X 射线照相缺陷定位方法分析与验证

蔡闰生 任华友

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 相对于公式法,双标记法解决了焦距和焦点位移测量误差所带来的问题。但此方法在射线检测 领域普及程度并不高,其中原因,首先是原理较复杂,针对性研究少,其次是测量精度没有被量化,可信度不高。 本文从公式法入手,通过对原理公式的变化分析和线性化分析,明晰了双标记法缺陷深度定位原理,推导了缺 陷深度定位公式,利用简化模型,对双标记法的定位精度做了进一步的分析与计算,最后针对具体被检测物,测 试验证了双标记法的计算公式和测量精度,用理论和实践证明了方法和精度的可靠性。

关键词 X射线,缺陷深度,定位精度

Analysis and Verification of Locating Defects in X-ray Photographic Testing

Cai Runsheng Ren Huayou

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

Abstract Formula method and double labeling method are two positioning methods on depth of defects. Relative to the formula method, the double labeling method solves the problems brought by the measurement error of focal length and focus shift by method of double labeling. This is a method of greater practical significance. Meanwhile, this method is not wildly used in the field of ray inspection. The first reason is the principles are complicated, and targeted researches are less; the second reason is, the measurement accuracy cannot be quantified, the credibility is dubious. Formula method is used in this essay. Through the analysis on change and linearization of principle formula, the essay defines the position principle on defect depth of double labeling method, derives the position formulation of defect depth. Using the reduced model, the essay do further analysis and calculation on position accuracy of double labeling method. Finally, according to the specific article to be detected, the test verified the calculation formula and the measurement accuracy, certified the reliability on method and accuracy from the point of theory and practice.

Key words X-ray, Defects depth, Location accuracy

0 引言

普通 X 射线照相技术是典型的二维成像技术。 在实际应用中,很多时候需要准确掌握内部特征和缺 陷在材料内部的深度位置,为缺陷修补、缺陷危害评 价提供必要的信息,深度测量成为一种必然要求。目 前,在 X 射线检测领域,缺陷定位技术应用并不广 泛,其主要原因是工程化研究和定位误差分析未得到 进一步开展。本文在理论推导的基础上,系统阐述了 公式法和双标记法两种缺陷定位方法,着重分析了双 标记法的原理,推导解析了缺陷深度计算公式,并对 缺陷定位精度进行了详细分析,最后通过实测进行了 验证。

1 缺陷深度定位的公式法

X 射线底片影像只能给出两个方向上的信息,对 于第三个方向上内部情况,则需在另一个方向上投 影。射线照相从原理上可以形成第三个方向投影,但 受被检测物几何尺寸和射线源能量等制约,现实中常 无法实现。因此偏离原有投影方向,开展两次曝光照 相,形成准第三方向影像,是缺陷深度定位的一种必 然选择^[1]。

收稿日期:2012-11-15

作者简介:蔡闰生,1963出生,硕士,主要从事射线检测研究。E-mail: cai_sohu@ sohu. com

1.1 射线照相两次曝光原理

当 X 射线穿过被检物时,包括缺陷在内的物体 内部情况被直线投射在射线胶片上形成潜影。在射 线胶片完成一次曝光后,变换射线源与物体的相对位 置进行二次曝光,经暗室处理,形成了同一张底片上 两次曝光影像,见图1。



(a) 0.1 mm 铜丝贴附



(b) 铜丝两次曝光影像图 1 两次曝光示意图Fig. 1 Two radiographic hint

1.2 原理分析

图 2 中 A、B 两点为射线源的两个位置,C 点位为 缺陷位置,H 为缺陷到胶片高度,射线源从 A 点平行 底片移动到 B 点,根据几何原理,可知 $\triangle ABC \sim$ $\triangle A_0 B_0 C_{\circ}$

$$H = \frac{F \times A_0 B_0}{AB + A_0 B_0} \tag{1}$$

式中, 焦距 F 可以事先测得, A₀、B₀ 是缺陷点 C 两次 曝光后在底片上的投影, 因此, 缺陷在两次曝光后移 动的距离可从底片上测量, AB 是焦点移动位置, 也是 可以实际测量的长度。由此, 缺陷点 C 到胶片平面 的高度 H 可以通过计算获得。



