清晰；
- 缺点：增感率低。

表 2—14

金属增感屏的选用

射线种类	增感屏材料	前屏厚度 (mm)	后屏厚度 (mm)
<120 kV	铅箔	—	≥ 0.10
120~250 kV	铅箔	0.025~0.125	≥ 0.10
>250~450 kV	铅箔	0.05~0.16	≥ 0.10
1~3 MeV	铅箔	1.00~1.60	1.00~1.60
>3 ~8 MeV	铜箔、铅箔	1.00~1.60	1.00~1.60
>8~35 MeV	钽箔、钨箔、铅箔	1.00~1.60	—
Ir192	铅箔	0.05~0.16	≥ 0.16
Co60	钽箔、钢箔、铅箔	0.50~2.00	0.25~1.00

荧光增感屏——结构与原理

- 结构:

在支持物上涂一层荧光物质 (通常用钨酸钡)
再加保护层。

- 增感原理:

在射线照射下钨酸钡辐射
荧光, 最强波长为425nm
的蓝紫光, 被胶片吸收,
产生感光效应。

与增感型胶片使用

$$k = 100 - 300$$

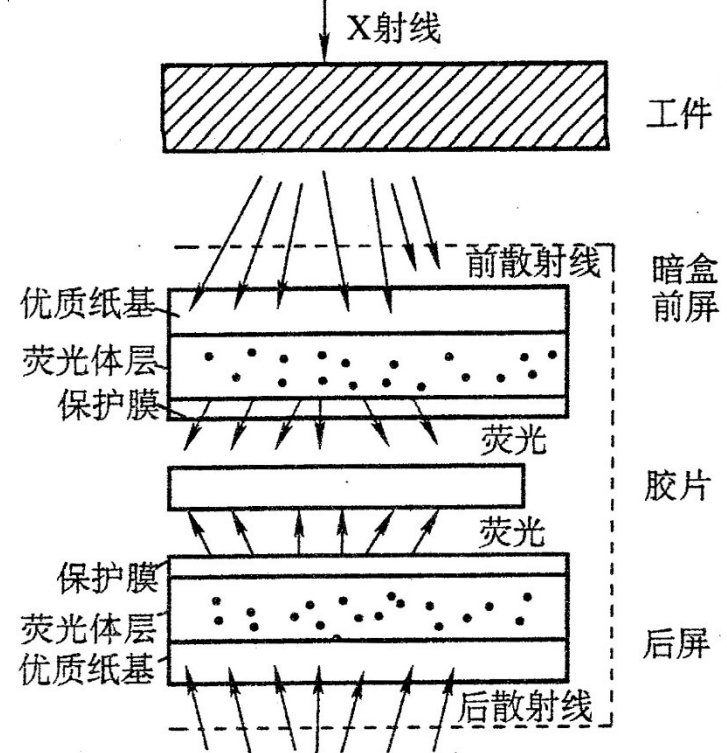


图 2—56 荧光增感屏的构造和作用

荧光增感屏——优缺点及影响因素

- 优缺点

优点：增感率高；

缺点：荧光物质的颗粒大，荧光产生较强的扩散和散射，加之荧光屏不能吸收散射线，故影像不清晰、灵敏度低。承压设备检测不允许使用。

- 影响因素

管电压较低时，增感率高；管电压 $>200\text{KV}$ 时，增感率降低。

金属荧光增感屏

- 结构:

铅箔粘在纸基上，在铅箔上涂布荧光物质

- 特点:

兼有金属屏吸收散射线和
荧光屏高增感特性的优点。

- 使用:

