

关于提高X射线探伤灵敏度的探讨

三五三三厂 张鸿发

摘 要

本文以焊缝探伤为例,对X射线探伤中的电压、焦距、底片黑度,角度诸种参数以及工件厚度对灵敏度的影响进行了综合分析,并对一些参数的选择进行了讨论。

一、概述

X射线探伤灵敏度有绝对灵敏度和相对灵敏度之分。绝对灵敏度是指在X射线底片上所能发现的工件中沿射线穿透方向上的最小缺陷尺寸,相对灵敏度是指该缺陷的尺寸占被透照工件厚度的百分比。通常所说的灵敏度一般指相对灵敏度。百分比越小,灵敏度越高,检测细小缺陷的能力越大。

灵敏度计算式为:

$$K = S/A \cdot 100\% \quad (1)$$

公式(1)仅是理论上的计算方法,实际上S不易测量,因此一般不作这样计算。在通常情况下是用透度计来确定灵敏度。透度计有槽式和金属丝两种,后者较前者能更灵敏地反映底片质量的变化,使用方便。本文采用金属丝透度计,如图2所示。这种透度计是由一组不同直径的金属丝(7根,10根)平行地排在粘紧着的两块橡皮板或塑料板之间而构成。金

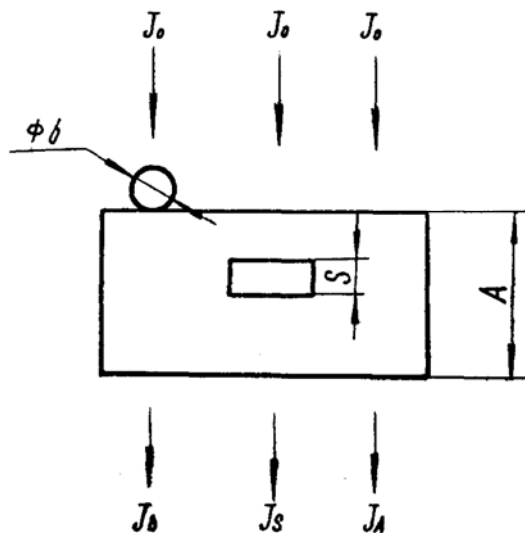


图1 灵敏度计算示意图

- A: 工件厚度,
- S: 缺陷厚度,
- b: 透度计金属丝直径,
- J₀: X射线初始强度,
- J_A: X射线透过工件A后的强度,
- J_S: X射线透过S后的强度,
- J_b: X射线透过金属丝b和工件A后的强度。

属丝的材料和被透照工件材料相同或基本相同。透照时,把透度计放在被透照工件上。此时灵敏度计算式是:

$$K = b/A \cdot 100\% \quad (2)$$

式中, b: 在底片上可见的最小直径的金属丝, A: 工件沿射线透照方向的厚度。

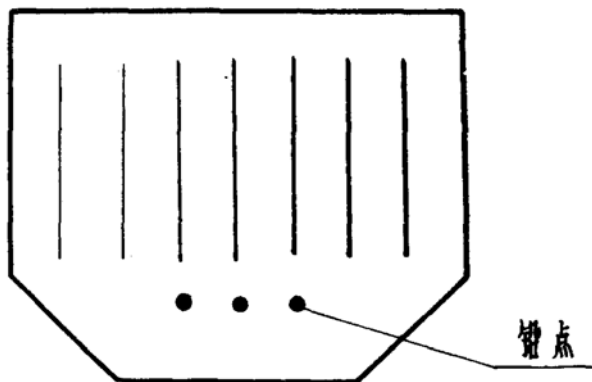


图2 金属丝透度计

透度计所显示的灵敏度并不一定代表真正能发现缺陷的灵敏度，例如对被透照工件内部气孔来说，它的直径要有最细金属丝三倍大时，才能被检查出来〔2〕。用透度计来决定灵敏度，虽说是一种近似的方法，但在实际工作中有它很大用处。如果决定了用透度计时所要达到的灵敏度，我们就可以判断底片质量，并可作为改进透照技术和工作条件的依据。