1.3 适用范围

公式法原理简单、计算简便,但实际应用中却存 在一些问题。主要体现在测量过程的精度控制方面。 在式(1)中,焦距 F 和射线源相对位移 AB 以及缺陷 在底片上投影 A₀B₀ 都参与计算,而在工业射线探伤 机的实际操作中,上述三个数据的测量都会存在误 差,尤以 F 的精确测量难度最大,另外公式法还有一 个需要胶片紧贴被检测物平面的隐含条件。因此,公 式法的适用范围较小。

1.4 线性化及误差分析

从式(1)可知:缺陷 C 距离底片高度 H 与缺陷底 片上投影的位移量 A₀B₀ 是非线性关系。当 H 接近 F 时,即焦距过小,或缺陷位置过高(被检物过厚),缺 陷的投影距离 A₀B₀ 将变得无限大;而当 H 趋于0 时, 即缺陷位置较低时,缺陷投影距离 A₀B₀ 趋近 0。

实际检测过程中,F可人为控制,而被检测物的 厚度相对较小。F通常是被检测厚度的十几倍,甚至 几十倍。因此,当射线源平移距离固定后,A₀B₀随着 F的增大而逐渐减小。整理式(1),也可看出其中关 系。

$$A_0 B_0 = \frac{H \times AB}{F - H} \tag{2}$$

设缺陷位置距底片高度为 H, F 从 15H 开始选 取,射线源移动距离 AB 取为 100 mm,按照式(2)可 计算 A_0B_0 数值,其量化值见表 1。可见, AB 为定值, 随着 F 的增大, A_0B_0 的数值逐步缩小。对上述数值 进行回归分析,其呈现的规律见图 3。可知,在 F 增 大到 H 的一定倍数后, F 与缺陷投影 A_0B_0 呈线性关 系。其线性拟合程度较高, 拟合系数 R^2 约为 0. 98。

上述分析可知,缺陷投影 A_0B_0 随着F的增大而逐渐减小,当F足够大, A_0B_0 在式(1)分母中的作用变小,可舍去。但忽略 A_0B_0 ,将带来一定的误差。根据式(1)计算在大焦距条件下其相对误差。

表1 焦距 F 与投影 A_0B_0 取值

Tab. 1Focal length F and projection

A_0B_0 corresponding numerical				
F	F-H	A_0B_0		
15H	14	7.14		
16H	15	6.68		
17H	16	6.25		
18H	17	5.88		
19H	18	5.56		
20H	19	5.26		
21H	20	5.00		
22H	21	4.76		
23H	22	4.55		
24H	23	4.35		
25H	24	4.17		

当 F>10H 时

$$\frac{\frac{F \times A_0 B_0}{AB} - \frac{F \times A_0 B_0}{(AB + A_0 B_0)}}{\frac{F \times A_0 B_0}{(AB + A_0 B_0)}} \times 100\%$$

$$= \frac{A_0 B_0}{AB} \times 100\% < 10\%$$

这个误差范围可以被接受,特别是当 F 远远大 于被检物体厚度时,其误差将明显缩小。

综上所述,式(1)可以被近似表示为:

$$H \approx \frac{F \times A_0 B_0}{AB} \tag{3}$$

由式(3),缺陷 C 的深度 H 与其在底片上的投影 A_0B_0 成近似线性关系,这在本文后续分析中具有重要意义。





2 缺陷定位的双标记法

虽然公式法在实践应用中难度较大,但其利用相 似三角形的深度测量方法仍具有指导意义。特别其 式(1)的线性化,为双标记缺陷定位法打下了基础。

2.1 双标记法原理分析

双标记法仍然是建立在相似三角形原理和两次 曝光技术基础之上的缺陷定位方法^[3],但已从根本 上解决了射线源位移距离 *AB* 和 *F* 的测量精度的问题,原理见图 4。