与非增感型胶片配用。

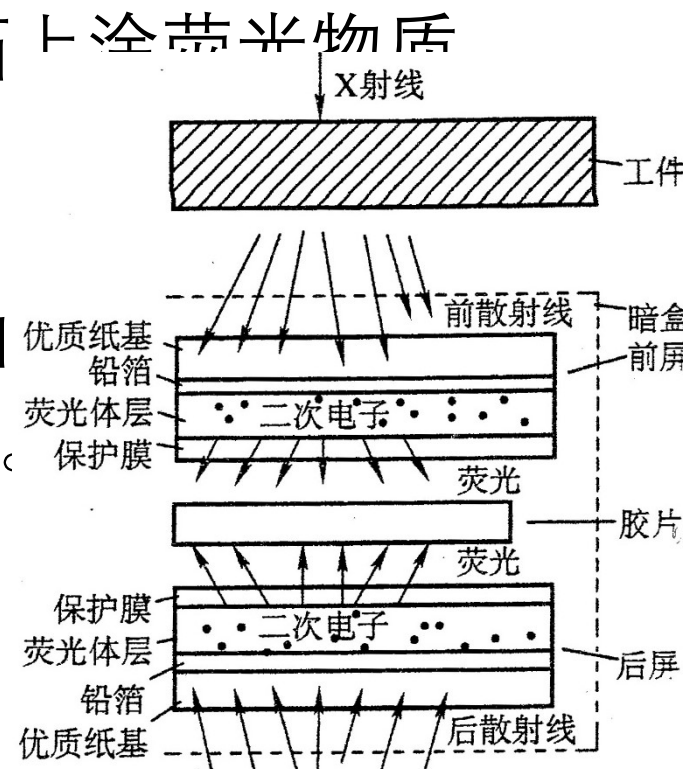


图 2—57 金属荧光增感的构造和作用

增感屏的操作

- 增感屏与胶片
金属增感屏与非增感型胶片一起使用；
荧光增感屏与增感型胶片一起使用。
- 前屏：厚度较小，适于射线能量；
后屏：厚度较大，兼吸收散射线。
- 增感物质应朝向胶片，且接触紧密。
- 装取增感屏时应避免摩擦产生静电感光。

作用与类型

项目	金属 增感屏	荧光 增感屏	金属荧光 增感屏
增感物质	金属箔	荧光物质	金属＋荧光
增感机理	二次电子	荧光	二次电子＋荧光
增感系数	低	很高	高
不清晰度	基本不存在	很大	大
散射线	大量吸收	不吸收反产生	吸收并产生

增感屏的操作

- 表面保持

光滑、清洁、无污染——如有油污，会吸收电子，形成减感使底片产生白影；

无损伤——如划伤或开裂，因发射二次电子的面积增大，使底片出现细黑线；

无变形——卷曲、受折后引起与胶片接触不良，使影像模糊。

像质计Image Quality Indicator

- 作用与类型 **Function & Classification**
- 金属丝型像质计 **Wire Type IQI**
- 平板孔型像质计 **Plate-Hole Type IQI**
- 阶梯孔型像质计 **Stepped hole IQI**
- 像质计的摆放 **Operation**

作用与类型

- 像质计：

又称影像质量指示器、透度计、IQI，用与被检工件材质相同或对射线吸收性能相似的材料制成，设有认为厚度差的结构（如金属丝、孔、槽等）。

- 作用：

测量射线照相灵敏度；判断影像质量；评定透照技术、暗室处理情况、缺陷检验能力。

- 类型：

丝型——应用最广，中、日、德、英、美、国际标准；

平板孔型——美；

阶梯孔型——英、法。

金属丝型像质计

- 金属丝直径：
等差数列、等比数列，常用等比数列。

- 等比数列：

R10系列：公比为 $\sqrt[10]{10} = 1.25$, 常用

R20系列：公比为 $\sqrt[20]{10}$

- 长度：
10mm, 25mm, 50mm。

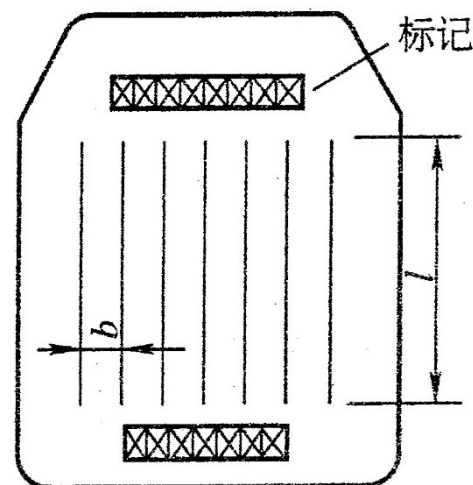


图 2—58 金属丝型像质计结构

金属丝型像质计

• 丝号

2—15

R10 像质计线号和丝径

线号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标称线径	3.20	2.50	2.00	1.60	1.25	1.00	0.80	0.63	0.50	0.40
线号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
标称路径	0.32	0.25	0.20	0.16	0.125	0.100	0.080	0.063	0.050	

