

射线检测
基础讲座

第二讲 射线照相检验基本技术

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

BASIC RADIOGRAPHIC TECHNIQUES

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 透照布置与有效透照区

射线照相的基本透照布置如图 2-1 所示。考虑透照布置的基本原则是使射线照相能更有效地对缺陷进行检验。在具体进行透照布置时主要应考虑射线源、工件和胶片的相对位置。应使透照厚度尽可能小, 缺陷更靠近胶片。射线中心束的方向, 尽可能

能使射线中心束的方向沿着危害性缺陷延伸方向。

有效透照区(L_3)。中心射线束在一般情况下应指向有效透照区的中心。有效透照区主要是控制一次透照中透照厚度变化的范围, 这个变化范围必须限制在一定的限度之内, 以使有效透照区在射线底片上形成的影象满足以下要求, 即(a) 黑度处于规定的黑度范围。(b) 射线照相灵敏度符合规定的要求。

透照厚度是指透照时射线穿过工件的行程。显然, 在透照区内不同的位置其透照厚度不同。在一次透照范围内, 如果不同点的透照厚度相差过大, 将造成射线底片上不同点的黑度相差过大, 这必然导致不同点影象质量明显不同, 以致难以确定射线底片的射线照相灵敏度, 因此必须控制一次透照范围。

在选定透照布置后也就确定了射线照相的几何不清晰度、透照厚度比、有效透照区和影象的放大倍数。按照相似关系容易得到几何不清晰度 U_g 的计算式为

$$U_g = \frac{\phi}{f} = \frac{\phi_2}{L_1}$$

式中 ϕ ——焦点或射源尺寸, mm

L_1 ——焦点或射源至工件表面距离, mm

L_2 ——工件表面至胶片距离, mm

透照厚度比

$$K = \frac{T}{T'} \quad (2-1)$$

有效透照区

$$L_3 = 2L_1 \tan \theta \quad (2-2)$$

影象宽度(图 2-1b)

$$W = W_0 + U_g \quad (2-3)$$

式中 W_0 ——几何不清晰度为 0 时影象的宽度
影象的放大倍数 M 为

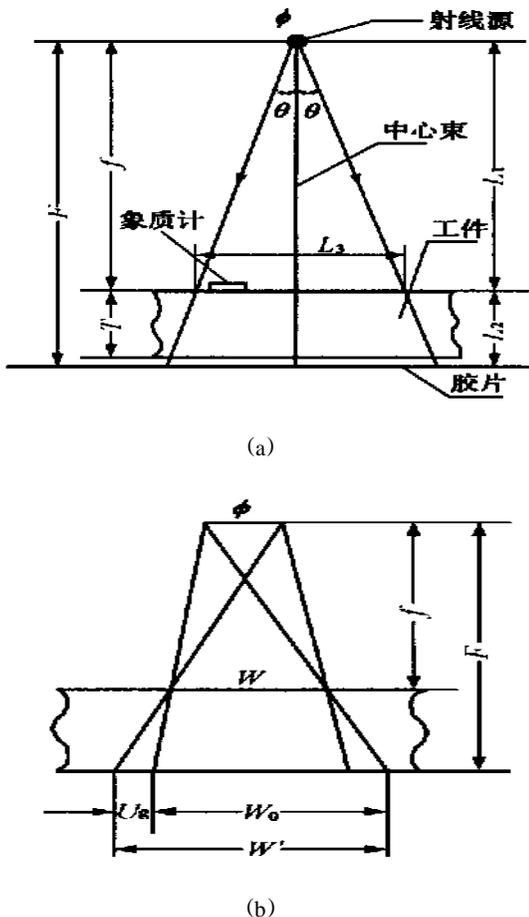


图 2-1 射线照相的基本透照布置

$$M = \frac{W}{W} = \frac{E}{f} + \frac{U_s}{W} \quad (2-4)$$

有时记

$$M_0 = \frac{E}{f} \quad (2-5)$$

故

$$M = M_0 + \frac{U_s}{W} \quad (2-6)$$

实际常控制的一些参数是透照厚度比和裂纹检验角等。对平板工件有效透照区的规定主要有三种,即规定透照厚度比、照射角(或横向裂纹检验角)或有效透照区与焦距的关系。表 2-1 列出了常见的三种具体规定。

表 2-1 平板工件有效透照区的一些规定

| 技术级别 | f/L_3 | 透照厚度比 K | 照射角 $\theta/(\circ)$ |
|------|---------|-----------|----------------------|
| A 级 | 2 | 1.03 | 14 |
| B 级 | 3 | 1.01 | 9 |