二、灵敏度公式推导

射线在工件 A 中的衰减方程式为：

$$J_A = J_0 e^{-\mu A} \quad (3)$$

此处 J_0 我们假设为一束单色的 x 射线初始强度， μ 是线衰减系数（厘米⁻¹）。

（3）式两边取自然对数，得：

$$\begin{aligned} \ln J_A &= \ln J_0 - \mu A \\ A &= \frac{\ln J_0 - \ln J_A}{\mu} \end{aligned} \quad (4)$$

同理：

$$A + b = \frac{\ln J_0 - \ln J_b}{\mu} \quad (5)$$

（5）式减（4）式，得：

$$b = \frac{\ln J_A - \ln J_b}{\mu} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2.3(\log J_A - \log J_b)}{\mu} \\ &= \frac{2.3(\log J_{At} - \log J_{bt})}{\mu} \end{aligned} \quad (7)$$

在图 3 中， r 为底片的衬度系数。

$$r = \tan Q = \frac{D_2 - D_1}{\log E_2 - \log E_1} = \frac{D_A - D_b}{\log J_{At} - \log J_{bt}}$$

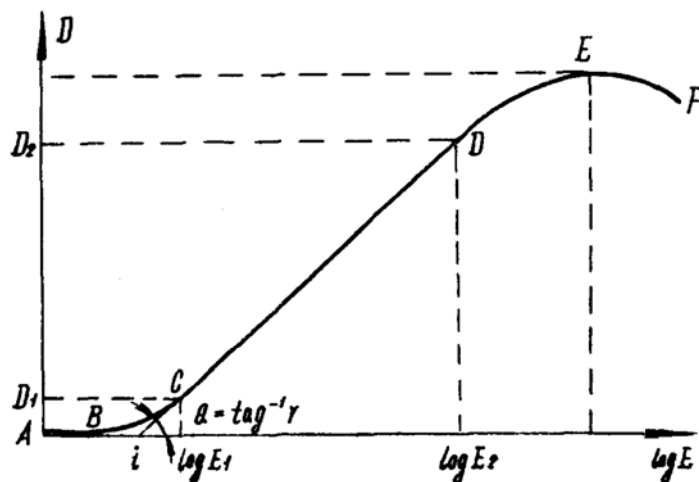


图 3 胶片特性曲线

$$\log J_A t - \log J_b t = \frac{D_A - D_b}{r} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中的 t 为曝光时间,式(8)中的 E 为曝光量, $E = J \cdot t$, D_A 为x射线透过工件A后使底片达到的黑度, D_b 为x射线透过透度计b和工件A后使底片达到的黑度, D_A 、 D_b 须在 D_1 与 D_2 之内,即在特性曲线线性段内。

(8)式代入(7)式,得:

$$b = \frac{2.3(D_A - D_b)}{r\mu} \quad (9)$$

(9)式代入(2)式,得

$$K = \frac{2.3(D_A - D_b)}{r\mu A} \cdot 100\% \quad (10)$$

底片上肉眼能感觉到的最小的黑度差(即最小对比度)约为0.02〔3〕。由此我们设 $D_A - D_b = 0.02$,故(10)式为:

$$\begin{aligned} K &= \frac{2.3 \cdot 0.02}{r\mu A} \cdot 100\% \\ &= \frac{4.6}{r\mu A} \% \end{aligned} \quad (11)$$

公式(11)仅作理论分析之用,实际计算灵敏度时采用(2)式。普通x射线机产生的射线并非单色的,它是由多种波长的射线所组成的,故(11)式是近似公式。

三、电压的选择

由(11)式可知:若要 K 小,则当 r 和 A 一定时, μ 必须大。电压与 μ 成反比,电压高, μ 小,反之 μ 大,这一结论可以从曝光曲线上一目了然。

曝光曲线方程式的推导:

$$J_A = J_0 e^{-\mu A} \quad (3)$$

(3)式两边取自然对数,得:

$$\ln J_0 = \mu A + \ln J_A \quad (12)$$

(12)式两边各加 $\ln t$, t 为曝光时间,得:

$$\begin{aligned} \ln J_0 + \ln t &= \mu A + \ln J_A + \ln t \\ \ln J_0 t &= \mu A + \ln J_A t \end{aligned} \quad (13)$$