• 型号

2—16

像质计型号和对应线号

像质计型号	1 号	6 号	10 号	13 号
线号	(1) — (7);	(6) — (12);	(10) — (16)	(13) — (19)

金属丝型像质计

- 材料
钢质、铝质、钛质、铜质。

- 选择

应选择与工件材质相同的像质计，如缺少，则可用原子序数低的像质计代替。

2—17

不同线材像质计适用的材料范围

线材代号/线的材料	FE/碳素钢	CU/铜	AL/铝	TI/钛
适用材料范围	铁、镍	铜、锌、锡及锡合金	铝及铝合金	钛及钛合金

平板孔型像质计

- 结构：材料与被检工件相同或相近平板上钻3个孔径为 $1T$, $2T$, $3T$ 孔, 板厚 T 应为透照厚度的1%, 2%, 4%。

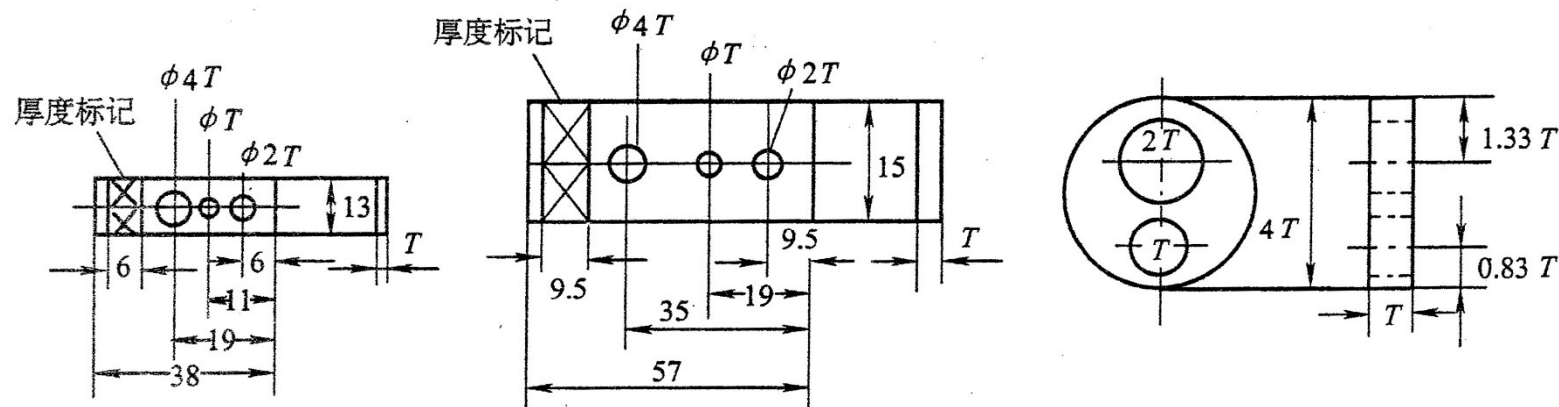


图 2—59 平板孔型像质计结构

平板孔型像质计

- 灵敏度级别：共9个： 1-1T,1-2T,1-4T;
2-1T,2-2T,2-4T; 4-1T,4-2T,4-4T

如4-2T：像质计板厚为透照厚度的4%，至少可识别直径为2T的孔

- 等效灵敏度

$$EPS = \frac{100}{x} \sqrt{\frac{Th}{2}} (\%)$$

式中： h——可识别最小孔直径

x——像质计板厚

T——工件的透照厚度

像质计的摆放

- 原则：数量、位置、方法应按标准。
- 每张底片都应有像质计影像（双向曝光每120°放1个）；
- 应放置在工件的射线源侧表面(如在胶片侧，则应作对比试验并加F作标记)；

