

# 宽容度照相模式射线检测灵敏度分析

蔡闰生 高红月 何川龙 邢文涛

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 使用穿透电压和较大的曝光量可以增大影像的对比度,进而提高射线检测灵敏度。但为了完成对变截面物体的高效率检测,实践中经常会使用较高的透照电压和较小曝光量这种宽容度照相模式,因此带来了检测灵敏度的降低。为了揭示这个过程中灵敏度的变化情况,引入了透照电压和透照电流相互作用的理论分析,设计了以铝材质为研究对象的宽容度照相灵敏度分析模型,结合数据规划分析,描述出宽容度照相模式下检测灵敏度的变化趋势。从理论上说明了宽容度照相模式可具备相当的检测灵敏度,用实践验证了灵敏度的变化规律。可穿透电压提高40%后,检测灵敏度仍满足相关标准要求。宽容度照相具有可靠的检测灵敏度。

**关键词** 宽容度照相,射线检测,灵敏度

中图分类号: TG115.28+1

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2019.05.017

## Sensitivity Analysis for Radiographic Detection of Tolerance Photography

CAI Runsheng GAO Hongyue HE Chuanlong XING Wentao

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

**Abstract** Using the penetrating voltage and the higher level of exposure could enhance the contrast of the image, thereby the sensitivity of radiographic inspection was improved. But in order to achieve the high efficiency inspection of the variable cross-section objects, the method with the penetrating voltage and the lower level of exposure called latitude camera was normally used, which decreased the sensitivity of inspection. For demonstrating the changing of the sensitivity between those two methods, theoretical analysis of the interaction between trans-illumination voltage and current had been considered. In addition, a latitude camera sensitivity analysis model of aluminum product was designed. Then the data from the model was analyzed to describe the trend of inspection sensitivity in a latitude camera mode. So in theory, the latitude photography mode has considerable inspection sensitivity; and in practice, the changing law of model sensitivity is verified. When the penetrating voltage increases 40%, the inspection sensitivity still meets the relevant standards. As a result, the latitude camera has reliable inspection sensitivity.

**Key words** Latitude camera, Radiographic inspection, Sensitivity

### 0 引言

对截面厚度变化较小,采取适当提高透照电压,减小曝光量进行一次性透照的方法,被称为宽容度透照模式<sup>[1]</sup>。这种方法在射线检测实践中使用极为广泛,环形焊缝检测就是最典型的应用。此外对存在凸起、台阶等变截面金属铸件的射线检测,也多应用这种模式。然而,这种宽容度照相模式,在检测标准中常被加以限制使用。例如检测方法 GJB1187A—2001 中要求对铝合金件照相不得提高 30 kV<sup>[2]</sup>。其他一些标准甚至明确提出:A级技术(最低等级)曝光量应不小于 15 mA·min。标准限制的目的在于确

保必要的曝光量,以保证检测灵敏度,完成对细节缺陷的检出。但在检测实践中,一些检测工作量大且使用便携射线机(额定透照电流较小)的工厂企业,为实现全面检测以及提高检测效率,通常会使用较大的透照电压和相对较小的曝光量,这种有别标准的检测方法,其检测灵敏度和检测结果常被质疑。但事实上,提高透照电压、减小曝光量(有相当数量的额定透照电流 5 mA 的检测设备),实际检测灵敏度降低多少,降低的趋势如何,业界并没有明确的认识。本文将以铝材料为样本,以丝型像质计为指征,分析大宽容度模式下的射线检测灵敏度。

收稿日期:2019-02-27

第一作者简介:蔡闰生,1963年出生,主要从事射线检测工艺研究工作。E-mail:cai\_sohu@sohu.com

## 1 射线检测灵敏度理论分析

### 1.1 射线检测灵敏度与丝型像质计

射线检测灵敏度是指底片记录、显示细节的能力<sup>[3]</sup>。而这个能力一般用像质计来表征,丝型像质计为国内普遍采用,国际标准化组织也将其纳入标准中。简单地说:就是底片能发现多大直径的丝,即表示在所应用的照相技术下,该尺寸丝状细节可被发现的能力。但细致地说,在黑白底片上,能够发现的细节,都是底片上黑白差异所致,也就是对比度上的显示。因此,获得合适的底片黑度以及较大的对比度,就是获得较高射线检测灵敏度的关键所在。