2 基本透照参数

射线能量、焦距和曝光量是三个基本透照参数,这三个基本透照参数与影象质量的三个基本因素(即对比度、不清晰度和颗粒度)密切相关。对比度基本公式给出了它们之间的主要关系

$$\Delta D = - \frac{0.434 \mu G \Delta T}{1+n}$$

以下丝型细节的可识别性公式给出了细节影象可识别性与基本透照参数的典型关系

$$\frac{\pi d^2}{4F(U+d)} = - \frac{2.3 \Delta D (1+n)}{\mu G}$$

基本透照参数选取的原则可概括如下:

(1) 射线能量 按透照厚度选取射线能量,对低能(400kV 以下)X 射线,所选取的透照电压不应超过按厚度规定的最高透照电压。

(2) 焦距 所选取的最小焦距必须满足射线照相相对几何不清晰度的规定,实际使用的焦距应符合有效透照区的要求。

(3) 曝光量 应不小于规定的推荐值。

对不同透照厚度,其透照电压可按下列经验式计算

$$V = A + BT$$

此式适用于中速胶片的检验,曝光量约 20mA · m in。透照电压系数见表 2-2。

美国材料试验学会标准 ASTM E94-93 认为,100~500kV 的 X 射线,对能量达其 2.5~10 倍射线的半值层透照可得到满意的结果。表 2-3 是其给出的不同射线能量的钢的半值层。

表 2-2 透照电压系数值 kV

| 材料 | A | | B | |
|----|---------|--------|---------|--------|
| | 0mm < T | 5mm T | 0mm < T | 5mm T |
| | < 5mm | < 50mm | < 5mm | < 50mm |
| 钢 | 40 | 80 | 10 | 5 |
| 铝 | 20 | 40 | 5 | 1.5 |

T——透照厚度,mm

表 2-3 ASTM E94-93 给出的钢的半值层

| 射线能量 kV | 半值层 HVL mm | 射线能量 MV | 半值层 HVL mm |
|-------------------|---------------|-----------------|---------------|
| 120 | 2.5 | 1 | 14.5 |
| 150 | 3.6 | 2 ²⁾ | 20.3 |
| 200 | 5.1 | 4 | 25.4 |
| 250 | 6.4 | 6 | 29.2 |
| 400 ¹⁾ | 8.9 | 10 | 31.8 |

注: 1) ¹⁹²Ir 2) ⁶⁰Co

确定最小焦距 F_{min} 经常使用诺模图。诺模图是一种计算用的列线图,确定最小焦距的三线诺模图是利用梯形上底与下底之和等于两倍中线的几何关系画出的三线计算图。用该图可以直接查出给定条件下的最小焦距($F_{min} = L_1 + L_2$)。制作诺模图时需解决三个问题,即三线的左右相对位置、三线的上下相对位置和三线的刻度尺单位长度。下面以 $f/\phi = 15T^{2/3}$ 为例说明。

首先对此式取对数,得

$$\lg f - \lg \phi = \lg 15 + \frac{2}{3} \lg T$$

将此式整理成下式

$$\frac{1}{2} (2 \lg f) = (\lg 15 + \lg \phi + \frac{2}{3} \lg T)$$

按此式可以确定

(1) f 线位于梯形中间; ϕ 线和 T 线为上下底,可任意等距离地分置于 f 线的两侧。

(2) 从式中看到, f , ϕ 和 T 对数前的系数分别为 1/2, 1 和 2/3, 因此,三线对数刻度尺的单位长度比为

$$\phi \text{ 线 } : f \text{ 线 } : T \text{ 线 } = 1 : \frac{1}{2} : \frac{2}{3}$$

例如 ϕ 线取 1~10mm 的长度为 134mm, 则 f 线取 $134 \times 1/2 = 67\text{mm}$, T 线取 $134 \times 2/3 = 89.3\text{mm}$, 按上述长度分别画出 ϕ_f 和 T 线的对数刻度。

(3) 为确定三线的上下相对位置,先适当固定两线的位置(如 ϕ 线和 f 线),然后取其一组值(例 $\phi = 2\text{mm}$, $f = 100\text{mm}$)代入原式计算出 $T = 6.1\text{mm}$, 按此值移动 T 线,使上值三点位于一条直线上。