$J_A t$ 是曝光量,它是胶片黑化的决定因素,制作曝光曲线时底片黑度是一定的,所以 $J_A t$ 应当是常数 C 。因此(13)式可写成:

$$\ln J_0 t = \mu A + C \quad (14)$$

(14)式与直线方程式 $y = kx + b$ 相似, k 是斜率。

图4为我厂GTY-200-20型x射线机的曝光曲线表,显然可见:随着电压的升高,直线斜率依次降低。110千伏时 μ 最大,190千伏时 μ 最小。

由此我们得知:要提高灵敏度,应当采用管电压较低的软射线对工件进行探伤。

但是,我们也应该注意到射线的强度与管电压有关,即:

$$J = k \frac{ZIV^2}{F^2} \quad (15)$$

式中, k : 常数, 与仪器和度量单位有关, Z : x射线管阳极材料原子序数, I : 管电流, V : 管电压, F : 焦距。

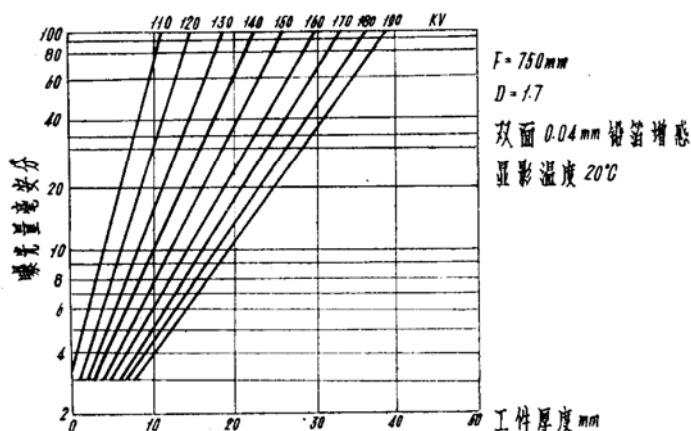


图4 GTY-200-20型x射线机曝光曲线表

由(15)式可见: 射线强度 J 和电压 V^2 成正比, V 降低后, 在焦距 F 不变的情况下, 射线强度 J 大大降低, 由此曝光量 E 也大大降低。为了使 E 保持不变, 就要加大管电流 I 和加长曝光时间 t 。我们知道软射线和长时间的曝光又会带来散射线对底片的影响较大。当工件是铁及射线波长 $\lambda > 0.2 \text{ \AA}$ 时, 散射系数 σ 与 $Z^m \lambda^n$ 成正比, 其中 $1 < m < 2$ $1 < n < 3$ (1)。射线束的最短波长 $\lambda_0 = \frac{12.42}{V} \text{ \AA}$, 最大强度的波长 $\lambda_{\max} \approx 1.5 \lambda_0$, 可以认为平均波长 λ 与 $\lambda_{\max}$ 相

等(5), 因此 $\lambda = 1.5 \lambda_0 = \frac{18.63}{V} \text{ \AA}$, 当 $\lambda = 0.2 \text{ \AA}$ 时, $V \approx 93 \text{ KV}$ 。如果所取电压低于临界电压(即刚能穿透工件的电压), 则胶片将不会感光。

所以, x射线管电压的选择原则是: 适当选取低电压, 大电流、短时间曝光。

四、焦距的选择

焦距应根据几何不清晰度 U_g 的要求来选择。 U_g 又称半影区。

在图5中、几何不清晰度为:

$$U_g = \frac{T \cdot d}{F - T}$$

U_g 一般规定在0.2~0.4毫米之间。 U_g 越小, 底片清晰度越好。

式中, F : 射线源至胶片距离, T : 工件表面至胶片距离, d : 射线源的有效直径。

对x射线机来说 d 是固定的, U_g 主要决定于 F 和 T , 显然加大 F , 会使 U_g 减小。

各种胶片本身具有一定粒度, 它们限制了底片的分辨力, 这个因素称为内在不清晰度 U_f , 当 U_g 小于 U_f 时, U_g 在底片的分辨力中即不起主要作用, 因此希望采用过大焦距来提高清晰度是毫无意义的, 往往是适得其反。细粒度胶片 U_f 较小。 U_f 还与管电压有关, 电压越高,

