



射线检测

第四章 射线透照工艺



4.1 射线工艺条件的选择

4.2 透照方式的选择和一次透照长度的计算

4.3 曝光曲线的制作及应用

4.4 散射线的控制

4.5 焊缝透照常规工艺

4.6 射线透照技术和工艺研究

本章是前面所学习的理论内容的集中应用，讨论了主要的工艺条件对射线照相质量的影响，以及如何选择合适的工艺条件。

本章也是看懂标准、制作操作指导书的基础。

无损检测工艺文件

❑ 无损检测工艺文件：工艺规程、操作指导书（工艺卡）

❑ 工艺规程：根据相关法规、技术标准、有关的技术文件，针对本单位的特点和技术条件编制的技术文件

- 3级人员编制、多文字形式

❑ 操作指导书：根据工艺规程并结合检测对象的具体检测要求编制的技术文件

- 2级人员编制、3级人员审核、多图表形式
- 包括：适用范围、检测设备和器材、检测技术与工艺、暗室处理方法和条件要求、底片观察技术、底片质量要求、验收标准、操作指导书的验证要求等

产品编号	15T01			产品名称	塔式容器筒节				
产品规格	φ3200x2000x26mm			产品材质	Q345R	焊接方法	埋弧自动焊焊接		
执行标准	NB/T47013.2-2015			检测技术等级	AB	验收等级	II 级		
探伤机型号	RF300EG-B2F2.2 型定向 X 射线机			焦点尺寸	φ3x1mm	检测时机	焊接完成目视检查合格后		
胶片牌号	Agfa-D7			胶片规格	360x100mm	增感屏	Pb0.03mm		
像质计型号	FE 7-13			像质计灵敏度	10 号丝	底片黑度	2.0≤D≤4.5		
显影配方	Agfa-D7 型配方			显影时间	5min	显影温度	20℃		
焊缝编号	焊缝长度 (mm)	检测比例 (%)	透照方式	透照厚度 (mm)	焦距 F (mm)	透照次数	一次透照长度 (mm)	管电压 Kv 或源活度 Ci	曝光时间 (min)
A1	2000	100	源在外单壁透照	26	700	7	286	220	3 (5mA)
透照布置示意图									
技术要求及说明	1、射线源放置：射线束中心垂直指向透照中心； 2、散射线屏蔽：暗盒背面加铅板进行背散射防护； 3、像质计使用：像质计置于射线源侧，横跨并垂直于焊缝放置于透照长度的 1/4 处，细丝朝外； 4、检测范围包括焊缝金属及相对于焊缝边缘至少 5mm 的相邻母材区域； 5、操作人员防护用品穿戴齐全，佩戴个人剂量计并携带剂量报警仪； 6、初次使用的操作指导书应进行工艺验证，以验证底片质量是否能达到标准规定的要求。								
曝光参数计算	焦距 F=700mm 时，管电压 5mA，曝光时间 t=3min， 焦距 F=600mm 是，管电压 5mA，曝光时间 t=2.2min， 查图，T=26，t=2.2mm，对应的管电压为 220KV。								
不允许存在的缺陷	1、裂纹、未熔合、未焊透 2、圆形缺陷：在 10x20mm 的评定区内，点数超过 12 点； 3、条形缺陷：①单个缺陷长度超过 8.7mm，②在任意长度为 312mm 的评定区内，一组条形缺陷累计长度超过 26mm； 4、圆形缺陷评定区域内同时存在圆形缺陷和条形缺陷时综合评级超过 II 级的缺陷。								
编制	XXX(RT-II)			审核	XXX(RT-III)		时间	2021-XX-XX	

4.1 射线工艺条件的选择

- ✓ 射线源和能量的选择
- ✓ 焦距的选择
- ✓ 曝光量的选择与修正

4.1.1 射线源和能量的选择

□ 选择射线源和能量的首要因素：是射线对被检工件具有足够的穿透能力。

线 ● X射线：管电压

质 ● γ 射线：射线源的种类

1、射线源的选择

➤ 考虑因素：

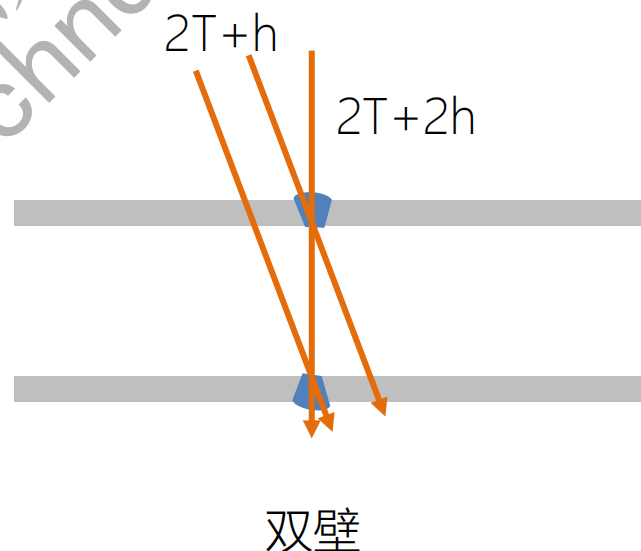
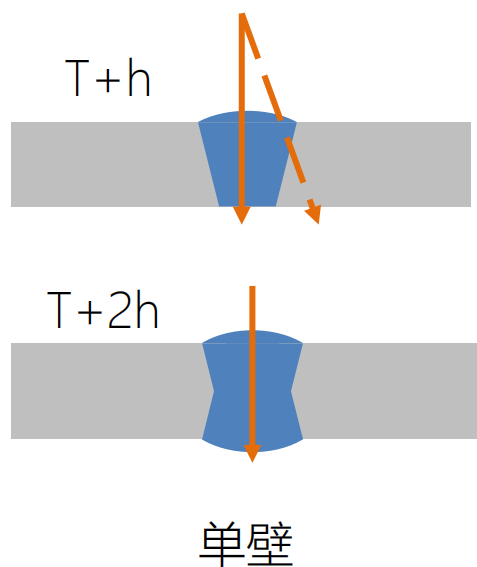
1. 透照厚度
2. 照相灵敏度
3. 曝光时间

