

X射线曝光曲线的教学探讨

◆邢秀文 张国才 邓建杰

(北京理工大学珠海学院 珠海 519085)

摘要:展示了曝光用试块新的使用方法;展示了用软件拟合来制作曝光曲线的过程。通过软件拟合,可以制作任意电压或者任意时间的曝光曲线,从而减少胶片的使用,并且达到很好的效果。
关键词:曝光曲线;拟合

一、引言

X射线检测是最重要的无损检测方法之一,是无损检测教学的重要内容。而射线机曝光曲线的使用不仅是重要的教学内容,也是检测工程师经常查阅的图表,其重要性不言而喻。

一台新的射线机,或者是用过一段时间之后的射线机,亦或者是更换胶片拍摄,原则上都需要重新制作曝光曲线。笔者作为一名资历尚浅的无损检测教师,在此谈一谈对制作曝光曲线的一些看法,提出一些不同的方法,供同行批评指正。

二、曝光曲线的原理

从射线机的阳极靶发出的射线总功率

$$P = aiZV^2 \quad (1)$$

在上式中,我们用符号P代表射线的总功率,因为它的单位是“瓦特=焦耳/秒”。而在大多数的教科书中,它的符号都是I,并且被称为射线强度,这是错误的。公式(1)中α是常量,i是管电流,z是靶的原子序数,v是管电压。

射线发出后,按照圆锥形扩散,单位面积上的辐射功率称为“强度”。在距离为L处,射线的强度为

$$I(F) \propto \frac{P}{F^2} = \frac{aiZV^2}{F^2} \quad (2)$$

上式中L的单位是“瓦特/平方米”。

如果在射线传播的路径中,有一块厚度为T的钢板,则经过钢板的吸收与散射,透射线的强度为

$$I = (1+n) \frac{aiZV^2}{F^2} e^{-\mu T} \quad (3)$$

在上式中,散射比n与管电压V以及板厚T都有依赖关系,衰减系数μ也是与管电压V有依赖关系的。

我们通常制作曝光曲线,有几个前提条件:

- a)管电压V固定;
- b)焦距F固定;
- c)胶片所能达到的黑度D固定。而为了能够让胶片达到特定的黑度,则胶片的曝光量It必然为某个特定常量;
- d)因为管电压固定了,所以可认为衰减系数μ是常量;
- e)因为管电压固定了,散射比n仅仅与板厚T相关。但是我们一般将其视为常量。

将等式(3)两边乘以时间,并取常用对数得

$$\lg(it) = \mu T + \lg(It) + \lg \left[(1+n) \frac{aZV^2}{F^2} \right] \quad (4)$$

对于多数便携式射线机,管电流i是固定的,所以上式也可以写作

$$\lg(t) = \mu T + C \quad (5)$$

表1 曝光曲线制作——黑度值

	4mm	8mm	12mm	16mm	20mm	24mm	28mm	32mm	36mm	40mm
150kV 1min	5.13	2.96	1.72	1.05	0.69					
150kV 2min		4.61	2.79	1.68	1.05	0.69				
150kV 4min			4.46	2.76	1.71	1.08	0.72			
180kV 1min		4.45	2.80	1.77	1.16	0.80				
180kV 2min			4.64	3.08	1.99	1.31	0.89	0.64		

即:曝光时间的对数lg(t)与板厚T是一条线性直线关系。这就是常用的曝光曲线原理。

为了后续处理方便,笔者将等式(5)改写为如下形式

$$T = A * \lg(t) + B \quad (6)$$

其中A,B为常量。

三、曝光曲线的制作过程

1. 曝光时间

如果认可曝光曲线是一条直线的结论,那么只需要两个点就可以画出一条直线。但是我们认为任何实验都是有误差的,所以应该多做几个点,用“拟合”的方法来画出这条直线。所以,我们的做法是对每个固定的管电压,取3个时间点:1分钟、2分钟、4分钟。

2. 曝光电压

我校的射线机为2505型,电压范围150~250kV。我们取值为150、180、210、240kV四个值,中间的跳跃比较大。

3. 实验用试块

我校购买了两个阶梯试块,台阶厚度为2、4、6……20毫米。但是在完全不知道曝光参数的情况下,我们无法确定用单个试块是否会曝光过度,或者曝光不足。即便是配合平板钢板,我们也不知道该增加多厚的钢板。所以我采取的方案是采取两个试块叠加放置(图1),使得试块厚度从4毫米——40毫米都有覆盖,这样总能找到一个黑度合适的阶梯。

4. 黑度设定

我们采取黑度D=2.5



图1 曝光曲线试块

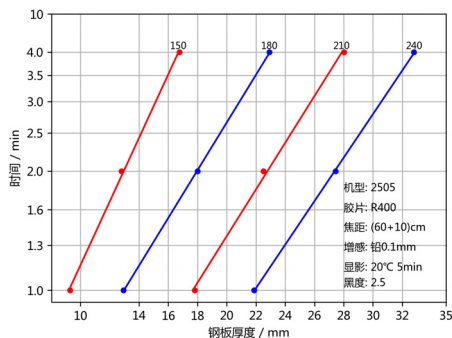


图2 初步曝光曲线

5. 实验数据(见表1.)

