

射线检测
基础讲座

第十二讲 射线照相检验中的计算问题

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

CALCULATION IN RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 概述

在射线照相检验的培训教材中,所设计的计算问题大致可归纳为以下几类:

(1) 基本理论和概念计算 包括射线衰减规律计算、放射性衰变规律计算和求散射比(综合性题)的计算。

(2) 曝光量计算 包括由曝光因子直接求曝光量或曝光时间、由曝光因子结合胶片感光特性曲线求曝光量或曝光时间、由曝光因子结合放射性衰变规律求曝光量或曝光时间和由曝光量波动结合胶片感光特性曲线作曝光量或曝光时间修正。

(3) 影象质量问题计算 包括求黑度、灵敏度、对比度、缺陷尺寸以及影象对比度比的计算。

(4) 胶片感光特性曲线与曝光曲线结合计算 包括求增感系数、胶片感光特性曲线的梯度、感光速度和阶梯透照的厚度与黑度的计算。

(5) 透照布置计算 包括求几何不清晰度、焦距最小值、100%透检时最少拍片张数或一次透照有效长度以及椭圆成象的平移距离和有效检验长度的计算。

(6) 辐射防护简单计算 包括求外照射的防护距离、时间和屏蔽厚度以及简单辐射防护设计中的屏蔽厚度的计算。

2 例题

显然,III级人员应能进行综合性计算,下面给出一些例题。

【例1】用X射线机透照一铸件,焦距为500mm,管电流5mA,曝光时间4min,底片黑度1.0。现改用750mm的焦距,管电流15mA,为使底

片黑度达到1.5,求这时曝光时间应为多少?(胶片特性曲线上黑度1.0对应的 $\lg H = 1.8$,黑度1.5对应的 $\lg H = 2.1$)

解:记 $D_0 = 1.0$, $i_0 = 5\text{mA}$, $t_0 = 4\text{min}$, $F_0 = 500\text{mm}$, $\lg H_0 = 1.8$, $D = 1.5$, $i = 15\text{mA}$, $F = 750\text{mm}$, $\lg H = 2.1$ 。设 t 为改变透照条件后的曝光时间。

因为 $\lg H - \lg H_0 = 2.1 - 1.8 = 0.3$

所以 $\frac{H}{H_0} = 10^{0.3} = 2$

故 $\frac{i \cdot t}{F^2} = \frac{i_0 \cdot t_0}{F_0^2} \times 2$

所以 $t = \frac{2i_0 t_0 F^2}{i F_0^2} = 6\text{min}$

【例2】用 ^{192}Ir γ 射线源透照1.2m直径的环焊缝,曝光时间为24min,若在透照1.2m直径的容器焊缝后30d再透照直径为1.5m的容器焊缝,问应选用多长的曝光时间?

解:记 A_0 为源的初始放射性活度, A 为30d后源的放射性活度, $R_0 = 1.2/2\text{m}$, $R = 1.5/2\text{m}$, $t_0 = 24\text{min}$, $\Delta t = 30\text{d}$, T 为源的半衰期, $T = 74\text{d}$ 。设 n 是30d所相应的半衰期个数, t 为30d后透照容器焊缝所需的曝光时间。

由 $\frac{A \cdot t}{R^2} = \frac{A_0 \cdot t_0}{R_0^2}$

得 $t = \frac{A_0 \cdot t_0 \cdot R^2}{A \cdot R_0^2}$

因 $A = \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot A_0$

又 $\Delta t = n \cdot T$

故 $n = \frac{30}{74} = 0.405$

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^{0.405} \cdot A_0 = 0.755A_0$$

所以

$$t = \frac{24 \times 1.5^2 A_0}{1.2^2 \times 0.755A_0} = 49.7 \text{ min}$$

也可利用射线指数衰减律求解。

【例 3】用 X 射线透照工件, 无增感时曝光 12min 得底片黑度为 2.0, 增感时曝光 2min 得底片黑度为 1.5, 胶片特性曲线在黑度为 1.2~3.8 范围内的平均梯度为 3.5, 求增感屏在黑度为 1.5 时的增感系数。