4.1.1 射线源和能量的选择

透照厚度

透照厚度 (W)： 射线照射方向上材料的公称厚度，多层透照时，透照厚度为通过的各层材料公称厚度之和。 (3.1)

- ❑ 在实际检测中，必须先确定透照厚度，有时还需要考虑余高等影响因素。
- ❑ 透照厚度决定了射线能量、曝光量、像质指数（识别像质计丝号）的选择，同时还与透照厚度比、有效透照区域等有关



4.1.1 射线源和能量的选择

X射线设备可透照的的最大厚度

射线能量	高灵敏度法 最大厚度 (mm)	低灵敏度法 最大厚度 (mm)
100KV	10	16
150KV	15	24
200KV	25	35
300KV	40	60
400KV	75	100

4.1.1 射线源和能量的选择

γ 源射线源和1MeV以上X射线设备的透照厚度范围（标准：表4）

射线源	透照厚度 mm	
	A级、AB级	B级
Tm170	≤ 5	≤ 5
Yb169	$\geq 1 - 15$	$\geq 2 - 12$
Se75	$\geq 10 - 40$	$\geq 14 - 40$
Ir192	$\geq 20 - 100$	$\geq 20 - 90$
Co60	$\geq 40 - 200$	$\geq 60 - 150$
X射线 (1~4MeV)	$\geq 30 - 200$	$\geq 50 - 180$
X射线 (> 4~12MeV)	≥ 50	≥ 80

4.1.1 射线源和能量的选择

- ◆ 对5mm以内的钢，除非允许较低灵敏度，选择X射线；
- ◆ 对5~50mm的钢，选择X射线能获得较高的灵敏度；
- ◆ 对50~150的钢，X射线和 γ 射线的像质计灵敏度几乎相同，但裂纹检出率还是X射线较高；
- ◆ 对大于150mm的钢，即使使用能最大的 γ 源（Co60），曝光时间也很长，宜用高能X射线；
- ◆ 对于大批量的工件检测，X射线曝光时间短，宜选X射线；
- ◆ 对于轻质合金和低密度材料，国内使用Yb169、Tm170 γ 源很少，最常用的还是X射线；

X射线能量较低，且可调，曝光时间较短，同样透照技术条件下，照相灵敏度高于 γ 射线，在透照条件允许的情况下，一般使用X射线。

X射线机体积较大，是某些现场条件下无法选用的主要原因。

4.1.1 射线源和能量的选择

- ◆ 只要与容器直径有关的焦距能满足几何不清晰度要求，环形焊缝的透照应尽量选用周向锥靶X射线机作中心周向透照，以提高工作效率和影像质量；
- ◆ 对直径较小的管子环焊缝，也可选用小焦点的棒阳极X射线机或小焦点 γ 射线作中心周向透照；
- ◆ 选用周向平靶X射线机对环焊缝做中心周向透照时，应考虑射线倾斜角度对环缝中纵向裂纹检出率的影响。

4.1.1 射线源和能量的选择

2、X射线能量的选择

◆ 过低:

- 穿透能力不够, 导致透射射线强度过小, 底片黑度不足;
- 曝光时间过分延长, 底片灰雾增大;
- 厚度宽容度减小。

◆ 过高:

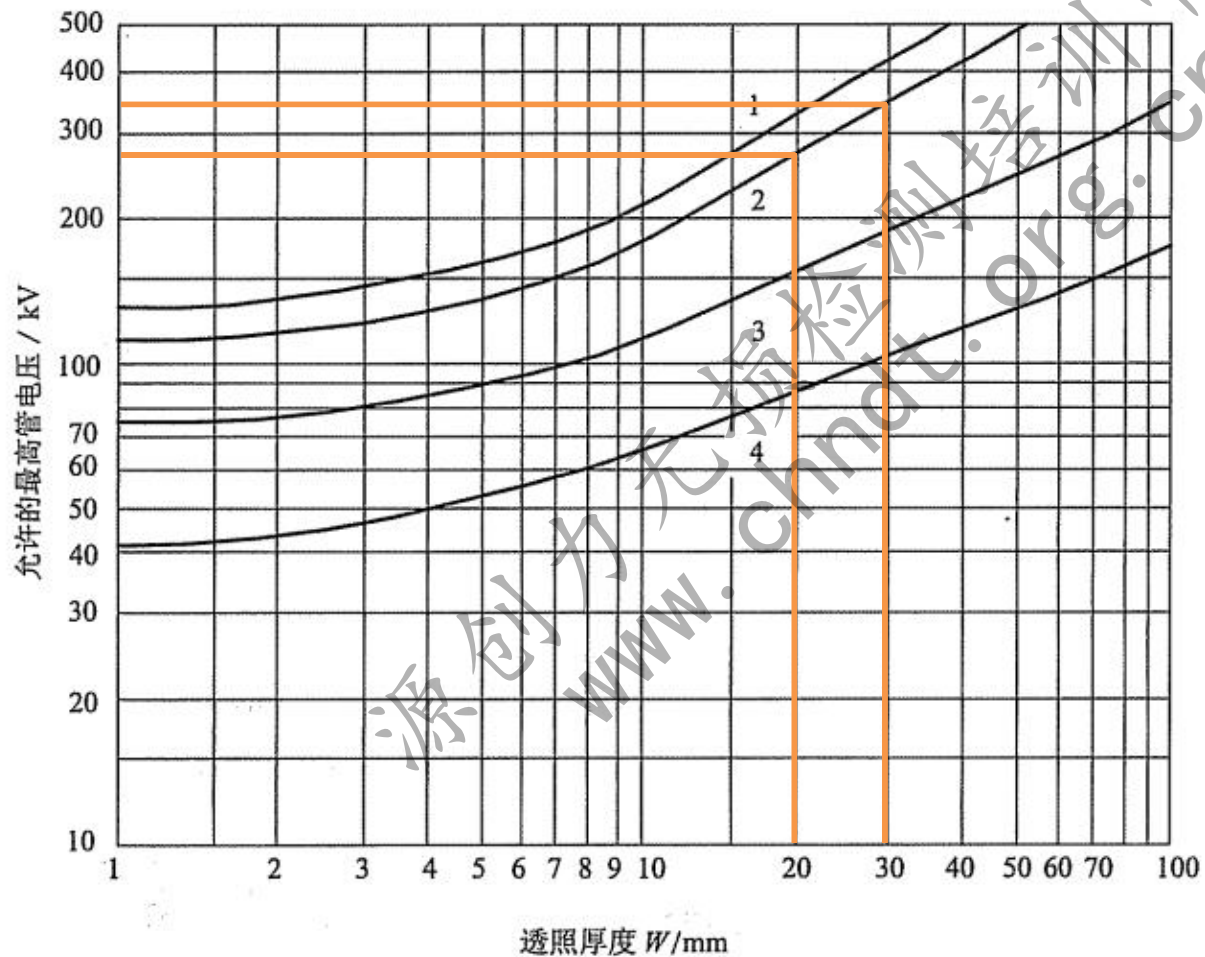
- 主因对比度降低,
- 固有不清晰度 U_i 增大,
- 底片颗粒度增大。

从照相灵敏度角度考虑: 在保证穿透能力的前提下, 选择能量较低的管电压。

在底片黑度不变的前提下, 提高管电压可以缩短曝光时间, 但代价是灵敏度降低, 为保证透照质量, 标准对不同透照厚度允许的X射线最高透照管电压有一定限制。

4.1.1 射线源和能量的选择

不同透照厚度允许的X射线最高透照管电压（标准：图1）



1—铜、镍及其合金

2—钢

3—钛及其合金

4—铝及其合金

4.1.2 焦距的选择

- ❑ 焦距 (F)：沿射线束中心测定的射线源与胶片之间的距离。（标准：3.4）
- ❑ 焦距主要影响几何不清晰度 U_g ，焦点尺寸 d 越小，焦距 F 越大， U_g 越小，底片上影像越清晰。

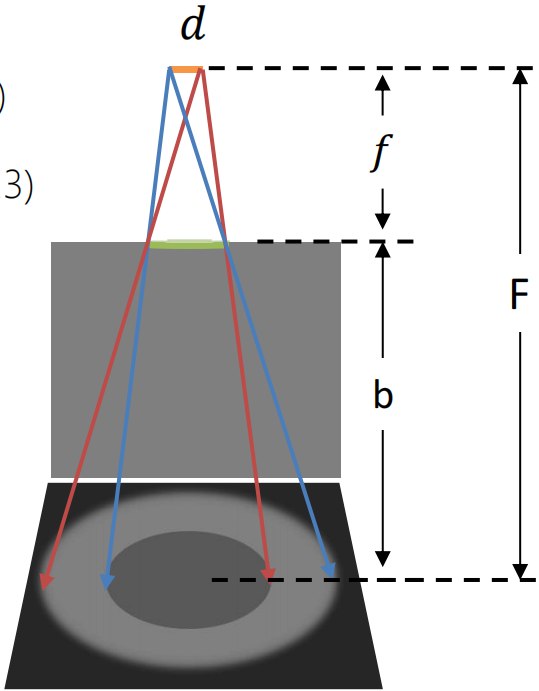
$$U_g = \frac{db}{f} = \frac{db}{F - b}$$

d : 射线源的有效焦点尺寸 (标准3.5)

b : 沿射线束中心测定的工件受检部位射线源侧表面与胶片之间的距离 (标准3.2)

f : 沿射线束中心测定的射线源与工件受检部位射线源侧表面之间的距离 (标准3.3)

射线检测技术等级	f	U_g 值
A级	$f \geq 7.5d \cdot b^{2/3}$	$U_g \leq (2/15) b^{1/3}$
AB级	$f \geq 10d \cdot b^{2/3}$	$U_g \leq (1/10) b^{1/3}$
B级	$f \geq 15d \cdot b^{2/3}$	$U_g \leq (1/15) b^{1/3}$