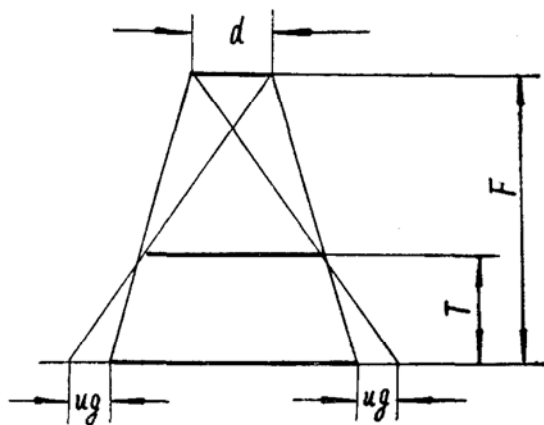


图5 几何不清晰度

U_f 越大。使用金属箔增减, 细粒度胶片, 当电压 $< 100\text{KV}$ 时, $U_f \approx 0.1 \sim 0.2$ 毫米, 电压为 $100 \sim 300\text{KV}$ 时, $U_f \approx 0.15 \sim 0.25$ 毫米^[6]。

由(15)式可知 J 与 F^2 成反比, F 加大, J 大大降低, 为了使 E 保持不变, 必定要提高电压和加长曝光时间, 由前文分析可知: 电压增高, U_f 增大, μ 减小; 时间加长, 散射线影响增大, 灵敏度降低。

焦距太小, 会使 U_g 增大。

选择 $U_g = U_f$ 来计算焦距比较合适, 最小焦距由下式计算出:

$$U_f = \frac{T \cdot d}{F_{min} - T}$$

在通常情况下, 采用 70cm 左右的焦距是合适的^[4]。

五、底片黑度的选择

底片黑度在各种标准和文献中: 有的规定 $1.2 \sim 1.5$ ^[8], $0.7 \sim 1.2$ ^[9], 有的介绍 $1.3 \sim 3.0$ ^[4], $2.0 \sim 2.5$ ^[10]。目前国外底片黑度标准高于国内。

根据(11)式, 当 μ 和 A 一定时, r 与 K 成反比, r 大、灵敏度高。

底片黑度增加, 它的衬度系数 r 也增大, 但至一定程度时, r 值反而下降^[5]。

增加底片黑度的方法有二, 第一: 适当增加显影时间, 则在同一曝光量下, 底片黑度增加, 第二: 适当增加曝光量 E , 则在正常显影规范下, 底片黑度增加。

我们曾做过试验, 验证了底片黑度值增大灵敏度增高的结论是正确的。我厂某一种工件曾出现过批次性焊接裂纹。我们对其中一个工件, 在同一部位, 用同一曝光规范透照了 3 张胶片, 第一张显影 2 分钟, 黑度 0.8 , 第二张显影了 3 分钟, 黑度 1.2 , 第三张显影了 5 分钟, 黑度 1.6 , 结果: 第一张无裂纹印象, 第二张部分裂纹可见, 第三张裂纹全部显现。

我厂底片黑度标准在 $1.2 \sim 1.8$ 之间, 对易出现裂纹的工件, 底片黑度可大于 1.8 。

六、角度的选择

上面我们已指出, 透度计所显示的灵敏度并不一定代表真正能发现缺陷的灵敏度。有时底片上透度计灵敏度已经达到工艺要求, 但是漏检现象还是存在, 这故然有多种原因, 而角度选择不当可能是主要原因。

在一般情况下, 缺陷显现程度随着它们与射线束方向的相对位置不同而大不相同。

缺陷与射线方向一致时, 显现度好, 如图 6(a), 此时射线通过全长, S 大, 当缺陷位置与射线方向成某一角度时, 显现度就差些, 如图 6(b)、(c), 此时射线仅通过一部分, S 小。当 S 很小时, 工件中有缺陷和无缺陷处的黑度差 $\Delta D < 0.02$ 时, 在底片上就看不到缺陷的投影, 例如夹层, 破裂面与射线束夹角较大的裂纹等缺陷就属于此类。裂纹当其开裂宽度太小时, 即使 x 射线束通过全长, S 较大, 缺陷还是显现不出, 其最小值是 0.03mm ^{[7][8]}。射线束方向与破裂面平行或其夹角小于 15° ^[8] 或 10° ^[7] 时, 该裂纹易于发现。