解: 记增感系数为 k , 透照时管电流为 i , 无增感时的曝光时间为 t 。

$$\text{因为 } D = G \lg H + C$$

在相同的透照电压和焦距下有

$$H = mE \quad (m \text{ 为一比例系数})$$

$$\text{所以有 } 2.0 = 3.5 \lg(m \times 12 \times i) + C$$

$$1.5 = 3.5 \lg(m \cdot i \cdot t) + C$$

$$\text{可得 } 0.5 = 3.5 \lg \frac{12}{t}$$

$$t = \frac{12}{10^{(0.5/3.5)}} = 8.6 \text{ min}$$

$$\text{所以 } k = \frac{8.6}{2} = 4.3$$

【例 4】用 X 射线透照两块厚度分别为 $T_1=15\text{mm}$, $T_2=18\text{mm}$ 的板, 若射线的线衰减系数不随透照厚度改变, T_1 厚度板的散射比为 1.4, 两厚度板的曝光量比为 2.4, 射线的半值层为 1.5mm, 求两厚度板散射线强度比。

解: 记射线的半值层 $H=1.5\text{mm}$, 两种厚度板的散射比分别为 n_1 和 n_2 , 曝光量分别为 E_1 和 E_2 , 入射线强度都为 I_0 , 透射线强度分别为 I_1 和 I_2 , 透射的一次射线强度分别为 I_{D1} 和 I_{D2} , 透射的散射线强度分别为 I_{S1} 和 I_{S2} 。

$$\text{因为 } \begin{cases} I_1 = I_{D1} + I_{S1} = I_{S1} \left(1 + \frac{1}{n_1}\right) \\ I_2 = I_{D2} + I_{S2} = I_{S2} \left(1 + \frac{1}{n_2}\right) \end{cases}$$

$$\text{所以 } \frac{I_{S1}}{I_{S2}} = \frac{I_1(1+n_2)n_1}{I_2(1+n_1)n_2}$$

$$\text{又 } E_1 = i_1 t \quad E_2 = i_2 t$$

而曝光量又与射线强度成正比, 所以

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2} = 2.4$$

$$\text{从 } I_1 = I_{D1} + I_{S1}, I_2 = I_{D2} + I_{S2} \\ \text{得 } I_1 = I_0 e^{-\mu T_1} (1+n_1), I_2 = I_0 e^{-\mu T_2} (1+n_2)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1+n_1}{1+n_2} e^{-\mu(T_1-T_2)}$$

$$\text{又 } \mu = \frac{\ln 2}{H}$$

$$\text{故 } \frac{1+n_2}{1+n_1} = \frac{I_2}{I_1} e^{-\mu(T_1-T_2)} = 1.67$$

$$\text{所以 } n_2 = 3$$

$$\frac{I_{S1}}{I_{S2}} = 1.86$$

【例 5】用一定射线进行透照, 底片上最小可识别 0.4mm 直径的丝 (其对比度 $\Delta D_{\min}=0.02$), 如射线透照的参数不变, 只加强了对散射线的控制, 这时底片上最小可识别 0.2mm 直径的丝 (其 $\Delta D_{\min}=0.03$), 求这时底片上 0.4mm 直径的丝的对比度为原对比度的几倍?

解: 记原底片上 $d_1=0.4\text{mm}$ 时的对比度为 ΔD_1 , 即 $\Delta D_{\min 1} = \Delta D_1 = 0.02$, 后来的底片上 $d_1=0.4\text{mm}$ 时的对比度为 ΔD_2 , $d_2=0.2\text{mm}$ 时的对比度为 $\Delta D_{\min 2} = 0.03$, n_1 和 n_2 分别为两次透照的散射比, G 为射线胶片的梯度值。

$$\text{因为 } \Delta D_1 = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_1}$$

$$\Delta D_2 = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_2}$$

$$\text{所以 } \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = \frac{1+n_1}{1+n_2}$$

$$\text{又 } \Delta D_{\min 1} = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_1}$$

$$\Delta D_{\min 2} = - \frac{0.434 \mu G d_2}{1+n_2}$$

$$\text{得 } \frac{\Delta D_{\min 2}}{\Delta D_{\min 1}} = \frac{(1+n_1)d_2}{(1+n_2)d_1}$$

$$\text{故 } \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = \frac{1+n_1}{1+n_2} = \frac{\Delta D_{\min 2} d_1}{\Delta D_{\min 1} d_2} = 3$$