实际工作中，焦距最小值可由诺模图查出。

例题：采用AB级技术照相，焦点尺寸 $d_f = 2mm$ ，透照厚度 $b = 30mm$ ，求：最小焦距 F_{min}

1、计算法：

AB级： $f \geq 10d_f \cdot b^{2/3}$

$$f = 10d_f \cdot b^{2/3} = 10 \times 2 \times 30^{2/3} = 193mm$$

$$F_{min} = f + b = 193 + 30 = 223mm$$

2、查诺模图

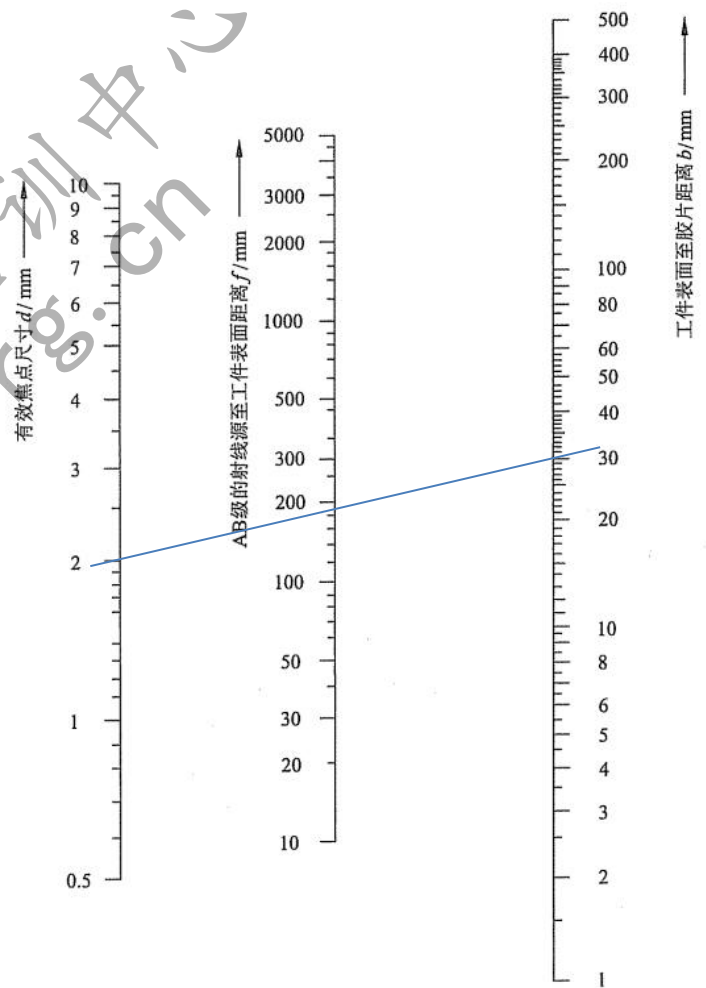
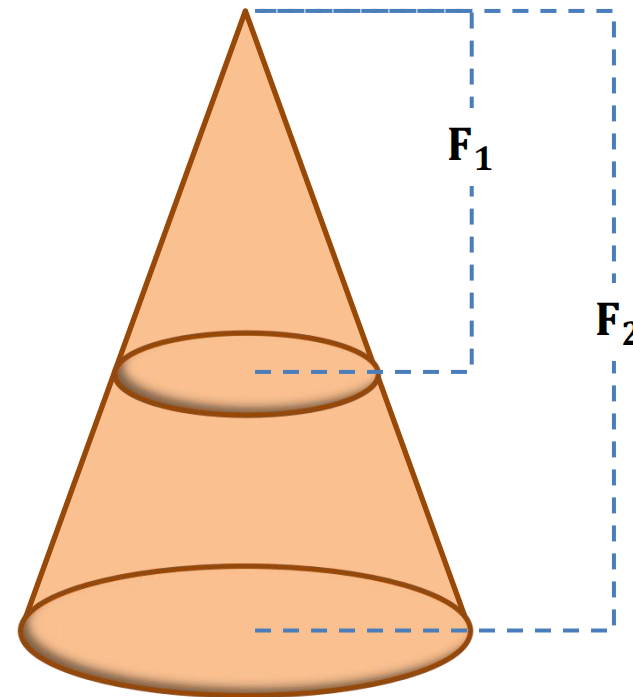


图3 AB级射线检测技术确定焦点至工件表面距离的诺模图

4.1.2 焦距的选择

- ◆ 实际工作中很少采用最小焦距，一般焦距比最小焦距大得多；
- ◆ 焦距增大后，均匀透照场范围增大，这样可以得到较大的有效透照长度，同时提高清晰度；
- ◆ 焦距的选择有时还与工件几何形状和透照方式有关；
 - 采用中心透照法时，焦距就是筒体半径；
 - 为得到较大一次透照长度和较小的横向裂纹检出角，双壁单影法透照环缝时，往往采用较小焦距。