这样就完成了所需的诺模图。图 2-2 就是按上述程序作出的诺模图。

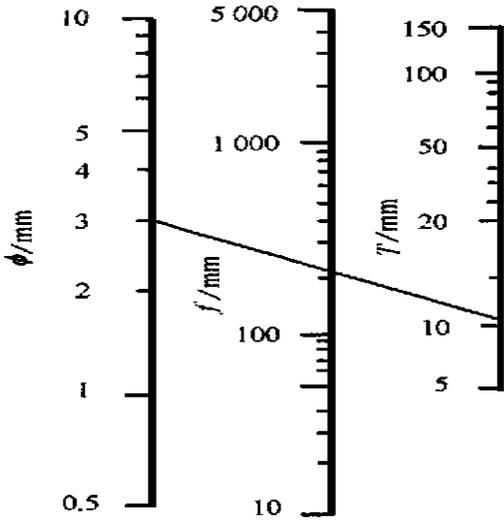


图 2-2 计算最小焦距 F_{min} 的诺模图 ($f/\phi = 15T^{2/3}$)

关于曝光量英国标准对低能 (400kV 以下) X 射线规定的推荐值为 15, 20 和 30 mA · m in。

3 曝光曲线

实际射线照相中常采用曝光曲线确定透照参数, 从曝光曲线给出的关系可方便地确定透照某种材料、一定厚度的工件, 满足规定的质量要求 (特别是达到一定黑度) 应选用的射线能量、焦距和曝光量等。曝光曲线是在一定条件下绘制的透照参数 (射线能量、焦距和曝光量) 与透照厚度之间的关系曲线。给定的曝光曲线只适于在给定条件下使用, 如果实际照相条件与曲线绘制条件不一致, 则必须对从曝光时间得到的数据进行修正, 或重新制作曝光曲线。

理论上常用的 X 射线照相曝光曲线是以透照电压为参数给出一定焦距下曝光量对数与透照厚度之间的关系。该类曝光曲线的函数关系为

$$\lg E = kT + C \quad (2-8)$$

导出此式的条件主要为 射线应近似单色化, 否则线衰减系数不能以常数处理。互易律不能失效。

实际射线照相的条件不同于曝光曲线制作条件时, 必须对从曝光曲线得到的透照参数进行修正, 现分四种情况进行讨论。

(1) 焦距不同时的修正 一般可简单地按平方反比定律修正, 即按照曝光因子进行计算修正。

(2) 黑度不同时的修正 这时应使用射线胶片的特性曲线进行修正。从胶片特性曲线查出对应于曝光曲线采用的射线底片黑度 D_0 与射线照相时射

线底片采用的黑度 D 的曝光量之比, 将曝光曲线上得到的曝光量乘以这个比, 即得到黑度改变后应选用的曝光量。由于胶片的感光度与射线能量相关, 即对不同能量的射线产生同一黑度所需的曝光量不同, 而胶片特性曲线仅仅是按照标准规定的能量制作的关系曲线, 因此, 将它应用到不同能量的射线时将存在误差。因而, 这是一种近似修正方法。

(3) 胶片不同时的修正 修正时必须有两种胶片的特性曲线。先从胶片特性曲线查出为得到黑度 D_0 不同胶片应采用的曝光量, 然后求出它们的曝光量之比, 最后将曝光曲线上求得的曝光量乘以这个比值, 即得到换用胶片时应采用的曝光量。与黑度修正相同, 该修正也存在近似性。

(4) 材料不同时的修正 这时可借助于材料的射线照相等效系数进行修正。材料的射线照相等效系数是指不同材料对射线吸收的等效性, 由于材料对射线的吸收不仅与材料本身的性质相关, 而且也与射线能量相关, 因此, 不同能量的射线, 其等效系数并不完全相同。使用材料的射线照相等效系数时, 首先应确定对被检工件应采用的射线能量 (透照电压), 然后从材料的射线照相等效系数表中确定等效系数, 进而得出等效厚度。

射线照相的厚度宽容度是指在一次透照中, 可以透照的厚度差范围。它可以从曝光曲线的函数关系和胶片特性曲线的函数关系导出, 即

$$\begin{aligned} \lg E &= kT + C \\ D &= G \lg H + C \\ \Delta T &= \frac{\Delta D}{G \cdot k} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 ΔT 和 ΔD 均为绝对值。可见, 若射线底片允许的黑度差范围为 ΔD , 则可透照的厚度差范围 ΔT 与胶片特性曲线的梯度和曝光曲线的斜率有关。图 2-3 显示了曝光曲线斜率与射线照相厚度宽容度的关系。由于不同胶片的感光特性曲线不同, 其射线照相厚度宽容度也不同。

