

文章编号: 0253-2239(2006)07-1016-5

# X 光图像中缺陷的自动提取方法研究\*

周 贤 刘义伦

(中南大学机电工程学院, 长沙 410075)

**摘要:** 针对炭素制品 X 光图像的特点, 对其缺陷的提取技术进行了研究, 提出了基于迭代的阈值构造方法和基于数学形态学的边缘提取算法。为快速准确地提取缺陷, 设计了目标边界提取算法和基于小波变换的图像增强算法, 实现了原始图像中目标区域的增强及其背景的去除。在此基础上, 为排除噪声干扰的影响, 采用数学形态学和迭代阈值分割相结合的方法从目标区域中提取出缺陷区域, 并在迭代阈值分割的基础上, 利用基于数学形态学的边缘提取算法提取了缺陷的边缘。实验结果表明, 该法很好地实现了缺陷区域及其边缘的自动提取, 且受噪声影响很小, 为进一步的缺陷特征参量的提取与选择奠定了良好的基础。

**关键词:** X 射线光学; 炭素制品; X 射线图像; 缺陷提取; 边缘检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## A Study of Automatic Extraction Method of Defects on X Image

Zhou Xian Liu Yilun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410075)

**Abstract:** Defect extraction techniques are studied regarding the characteristic of X-ray images of carbon product, and threshold-construction method based on iteration and edge-extraction algorithm based on mathematical morphology are advanced. In order to extract defects quickly and exactly, target boundary extraction algorithm and image enhancement algorithm based on wavelet transform are proposed, background removal and enhancement of object region are implemented successfully. Based on this method, combining mathematical morphology and iteration threshold segmentation is adopted to extract defect in order to eliminate the noise disturbance, and with iteration threshold segmentation, defect edge-extraction is realized based on edge-extraction algorithm of mathematical morphology. The experimental results indicate that the method can achieve automatic extraction of defect region and edge with weak noise disturbance, which lays a good foundation for flaw feature parameter extraction and choice.

**Key words:** X-ray optics; carbon product; X-ray image; defect extraction; edge detection

## 1 引 言

X 射线检测是炭素制品内部缺陷行之有效的定量检测方法<sup>[1]</sup>。在目前的生产实际中, 主要使用的是胶片照相机。随着生产技术的发展, 现代工业对于 X 射线的自动检测与识别技术的需求越来越迫切, 而准确有效地提取缺陷, 是实现 X 射线自动检测与识别的关键<sup>[2]</sup>。国内外很多学者都在这方面进行了有意义的探索和研究。将缺陷信息从 X 光图像中自动提取出来大致有两种方法。一是针对 X 光图像中存在较大的背景起伏这一特点, 先进行图像中的背景去除, 再选取合适的阈值进行缺陷的分

割<sup>[3,4]</sup>; 方法二则针对 X 光图像衬比度低的特点, 先对图像进行增强处理, 而后运用一些合适的检测和分割方法提取并分割出缺陷信息<sup>[5,6]</sup>。上述这些方法能够较好地 X 光图像中提取被测试件的缺陷, 但是对炭素制品的内部缺陷检测并未涉及, 且存在以下不足<sup>[7,8]</sup>: 1) 由工件的结构和图像噪声造成的误判率过高; 2) 缺乏通用性, 由于目标和背景之间的复杂程度不同, 所采取的检测方法也不同, 大多数方法都是针对特定的应用; 3) 处理时间长。

由于炭素材料的结构特征以及 X 射线检测本身的特点, 造成 X 光图像衬比度和信噪比低、缺陷

\* 湖南省教育厅重点科研项目(03A052)和企业横向项目(G1999064910)资助课题。

作者简介: 周 贤(1972~), 男, 湖南祁东人, 中南大学副教授, 博士研究生, 主要从事机械设计制造及其自动化方面的教学和科研工作。E-mail: zhouxian@csu.edu.cn

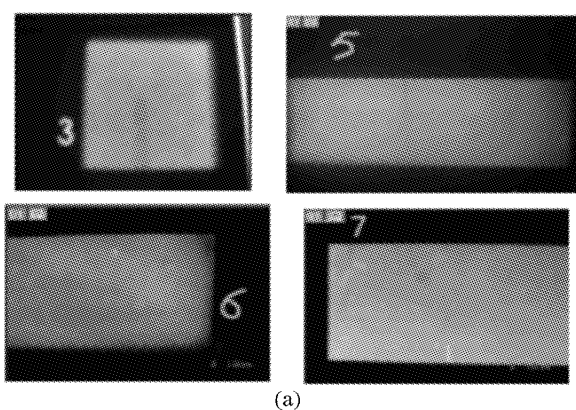
收稿日期: 2005-08-12; 收到修改稿日期: 2005-11-17

边缘模糊、存在较大的背景起伏,使得缺陷信息的正确提取成为这种技术中的一大难题<sup>[9,10]</sup>。本文通过对炭素材料 X 光图像以及不同检测方法的分析,提出在进行图像目标边界提取和图像增强的基础上,采用数学形态学和迭代阈值分割相结合的方法从原始图像中提取出缺陷区域,并在迭代阈值分割的基础上,利用基于数学形态学的边缘提取算法提取了缺陷的边缘。

