

射线检测  
基础讲座

# 第三讲 典型工件的射线照相技术

郑世才  
(新立机器厂, 北京 100039)

## PRACTICE OF RADIOGRAPHIC TESTING FOR TYPICAL SPECIMENS

Zheng Shicai  
(Xinli Machinery Plant, Beijing)

### 1 变截面工件透照技术

变截面工件射线照相常采用的技术主要有双(多)胶片技术、适当提高透照电压(X射线)和补偿方法等。双胶片技术是在同一暗盒中放置两张感光度不同或相同的胶片同时透照,感光度不同的胶片的选取应按胶片特性曲线进行。适当提高透照电压进行透照时,技术上需要处理的问题是如何确定透照电压,或者说,对截面厚度变化的工件如何确定透照厚度。

美国 ASTM 标准要求底片黑度同时满足下列要求:

$$D = (D_0 - 0.15D_0) \sim (D_0 + 0.30D_0)$$

即  $D = 0.85D_0 \sim 1.3D_0$

且对 X 射线

$$1.8 \leq D \leq 4.0$$

或对 Y 射线

$$2.0 \leq D \leq 4.0$$

式中  $D_0$ ——象质计所在处的黑度

按这样的规定,从胶片感光特性曲线和曝光曲线的函数关系,可对厚度为  $T_1 \sim T_2$  的变截面工件,导出确定透照电压的透照厚度  $T_A$ 。

$$T_A = \frac{1}{3}(T_1 + 2T_2) = T_1 + \frac{2}{3}(T_2 - T_1) \quad (3-1)$$

如果记  $k_0 = T_A/T_1, k_m = T_2/T_1$

则可得  $k_0 = \frac{2}{3}k_m + \frac{1}{3}$  (3-2)

由此,可确定变截面工件的透照参数。

一次可透照的厚度  $T_1 \sim T_2$  范围与透照电压相关。对应不同的透照电压具有不同的射线照相厚度

宽容度

$$\Delta T = \frac{\Delta D}{Gk}$$

式中  $G$ ——胶片感光特性曲线的梯度

$k$ ——曝光曲线( $\lg E-T$ )的斜率

可见,对允许的黑度差  $\Delta D$ ,采用不同的透照电压将得到不同的透照厚度差范围  $\Delta T$ 。

### 2 环焊缝透照技术

直径较大的环焊缝可以采用不同的透照方法进行透照,概括起来透照布置可分为

(1) 内透法 中心周向透照, 偏心透照(又分焦距小于外半径和焦距大于外半径的方法)。

(2) 外透法 源在外单壁透照方法(单壁单影), 源在外双壁透照方法(双壁单影)。

由于中心周向透照布置时透照厚度比始终是1,所得底片黑度均匀,灵敏度均匀,且整圈焊缝一次完成检验,因此,对环焊缝透照时,只要有可能应优先采用中心周向透照布置。

环焊缝透照需要确立的基本关系是,透照厚度比、横向裂纹检验角、有效透照长度等与焦距和射线半照射角等的关系,按图 3-1 几何和三角关系容易得到所需要的各种关系式。透照厚度比的关系式为

$$K = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{2T}{D}\right)^2 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{2 \frac{T}{D}} \quad (3-3)$$