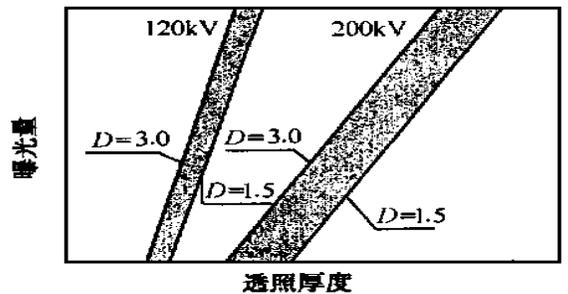


图 2-3 不同透照电压的射线照相厚度宽容度

4 缺陷深度测定

评定工件的质量不仅需要确定缺陷的性质和大小,而且需要知道其在工件中的位置。对于缺陷返修,准确定位尤其重要。在射线照相中,由于射线底片直接给出的是缺陷在透照平面上的位置,所以缺陷位置测定主要是确定其深度位置。

缺陷深度测定可以通过二次射线照相实现。最简单、最容易实现的二次射线照相方法是,在互相垂直的两个方向进行二次射线照相,从得到的两张射线底片可以直接测量缺陷的位置。但是,对于许多工件,由于其结构的几何特点,常常不能采用上述方法,而只能用其它的二次射线照相方法来确定缺陷位置,即平移二次射线照相法和旋转二次射线照相法。平移二次射线照相法是在完成第一次射线照相后,射线源与被透照工件进行一平行的相对移动,然后再完成第二次射线照相,用所得到的两张射线底片确定缺陷位置。旋转二次射线照相法是在完成第一次射线照相后,射线源相对于被透照工件旋转一个角度,再完成第二次射线照相,从得到的两张射线底片确定缺陷位置。图 2-4 是平移二次射线照相法(单标记近似法)的示意图,按图所示有

$$\frac{BC}{W} = \frac{h}{f+h}$$

因为 $BC = MC - MB$

$$\text{又} \quad \frac{MC}{M_2X_2} = \frac{f}{F} \quad \frac{MB}{M_1X_1} = \frac{f}{F}$$

所以

$$BC = \frac{(M_2X_2 - M_1X_1)f}{F}$$

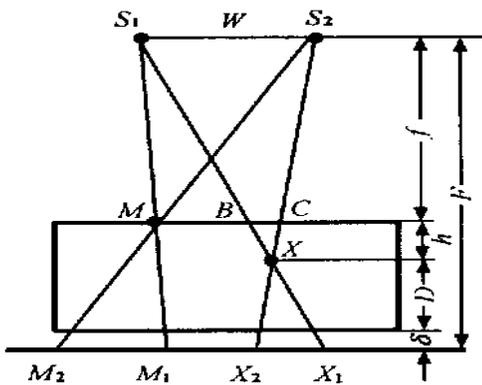


图 2-4 平移二次射线照相定位法(单标记近似法)

- X —— 工件中的缺陷位置 h —— 缺陷至工件表面距离
- D —— 缺陷至工件底面距离 S₁, S₂ —— 第一、二次射线照相的射源位置 W —— 两次射线照相中射线源平移距离 M —— 工件表面的铅制标记位置

$$\text{记} \quad \Delta = |M_2X_2 - M_1X_1|$$

$$\text{则} \quad \frac{f \cdot \Delta}{F \cdot W} = \frac{h}{f+h}$$

最后得到

$$h = \frac{f \cdot \Delta}{WF - f \cdot \Delta} \quad (2-10)$$

由于 Δ 取的是绝对值,所以此式对图中两种情况都适用。从式(2-10)可以看到,只要从得到的两张射线底片上测量出第一次射线照相的标记影象与缺陷影象间的距离 M_1X_1 和第二次射线照相的标记影象与缺陷影象间的距离 M_2X_2 ,并测量出 W, f 和 F ,则可按式(2-10)计算缺陷至工件表面的距离。