【例 6】环焊缝的外径为 600mm, 壁厚为 16mm, 采用射线源在外部的单壁法透照, 若焦距为 1000mm, 控制透照厚度比 k 为 1.1, 求一次透照的有效长度。

解: 记横向裂纹检验角为 β , 半照射角为 θ , 射线源至焊缝的距离为 f , 一次透照的有效长度为 L 。

因为壁厚 T 与外径 D 之比 $T/D = 16/600 = 0.027$ 很小, 所以近似有

$$\cos \beta = \frac{1}{k}$$

$$\text{得 } \beta = 24.6^\circ$$

$$\text{因为 } \sin \theta = \frac{\sin \beta}{1 + \frac{2f}{D}} = 0.09726$$

所以 $\theta = 5.6^\circ$

而
$$L = \frac{TD(\beta - \theta)}{180}$$

最后得到 $L = 199\text{mm}$

【例 7】X 射线机的曝光曲线示于图 12-1, 胶片的感光特性曲线示于图 12-2。在此条件下透照阶梯试块(图 12-3), 阶梯试块厚度 $T_B = 12\text{mm}$, $T_A = 10\text{mm}$ 。若透照时底片上 T_B 处的黑度为 2.0, 求底片上 T_A 处的黑度 D_A 为多少?

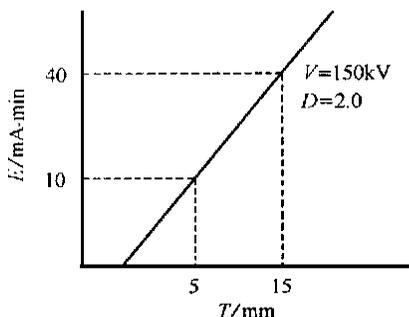


图 12-1 X 射线机的曝光曲线

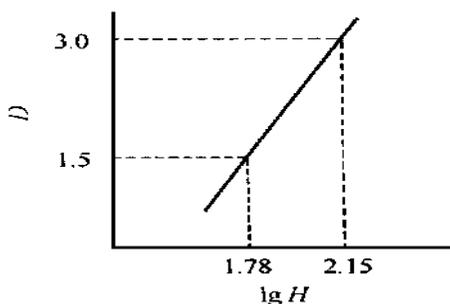


图 12-2 胶片特性曲线

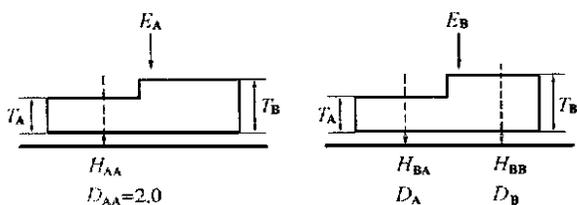


图 12-3 阶梯透照符号标注示意图

解: 记使 T_B 区得到黑度 $D_B = 2.0$ 时的曝光量为 E_B , 使 T_A 区得到黑度 $D_{AA} = 2.0$ 时的曝光量为 E_A , 曝光曲线中对应厚度为 15 和 5mm 的曝光量分别为 E_2 和 E_1 , $E_2 = 40\text{mA} \cdot \text{m} \cdot \text{in}$, $E_1 = 10\text{mA} \cdot \text{m} \cdot \text{in}$, 胶片特性曲线中 $\lg H_3 = 2.15$, $\lg H_{1.5} = 1.78$,