## 2 图像预处理

### 2.1 目标区域的分割

图 1(a)所示为实验中拍摄的照片,为了保证采集的图像能够覆盖整个炭素制品,通常采集到的图像都会明显地大于炭块的大小。这样就会产生不需要的但又是检测时为准确采集到目标区域所留下的



(a)

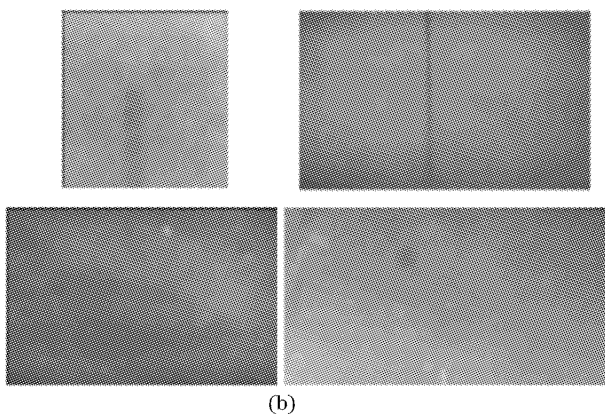
黑色背景。

这些背景无疑会大大加重运算负担,降低处理工作的效率;此外,在目标区域外可能会产生一些类似缺陷的点,其中一些点用一般的算法是无法区分的。因此,必须从图像中把目标区域(炭块)从黑色的背景中正确分割提取出来,而后续的缺陷提取可以限制在目标区域内进行。设计的目标边界提取算法如下:

1) 根据灰度值差别,找到图像中黑色背景和感兴趣区域的相交边界。

2) 沿相交边界进行剪切,完成感兴趣区域的分割提取。

采用 MATLAB 编程,得到的结果如图 2(b)所示。



(b)

图 1 带背景(a),背景去除后(b)的图像

Fig. 1 X-ray image with (a) and without (b) background

### 2.2 图像增强

背景去除后的图像,图像衬比度较差、缺陷边界模糊,成像质量相对较低。必须采用图像增强来改善图像的质量,使之更适合后续处理。为此,采用基于小波变换与传统方法融合的增强方法对目标区域分割后的图像进行处理,其算法如下:

1) 将原始图像采用直方图均衡化进行灰度调整,得到画面较亮、灰度较均匀的增强图像。

2) 由于 X 射线强度与工件厚度呈指数关系,因此 X 射线图像各像素间的灰度值也是指数关系,而非简单的线性关系。为强化弱边缘的衬比度,简化像素间的灰度关系,在进行小波变换之前,对图像的灰度进行对数变换。

3) 将增强后的图像进行二维小波分解,对每一层的高频系数采用软阈值增强,然后重构图像,消去随机的灰度不均点。

采用 MATLAB 编程,得到的图像增强结果如图 2 所示。

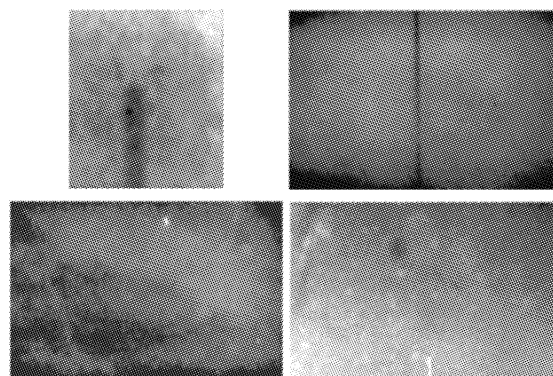


图 2 小波增强图像

Fig. 2 Wavelet enhanced image

4) 对图像进行空间卷积滤波,突出细节,平滑图面。通过目标区域分割及小波增强等预处理,图像

的质量大大改善,为后面的缺陷提取与识别打下了良好的基础。

### 3 缺陷的自动提取

#### 3.1 阈值的选取

如何确定最佳阈值是缺陷检测的关键。如果阈值选取太小,会把一些不是缺陷的像素也当作缺陷,造成误识;如果阈值选取的太大,则会把一些缺陷漏掉,造成漏识。

一般意义下,阈值运算可以看作是一种对图像中某点的灰度函数,或者该点的局部特性及该点在图像中的位置的检验,这种阈值函数可记作

$$T = T[x, y, N(x, y), f(x, y)], \quad (1)$$

在(1)式中,  $f(x, y)$  是对比图像中点  $(x, y)$  的灰度值;  $N(x, y)$  是点  $(x, y)$  邻域的某种局部性质(即区域内各像素的值,相邻像素值的关系等)。如果  $f(x, y) > T$ , 则该点为可疑点。根据对  $T$  的不同约束,可以得到三种不同类型的阈值,即:全局阈值(只与点的灰度值有关),局部阈值(与点的灰度值和该点的局部邻域特性有关),动态阈值(与点的位置、点的灰度值和该点的局部邻域特征有关)。