图 4 双标记法原理图 Fig. 4 Principle of double marking method

图 4 可知, O_1 、 O_2 、 O_3 分别为缺陷、被检物上表面标记、被检测物下表面标记,T为被检测物厚度,H为缺陷深度,K为底片距被检测物下表面距离。射线源由 A 平行移动到 B 后, O_1 、 O_2 、 O_3 三点在胶片的投影也发生了移动,其组成的三角形有: $\Delta A_1 O_1 B_1$ 、 ΔA_2

 O_2B_2 、 $\Delta A_3 O_3B_3$ 等多个,因射线源移动轨迹 *AB* 与胶 片平行,所以 $\Delta A_1 O_1B_1 \sim \Delta A O_1B \sim \Delta M O_1N$,根据 几何原理,并结合式(3)可以推出^[4]:

$$\frac{H}{T} \approx \frac{A_1 B_1 - A_3 B_3}{A_2 B_2 - A_3 B_3}$$
(4)

式中,T为被检物厚度是已知量,A₁B₁、A₂B₂、A₃B₃数 — 131值可从底片上获得,由此可计算缺陷深度 H。

2.2 双标记法误差分析

为便于双标记法误差的清晰分析,做简化双标记 原理图,见图5。

由双标记法适用条件 F > 10H、F > 10K,结合式 (4)并由图 5 可知,双标记法的误差来源于用 $A_1B_1 - A_2B_2$ 替代 *DE* 所产生的误差。因此,求 $A_1B_1 - A_2B_2 - DE_{-}$ 对 A_1B_1 的相对误差,也即求双标记法的系统误差。



图 5 双标记误差计算原理图

Fig. 5 Error calculation principle of double marking 在满足 F>10K、F>10H 条件时,可以通过推导得 到如下结论:

$$\frac{A_1B_1 - A_2B_2 - DE}{A_1B_1} \leq \frac{K + H}{4(F - K)} < \frac{1}{18} = 5.56\%$$

由此可以看出,以 $A_1B_1-A_2B_2$ 替代 DE 产生的误 差<5.56%,根据三角形相似原理:即使缺陷在误差 相对最大的被检测物上表面 C 位置,其相对误差< 5.56%。实际检测中,由于 $F \gg 10H$,因此误差会更 小。

2.3 双标记法应用范围

在常规 X 光照相检测中, 双标记法的应用具有

广泛意义。即使是非平面物体,在初探确定缺陷平面 位置的基础上,只要有足够的近似平面,缺陷的深度 测量也能实现^[5]。尤其是当被检测物无法与胶片紧 密贴置,双标记测量法变得无可替代。但双标记法的 应用也有一定的限制,即射线源的移动必须与胶片保 持平行,标记本身尺寸也需足够小,同时焦距F要满 足远大于检测物厚度的条件。

2.4 双标记法实验验证

选用厚度分别为 10 和 5 mm 铝标准试板,将三 段直径 0.1 mm 铜丝分别粘贴于试板上,其中 10 mm 厚试板两个平面都贴附铜丝,两块铝试板叠放,并用 厚度 10 mm 试块将试板垫起,试验布置图以及射线 照相底片见图 6、图 7,试验参数见表 2。



图 6 试验布置图 Fig. 6 Test plan



图 7 深度定位试验 X 射线影像

Fig. 7 Depth measurement experiment of X-ray pictures

mm

表 2 缺陷定位试验参数

Tab. 2	Defect	positioning	test	parameter	summary	
--------	--------	-------------	------	-----------	---------	--

焦距	源移动距离	上试板厚度	下试板厚度	被检物总厚度	垫块厚度	上下标记厚度	缺陷预埋深度	缺陷直径
1600	200	10	5	15	10	0.1	5	0.1

