

# 射线透照等效系数测试方法分析

蔡闰生 袁生平 任华友

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 为获得不同透照电压下不同标准材料的射线透照等效系数,以 50 kV 透照电压为例,以钛为标准材料,揭示了同时透照法和图像法两种等效系数的测试方法。通过对同时透照法步骤及存在问题的分析,引入了解决问题的阶梯扩展和厚度校正两种手段。在等效系数图像法的分析过程中,明确了曝光曲线种类和黑度选取的原则,阐述了曝光曲线与图像法的关系,结合数学手段运用,获得了等效系数与透照电压相关,但不随曝光量改变而变化的结论。

**关键词** 钛,标准材料,等效系数,测试方法

中图分类号:TM930.12

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.018

## Analysis of Radio Graphic Equivalent Factor Test Method

CAI Runsheng YUAN Shengping REN Huayou

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** In order to get radiographic equivalent factor for different materials under different transillumination voltage, the essay used two testing methods of simultaneous transillumination and exposure curve graphic in the environment of 50 kV transillumination voltage, using titanium as standard material. Through the analysis of the steps and problems of simultaneous transillumination method, the essay took in two means of ladder extension and thickness verification as the settlement of the problem. Though the analysis of exposure curve graphic method, the essay affirmed the rules on choosing exposure curve and blackness, explained the relationship between the exposure curve and graphic method. Combined with mathematical tools, the essay obtain the conclusion that the equivalent factor is associated with transillumination voltage, but will not change with the exposure quantity.

**Key words** Titanium, Standard materials, Equivalent factor, Test method

### 0 引言

射线透照等效系数是随透照电压等参数变化而变化的一类数值。不同透照电压下的等效系数不同。当透照电压相差数十千伏以上,不同透照电压等级下的等效系数相差较大,且不存在比例关系。

射线透照等效系数具有确定非标准材料曝光条件以及实施像质计代用等作用,特别对指导外场作业具有重要的意义。但长久以来,等效系数的理论与应用研究开展的并不深入。其中原因与等效系数测试方法的不完善有较大关系。

射线透照等效系数  $\varphi$  是指在一定管电压下,达到相同射线吸收效果(或者说是获得相同底片黑度)的标准材料的厚度  $T_0$  与被检材料的厚度  $T_m$  之比<sup>[1]</sup>。

即  $\varphi = T_0/T_m$ , 其中  $T_m$ 、 $T_0$  互为等效厚度。

JB4730—94 中给出了以钢为标准材料的部分材料等效系数,如表 1 所示。

表 1 的意义在于:将系数乘以待检材料的厚度,即得到相当于多少厚度钢的吸收效果<sup>[2]</sup>,并可按照相应厚度钢的透照参数对待检测材料实施透照。

表 1 射线能量(透照电压)均在 100 kV 及以上,而广泛应用的钛、铝、镁、铍及其合金材料以及绝大多数的非金属和复合材料,密度均较钢低,吸收系数要比钢小得多<sup>[3]</sup>。当上述材料、制件的厚度在几十毫米之内,射线检测的透照电压多低于 100 kV,由此,表 1 系数无法直接应用,因此建立简单有效的射线透照等效系数测试方法和相对较低透照电压的等效系

数体系,具有一定的实践意义。本文选择钛作为标准材料,适中透照电压 50 kV<sup>[4]</sup>,建立了同时透照法和

图像法两种等效系数的测试方法。

表 1 JB4730—94 部分金属的等效系数<sup>1)</sup>

Tab.1 JB4730—94 part equivalent coefficient of metal

金属	等效系数									
	100 kV	150 kV	220 kV	250 kV	400 kV	1 MeV	2 MeV	4 ~ 25 MeV	Ir	Co
铁	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
镁	0.05	0.05	0.08							
铝	0.08	0.12	0.18						0.35	0.35
铝合金	0.10	0.14	0.18						0.35	0.35
钛		0.54	0.54		0.71	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
铜	1.5	1.6	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
锌		1.4	1.3		1.3			1.2	1.1	1.0
黄铜		1.4	1.3		1.3	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0
因康镍合金		1.4	1.3		1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
蒙乃尔合金	1.7		1.2							
锆	2.4	2.3	2.0	1.7	1.5	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0
铅	14.0	14.0	12.0			5.0	2.5	2.7	4.0	2.3