### 1.2 底片对比度与灵敏度的关系

射线检测理论中有 $\Delta D \geq \Delta D_{\min}$ ,其中不等式左侧表示可发现细节的对比度,右侧表示人眼视觉特性可识别的最小黑度差(对于不同形状的细节,最小黑度差有一定的差别)。因此,射线检测所追求的就是较大数值的 $\Delta D$ 。

$$\Delta D = \frac{0.43\mu G \Delta T}{1+n} \quad (1)$$

式中, $\mu$ 为衰减系数,与材料或缺陷性质相关; $G$ 为胶片特性曲线斜率,与胶片种类相关; $\Delta T$ 为厚度差异或缺陷尺寸; $n$ 为散射比。很明显,公式中并没有与透照电压和透照电流(曝光量)相关的参数,但实际上,衰减系数 $\mu$ 与散射比 $n$ 都与透照电压间接关联,而且随着透照电压的升高,衰减系数有降低趋势。

公式(1)表明:(1)随后的分析模式所涉及参数具有全面性;(2)检测灵敏度与透照电压并非具有完全的线性相关性;(3)宽容度照相模式与检测灵敏度具有关联规律。

### 1.3 透照电压和透照电流的关系

透照电压和透照电流以及透照时间(曝光量=透照电流×透照时间)是射线检测的几个重要参数。从宏观上,它们与胶片性质等指标一起,共同影响底片的黑度、对比度和灵敏度。从微观上,透照电压决定了射线光子穿透物体的能力,透照电流决定了穿透物体的射线光子数量,这是在透照电压适当情况下获得的结论。但如果透照电压过低,即使使用大的透照电流和较长的透照电流输入时间,由于入射光子的动能不足,衰减过大,穿透物体的光子数目也不会多;同理,如果透照电压较高,较小的透射电流,穿透物体的光子数目也不会过少。决定底片黑度和灵敏度的本质原因,就是这些穿透物体的光子数<sup>[3]</sup>。从这个意义上讲,较高的透照电压,较低的透照电流,或者说较小的曝光量,原理上可以获得应有的检测灵敏度。

## 2 宽容度模式下灵敏度分析模型设计

选取适当厚度标准铝试块,铺放丝型像质计,以黑度2.0为限制条件,分步完成射线照相。其中铝试块厚度选取要相对大些,以尽可能地提高透照电压。其中黑度限制在2.0,具有两个意义:第一是为了保证黑度在GJB1187A—2001的规定范围内;第二提高透照电压,同时减小透照电流,势必造成黑度波动,进而影响 $\Delta D$ ,致灵敏度数值失真。

测试中使用相同底片以防止底片的特征曲线的 $G$ 值变化带来误差。另外相同的底片可使得底片噪声得到相对控制。

因为选取铝试块的厚度为定值,当透照电压变化后,实际上 $\Delta T$ 值就是像质计可发现的丝径数值。

此外,测试过程中,要保证焦距、透照设备、显影设备及参数的一致性。

综上,模型设计的中心思想就是:公式(1)为模版,恒定相应参数,获取透照电压和透照电流变化下的灵敏度数值。

## 3 灵敏度验证与分析

选取15 mm标准铝试板,源测放置10<sup>#</sup>~16<sup>#</sup>丝铝质像质计,从曝光曲线(焦距1 m)选取15 mm厚度对应透照参数55 kV,15 mA·min,获得底片。

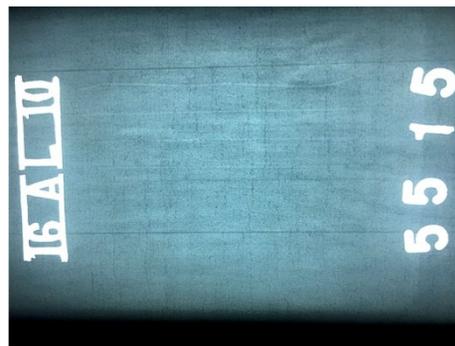


图1 55 kV,15 mA·min像质计影像

Fig. 1 IQI image of 55 kV and 15 mA·min

按照GJB1187A—2001要求,A级技术底片黑度要求在1.7~4.0间,现选择2.0黑度,查询曝光曲线,正常透照时,相匹配的透照参数为55 kV,15 mA·min。