180kV 4min				4.85	3.32	2.20	1.45	0.98	0.70	
210kV 1min			4.40	2.98	2.00	1.36	0.95	0.68		
210kV 2min				4.52	3.15	2.14	1.45	1.01	0.74	0.61
210kV 4min					4.90	3.55	2.46	1.69	1.16	0.96
240kV 1min				4.20	2.95	2.05	1.43	1.02	0.73	0.60
240kV 2min					4.60	3.33	2.35	1.66	1.16	0.93
240kV 4min						5.03	3.81	2.72	1.90	1.45

6. 寻找黑度 2.5 的钢板厚度

在黑度 2.5 左右取 4 至 5 个台阶的黑度数据,以黑度 D 为自变量,板厚 T 为函数,拟合多项式

$$T = a_0 D^2 + a_1 D + a_2 \quad (7)$$

例如,对于 150kV 1min 的胶片,取板厚 $T=4,8,12,16\text{mm}$,对应黑度 $D=5.13,2.96,1.72,1.05$ 来拟合上式,得到多项式的系数。再将 $D=2.5$ 代入拟合后的多项式,计算得到板厚 T 。

以板厚 T 为横坐标,时间的对数 $\lg(t)$ 为纵坐标,可以画出一个点。

7. 制作初步曲线

表 1 中的每一行数据,都可以绘制出一个点。相同电压的点再用直线拟合,即可画出初步的曝光曲线(图 2)。按照传统的制作过程,曝光曲线制作完毕。

四、曝光曲线的拟合扩充

大家会发现,图 2 中的曝光曲线的电压跳跃太大,缺少许多电压值的曲线。如果我们通过实验将所有电压的曝光曲线都做出来,就需要消耗大量的人力物力。那么能否通过软件拟合的方法来补充任意电压值的曝光曲线呢?

现在我们来研究曝光曲线的理论公式(6)。显然,管电压不同时,曝光直线的斜率 A 是不同的,截距 B 也是不同的。理论上可以推导这两个常量分别等于

$$A = \frac{1}{\mu}, \quad B = \frac{\lg(I_0) + \lg[(1+n) \frac{aZV^2}{F^2}] - \lg(i)}{\mu} \quad (8)$$

多数参考资料上都指出,在一般 X 射线检测范围内,衰减系数与电压的依赖关系为

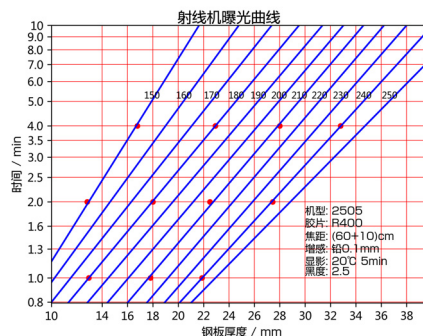
$$\mu \cong kZ^3 \lambda^3 \sim kZ^3 / V^3 \quad (9)$$

因此系数 $A = \frac{1}{\mu} \sim V^3$, $B \sim V^3$ 。所以我们可以根据已经拟合出来的 4 条“初步曝光曲线”,来寻找如下关系

$$A = a_0 V^3 + a_1 V^2 + a_2 V + a_3 \quad (10)$$

$$B = b_0 V^3 + b_1 V^2 + b_2 V + b_3 \quad (11)$$

找到系数 A, B 与管电压的关系之后,令电压 $V=150,160,170, \dots, 250 \text{ kV}$, 分别计算出它们的系数 A, B , 可以得到所有电压的曝光曲线 $T=A*\lg(t)+B$, 如图 3 所示。在图 3 中我们未经验证的时间进行了延拓,最小延拓至 0.8 分钟,最大延拓至 10 分钟。该方法的优点是绘制任意电压的曝光曲线。



六、遗留问题

对于等式(10)(11),我们发现,用 2 次、3 次、4 次多项式拟合,得到的曝光曲线有较大的差异。但是究竟哪一个更准确,还没有定论,有待进一步去研究核实。

参考文献:

- [1] 张大海, 郭冠华. 射线检测[M]. 机械工业出版社. 2014.1
- [2] 夏纪真. 工业无损检测技术(射线检测)[M]. 中山大学出版社. 2014.2
- [3] 中国机械工程学会无损检测分会编. 射线检测[M]. 机械工业出版社. 2010.1

作者简介: 邢秀文(1979-), 男, 硕士, 北京理工大学珠海学院教师, 历任大学物理教研室主任, 物理实验室主任, 工程物理系主任, 主讲声学基础、射线检测。

