

# X 射线检测仿真软件成像的黑度修正

朱 凯<sup>1,2</sup>, 王倩妮<sup>2</sup>, 郭广平<sup>1,2</sup>, 郭冠华<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘 要:** X 射线仿真软件通过读取物体三维模型, 基于射线衰减及成像理论, 计算得到理想探测器成像的射线图像。由于射线机、胶片、环境等方面与实际检测相比存在着一定的差异, 导致射线仿真软件成像与实际检测图像的黑度上不一致。以 X 射线仿真软件(X-RAY Simulation)为例, 通过对比它与真实 X 射线机对钛合金零件曝光图像的黑度差异, 利用软件自带的修正功能制作出修正系数曲线对仿真图像的黑度进行修正。试验证明最大黑度差由 1 左右降至 0.3。

**关键词:** 射线仿真软件; 黑度; 修正系数曲线

中图分类号: TG115.28; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)06-0053-04

## Method of Film Density Correction in Computer Simulated X-Ray Radiograph

ZHU Kai<sup>1,2</sup>, WANG Qian-Ni<sup>2</sup>, GUO Guang-Ping<sup>1,2</sup>, WU Guan-Hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Radiography Simulation Software produces simulated radiograph by loading three-dimensional data of the part to be inspected and by calculating based on X-ray attenuation and imaging theory. However, there are some differences between the simulated images and real images due to variation of ray-machine, film, environment and other factors. In this paper, the differences of density between simulated and real images were investigated by using software of XRSIM. Correction factor curve was made to correct the density of simulated X-ray radiograph. Experimental results show that the biggest differences of density are decreased from 1.0 to 0.3.

**Keywords:** Simulation Software of Radiography; density; Correction coefficient curve

胶片作为记录介质, 是最常用的无损检测技术之一, 已广泛应用于铸件、焊缝等工业产品的检测中。对于航空工业中的精密复杂的铸件, 由于形状复杂、厚度多变, 在编制检测工艺时, 往往需要大量试拍胶片来确定曝光参数, 不仅浪费成本, 也影响检测进度。射线照相检测计算机仿真技术利用零件三维造型数据, 通过改变材料、射线机、底片及透照参数, 可快速获得在不同参数条件下的仿真黑度图像。将其应用到射线照相检测工艺编制当中, 可达到节

约时间、减少成本、优化工艺参数的目的。

目前欧美国家开发了多种用于射线检测仿真的软件, 如美国的 XRSIM、德国的 BAM、法国的 CI-VA 等, 但这些软件在仿真前需要经过一定的修正, 以得到和实际检测尽可能相同的结果<sup>[1]</sup>。以美国开发的 XRSIM 软件为例, 在使用该软件对钛合金零件进行仿真后发现, 若将实际检测时所使用的透照参数(如透照电压、曝光量、焦距等)直接用于软件仿真而不进行修正, 所得仿真的图像黑度值与实际的胶片黑度值将会有较大差别, 使得仿真的透照参数无法较好地应用到实际检测工艺中。因此需要利用 XRSIM 软件自带的曝光量修正功能对仿真图像的黑度进行修正, 使相同透照参数下的仿真结果与真实透照结果的黑度相近。

收稿日期: 2013-02-04

**作者简介:** 朱 凯(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事射线仿真软件研究。

**导师简介:** 郭广平(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事无损检测和力学性能测试研究。

## 1 XRSIM 软件的基本原理和功能介绍

X射线仿真软件(XRSIM)是美国国家工业标准技术局(NIST)所支持的基金项目,最早由美国艾奥瓦州立大学无损检测中心设计研发<sup>[1]</sup>。XRSIM软件基于X射线物理衰减原理<sup>[2]</sup>,如图1所示。

$$I = I_0 e^{-\mu_t x} \quad (1)$$

$$\mu_t = \mu_{coh} + \mu_{pe} + \mu_{com} + \mu_{pp} \quad (2)$$

式中: $I_0$ 为入射射线强度; $I$ 为透射射线强度; $x$ 为工件厚度; $\mu_t$ 为线衰减系数; $\mu_{coh}$ 为瑞利散射衰减系数; $\mu_{pe}$ 为光电衰减系数; $\mu_{com}$ 为康普顿衰减系数; $\mu_{pp}$ 为电子对衰减系数。