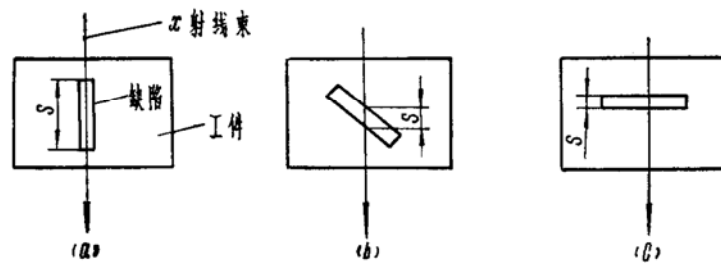


图6 缺陷显现程度与射线束相对位置的关系

让我们用试验来验证。我厂某种工件由于焊接工艺改变，致使 x 射线照原工艺角度 45° 检查时、造成批次性漏检。该批产品在进行气密性试验时，有两台产品接连发生前所未有的爆破事故，事后分析确认是严重的裂纹所致。检查全批次 x 射线底片，仅发现爆破的两台产品底片上有非常模糊的裂纹印象。为此我们进行了角度试验，如图 7 所示。试验结论 10° 角能清晰地显现裂纹。随后进行了全面复查，55 台产品中发现 19 台有不同程度的裂纹存在，最严重的一台裂纹断续总长 185 毫米，将其做金相试验，没有发现漏检。接着又复查了 94 台出厂产品，发现 24 台有不同程度的裂纹存在。鉴于这种情况，焊接工艺改回原工艺。几个批次之后，该种工件又出现批次性裂纹。有几个工件表面已发现裂纹，在射线底片却不见裂纹印象，是否又是角度问题？为此我们又一次做了上述试验，并且采取了一些措施，力求提高灵敏度，但是，试验结论是否定的。后来金相试验表明，裂纹宽度很小，一般在 0.02 毫米左右，而且近焊缝表面，有的已穿透到表面。针对这种情况，决定采用磁粉探伤，一共探了 70 只，发现近半数有裂纹，x 射线探伤仅发现其中 11 只。