透照厚度比与横向裂纹检验角  $\beta$  的关系如下

$$\cos \beta = \frac{1 + \frac{(K^2 - 1)T}{D}}{K} \quad (3-4)$$

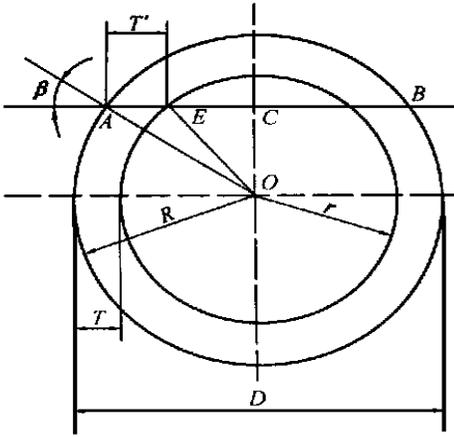


图 3-1 环焊缝的透照厚度比与横向裂纹检验角

各种透照布置的有效透照长度、透照厚度比、横向裂纹检验角、半照射角和焦距的关系见表 3-1。可见，它们之间的关系除了与环焊缝的参数相关外，还互相依从。

表 3-1 环焊缝的透照厚度比、横向裂纹检验角、半照射角和焦距关系

| 透照布置    | $\cos\beta$                     | $\sin\theta$                 | $L$  | $N$               |
|---------|---------------------------------|------------------------------|--|-------------------|
| 单壁外透    | $1 + (K^2 - 1) \frac{T}{D}$     | $\frac{\sin\beta}{2f/D + 1}$ | $\frac{\pi D (\beta - \theta)}{180^\circ}$ | —                 |
| 双壁外透    | $\frac{K}{D} \frac{T}{D} \ll 1$ | $\frac{\sin\beta}{2F/D - 1}$ | $\frac{\pi D (\beta + \theta)}{180^\circ}$ | $\frac{\pi D}{L}$ |
| $F > R$ |                                 |                              |  |                   |
| 偏心内透    | $\frac{1}{K}$                   | $\frac{\sin\beta}{1 - 2F/D}$ | $\frac{\pi D (\theta - \beta)}{180^\circ}$ | —                 |
| $F < R$ |                                 |                              |  |                   |

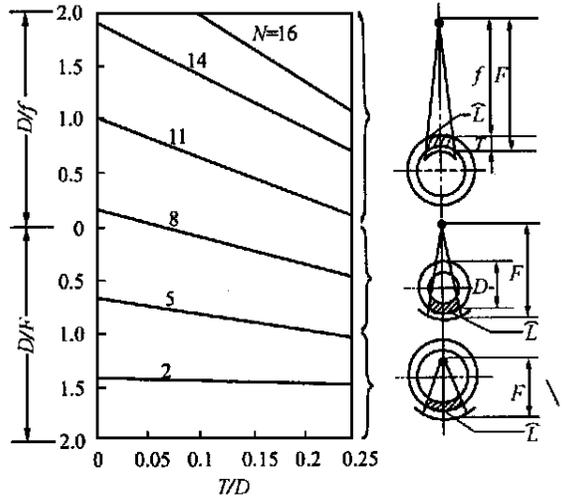
实际工作中按下面顺序确定有效透照长度、半照射角和焦距。

- (1) 依据  $T/D$  和  $K$  计算出横向裂纹检验角  $\beta$
- (2) 按产品特点选定  $F$  或  $f$ ，用得出的  $\beta$  值计算出照射角  $\theta$
- (3) 用  $\beta$   $\theta$  之值，计算出透照次数和有效透照长度。

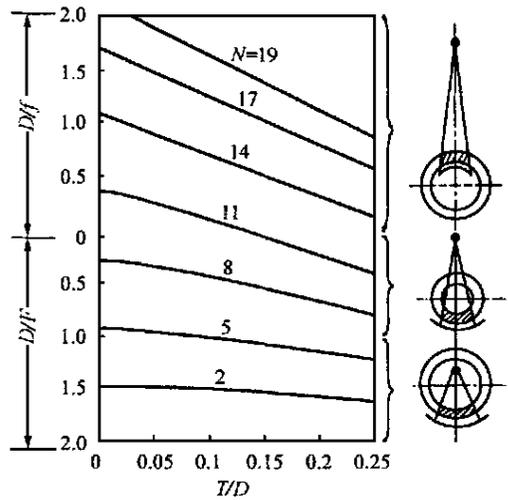
从上面的讨论可以看到，环焊缝透照时确定有效透照长度可以转化为确定透照次数，即在选定焦距后确定一圈焊缝需要的最少透照次数。对于一个具体的产品，与焊缝所需要的最少透照次数相关的因素可概括为：壁厚与直径之比  $T/D$ 。直径与透照距离或与焦距之比  $D/T$  或  $D/F$ 。射线照相标准规定的透照厚度比  $K$ 。

按照前面的公式可以计算最少透照次数，但在实际工作中，经常是预先对于不同的透照厚度比，画出不同的透照次数与  $T/D$ 、 $D/f$  或  $D/F$  的关系曲

线，对一个具体产品只需计算出它的  $T/D$ 、 $D/f$  或  $D/F$ ，则可从曲线图中迅速查到所需要的最少透照次数  $N$ 。图 3-2 是  $K = 1.10$  和  $K = 1.06$  时的图例。