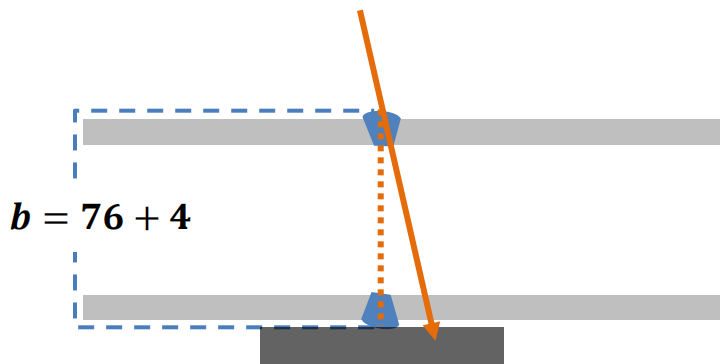


4.1.2 焦距的选择

例题：采用AB级技术照相，采用双壁双影倾斜透照φ76（外径）x4的管子对接焊缝，焊缝余高为2mm，已知X射线机焦点尺寸为3mm，求：最小焦距 F_{min}

NB/T 47013.2—2015

AB级	$f \geq 10d_f \cdot b^{2/3}$
-----	------------------------------



1、公式计算

$$f = 10d_f \cdot b^{2/3} = 10 \times 3 \times (76 + 4)^{2/3} = 557\text{mm}$$

$$F_{min} = f + b = 557 + 80 = 637\text{mm}$$

2、查诺模图

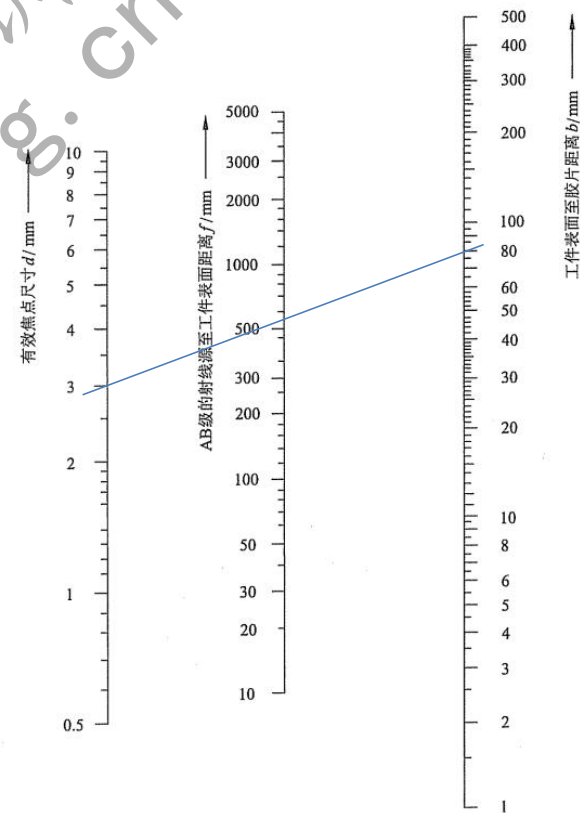


图3 AB级射线检测技术确定焦点至工件表面距离的诺模图

本课回顾

- 本节课我们讨论了射线源和能量的选择，焦距的选择；
- 选择射线源和能量的首要因素：是射线对被检工件具有足够的穿透能力

透照厚度，照相灵敏度，曝光时间

X射线能量较低，且可调，曝光时间较短，同样透照技术条件下，照相灵敏度高于γ射线，在透照条件允许的情况下，一般使用X射线。

- 在保证穿透能力的前提下，选择能量较低的能量。

- ◆ 标准对不同透照厚度允许的X射线最高透照管电压作出了限制，
- ◆ 标准对γ射线源透照厚度范围上下限作出了规定；

焦距主要影响几何不清晰度 U_g ，焦点尺寸 d_f 越小，焦距 F 越大， U_g 越小，底片上影像越清晰。

- ◆ 标准限制了几何不清晰度的最大值，AB级 $f \geq 10d_f \cdot b^{2/3}$

- 中心透照标准在γ射线最高能量的选择和最小焦距的选择上都作出了让步。



射线检测

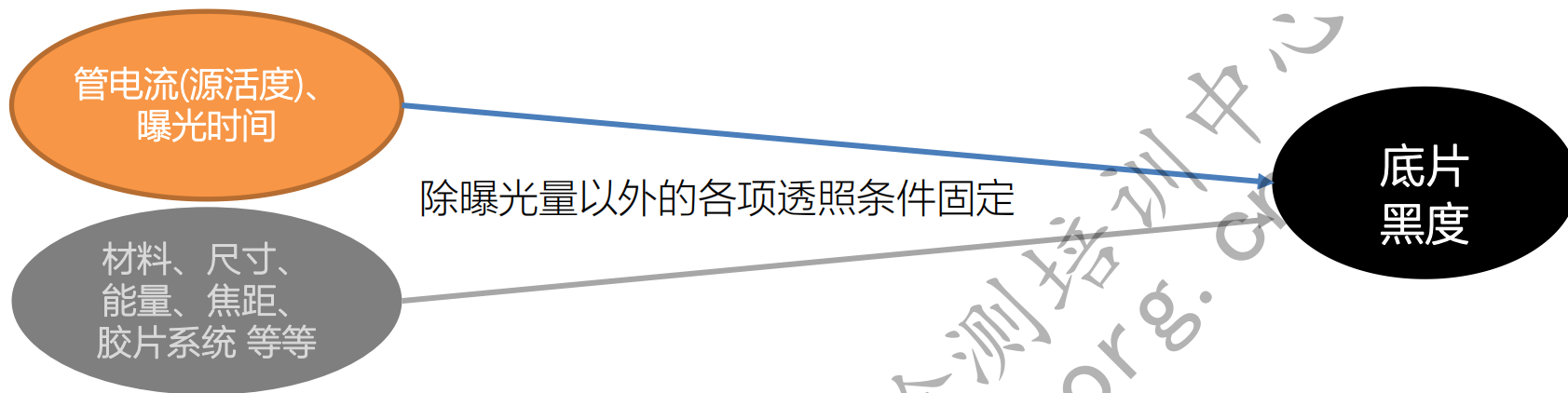
第四章 射线透照工艺



4.1 射线工艺条件的选择

- ✓ 射线源和能量的选择
- ✓ 焦距的选择
- ✓ 曝光量的选择与修正

4.1.3 曝光量的选择与修正



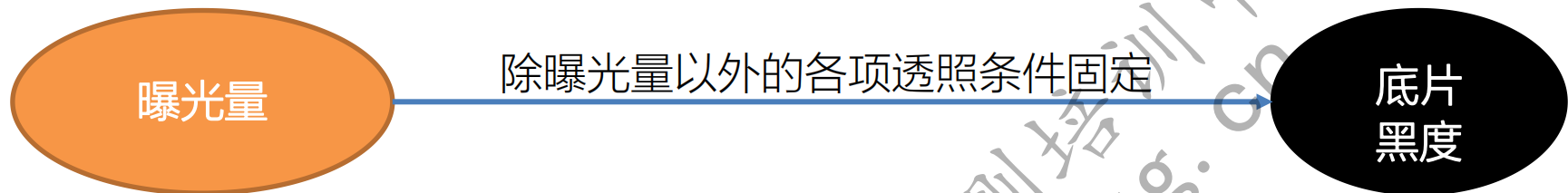
- 各项其他透照条件固定（工件材料、尺寸、能量、焦距、胶片、增感屏、暗室处理条件等等），底片黑度只与管电流(源活度)、曝光时间有关；
- 管电流(源活度)与曝光时间的乘积与底片黑度呈对应关系；