从图1看出像质计10<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>丝完整可见。表明此透照条件下,射线检测绝对灵敏度可到14<sup>#</sup>丝即0.16 mm。这个灵敏度完全满足GJB1187A—2001对于15 mm厚金属材料必须达到12<sup>#</sup>丝0.25 mm丝径的灵敏度要求。

### 3.1 宽容度模式下曝光量与透照电压的关系验证

由于图1匹配的各项透照指标完全符合GJB1187A—2001的要求。因此,图1可作为透照15 mm铝试板的标准底片,相关透照电压和曝光量确定为基准参数。进一步将以此为基础,对宽容度透照

模式中曝光量与透照电压的关系进行验证。即逐步减小曝光量,寻找2.0黑度下的适配透照电压。具体地,曝光量从15 mA·min开始,以1 mA·min为幅度逐步降低,直至曝光量为1 mA·min。通过实验,各曝光量对应的透照电压数值见表1。

表1 透照电流与透照电压匹配  
Tab.1 Matching technique of transmission current and voltage

曝光量/ mA·min	透照电压/ kV	曝光量/ mA·min	透照电压/ kV	曝光量/ mA·min	透照电压/ kV
15	55	10	62	5	73
14	56	9	63	4	78
13	57	8	65	3	83
12	58	7	67	2	93
11	60	6	69	1	115

由表1可知,随着曝光量逐步减小,底片黑度2.0的情况下,初期曝光量15~10(mA·min)区间,匹配透照电压增加的幅度较小;中期曝光量9~6(mA·min)区间,匹配透照电压变化幅度略有增大;后期曝光量5~1(mA·min)区间,匹配透照电压提升明显。

经拟合,在保证底片黑度2.0的前提下,透照电压与曝光量存在比较精确的幂函数关系,其拟合 $R^2=0.998$ ,如图2所示。

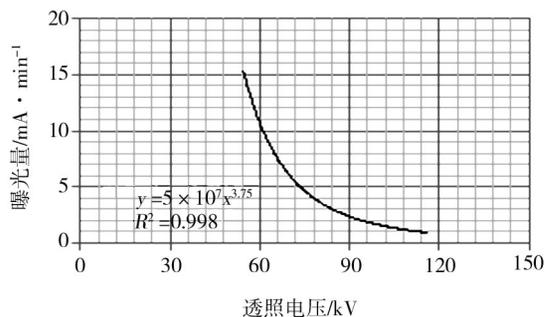


图2 黑度2.0时,透照电压与透照电流的关系

Fig. 2 Voltage and current relationship between radiographic exposure of black 2.0

从射线透照基础理论分析这种关系原因。底片的黑度主要是由射线光量子的数量决定,当透照电压较低的时候,即使曝光量较大,也存在相当多的低能光子,它们在与被透照物质的原子发生碰撞时,能量被完全消耗,不能穿透物体到达胶片贡献黑度。而当透照电压较高时,尽管曝光量较小,但存在相对更多的高能光子,它们穿透物体,使底片感光,便有了底片的黑度。至于幂函数的关系,这从X射线管的连续谱辐射总强度公式可以简单理解,即射线总强度(可形象理解为光子数目)与管电流与透照电压的平方的乘积成比例。

### 3.2 宽容度模式下透照电压与灵敏度的关系验证

GJB1187A—2001规定在焊接件中发现的像质计丝的长度不得少于10 mm,铸件相应长度应为100%<sup>[4]</sup>。结合以上两种情况,定义像质计丝长度显示50%即为发现。如此,有两方面的考量:第一,工程实践中,发现了一定长度的像质计,就表明检测能力能够达到对应的水平;第二,对于研究来说,工程用像质计不够精细,有必要细化。

通过实验,随着透照电压升高曝光量减小,即执行宽容度透照模式,检测灵敏度有较为明显的下降,如图3所示。

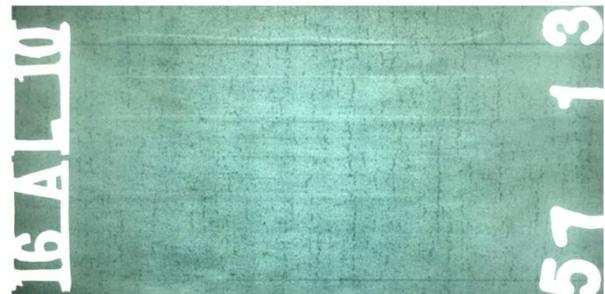


图3 57 kV, 13mA·min 像质计影像

Fig. 3 IQI image of 57 kV and 13 mA·min

由图3可知,当曝光量从15 mA·min减小到仅为2 mA·min时,像质计可见最细丝号就成为了12#丝,灵敏度下降速度很快。但继续实验,这种下降并非大斜率的直线下降,如图4所示。