(a)  $K = 1.10$



(b)  $K = 1.06$

图 3-2 环焊缝的最少透照次数  $N$  的示意图

### 3 小直径管对接焊缝透照技术

#### 3.1 概述

一般标准中通常定义管外径 89mm 的管为小直径管，也有的标准称管外径 76mm 的管为小直径管。对小直径管对接焊缝，其透照布置主要是椭圆成象透照布置和垂直透照布置。

在小直径管对接焊缝射线照相中所选用的焦距都远大于小直径管的直径，因此可近似地认为射线束平行入射。在这种简化下，对于垂直管轴截面的透

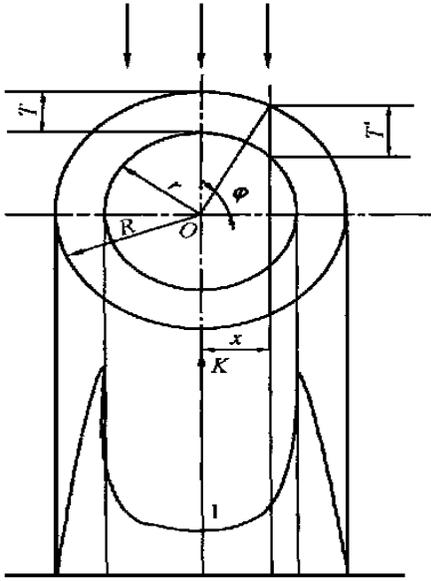


图 3-3 小直径管对接焊缝的透照厚度

照厚度可按照图 3-3 所示进行讨论。其离开圆心不同距离处的透照厚度与圆心处透照厚度的比,也就是透照厚度比,记为  $K$ ,  $x/R$  表示离开圆心的相对距离,对  $x < r$  区显然与一般大直径管环焊缝相同,即与式(3-3)相同。

对  $x > r$  区则有

$$K = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{2 \frac{T}{D}} \quad (3-5)$$

上面的两个关系式给出了透照厚度比随所研究点(透照点)与圆心的相对距离变化的一般规律。从图 3-3 可以看到,对于一定的  $T/D$ ,  $K$  随  $x/R$  的增大逐渐增大,在  $x/R = r/R$  点透照厚度比达到最大值,以后随  $x/R$  的增大迅速减小。透照区内透照厚度的上述变化规律,形成了小直径管对接焊缝射线照相技术的基本特点。

### 3.2 透照次数与透照电压

目前小直径管对接焊缝透照的主要规定如下:

- (1) 椭圆成象透照适用范围:  $D \leq 90\text{mm}$ , 焊缝宽度  $w \leq D/4, T \leq 8\text{mm}$ 。
- (2) 椭圆成象透照次数:  $T/D \leq 0.12$ , 相隔  $90^\circ$  透照 2 次;  $T/D > 0.12$ , 相隔  $60^\circ$  透照 3 次。
- (3) 椭圆影象开口宽度: 应近似于焊缝宽度。
- (4) 垂直透照: 不符椭圆成象透照条件时,相隔  $60^\circ$  进行 3 次垂直透照。

椭圆成象的透照次数是小直径管对接焊缝椭圆成象透照技术规定的重要参数之一,此规定是为了

保证全部焊缝区尽可能得到有效的检验。从透照厚度比的计算式可以得到不同透照次数对应的最大透照厚度比(表 3-2)。

表 3-2 小直径管对接焊缝透照次数与最大透照厚度比

| $T/D$ | $K_m$   |         | $T/D$   | $K_m$   |         |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | $N = 2$ | $N = 3$ |         | $N = 2$ | $N = 3$ |
| 0.02  | 1.44    | 1.16    | 0.12    | 1.78    | 1.22    |
| 0.04  | 1.48    | 1.17    | 0.146.4 | 2.38    | 1.25    |
| 0.06  | 1.53    | 1.18    | 0.20    | —       | 1.33    |
| 0.08  | 1.58    | 1.19    | 0.25    | —       | 1.73    |
| 0.10  | 1.66    | 1.21    |         |         |         |

由于  $N = 2, T/D \leq 0.12$  时,  $K_m = 1.78; N = 3, T/D \leq 0.25$  时,  $K_m = 1.73$ , 可见,对小直径管对接焊缝椭圆成象透照的上述规定,实质上是把椭圆成象透照的透照厚度比控制在一定的范围内。这就是标准规定有关透照次数的原因。