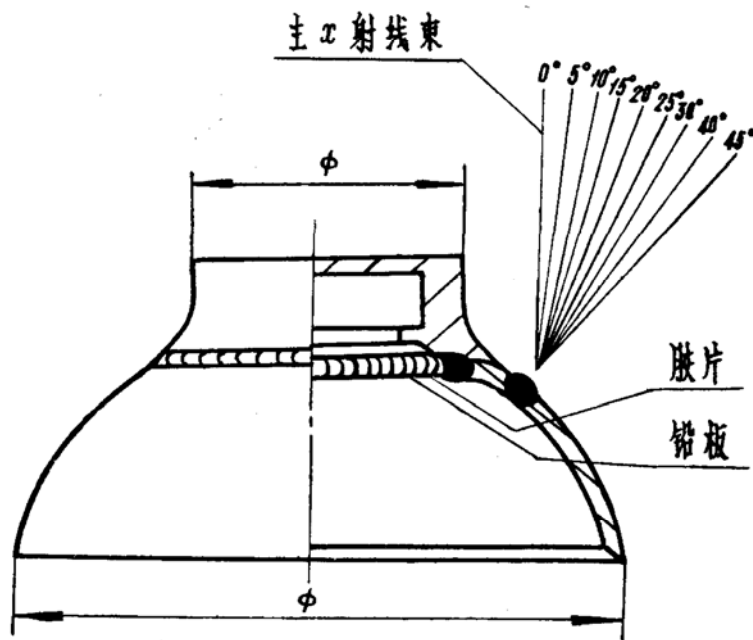


图7 透照角度试验示意图

我们的试验证明了上述理论分析和文献介绍的情况是正确的。

因此，对裂纹之类的缺陷必须注意透照角度的选择，细小裂纹即使角度正确，也可能漏检，应采用综合探伤。

七、工件厚度对灵敏度的影响

(11) 式表明在 r 和 μ 不变的情况下，灵敏度与工件厚度成正比，这个结论在一定厚度范围内是正确的。

以钢为例灵敏度与厚度关系如表1^[5]。

表 1

工件厚度 (毫米)	5	10	20	50	100
灵敏度 %	3.5	2.5	1.5	2.0	2.5

灵敏度起先是随着厚度的增加而增高，20毫米之后又递减。

之所以出现这种情况，其原因在于 x 射线通过工件时，将与工件内部质点作用，则一次射线束在被吸收的同时将发生散射（相干和不相干散射），由此产生的散射线方向很不定，都可以使胶片感光，使底片增加额外的黑度，降低了底片的反差和清晰度，使细小缺陷难以判断，甚至无法判断，灵敏度降低。散射线就象电子仪器里的噪声，它的存在使小讯号淹没，使讯噪比降低。工件越厚，射线与质点碰撞机会就越多，散射就越严重。图 8 说明薄工件散射线少，厚工件散射线多。又由于随工件厚度增加，电压要随之提高， μ 随之下降。

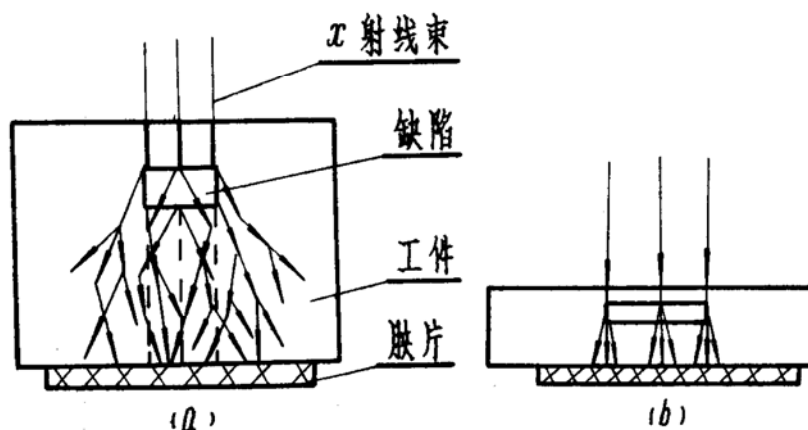


图 8 散射对底片清晰度影响

(a) 透照厚工件时清晰度由于散射而降低；

(b) 透照薄工件时清晰度增高。

总之，工件不太厚时、由于散射现象还不太严重，电压还不太高，灵敏度尚能随工件厚度增加而提高。随着工件厚度逐渐增大，散射现象随之逐渐严重，电压也随之逐渐提高，由此造成灵敏度随工件厚度增加而下降。在透照变截面工件时，我们要注意到这种现象。

参 考 文 献

- 〔1〕 许顺生：“金属X射线学”，上海科学技术出版社，1962年。
- 〔2〕 关云隆主编：“无损检验”，国防工业出版社，1973年。
- 〔3〕 B·C·索柯洛夫着、卢肅、赵冠生译，“材料探伤法”，中国工业出版社，1963年。
- 〔4〕 郑州机械科学研究所：“国外焊接技术资料、焊接检测与质量控制(二)”，1975年。
- 〔5〕 马铭刚：“焊缝x线检验”，机械工业出版社，1958年。
- 〔6〕 李方瑛等：“汽轮机叶片焊缝的x射线探伤”，无损检测，1982年第二期。
- 〔7〕 余宗德：“射线检测的现状与发展动态”，交流资料，1980年。
- 〔8〕 “x射线检验说明书Q/6SZ 121-79”。
- 〔9〕 “焊缝射线探伤标准JB928-67”。
- 〔10〕 “1978年赴日无损检验考察”，技术资料，1979年。
- 〔11〕 3533厂：“固体发动机焊接接头无损探伤情况简介”，导弹技术，无损检测专集，1980年。