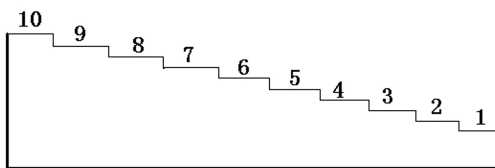
注:1)JB4730—2005 未给出等效系数表。

## 1 等效系数同时照相法分析

同时透照法是将不同材料试样置于同一张射线底片之上,用相同透照参数,在相同冲洗条件下获得射线影像的方法。由于材料的密度差异,同等厚度不同材料试样的影像黑度不同。

### 1.1 以钛为标准材料等效系数同时照相法

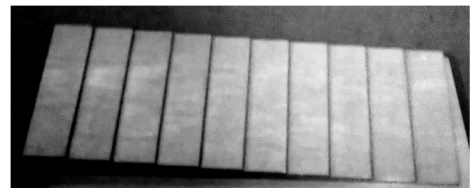
实验选用钛、铝、钢及酚醛树脂阶梯试块,其中



(a) 剖面

钛、铝、钢为市购 10 台阶标准阶梯试块,阶梯厚度增量 1 mm,酚醛树脂为 7 台阶非标设计阶梯试块,最薄厚度 40 mm,阶梯厚度增量 5 mm。

将钛和其他待测材料标准阶梯试块(图 1)和酚醛树脂阶梯试块,放置于一张射线胶片之上,选择适当焦距,用透照电压 50 kV,曝光量 15 mA·min 进行射线照相,获得钛及其他材料阶梯试块影像见图 2。



(b) 实物

图 1 钛及其他材料标准阶梯试块

Fig.1 Standard ladder block of titanium and other materials

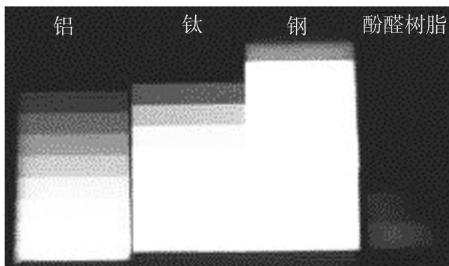


图 2 四种材质阶梯试块射线影像

Fig.2 Ray images of ladder block of four type of materials

图 2 可见,在 50 kV 透照电压下,2 mm 以下的铝、钛以及 50 mm 以下的酚醛树脂区域,底片影像黑度大,其阶梯影像消失在背景中,表明相同厚度下,材

料密度不同,影像黑度不同,其中材料密度小的底片黑度大。

等效系数的确定应在同一黑度条件下进行。本文选取 1.5 黑度,即其他材料等效厚度应和标准材料钛在某厚度所对应的底片黑度一致,且均为黑度 1.5。具体地,选取透照电压 50 kV,曝光量 15 mA·min,对钛和其他材质阶梯试块同时进行射线照相,获得钛阶梯试块 3 mm 处黑度为 1.5 的射线影像,此时,其他材料阶梯试块底片黑度 1.5 处所对应的阶梯厚度就是 3 mm 钛的等效厚度。

测量图 2 中底片黑度 1.5 时不同材质的对应厚度,结果见表 2。

表2 钛1.5黑度时,其他材料黑度和对应厚度

Tab.2 Blackness and thickness of other materials when the titanium is of 1.5 blackness

材料	黑度	厚度/mm	材料	黑度	厚度/mm
酚醛树脂	1.6	60	钛	1.5	3
铝	1.5	4	钢	1.0	1

表2,铝4 mm处和钛3 mm处黑度同为1.5,按等效系数定义公式,铝相对钛的等效系数为0.75。酚醛树脂和钢由于没有黑度1.5的对应厚度,因此其等效系数无法通过表2结果直接建立,为获得酚醛树脂和钢具有1.5黑度的对应厚度,此时可采用同时透照法的两个延伸方法。

### 1.2 阶梯扩展透照法分析

实验采用的钢标准阶梯试块厚度区间在1~10 mm,其最薄1 mm处的影像黑度为1.0,若希望获得1.5黑度的影像,根据射线照相理论,势必要选用更小的钢厚度。同理,对于密度较小的酚醛树脂,要选用更大的厚度。但这只是定性地确定了材质厚度的选择方向,实际量化则需扩展阶梯试块的范围。

具体到上述材料,钢材质阶梯试块,应制作厚度区间0.5~1.0 mm、阶梯等厚度0.1 mm的5台阶阶梯试块,进行透照;对于酚醛树脂,可制备厚度区间55~65 mm、阶梯等厚度1 mm的10台阶阶梯试块。这样的阶梯扩展结果有着经验的因素,但如果制作范围更广,阶梯等厚度更小的阶梯试块,同时透照法是一种有效的方法。