通过 X 射线试验底片测量:上表面标记影像位移 3.42 mm;缺陷模拟影像位移 2.42 mm;下表面标记位移 1.88 mm。将以上数值代入式(4)计算:H=5.26 mm。设模拟缺陷预埋深度为 M。

计算相对误差:

$$\frac{H_{\rm f}-M}{M} \times 100\% = \frac{5.26-5.0}{5.0} \times 100\% = 5.2\%$$

经计算,采用双标记法获得的缺陷深度数值为 5.26 mm,相对误差为 5.2%,可满足实际检测的需 要。误差产生原因有两个方面,一是近似公式与射线

— 132 —

源移动平行所带来的系统误差,二是试板间隙、底片 投影位移测量所带来的随机误差。要减小随机误差, 可适当增大射线源二次位移量,采用底片数字化测量 以及超声、CT辅助修正等手段。

2.5 双标记法应用

对 C/C 复合衬板毛坯料进行射线探伤,发现多处 夹杂缺陷^[6]。对照 Fe 像质计影像和 CT 检测影像分 析判断为密度为 8.0 g/cm³ 左右的高密度金属夹 杂^[7]。为判断夹杂缺陷位置,采用双标记法实施缺陷 定位。坯料外观及坯料初探、缺陷定位底片见图 8~ 图 10。



图 8 衬板坯料 740 mm×140 mm×55 mm Fig. 8 Est material 740 mm×140 mm×55 mm



图 9 坯料 3[#]位置初探投影 Fig. 9 Third position on material first X-ray





经测量,定位底片中,上表面标记位移 15.62 mm,下表面标记位移 5.34 mm,缺陷 A 点位移 5.28 mm,缺陷 B 点位移 5.28 mm,缺陷 C 点位移 5.24 mm,缺陷 D 点位移 5.26 mm。可判断高密度夹杂缺 陷位于下表面附近。经计算,缺陷深度分别为 0.32、 0.32、0.54、0.43 mm。经分析,坯料外表面粗糙,缺 陷为粘附在坯料表面上的多余物,将缺陷区外表面打 磨并二次拍照验证,底片显示夹杂消失。经与送检方 交流,夹杂可能来源于高温工序时金属包套融化物, 据此判定产品合格,双标记法定位准确。

3 结论

公式法原理清晰明了、计算简单,但操作难度大, 测量误差难以有效控制,不具有明显的实际应用意 义。双标记法虽然是一种误差较小的测量方法,但在 射线检测领域其普及程度并不高。其中原因,首先是 原理相对复杂,既涉及几何学原理,又相关射线照相 的特殊技术,其次是测量精度没有被量化。本文从公 式法入手,对原理公式进行了变形分析和线性化分 析,进而导出双标记法原理公式,并以简化的模型,对 双标记法的测量精度进行了数学分析与计算,清晰说 明了方法的科学性,并通过对具体产品的检测,实证 了方法的有效性和测量精度的可靠性。

参考文献

[1] 林志强,赖传理. 基于射线成像原理的测厚新方法 [J]. 东方电气评论,2012,25(3):67-70

[2] 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, 1992:998-1003

[3] 张富生. 用射线检测技术确定焊缝缺陷深度[J]. 检查与测量,2011(6):51-54

[4] 蓝清生,张路根. 黑度法确定射线探伤中缺陷高度的 计算公式[J]. 无损探伤,2001,(3):7-10

[5] 朱维民,高伟.应用 X 射线对焊缝缺陷位置及深度的 测量[J].应用科技,2002,29(5):1-3

[6] 王俊山,许正辉,黄葛伟.用 CT 图象分析 C/C 复合 材料的内部缺陷[J]. 宇航材料工艺,1998,28(6):53-56

[7] 金虎,蔡闰生. C/C 复合材料密度的 CT 定量无损检 测技术[J]. 宇航材料工艺,2011,41(6):85-87

(编辑 任涛)