XRSIM可在不需要真实零件的情况下,通过读取工件三维模型、设定材料类型、射线机型号、底片类型、透照条件等参数来仿真实际X射线检测并获得曝光影像。

如图1所示在仿真过程中,软件将射线源分为 $m \times n$ 个网格,将每个网格看做是一个源,每个源的强度为 $\frac{I_0}{m \times n}$ 。探测器也被分为 $i \times j$ 个网格,每个网格接收到的射线强度的总和为:

$$I_{i,j} = \sum_{n,m} \frac{I_{nm} I_0 e^{-\mu x_{i,j,n,m}}}{R_{i,j,n,m}^2} \quad (3)$$

式中: $I_{nm}$ 为点源 $(n,m)$ 占射线源总强度的百分比; $x_{i,j,n,m}$ 为工件在投射方向的厚度; $R_{i,j,n,m}$ 为点源 $(n,m)$ 到网格 $(i,j)$ 的距离。

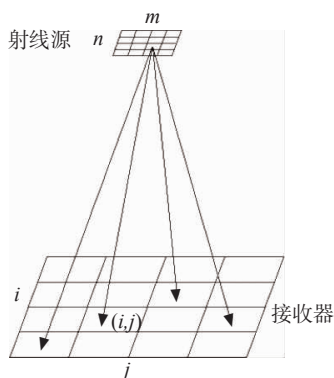


图1 射线机仿真运算原理

实现检测参数的优化是该软件最主要的功能,XRSIM仿真软件只能识别ASC II编码的STL三维图形文件,STL格式可以设计高效的算法提高射线与图形文件的求交速度<sup>[3-4]</sup>,能快速仿真出三维零件在规定条件下的黑度图,利用此格式的特点有利于节省仿真时间,便于优化参数。此外XRSIM与真实X射线机相比还具有操作简单、利于储存、

参数易于调节等优点。

## 2 黑度对比试验

底片评定时对黑度范围的要求十分严格,黑度过高或过低都将导致底片无法进行评定,在JB/T 4730中规定评片质量最低级时也将检测部位的黑度范围控制在1.5~4之间,因此XRSIM软件仿真所得到的结果能否应用于真实X射线机检测过程中,主要取决于在相同透照参数条件下所得到仿真图像的黑度值与真实胶片的黑度值是否一致。为便于对比在不同厚度时仿真图像与真实胶片的黑度差,试验选取三角形钛合金楔块(材料牌号为ZTC4,最大厚度为10 mm,如图2所示)进行试验,要求对此零件5 mm厚度部位进行检测。

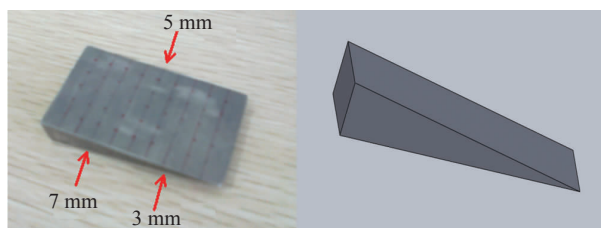


图2 零件实物和三维

首先使用X射线机对真实零件进行透照,通过调整射线机的透照电压使5 mm部位的胶片黑度控制在2.5左右,并使用黑度计测出对应楔块1 mm,2 mm,3 mm,4 mm,5 mm,6 mm,7 mm,8 mm和9 mm部位的黑度值(分别为6以上,4.98,3.95,3.12,2.52,2.08,1.74,1.45,1.25),记录下透照电压值为95 kV,再将此电压值用于XRSIM对零件三维模型进行仿真透照,软件的其它透照参数选用X射线机实际使用的参数(焦距1.75 m、胶片D4、曝光量30),利用软件自带的黑度测量功能测出仿真图像1~9 mm各厚度部位的黑度值(分别为6以上,4.84,3.47,2.46,1.77,1.29,0.94,0.69,0.51),去除6以上的黑度值,将这两组数据拟合成两条曲线进行对比,如图3所示。

从图3中可以看出,在真实胶片的黑度约为5时,两者的黑度基本一致,但随着真实胶片黑度的减小两者的黑度差逐渐增大,当真实胶片黑度减小到1.5时,两者的黑度差达到1左右,这种差异主要是由于该软件不能完美地模拟出与实际检测相同的射线机和胶片,再加上洗片条件、环境等因素的影响所造成的。因此笔者希望通过利用软件自带的修正功能,使仿真图像黑度与真实胶片的黑度在可检测范