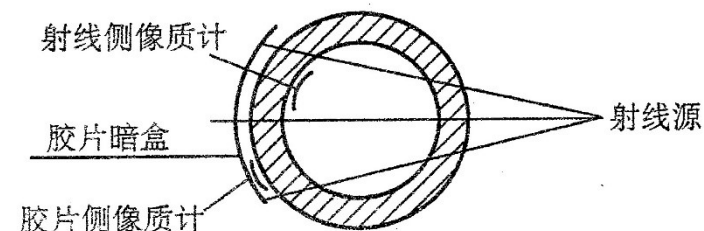


图 2—63 双壁单影法中像质计的对比试验

像质计的摆放

- 摆放在灵敏度差的部位如：在厚度较大部位，在被检区的一端；
- 丝型：贯穿焊缝并与焊缝垂直，细丝在外侧；
- 平板孔型：离焊缝边缘5mm以上。

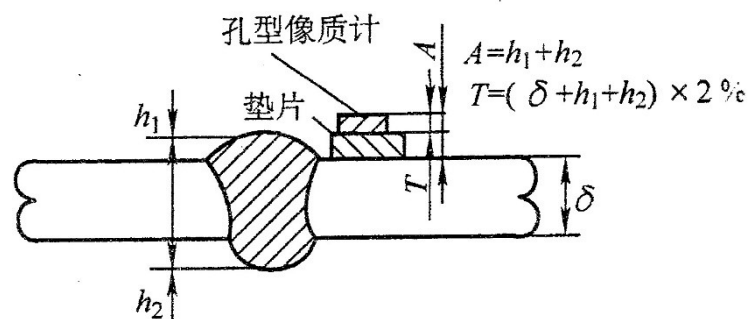


图 2—64 平板孔形像质计的放置

像质计的摆放

- 识别:

在底片上至少可清晰看到连续10mm长的影像。

- 相对灵敏度: $Sw = (d/T) \times 100\%$

d: 可识别丝的最小直径; T: 工件的透照厚度

其他辅助器材——暗袋

- 制作材料：对射线吸收少、遮光性好的黑色塑料膜或合成革。
- 要求：薄、软、滑。
- 尺寸：与增感屏、胶片匹配。

其他辅助器材——标记带

- 标记的组成：
 - 识别标记：工件编号、部位编号、透照部门、透照时间、透照人员；
 - 定位标记：搭接标记、特定点标记（如焊缝检测时的中心）
- 标记布置原则：
 - 保证标记的影像能完整出现在底片上，并不干扰对缺陷影像的识别和评定。

其他辅助器材——标记带

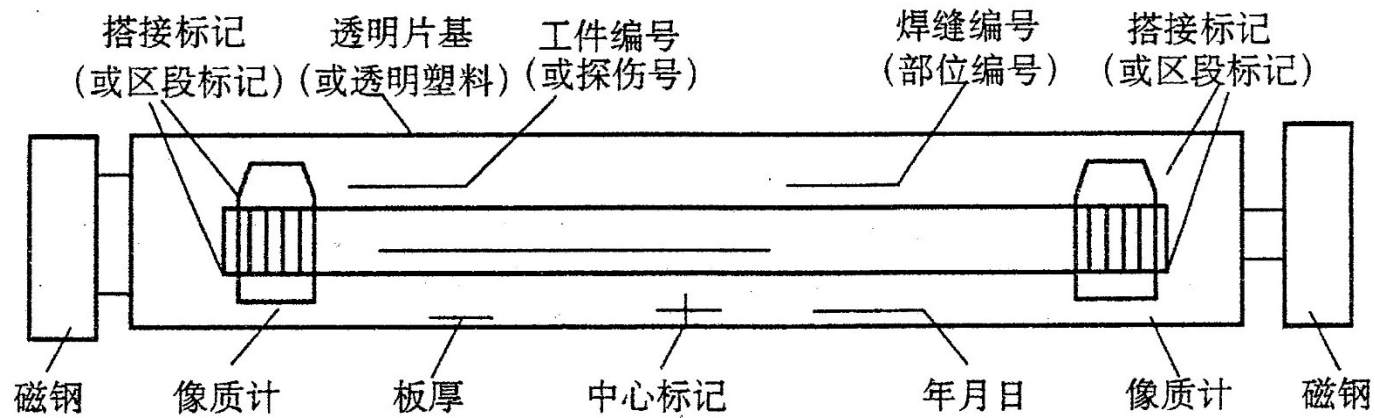


图 2—65 标记带的示例

其他辅助器材——屏蔽铅板

- 1mm后的铅板。

其他辅助器材——中心指示器

- 指示射线的方向，使射线中心束对准透照中心。

其他辅助器材——其他小器件

- 卷尺、钢印、榔头、照明灯、电筒、各种尺寸的铅遮板、补偿泥等。