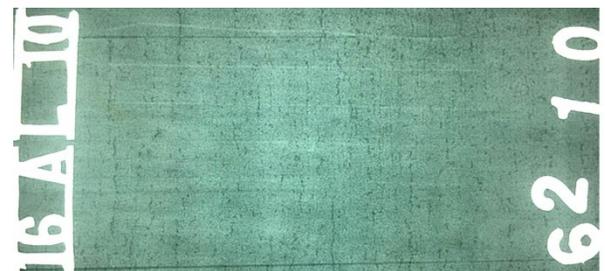


图4 62 kV, 10 mA·min 像质计影像

Fig. 4 IQI image of 62 kV and 10 mA·min

由图4可知,当曝光量从标准曝光量的15 mA·min减小了5 mA·min,像质计仍可见12#丝,灵敏度保持不变。但继续减小曝光量增大透照电压,灵敏度再次发生了显著变化,如图5所示。

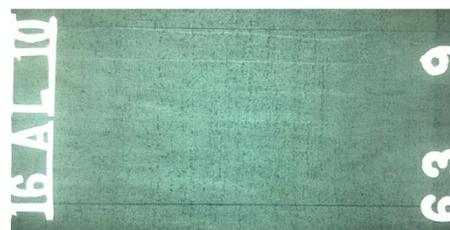


图5 63 kV, 9 mA·min 像质计影像

Fig. 5 IQI image of 63 kV and 9 mA·min

由图5可知,像质计可发现最细丝为11<sup>#</sup>。此时,灵敏度仍满足GJB1187A—2001的相对要求。此后,

这个灵敏度一直保持到78 kV,4 mA·min。灵敏度与透照电压对应详见表2。

表2 透照电压与灵敏度的关系  
Tab. 2 The relationship between transillumination voltage and sensitivity

像质计 丝号	透照电压/kV														
	55	56	57	58	60	62	63	65	67	69	73	78	83	93	115
10 <sup>#</sup>													√	√	√
11 <sup>#</sup>							√	√	√	√	√	√			
12 <sup>#</sup>			√	√	√	√									
13 <sup>#</sup>	√	√													

由表2可见,宽容度照相模式下,透照电压与灵敏度具有一定的关系。其关系可以表述为:随着电压的升高,检测灵敏度呈阶梯状下降趋势,且阶梯平台逐步加宽。表明:在一个平台上,更多的透照电压具有相同的检测灵敏度。例如:73~78 kV都具有相同的灵敏度。这也从侧面验证了射线理论另一个观点:即透照电压越高,宽容度越大。

#### 4 结论

灵敏度是射线检测的关键指标,因此业内对于宽容度照相这种可降低检测灵敏度模式的运用抱有谨慎态度,即不能不用,又只能试探性应用,其中核心问题就是这种模式下的检测灵敏度变化趋势的模糊性。通过对透照电压和透照电流(曝光量)相互作用于灵敏度的微观分析和以铝材作为模型的宏观试验分析,经过透照电压和曝光量两参数的组合适配,

在2.0黑度下,取得了各组合参数下的检测灵敏度数据,经分析确定以下结论:(1)铝材透照电压提高到可穿透电压140%,检测灵敏度仍满足相关标准要求;(2)在满足黑度等相关标准要求前提下,宽容度照相模式具有可靠的灵敏度;(3)以上结论虽以铝材作为研究对象获得,但实验与分析的方法具有普遍意义;(4)透照电压与曝光量适配数值具有幂函数关系。

#### 参考文献

- [1] 航空航天无损检测人员资格鉴定委员会. 射线检测, 第二版[M]. 北京:机械出版社,1994:177-178.
- [2] GJB1187A-2001-2001,射线检测[P]. 2001-11-23.
- [3] 刘德镇. 现代射线检测技术[M]. 北京:中国标准出版社,1999:117-118.
- [4] 郑家勋,等译. 美国无损检测手册射线卷,第一版[M]. 上海:世界图书出版公司,1992:240-245.