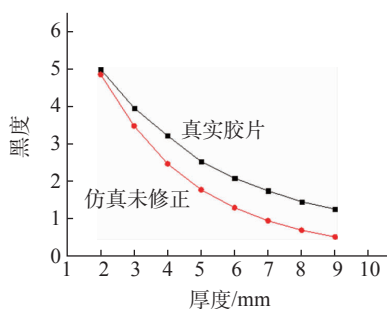


图3 95 kV时胶片黑度曲线和修正前仿真黑度曲线  
围(1.5~4)内时尽可能一致。

### 3 黑度修正方法

XRSIM 拥有自带的曝光量修正功能,此功能通过改变软件中射线机的曝光量修正系数(如修正系数为2,则曝光量为原来的两倍,如修正系数为0.5则曝光量为原来的一半)来增加或减少仿真图像的黑度值。试验希望通过调整软件中曝光量修正系数的方法来改变仿真图像的黑度,使图3中的仿真黑度曲线与真实黑度曲线在1.5~4黑度范围内时尽量重合。

从图3中可看出仿真黑度曲线始终在真实黑度曲线的下方,试验通过逐渐增大曝光量修正系数的方法使图3中的仿真黑度曲线上移,且发现当修正系数增大为1.5时,两曲线在1.5~4黑度范围内时最为接近,黑度差仅为 $\pm 0.3$ (如图4所示),相比图3中两曲线的黑度差准确度有了较大的提高。但此方法只能对某一特定透照电压条件下的黑度进行修正,因此需要制作出一条修正系数曲线来调整在不同透照电压条件下的仿真黑度曲线,使模拟结果更加精确。

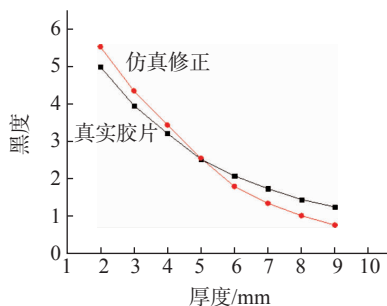


图4 95 kV时胶片黑度曲线和修正后仿真黑度曲线

通过对图4中两曲线的观察,发现经过修正后的仿真黑度曲线与实际胶片黑度曲线在黑度约为2.5处时相交,于是猜想若在其他透照电压下使仿真黑度曲线修正到与真实黑度曲线在2.5处重合,

是否也能提高仿真曲线黑度在1.5~4之间的准确度。为此试验先选取一钛合金(材料牌号为ZTC4)阶梯试块制作出真实X射线机下的曝光曲线,再将阶梯试块各厚度在曝光曲线上所对应的参数代入XRSIM软件中进行仿真,并调整修正系数,使仿真后各厚度的黑度值也为2.5左右,最后将这些修正系数拟合成一条光滑的曲线。具体实验过程如下:

(1) 根据下面的试验参数制作出钛合金曝光曲线,如图5所示:

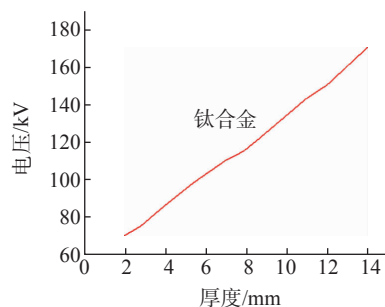


图5 钛合金曝光曲线

X射线机:ISOVOLT320/13;

试块:钛阶梯试块:厚度依次为2,4,6,8,10,12和14 mm;

焦距:1.75 m;黑度: $2.5 \pm 0.2$ ;胶片:柯达MX125(D4);曝光量: $30 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 。

(2) 把相同的试验参数输入到XRSIM软件中,并取这条钛合金曝光曲线上7个点(如表1所示)的厚度值和对应的电压值输入到XRSIM中进行仿真,若仿真图像黑度低于(高于)真实胶片黑度则提高(降低)曝光量修正系数,经过反复调整,使XRSIM所仿真出的黑度约为2.5。将这些电压所对应的修正系数值拟合成一条曲线,该曲线就是修正系数曲线,如图6所示。

通过对图7中修正系数曲线的观察可发现,修正系数最初随电压的增大而增加,当电压值增大到

表1 7个厚度在XRSIM中的修正系数值

| 透照厚度/mm | 电压/kV | 修正系数 | 修正后的黑度值 |
|---------|-------|------|---------|
| 2       | 70    | 1.1  | 2.521   |
| 4       | 86    | 1.5  | 2.513   |
| 6       | 103   | 1.5  | 2.521   |
| 8       | 116   | 1.65 | 2.508   |
| 10      | 134   | 1.6  | 2.525   |
| 12      | 150   | 1.65 | 2.502   |
| 14      | 170   | 1.65 | 2.511   |