虽然阶梯扩展的方法直观有效,但存在费工、耗时的问题,特别对射线检测人员不熟悉的材质阶梯试块的制备将是一件复杂的工作。因此在现有阶梯试块基础上,完成同时透照法等等效系数的确定,等效厚度的校正方法具有一定的优势。

### 1.3 等效厚度校正方法分析

影响底片黑度的因素较多,如材料密度、透照厚度、透照参数、胶片、显影温度等。用同一参数同时照相,可保持材料密度,透照参数,胶片,显影温度的恒定关系。此时底片的黑度仅与透照厚度相关,且保持指数相关<sup>[5]</sup>。现以酚醛树脂为例,分析其中关系。

酚醛树脂影像的黑度变化,同样是随着厚度的增加而减小,且黑度变化仅与其厚度指数关联,并且在厚度变化不大的情况下,趋势基本一致。其黑度与厚度变化对应见表3。

由表3看出,随着厚度增加,黑度相应减小。对其进行指数拟合,拟合曲线、拟合公式见图3。

从图3可知,相关系数 $R^2=0.997$ ,表明厚度与黑度指数拟合高度相关,拟合公式为:

$$y = 31.542e^{-0.0495x} \quad (1)$$

式中, $y$ 为黑度, $x$ 为厚度。

表3 酚醛树脂厚度与黑度对应

Tab.3 Blackness vs thickness of other materials while titanium is of 1.5 blackness

厚度/mm	黑度	厚度/mm	黑度
40	4.4	55	2.1
45	3.3	60	1.6
50	2.7		

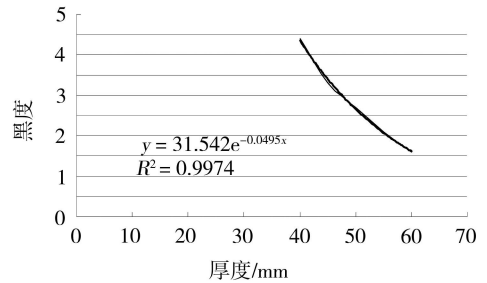


图3 酚醛树脂厚度与黑度关系

Fig.3 Relationship between thickness and blackness of fiber reinforced phenolic resin

根据式(1),当黑度选定为1.5时,求取对应厚度,公式两边取自然对数:

$$\ln 1.5 = \ln 31.542 - 0.0495x$$

$$x = 61.42 \text{ mm}$$

即透照3 mm钛,相当于透照61.42 mm的酚醛树脂,按照等效系数计算公式:酚醛树脂相对于钛的等效系数约为0.049。

值得注意的是,等效厚度校正时,其黑度及对应厚度值应在选定黑度的附近区域选取,若离散过大,指数规律不相同。

用此方法也可获得50 kV,15 mA·min时钢相对于钛的等效系数。

## 2 等效系数图像法分析

对于需经常进行射线透照检测的材质,比如铝、钢(铁)、钛,检测人员通常会在实际应用之前制作曝光曲线,用以指导某种材质在不同厚度时的透照参数选取。考虑曝光因子和厚度宽容因素,并协调透照电压,曝光曲线黑度,将不同材质曝光曲线整合,可建立以曝光曲线为基础的等效系数图像法。

### 2.1 曝光曲线

曝光曲线是指在一定焦距下,以透照电压为参数的曝光量对数与厚度的关系曲线,在适当区间,这种关系曲线呈直线显示<sup>[6]</sup>。不同的材料具有不同的曝光曲线。由曝光曲线可方便地确定某种材料、某个厚度的工件,在满足规定质量要求下,应选用的透照电压、焦距、曝光量及冲洗条件等。钛曝光曲线见图4。

从图(4)可知,若要透照20 mm厚度钛,大约可选用120 kV,1.2(15 mA·min),或100 kV,1.4(30 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第4期

mA·min) 两个透照参数。

对于透照密度更低的酚醛树脂,需制作专用的酚醛树脂曝光曲线(图5)。

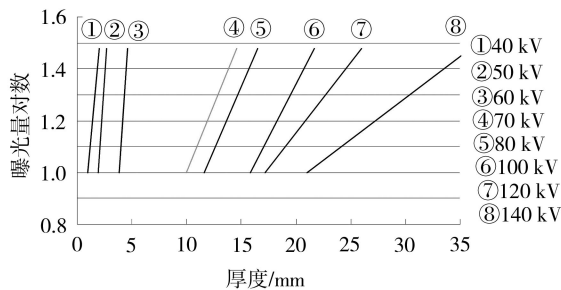


图4 钛曝光曲线(黑度1.5)

Fig.4 Curve of titanium exposure (with 1.5 blackness)