从胶片特性曲线函数关系

$$D = G \lg H + C_1$$

有 $D_B = G \lg H_{BB} + C_1$

$$D_A = G \lg H_{BA} + C_1$$

所以 $D_A = D_B + G(\lg H_{BA} - \lg H_{BB})$

从图 12-2 可知

$$D_3 = G \lg H_3 + C_1$$

$$D_{1.5} = G \lg H_{1.5} + C_1$$

所以
$$G = \frac{D_3 - D_{1.5}}{\lg H_3 - \lg H_{1.5}} = 4.05$$

对同一胶片如黑度相同时曝光量应相等, 故有

$$H_{BB} = H_{AA}$$

$$\frac{H_{BA}}{H_{BB}} = \frac{H_{BA}}{H_{AA}}$$

在相同的透照电压和焦距下透照, 有

$$H = mE \quad (m \text{ 为一比例系数})$$

所以有
$$\frac{H_{BA}}{H_{BB}} = \frac{H_{BA}}{H_{AA}} = \frac{E_B}{E_A}$$

即
$$\lg H_{BA} - \lg H_{BB} = \lg E_B - \lg E_A$$

从曝光曲线函数关系

$$\lg E = kT + C_2$$

有
$$\lg E_B = kT_B + C_2$$

$$\lg E_A = kT_A + C_2$$

所以
$$\lg E_B - \lg E_A = k(T_B - T_A)$$

从图 12-1 可知

$$\lg E_2 = kT_2 + C_1$$

$$\lg E_1 = kT_1 + C_1$$

所以

$$k = \frac{\lg E_2 - \lg E_1}{T_2 - T_1} = \frac{\lg 40 - \lg 10}{15 - 5} = 0.0602$$

最后得到

$$D_A = D_B + G(\lg H_{BA} - \lg H_{BB}) =$$

$$D_B + G(\lg E_B - \lg E_A) =$$

$$D_B + Gk(T_B - T_A) =$$

$$2.0 + 4.05 \times 0.0602(12 - 10) = 2.49$$

辐射防护计算是一个比较复杂的问题, 简单的外照射辐射防护计算一般包括: 确定辐照场的照射量数据(确定辐射源的输出数据)。确定应采用的剂量当量限值。按等式关系和衰减规律等计算。下面给出一些例题。

【例 8】辐照场中工作人员所在处的剂量率 $H = 50 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$, 按照 GB 4792-84 标准, 为限制随机效应, 工作人员一周最多可工作多少小时?

解: GB 4792-84 规定, 为了限制随机效应的发生率, 年剂量当量限值为 50mSv, 每年按照 50 周计算工作时间, 则每周的剂量当量限值应是 1mSv。

记周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$, 每周可工作的小时数为 t 。

因为
$$H = 50 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$$

所以
$$t = \frac{H_w}{H} = \frac{1 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} = 20\text{h}$$

【例 9】辐照场中距源 2m 处的剂量率是 $90 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$, 若工作人员每周工作 25h, 按照 GB 4792-84 标准, 工作人员与源的最小距离应为多少?

解: 记 $H_0 = 90 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$, $F_0 = 2\text{m}$, $t = 25\text{h}$, GB 4792-84 规定周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$ 。

设 F 为工作人员至源的最小距离, H 为工作人员在距源最小距离处所接受的照射剂量率。

$$\text{则 } H = \frac{H_w}{t} = \frac{1 \times 10^{-3}}{25} = 40 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$$

$$\text{由于 } \frac{H_0}{H} = \frac{F^2}{F_0^2}$$

$$\text{所以 } F = F_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} = 2 \times \sqrt{\frac{90}{40}} = 3\text{m}$$

【例 10】一台最高管电压为 250kV 的 X 射线机在 1m 处曝光量为 $1\text{mA} \cdot \text{min}$ 时产生的剂量是 0.02Sv , 探伤人员使用该机每周工作 5d, 每天开机工作 4h, 使用的管电流为 5mA, 工作点距 X 射线机为 4m, 按照 GB 4792-84 标准的规定, 求防护一次射线所需的混凝土墙的厚度。