曝光量 (E)

□ X射线机: $E = it$ (管电流 × 曝光时间)

□ γ射线机: $E = At$ (源活度 × 曝光时间)

- 曝光量可以定义为 射线源发出的射线强度与照射时间的乘积。



- ❑ 底片黑度与曝光量有很好的对应关系，因此可以通过改变曝光量来控制底片黑度；
- ❑ $3mA \times 5min = 5mA \times 3min = 15mA \cdot min$
- ❑ **互易律**：决定光化学产物质量的条件只与总的曝光量相关，即取决于辐射强度与时间的乘积，而与这两种因素的单独作用无关。即：底片黑度只与总的曝光量相关；
- ❑ 互易律给出了底片黑度不变的前提下，射线强度与曝光时间相互变化的关系；
- ❑ 射线照相中互易律成立的条件：
 - 除曝光量以外的各项透照条件固定
 - 金属增感屏（铅增感屏）、无增感屏

4.1.3 曝光量的选择与修正

平方反比定律

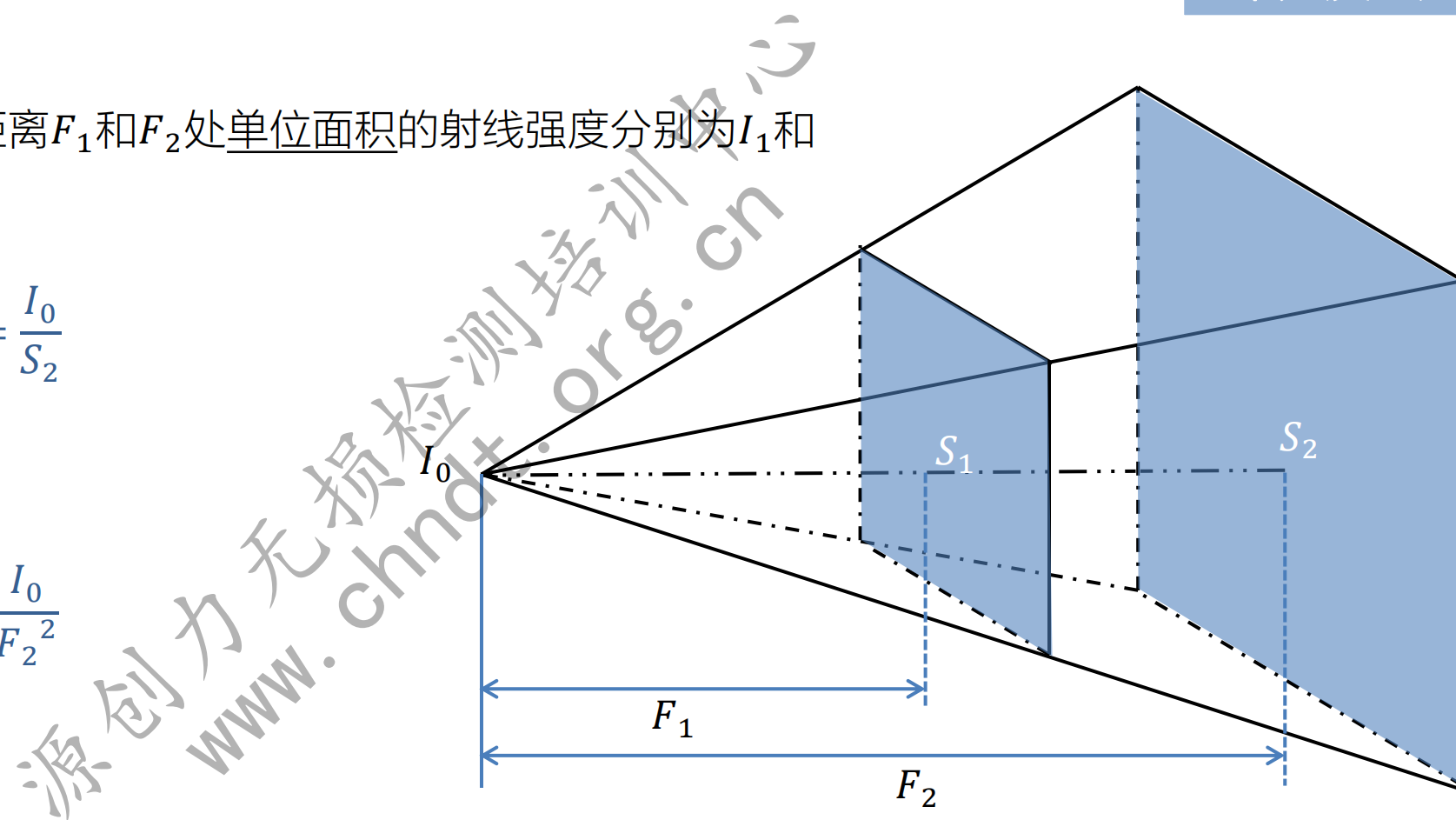
设：射线源初始强度 I_0 ，在距离 F_1 和 F_2 处单位面积的射线强度分别为 I_1 和 I_2 ，辐射面积分别为 S_1 和 S_2 。