小直径管对接焊缝射线照相检验需要考虑的是透照电压如何确定。解决上述问题的基本思路应是,在规定的透照厚度范围内确定一个透照厚度,依据这个透照厚度并考虑所需透照的厚度范围确定射线能量,即透照电压。这也就是通常所说的适当提高透照电压的含意。变截面工件射线照相检验技术的处理可作为参考。

例如,对  $\phi 4\text{mm} \times 5.5\text{mm}$  的小管焊缝,设余高为  $2\text{mm}$ , 则应有

$$T_1 = 2 \times 5.5 + 2 = 13\text{mm}$$

二次透照时

$$K_0 = 2 \times \frac{1.67}{3} + 0.33 = 1.44$$

$$T_A = T_1 \cdot K_0 = 18.7\text{mm}$$

$$\text{kV} = 80 + 5T_A (\text{mm})$$

计算得到的透照电压为  $174\text{kV}$ 。这与实际采用的,可得到较好结果的透照电压  $170\text{kV}$  基本上一致。

### 3.3 椭圆成象透照的有效透照长度估计

如图 3-4 所示,设在底片上椭圆成象透照的有效透照区为  $PQ$  弧和  $ST$  弧,下面估计它们的长度和占焊缝总长的比例。

任一椭圆都可以用下面的参数方程描述

$$x = a \cos t$$

$$y = b \sin t$$

式中  $a$ ——椭圆的半长轴长度,即椭圆的大圆半径  
 $b$ ——椭圆的半短轴长度,即椭圆的小圆半径  
 $t$ ——引入的参数

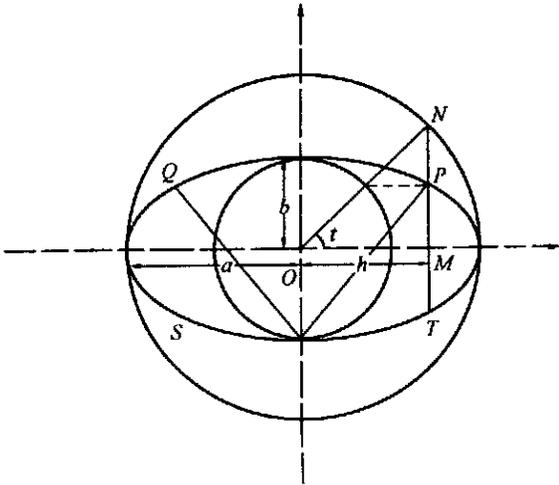


图 3-4 椭圆成象透照的有效透照长度

估计这参数时, 过 P 点作椭圆长轴(即 x 轴)的垂线, 交大圆于 N, 交椭圆长轴于 M。则

记  
则

$$t = \angle NOM$$

$$OM = h$$

$$h = a \cdot \cos t$$

$$t = \cos^{-1} \frac{h}{a}$$

记有效透照长度为 L, 即  $L = PQ + ST$ , 由于

$$PQ = \pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90} \right\}$$

$$ST = \pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90} \right\}$$

所以

$$L = 2\pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90} \right\}$$

记一次有效检验率为  $\eta$  则

$$\eta = \frac{L}{2\pi a} = 1 - \frac{t}{90}$$

即只要从底片上确定有效透照区的端点, 则从其和椭圆的半长轴可确定相应的参数 t, 进而给出有效透照区长度和一次有效检验率。表 3-3 给出了一些计算结果。

如果认为椭圆两侧的有效透照区长度可能不同, 也只需按式(2-26)分别计算每侧的参数 t, 然后再分别计算 PQ 和 ST。

表 3-3 椭圆成象有效检验率

| h/a  | t/(°) | $\eta$ % | h/a  | t/(°) | $\eta$ % |
|------|-------|----------|------|-------|----------|
| 0.50 | 60.0  | 33.3     | 0.80 | 36.8  | 59.0     |
| 0.60 | 53.1  | 40.9     | 0.85 | 31.8  | 64.7     |
| 0.70 | 45.6  | 49.4     | 0.90 | 25.8  | 71.3     |
| 0.75 | 41.4  | 54.0     | 0.95 | 18.2  | 79.8     |