也可以采用作图法确定缺陷位置,其适用于各种二次射线照相中缺陷的定位。只要图画得准确,同样可得到满意的结果。此外,还可采用双标记法,也可不用标记。

未焊透深度测定是一个典型的缺陷深度测定问题。它除可以采用上述二次透照法外,还可采用黑度计算法和试块对比法。未焊透缺陷,按其特点可采用矩形缝模拟。矩形缝细节在射线底片上的对比度 ΔD 公式,在 $\theta = 0^\circ; W \gg U$ 时可简化为

$$\Delta D = - \frac{0.434\mu G \cdot l}{(1+n)}$$

此式可作为未焊透深度测定方法的基本原理,它与以下射线照相对比度的基本公式实际上相同

$$\Delta D = - \frac{0.434\mu G \cdot \Delta T}{(1+n)}$$

可见,为了从黑度差 ΔD 给出未焊透深度,必须给出黑度差 ΔD 与未焊透深度关系式中的系数项 $\frac{0.434\mu G}{(1+n)}$ 之值。由于它不能从理论上简单地给出,所以需采用对比试块,从已知的厚度差 ΔT 在与工件同样透照条件下得到的黑度差 ΔD 加以确定,这是对比试块的基本作用。

应指出的是,在导出此式的过程中,需假定胶片特性曲线的梯度值相同。因此,上述计算式适用于 ΔD 较小的情况。常规的黑度测量仪难以进行上述测量。采用上述方法时,一般应配备图象扫描仪,将底片图象转换为数字化的灰度图象,然后实现上述测量。

5 射线照相检验工艺编制

完整的射线照相检验工艺包括从产品准备到资料存档整个过程的规定,其中主要的技术内容是透照布置、透照参数和透照辅助措施,其它部分常可形成通用的规定内容。这些规定一般编制成图表,称为

表 2-4 射线照相检验工艺卡

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|---------|--|-------|-----|-----|-----|-------------------------------------|-----|----------|
| 产 品 | 名 称 | | 材 料 | | 图 号 | | 编 号 | | | | |
| | 技术条件 | | | | RT 标准 | | | | | | |
| 设备 器材 | 射 线 源 | | 焦 点 尺 寸 | | 增感屏 | | | | | | |
| | 胶 片 | | 象 质 计 | | 底片黑度 | | | | | | |
| 暗 室 处 理 | | 方 法: | | 暗室操作规程: | | | | | | | |
| 工件草图与透照部位编号 | | | | 透照布置示意图 | | | | | | | |
| | | | | (1) 源外片内法 (2) 源内片外法 a 周向曝光法 b 偏心法 (3) 双壁单影法 (4) 双壁双影法 | | | | | | | |
| 检 验 部 位 | | | 透 照 数 据 | | | | | | | | |
| 名 称 | 厚 度 | 编 号 | 胶 片 | 前 屏 | 后 屏 | 滤 波 | 遮 蔽 | 背 屏 | kV | FFD | <i>E</i> |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| 备 注 | | | | | | | | | 编制: _____ 审核: _____ 批准: _____ | | |
| 更改记录: | | | | | | | | | | | |

射线照相检验工艺卡, 其参考格式如表 2-4 所示, 其主要内容有工件的原始数据、有关技术文件编号、设备与器材、透照布置与标记、透照参数、工件示意图以及编制、审核和批准签名。

编制射线照相检验工艺, 应依据有关产品的法规、规程、质量标准或技术文件, 确定射线照相检验的部位、比例和应采用的射线照相技术标准及技术级别。编制射线照相检验工艺的核心内容是, 分析产品的特点, 按照射线照相技术标准的规定, 利用已有的技术数据、资料确定透照布置、透照参数和应采取的辅助措施, 保证所得到的射线底片质量符合射线照相技术标准的规定。

射线照相检验工艺卡编制步骤一般为:

(1) 准备 熟悉、理解有关产品的法规、规程、质量标准或技术文件及射线照相标准, 按有关规定确定产品的检验部位、比例和射线照相技术、级别。

(2) 规定射线照相技术 分析工件特点, 根据工件特点、射线照相技术数据(如曝光曲线及胶片特性曲线等)或必要的试验数据, 确定应选用的透照布

置、射线照相设备器材、透照参数和透照辅助措施等。在确定射线照相技术时, 必须满足标准对底片黑度和灵敏度的有关规定。

(3) 验证 必要时, 应对所规定射线照相技术进行一定的试验验证。

(4) 编制文件 编写射线照相检验工艺卡书面文件, 一般即编制出射线照相检验工艺卡。

(5) 审批 对编制出的射线照相检验工艺卡完成审核、批准手续, 形成正式的射线照相检验工艺卡文件。

射线照相检验工艺卡应由具有一定技术资格的人员编制和审核, 并应经有关领导批准。射线照相检验工作必须依据相应的射线照相检验工艺卡进行。对制订的射线照相检验工艺卡, 不同人员负有其相应的责任。在执行过程中, 由于技术的发展、工作条件的改变和发现的问题等, 射线照相检验工艺卡应及时修改。

收稿日期: 1999-08-10