$$\text{则有: } I_1 = \frac{I_0}{S_1} \quad I_2 = \frac{I_0}{S_2}$$

$$\text{因为: } \frac{S_1}{S_2} = \frac{F_1^2}{F_2^2}$$

$$\text{所以: } I_1 = \frac{I_0}{F_1^2} \quad I_2 = \frac{I_0}{F_2^2}$$

$$\text{即: } \frac{I_1}{I_2} = \frac{F_2^2}{F_1^2}$$

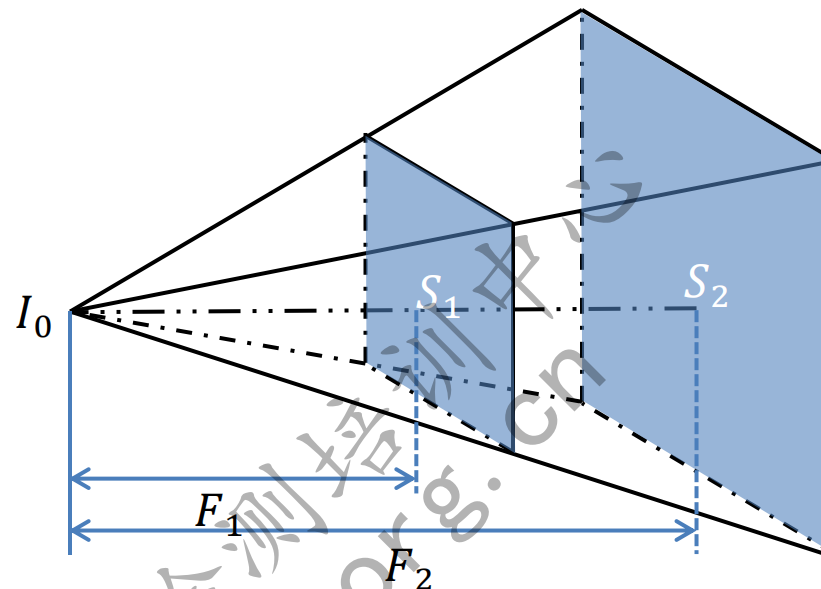


平方反比定律：从一点源发出的辐射，（单位面积）强度 I 与（距离源的）距离 F 的平方成反比。

4.1.3 曝光量的选择与修正

$$I_0 = E = it$$

$$I_1 = \frac{I_0}{F_1^2} = \frac{i_1 t_1}{F_1^2} \quad I_2 = \frac{I_0}{F_2^2} = \frac{i_2 t_2}{F_2^2}$$



其他条件固定时，只要： $\frac{i_1 t_1}{F_1^2} = \frac{i_2 t_2}{F_2^2} = \dots = \frac{i_n t_n}{F_n^2} = M$ 则有： $D_1 = D_2 = \dots = D_n$

X射线照相曝光因子： $M = \frac{it}{F^2}$ γ 射线照相曝光因子： $M = \frac{At}{F^2}$

□ 曝光因子清楚表达了：射线强度、曝光时间、焦距，三者之间的关系，利用曝光因子可以确定三个参量中一个或者两个发生改变时，如何修正其他参量。

4.1.3 曝光量的选择与修正

例题1

X射线机透照一工件，原透照管电压为200KV，管电流为5mA，曝光时间为4min，焦距600mm，现透照管电压不变，将焦距变为900mm，欲保持底片黑度不变，如何选择管电流和曝光时间？

- 1、X射线曝光因子： $M = i_1 t_1 / F_1^2 = i_2 t_2 / F_2^2$
- 2、已知： $i_1 = 5mA$, $t_1 = 4min$, $F_1 = 600mm$, $F_2 = 900mm$, 求 $i_2 t_2$ 。
- 3、代入： $M = \frac{5 \times 4}{600^2} = \frac{i_2 t_2}{900^2}$

求得： $i_2 t_2 = 45mA \cdot min$

可以选择：5mA管电流，9min曝光时间。

4.1.3 曝光量的选择与修正

例题2

用Ir192 γ 源透照直径1m的环焊缝，曝光时间24min，得到底片黑度恰好满足要求，60天后仍用该源透照同样厚度的直径为1.2m的环焊缝，问曝光时间为多少？(Ir192半衰期为75天)

1、利用 γ 射线曝光因子： $M = A_1 t_1 / F_1^2 = A_2 t_2 / F_2^2$

2、已知： $F_1 = 500\text{mm}$ ， $F_2 = 600\text{mm}$ ， $t_1 = 24\text{min}$ ，求 t_2 。

3、代入： $M = \frac{A_1 \times 24}{500^2} = \frac{A_2 t_2}{600^2}$

4、始活度为 A_1 ，60天后该 γ 源的活度为 A_2

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{75} = 0.00924 \quad A_2 = A_1 e^{-\lambda T} = A_1 e^{-0.00924 \times 60} = 0.574 A_1$$

$$A_2 = A_1 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{60}{75}} = 0.574 A_1$$

5、代入： $M = \frac{A_1 \times 24}{500^2} = \frac{0.574 A_1 \times t_2}{600^2}$

求得： $t_2 = 60.2\text{min}$

4.1.3 曝光量的选择与修正

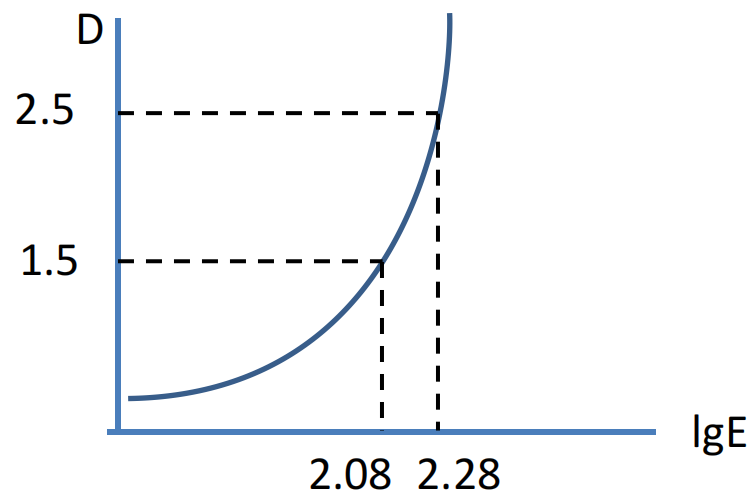
例题3

所用胶片的特性曲线如图，给定曝光量 $15\text{mA}\cdot\text{min}$ ，被检区黑度为1.5，现为提高对比度，欲将黑度提高到2.5，求所需曝光量。