#### 4 T 形接头的射线照相检验技术

T 形接头的射线照相问题, 基本上也属于变截面射线照相。技术问题主要是透照方向的选取, 其次是如何确定透照电压。

按照接头的坡口形式, T 形接头的透照方向基本选用两种, 即 30° 或 45°; 见图 3-5。采用不同透照方向时透照厚度不同:

30° 时透照厚度为

$$T_A = 1.1(T_1 + T_2)$$

45° 时透照厚度为

$$T_A = 1.4(T_1 + T_2)$$

实际上在确定透照方向时, 还应考虑对重要缺陷的可检性问题。按上述透照厚度可确定透照电压。对于形状规则的 T 形接头, 也可采用补偿块, 使透照区厚度变化比较均匀。

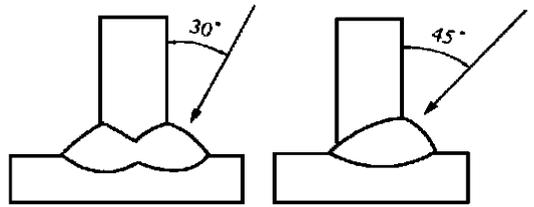


图 3-5 T 形接头射线照相的透照方向

一些管座角接头可视为 T 形接头, 其射线照相可按上述基本技术进行。需要进一步考虑的是透照次数。经常采用的透照布置如下:

(1) 中心射线束以与支管成 30° 左右的角度(或较小角度)指向肩部焊缝区。

(2) 中心射线束以与支管成 45° 左右的角度(或较小角度)指向腹部焊缝区。

对上述两种透照布置, 在讨论小直径管对接接头的近似假设下可以得到透照厚度比的变化均服从小直径管对接接头的结论。从肩部透照时, 可能的最大透照区应认为是从肩部向两侧延伸至腹部所形成的近似半圆区。透照区内任一点的透照厚度比, 应为主管圆周截面上一点的透照厚度比。最大透照厚度比位于腹部点。从腹部透照时, 可能的最大透照区应认为是从腹部向两侧延伸至肩部所形成的近似半圆区。虽然这时透照区内的点位于主管轴向上不同位置, 但实际上是位于主管圆周上的不同点, 因而透照区内任一点的透照厚度比, 仍为主管圆周截面上某一点的透照厚度比。此透照厚度比遵循小直径管对接接头的结论, 最大透照厚度比位于肩部点。

实际透照厚度比将略高于上述讨论给出的值。

从上面的讨论可看出, 管 T 形接头从任何方位透照时, 其透照厚度比均可按小直径管对接接头焊缝的情况分析。此外, 对管 T 形接头其最大透照厚度比, 将直接与主管管径之比相关, 也与主管壁厚与主管管径比相关。当支管管径与主管管径之比不大时, 无论从肩部透照或从腹部透照, 在焊缝半圆周的透照区内, 最大透照厚度比均不会超出对接接头关于二次透照的规定。即在多数情况下, 管 T 形接头焊缝可进行二次透照。

透照电压可依变截面工件射线照相工艺确定。

## 5 大厚度工件高能 X 射线照相检验技术

### 5.1 高能 X 射线源

对大厚度金属工件进行射线照相检验时, 为了得到较高的射线照相灵敏度, 一般应采用高能 X 射线照相检验技术。在工业射线照相中一般采用加速器产生更高能量的射线, 利用加速器加速带电粒子, 通过韧致辐射产生高能 X 射线。

按照带电粒子在加速过程中的运动轨迹和加速原理, 加速器可以分为四类, 表 3-4 是加速器简单分类表。在工业射线照相检验中应用的加速器主要有电子直线加速器、电子感应加速器、电子回旋加速器。电子感应加速器是涡旋电场回旋加速器, 电子回旋加速器是一种高频电场回旋加速器, 电子直线加速器是一种直线加速器。在工业射线照相检验中使用的范得格拉夫高压发生器和谐振变压器高压发生装置属于高压加速器。

电子直线加速器采用电磁场加速电子, 按所采用的电磁场形式把电子直线加速器分为行波电子直线加速器和驻波电子直线加速器。行波电子直线加速器利用波导管中的行波电磁场加速电子, 电子以一定初速注入加速管, 与行波电场同步, 从电磁场中