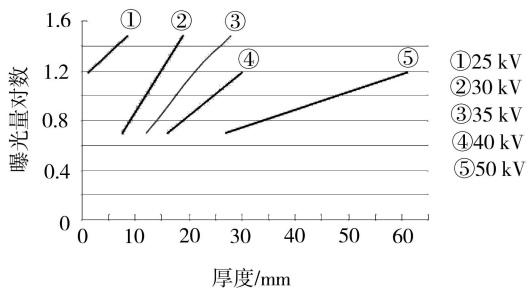


图5 酚醛树脂曝光曲线(黑度1.5)

Fig.5 Curves of fiber reinforced phenolic resin exposure (with 1.5 blackness)

## 2.2 等效系数曝光曲线图像法分析

分析图4、图5,虽然其材料不同,但黑度条件一致,均为1.5,且横坐标与纵坐标性质以及单位相同,因此,两图所示曝光曲线可在同图中绘制。选取50 kV时,钛和酚醛树脂曝光曲线见图6。

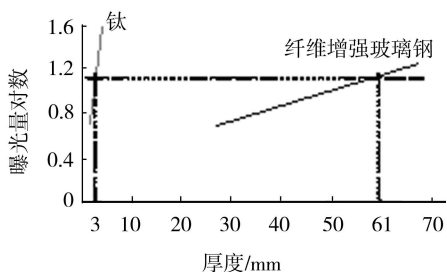


图6 透照电压50 kV钛、酚醛树脂曝光曲线(黑度1.5)

Fig.6 Exposure curves of titanium and fiber reinforced phenolic resin (with 50 kV, 1.5 blackness)

在图6中,当选取曝光量15 mA·min即纵坐标刻度1.18时,两条曝光曲线横坐标对应厚度分别为钛3 mm、酚醛树脂为61 mm。

在图6中同样可任意选取其他曝光量,如此在两条曝光曲线上能获得无数个对应等效厚度。但等效系数不会因为等效厚度的变化而发生改变。这是因为:尽管在选取透照电压的同时,也要选取曝光量,但事实上等效系数不随曝光量变化而变化。由曝光曲线

线公式可以证明这一关系。

透照电压50 kV时,钛曝光曲线中,有直线:

$$y_1 = a_1 x_1 + b_1$$

酚醛树脂曝光曲线中,有直线:

$$y_2 = a_2 x_2 + b_2$$

两式中截距 $b_1$ 和 $b_2$ ,数学意义为当 $x=0$ 时,两直线与纵轴的交点数值。实际意义为: $x=0$ ,无任何厚度材料被射线穿透,即无透照电压加载,此时曝光量及其对数也不存在。即 $b_1=b_2=0$ 。因此当 $y_1=y_2$ ,即曝光量相同时,

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{a_2}{a_1} = \text{常数}$$

需要说明的是,完整的曝光曲线并非一条真正的直线,只有透照厚度达到一定数值时,才呈直线显示,因此关于直线截距分析是一种近似的方法。另外,虽然曝光量的选取理论上不影响等效系数的计算,但等效系数需要在某一黑度下获得,而黑度又和曝光量密切相关。因此过大或过小的曝光量,都不能获得准确的黑度测量值。因此选用较为恰当的曝光量也同样重要。

## 3 结论

相对于建立不同透照电压的射线透照等效系数数值体系,等效系数获得方法的建立更有意义。本文给出了获得等效系数的两种方法。

等效系数同时透照法是一种比较直观的方法。同时透照后,底片影像黑度一致处即存在等效厚度。如果影像中无一致黑度,使用阶梯扩展法获得的等效系数更为准确,由等效厚度修正法获得的等效系数,实践证明也可满足工程需要。

等效系数图像法是一种趋于理论化的方法,通过计算机等辅助手段,原则上可确定任意不同材质的等效系数,也包括确定任意透照电压下的等效系数。

等效系数图像法表明:等效系数与透照电压变化相关,与曝光量变化无关。

## 参考文献

- [1] 熊秀文. 关于射线透照等效系数[J]. 无损探伤, 1997(6): 46-48
- [2] JB4730—94, 压力容器无损检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [3] 王伏喜. 钛合金焊缝X射线照相底片黑度对灵敏度的影响[J]. 无损检测, 2000, 22(6): 263-264
- [4] 日本无损检测协会编, 李衍译. 射线探伤B[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 27, 28, 72
- [5] 蔡闰生. 基于普通X射线机的厚度测量[J]. 中国测试, 2012, 38(6): 23-25
- [6] 郑家勋, 等译. 美国无损检测手册射线卷[M]. 第一版, 上海: 世界图书出版公司, 1992: 268-279

(编辑 李洪泉)