解: 记 GB 4792-84 规定的周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$, 探伤人员每周的工作负荷 $W = 5 \times 4 \times 60 \times 5 = 6000\text{mA} \cdot \text{min}$, 混凝土对 250kV X 射线的半值层 $T_0 = 28\text{mm}$, $X_0 = 0.02\text{Sv}$, $F_0 = 1\text{m}$, $F = 4\text{m}$ 。

设 H 为探伤人员每周接受的剂量当量, T 为所需的混凝土防护墙厚度, n 为 T 与 T_0 之间的倍数。

$$\text{由于 } H = \frac{X_0 \cdot W}{F^2} = \frac{0.02 \times 6000}{4^2} = 7.5\text{Sv}$$

$$\text{又因为 } T = n \cdot T_0$$

$$\text{所以 } H = 2^n \cdot H_w$$

$$n = \frac{\lg \frac{H}{H_w}}{\lg 2} = \frac{\lg \frac{7.5}{0.001}}{\lg 2} = 12.87$$

这样得到

$$T = 12.87 \times T_0 = 12.87 \times 28 = 360.4\text{mm}$$

若考虑两倍的安全系数, 应再加一个半值层, 即

$$T = 360.4 + T_0 = 360.4 + 28 = 388.4\text{mm}$$

屏蔽计算也可以按照屏蔽材料的透射比进行, 这时需要有相应的 X 射线在混凝土中的减弱曲线, 可参照本讲座第 11 讲中的图 11-2。例如, 在本题中所需的透射比为

$$K = \frac{H_w}{H} = \frac{1 \times 10^{-3}}{7.5} = 1.3 \times 10^{-4}$$

从图 11-2 中的曲线得到宽束 X 射线所需的混凝土防护墙厚度约为 350mm。

参 考 文 献 (略)

收稿日期: 1999-08-10

(上接第 550 页)

15.5, 判为点渣; 圆形度 < 15.5 , 判为球状气孔, 若不满足则进行(2)。

(2) 等效面积 < 0.1 , 是裂缝, 若不满足则进行(3)。

(3) 等效链码方向象素分布 $N_0 < 0.8$, 判为未焊透, 若不满足则进行(4)。

(4) 再判断长宽比, 若 > 5 , 是未熔合, 若不满足则进行(5)。

(5) 剩下的归为条状夹渣。

图 4 的模式识别结果为球状气孔, 其主要参数为: 面积 2.00mm^2 , 周长 5.47mm , 等效面积 0.37mm^2 , 周长平面积比 14.98 , 长径 1.83mm , 短径 1.49mm , 长宽比 1.22 , 折算点数 2 , 水平等效链码 0.36 , 垂直等效链码 0.21 , 一三等效链码 0.27 , 二四等效链码 0.16 。

4.4 缺陷定级

根据 JB 4730-94, 将缺陷分为四个等级。射线检测人员对条件进行判断, 由计算机自动定级。

5 结论

本文探讨了用数字图象技术进行图象预处理、缺陷自动识别的有关算法。软件在 Windows 98 的中文平台下用 Visual Basic 6.0 语言设计, 使用方便, 实用性强。但是, 缺陷提取速度和类型识别的准确率仍有待提高。

参 考 文 献

- 1 Castleman Kenneth R 著, 朱志刚, 石定机, 林学阁等译 数字图象处理 北京: 电子工业出版社, 1998 146- 214
- 2 蔡 靖, 杨晋生, 丁润涛 模糊加权均值滤波器 中国图象图形学报(A 版), 2000, 5(1): 52- 55
- 3 龚 坚, 李立源, 陈维南 基于二维直方图 Fisher 线形分割的图象分割方法 模式识别与人工智能, 1997, 10(1): 1 - 7
- 4 Reddi SS, Rudin SF, Keshavan HR. An optimal multiple threshold scheme for image segmentation. IEEE Trans, 1984, SMC-14(4): 661- 665
- 5 Herbert Freeman On the encoding of arbitrary geometric configurations IEEE Trans Electronic Computer, 1961, EC-10: 260- 268

收稿日期: 2000-08-07