获得能量, 加速到所需能量。驻波电子直线加速器利用谐振腔中的驻波电磁场加速电子, 在谐振腔中存在较强的轴向电场分量, 不断供给电子能量, 使电子加速。为了使电子不断加速, 必须保持电子运动与加速场的同步。电子感应加速器利用导向磁场约束电子, 使电子作回旋运动, 利用电磁感应产生的涡旋电场加速电子, 电子沿圆形轨道运动, 进行加速。当加速结束时电子脱离圆形轨道, 撞击在靶上, 产生 X 射线。电子回旋加速器利用导向磁场, 使电子沿具有公切点的逐渐加大的圆运动, 多次通过高频或超高频电场不断加速。当电子被加速到所需能量时, 从圆周轨道将电子引出, 撞击在靶上产生高能 X 射线。

### 5.2 补偿器、增感屏、屏蔽板

在 高能 X 射线机中, 电子的速度接近光速, 所产生的高能 X 射线, 主要在电子速度方向辐射。这样, 在辐射场的横断面上, 辐射强度很不均匀。束中心的强度比偏离中心处的强度高出很多, 图 3-6 是典型的辐射强度分布。这种情况随射线能量的提高而更加显著, 它限制了高能射线可使用的辐照场。为了使射线束具有较大的比较均匀的辐照场, 经常采用补偿器。补偿器一般用铝制作, 在射线束中心区其厚度大, 随着角度加大厚度逐渐减小, 因不同厚度对射线的吸收不同, 得到具有较大均匀区的辐照场。

在 高能范围, 射线量子与物质的作用主要是康普顿散射和电子对效应。在  $0.2 \sim 10\text{MeV}$  能量范围, 对钢、铝等金属材料, 康普顿散射是主要的相互作用过程。此外, 由于相互作用过程所产生的次级粒子具有很高的能量, 它们将进一步引起散射。射线束辐照的任何物体, 都会产生很强的散射线, 控制散射线是高能射线照相技术的一个极重要部分。为了控制散射线, 对高能射线照相需强调的是注意使用准直器、增感屏和屏蔽板。

表 3-4 加速器简单分类表

| 类 型       | 加 速 原 理             | 可加速粒子        |
|-----------|---------------------|--------------|
| 高压加速器     | 带电粒子通过高压电势差         | 电子, 质子, 重离子等 |
| 涡旋电场回旋加速器 | 粒子在电磁感应产生的涡旋电场中回旋运动 | 电子           |
| 高频电场回旋加速器 | 导向磁场使粒子回旋运动多次通过高频电场 | 电子, 质子, 重离子等 |
| 直线加速器     | 带电粒子沿直线在微波电场中运动     | 电子, 质子等      |

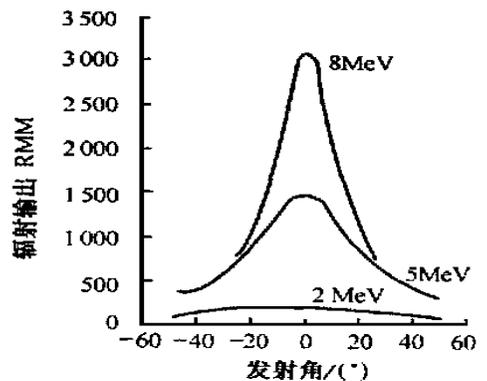


图 3-6 高能 X 射线辐照场强度的分布

准直器用铅、钨等制作, 限制出射的射线束范围, 使其只照射需要照射的部位。描述高能X射线

表 3-5 部分材料高能宽束半值层值<sup>1)</sup> cm

| 材料种类  | 射线能量 / MeV |      |       |       |       |       |       |
|-------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1          | 2    | 4     | 6     | 8     | 10    | 16    |
| 钨     | 0.55       | 0.90 | 1.15  | 1.20  | 1.20  | 1.20  | 1.15  |
| 铅     | 0.75       | 1.25 | 1.60  | 1.70  | 1.70  | 1.70  | 1.65  |
| 钢     | 1.60       | 2.00 | 2.50  | 2.80  | 3.00  | 3.00  | 3.30  |
| 铝     | 3.90       | 5.40 | 7.50  | 8.90  | 9.60  | 10.00 | 11.00 |
| 固体推进剂 | 6.10       | 8.40 | 11.60 | 13.80 | 14.90 | 16.50 | 20.40 |
| 混凝土   | 4.50       | 6.20 | 8.60  | 10.20 | 11.00 | 11.50 | 12.70 |