- 1、设黑度1.5和2.5所对应的曝光量分别为 $E_{1.5}$ 、 $E_{2.5}$
- 2、根据所给的胶片特性曲线，可知：

$$\frac{E_{1.5}}{E_{2.5}} = \frac{10^{2.08}}{10^{2.28}} = 10^{2.08-2.28} = 0.63$$

- 3、已知： $E_{1.5} = 15\text{mA}\cdot\text{min}$ ，则： $E_{2.5} = \frac{15}{0.63} = 24\text{mA}\cdot\text{min}$ ，



4.1.3 曝光量的选择与修正

例题3.1

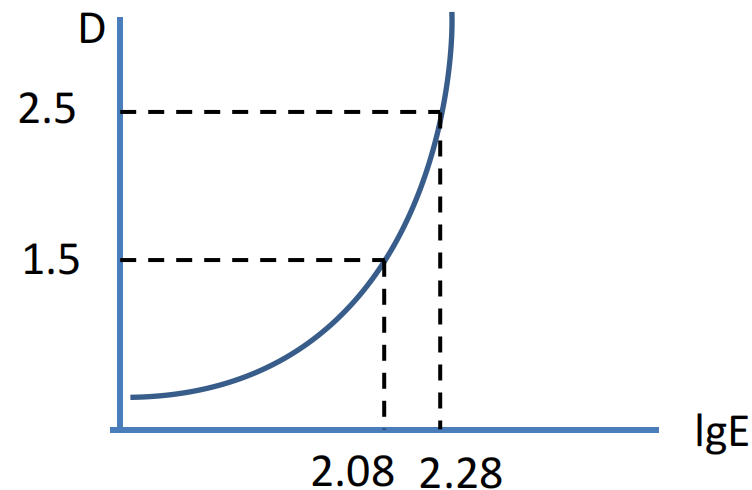
所用胶片的特性曲线如图（焦距为600mm），给定曝光量15mA.min，被检区黑度为1.5，现为提高对比度，欲将黑度提高到2.5，焦距变为700mm，求所需曝光量。

- 1、黑度2.5，焦距600mm，曝光量是多少？
- 2、同样黑度，焦距变成700mm，曝光量是多少？

$$E_{2.5} = 24mA \cdot \min (F = 600mm)$$

$$M = i_1 t_1 / F_1^2 = i_2 t_2 / F_2^2 \quad \frac{24}{600^2} = \frac{E}{700^2}$$

$$E = 32.7mA \cdot \min$$



4.1.3 曝光量的选择与修正

例题4

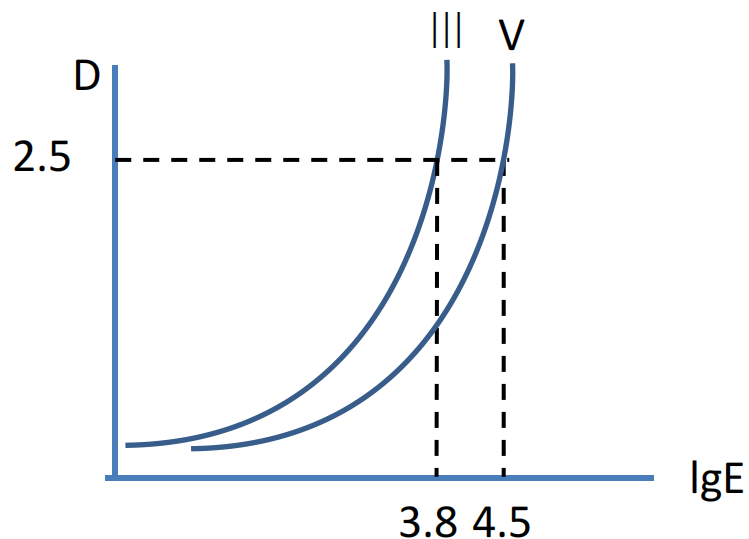
透照某工件，原用天津Ⅲ型胶片，曝光量为 $12\text{mA}\cdot\text{min}$ ，所得底片黑度为2.5。现在改用天津V型胶片，求获得相同黑度所需曝光量（胶片特性曲线如图。）

1、设天津Ⅲ和天津V曝光量分别为 E_{III} 、 E_V

2、根据所给的胶片特性曲线，可知：

$$\frac{E_{III}}{E_V} = \frac{10^{3.8}}{10^{4.5}} = 10^{3.8-4.5} = 0.2, \text{ 即: } E_V = \frac{E_{III}}{0.2}$$

3、已知： $E_{III} = 12\text{mA}\cdot\text{min}$ ， 则： $E_V = \frac{12}{0.2} = 60\text{mA}\cdot\text{min}$



4.1.3 曝光量的选择与修正

□ 曝光量影响：颗粒度、底片黑度、影像对比度、信噪比。

□ X射线照相，推荐曝光量（标准5.9）

技术级别	曝光量	焦距为700mm, 当焦距改变时可按平方反比定律进行修正
A、AB	$\geq 15\text{mA}\cdot\text{min}$	
B	$\geq 20\text{mA}\cdot\text{min}$	

□ γ 射线照相有关曝光量的要求：总曝光时间应不少于输送源往返时间的10倍。

- 如：单程放源的时间是10秒钟，往返就是20秒，我们把源到达指定位置静止的时间作为曝光时间，则曝光时间不能少于 $20 \times 10 = 200$ 秒。