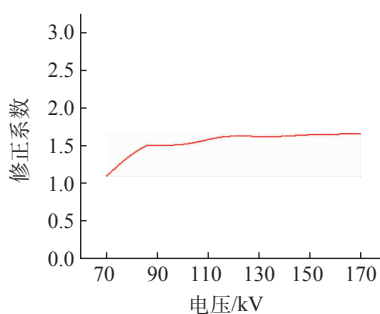
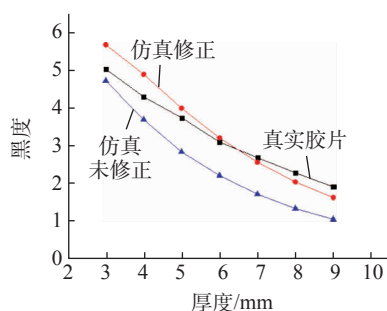
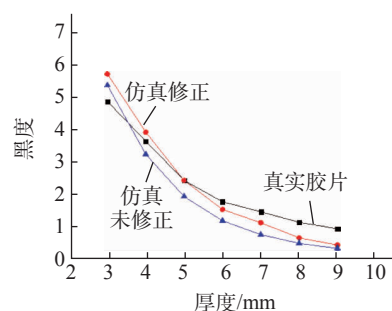


图6 修正系数曲线



(a) 78 kV



(b) 110 kV

图7 78 kV和110 kV时三种条件下的黑度曲线

约85 kV后,修正系数基本保持在1.5~1.6之间。为验证图6中修正系数曲线的可靠性,同样以图3中的钛合金零件进行验证,要求对其3 mm和7 mm两处厚度进行检验。首先根据图5中的曝光曲线和图6中的修正系数曲线找出两厚度对应的透照电压(78 kV和110 kV)和修正系数(1.3和1.6),再将此钛合金零件分别用真实X射线机、未经修正的仿真系统和经过修正的仿真系统在不同电压下进行透照,将三种透照方式所得结果拟合成三条曲线,如图7所示。

通过对图7两幅图的观察,可知修正后的黑度曲线与黑度曲线在黑度约为2.5处重合,且修正后的仿真曲线比修正前的仿真曲线在黑度为1.5~4时更加接近真实黑度曲线,从而验证出通过上述方法修正后,仿真图像黑度可更加接近真实胶片的黑度。为进一步证明此方法做出的修正系数曲线的可靠性,再用改变的射线机型号(ISOVOLT-450M/10)、胶片型号(AA400)、材料类型(铝合金)以及其它参数(如黑度,焦距,曝光量等)按上述步骤进行试验也得到了相似的结果。

#### 4 结论

通过对XRSIM软件仿真图像黑度与真实射线照相检测胶片黑度进行对比分析,提出一种以理想黑度2.5为基准的利用X射线机曝光曲线来制作XRSIM修正系数曲线的方法。实验证明,利用此方法制作出的修正系数曲线可将有效黑度范围内模拟软件计算得到的黑度与实际测得的黑度最大差值由1左右降低到0.3,使仿真图像黑度在可检测范围内比真实胶片黑度更加准确。

#### 参考文献:

[1] 孙朝明,王增勇.射线检测技术中的仿真技术发展[J].

无损检测,2009,31(9):475-478.

[2] 郑世才,赵起良.射线检测[M].北京:机械工业出版社,2004.

[3] 王倩妮,郭广平.射线检测计算机仿真技术在铸件检测中的应用[C]//全国第九届无损检测学术年会论文集.[S. l]:[s. n],2010:817-821.

[4] 李晓丽.X射线仿真软件及其应用[C]//全国射线数字成像与CT新技术论文集.[S. l]:[s. n],2009.

## 2013 世界声发射会议

### 1 会议名称

英文:World Conference on Acoustic Emission—2013,简称 WCAE2013

中文:2013 世界声发射会议

### 2 会议时间、地点

时间:2013 年 10 月 30 到 11 月 2 日

地点:上海徐汇区漕宝路 38 号上海华夏宾馆

### 4 会议论文提交日期

2013 年 7 月 31 日前 提交 300 字以内的摘要(英文)

2013 年 9 月 15 日前 提交 2 页长摘要(WORD 与 PDF 格式)

2013 年 10 月 30 日前 提交论文全文(WORD 与 PDF 格式)

### 5 会议出版物

2013 年 10 月 25 日会议论文摘要汇编

2014 年 2 月 28 日由美国 SPRINGER 正式出版会议论文集

### 6 会议费用

2013 年 9 月 15 日前注册:正式代表每人 2600RMB,学生/退休人员每人 2000RMB,随行人员每人 1000RMB;2013 年 9 月 15 日后注册:每人增加 400RMB。

7 会议官方网站: [www.wcacousticemission.org](http://www.wcacousticemission.org)