注: 1) 表中数值是用胶片法测出的, 由于实际材料特性及散射控制等因素影响, 会有一定误差。

表 3-6 推荐的增感屏和屏蔽板厚度(铅)

| 能量 MeV | 透照厚度 cm          | 前屏    | 后屏    | 屏蔽板厚度 mm |
|--------|------------------|-------|-------|----------|
|        |                  | 厚度 mm | 厚度 mm |          |
| 1~ 4   | 低散射, $T < 10$    | 0.25  | 0.25  | —        |
|        | 高散射, $T > 10$    | 0.51  | 0.25  | 0.76     |
| 6~ 10  | 低散射, $T < 12.7$  | 0.51  | 0.25  | —        |
|        | 高散射, $T > 12.7$  | 0.76  | 0.25  | 0.76     |
| 12~ 25 | 低散射, $T < 15.25$ | 0.76  | 0.25  | —        |
|        | 高散射, $T > 15.25$ | 1.27  | 0.25  | 0.76     |

线质最有用的参数是半值层值HVL。铅、钨等材料的宽束半值层见表 3-5。

铅箔增感屏既有增感作用, 又有吸收散射射线的作用。推荐使用的铅增感屏厚度见表 3-6, 前铅屏增感作用与其厚度的关系见图 3-7。

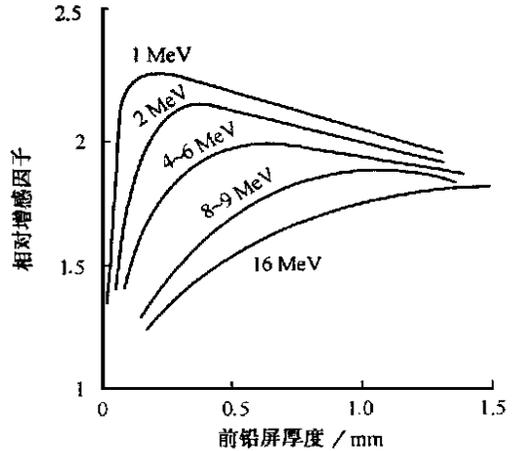


图 3-7 前增感屏的增感作用

### 5.3 高能 X 射线照相曝光曲线

高能 X 射线照相的曝光曲线一般如图 3-8 所示, 可达到的射线照相灵敏度如图 3-9 所示。采用高 (下转第 133 页)

(上接第 124 页)

录分析的硬件和软件已相当先进和完善。更重要的是 MAE 与传统声发射本质的不同是 MAE 基于宽带声发射信号, 物理概念清晰, 信号解释明确, 缺陷信号特征明显, 即使是对本文介绍的一些复杂结构在复杂试验环境中, 也能有效地提取和识别裂纹信号及其特征。当然, MAE 同样也在不断发展完善, 在实际应用中也还离不开经验的积累。因此, 建议针对某一新的具体应用对象, 在检测前先制作典型试样, 模拟裂纹缺陷和加载条件进行试验, 确定和识别信号特征、噪声及其噪声源、参数设置等。特别是有些现场噪声(如电磁干扰), 通过采取一些简单的措施就能明显得到改善。

### 参 考 文 献

- Goman Michael R. Plate wave acoustic emission. Journal of the Acoustic Society of America, 90(1): 358
- Zola Steve. Source location in thin plates using cross correlation: [Doctoral Dissertation]. USA: Naval Postgraduate School, University of Denver, 1991
- Prosser William H. The propagation characteristics of the plate modes of acoustic emission waves in thin

aluminum plates and thin graphite/epoxy composite plates and tubes NASA Technical Memorandum 104187

- Goman MR. Determining fatigue crack growth in aircraft by monitoring acoustic emission. Naval Research News, 1992, 24- 27
- Searle Ian R, Zola Steve. Identification of broadband acoustic emission signals. Proceedings of Smart Structures and Materials 1996 Conference,
- Prosser WH, Jackson KE, Kellas S et al. Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix crack in composites. Materials Evaluation, 1995, 53(9): 1052- 1058
- McBride SL, Madachlan JW. Acoustic emission due to crack growth, crack face rubbing and structural noise in the CC-130 hercules aircraft. Journal of Acoustic Emission, 1984, 3(1)
- McBride SL, Pollard, MacPhail JD et al. Acoustic emission detection of crack presence and crack advance during flight. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Thompson Donald O, Chimenti Dale E, eds. Plenum Press, 1989. 1819- 1825

收稿日期: 1999-07-05

求出  $a$  和  $b$  值, 从而得出另一个回归公式

$$\delta = \frac{4.175}{\sqrt{f}} - 1.97 \quad (6)$$

使用探头 1 探测得出的公式误差如下:

偏差平方和

$$q = \sum_{i=1}^n [\delta_i - \delta]^2 = 0.000081$$

式中  $\delta$  —— 涡流强度衰减为 37% 的渗透厚度理论计算值

$n$  —— 测试次数

$$n = 10$$

平均标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{q}{n}} = 0.0028$$

最大误差

$$\mu_{\max} = \max |\delta_i - \delta| = 0.055$$

最小误差

$$\mu_{\min} = \min |\delta_i - \delta| = 0.008$$

误差平均值

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta|}{n} = 0.007$$

使用探头 2 探测得出的公式误差如下:

偏差平方和

$$q = \sum_{i=1}^n [\delta_i - \delta]^2 = 0.0036$$

平均标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{q}{n}} = 0.019$$

最大误差

$$\mu_{\max} = \max |\delta_i - \delta| = 0.16$$

最小误差

$$\mu_{\min} = \min |\delta_i - \delta| = 0.005$$

误差平均值

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta|}{n} = 0.006$$

通过两种不同型号的低频探头对铝合金近表面裂纹的测试及模拟公式的推导结果分析, 理论计算值与实验值吻合很好, 误差极小。

## 5 实际应用

目前, 低频涡流检测技术在航空领域已广泛使用, 如 TY-154M 型飞机 14 框 27-32 长桁条, 在飞机重着落后受损, 其桁条厚度 4mm, 机身蒙皮与桁条之间涂有一层薄薄的密封胶, 为了通过蒙皮检查桁条是否存在裂纹, 我们采用了低频涡流检测技术, 提高检测效率, 保证检测质量, 制作了相应结构的模拟试块并选用探头 1, 将  $\delta = 2$  代入公式 (5), 计算出工作频率  $f = 1.66\text{kHz}$ , 取  $f = 1.70\text{kHz}$  可有效地检查出模拟试块上的裂纹。

又如, 飞机蒙皮因气候潮湿, 蒙皮内侧局部腐蚀造成厚度减小, 强度降低, 同样采用低频涡流检测技术, 制作相应结构的模拟试块, 可有效地检查蒙皮内侧的局部腐蚀。

## 6 结束语

实验证明, 使用放置式低频反射探头检查工件近表面缺陷是可行的, 涡流的渗透深度与工作频率的平方根成反比。实验中根据缺陷在工件中的埋藏深度, 选用适当的检测线圈, 作出相应的渗透深度与工作频率曲线, 并对曲线进行一元线性回归分析, 得出相应的经验公式, 对实际工作中确定最佳工作频率具有一定的作用。

收稿日期: 1999-09-09

(上接第 130 页)

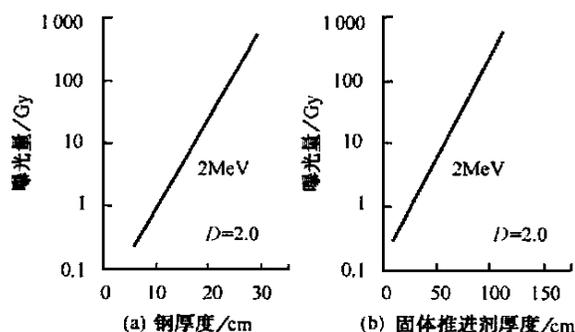


图 3-8 典型的直线加速器的曝光曲线

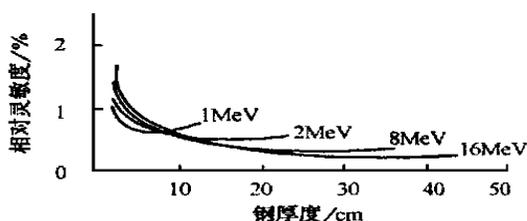


图 3-9 钢的高能射线照相灵敏度

能 X 射线, 一次可对较大的厚度范围进行透照, 在这个厚度范围内, 可以得到要求的射线照相灵敏度。

收稿日期: 1999-12-16