采用准确性高的基于迭代算法的全局阈值法。其阈值  $T$  只与点的灰度值  $f(x, y)$  有关,此时,阈值函数变为

$$T = T[f(x, y)], \quad (2)$$

相应的基于迭代算法的阈值表达式为

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right\}, \quad (3)$$

式中  $h_k$  为灰度为  $k$  值的像素个数,  $L$  为灰度级数。

迭代算法如下:

1) 选择图像灰度范围的中值为初始值  $T_0$ , 进行图像分割,产生子图像;

2) 根据子图像的特性,按(3)式来选取新的阈值,再用新的阈值分割图像;

3) 迭代一直进行到  $T_{i+1} = T_i$  结束,取结束时的  $T_i$  为阈值,使错误分割的图像像素点降到最少。

显然,这样做的效果好于用初始阈值  $T_0$  直接分割图像的效果。迭代算法能有效消除或减少噪声对灰度门限阈值  $T$  的影响,其原因如下。

设一幅混有噪声的图像  $g(x, y)$  是由原始图像  $f(x, y)$  和  $e(x, y)$  叠加而成,即

$$g(x, y) = f(x, y) + e(x, y). \quad (4)$$

由于噪声是随机作用于图像的像素点上,可以认为在分割出的目标  $g_1$  和背景  $g_2$  上噪声干扰仍为  $e(x, y)$ , 即

$$\begin{aligned} g_1(x, y) &= f_1(x, y) + e(x, y), \\ g_2(x, y) &= f_2(x, y) + e(x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

对分割出的图像分别求其灰度均值,则有

$$\begin{aligned} E\{g_1(x, y)\} &= E\{f_1(x, y) + e(x, y)\} = \\ &= E\{f_1(x, y)\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E\{g_2(x, y)\} &= E\{f_2(x, y) + e(x, y)\} = \\ &= E\{f_2(x, y)\}, \end{aligned} \quad (7)$$

上式说明,随着迭代次数的增加,平均灰度值将趋向于真值。因此,用迭代算法求得的最佳阈值几乎不受噪声干扰的影响。

根据迭代算法进行阈值分割处理后,目标图像(即小波增强图像)中的目标缺陷和背景根据灰度值的不同分为了两类,并被分别标记为白色和黑色,用二值来显示,如图3所示。

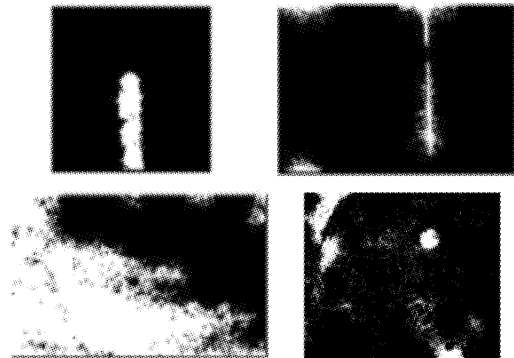


图3 经阈值分割处理后的二值图像

Fig. 3 Binary image of threshold segmentation

#### 3.2 伪缺陷的去除

虽然根据迭代法求得的最佳阈值几乎不受噪声干扰的影响,但仅仅根据最佳阈值来分割缺陷,还是会产生少量伪缺陷(噪声)。它们介于目标缺陷和背景之间,使目标缺陷的边缘变得模糊不清。缺陷和伪缺陷之间的区别就是缺陷点比较集中,而伪缺陷点分散且没有规律。可以根据缺陷点的集中程度这一几何结构的不同,用数学形态学图像处理技术判别该点为缺陷还是伪缺陷。具体算法如下:

1) 用  $b \times b$  的模板对整幅图像进行扫描。设定一个评价缺陷点集中度的函数,即

$$u = v \times b \times b, \quad (8)$$

其中  $v$  为预先设定的概率阈值,在  $0 \sim 1$  之间。在实际的应用中,  $v$  的值越大,去除的伪缺陷越多,但真

实缺陷被误去除的可能性也越大。

2) 设  $s$  为模板内可疑点的个数, 当  $s$  大于  $u$  时, 判断为缺陷, 否则判断为伪缺陷。

以图 3 中最后一幅图像为例, 采用数学形态学的方法去除伪缺陷:

1) 取 majority 参量用 BWMPH() 函数对图像进行了去噪声处理, 仅保留了 8 邻域内灰度值的和大于等于 5 的像素作为处理后的缺陷。结果如图 4(a) 所示。这一运算消除了大部分细微的干扰, 并且使图像边缘变得清晰。

2) 用 imclose() 函数对图像 4(a) 进行关闭运算, 来第二次去噪声, 如图 4(b) 所示, 图像中的大部分噪声被消除, 其余噪声也有不同程度的缩小。

3) 用 eliminate\_noise() 函数进行第三次去除噪声的处理, 其中, 模板取  $b=20$ , 概率阈值  $v=0.2$ , 如图 4(c) 所示。至此, 图像中的绝大多数噪声被消除, 如图 4(d)。

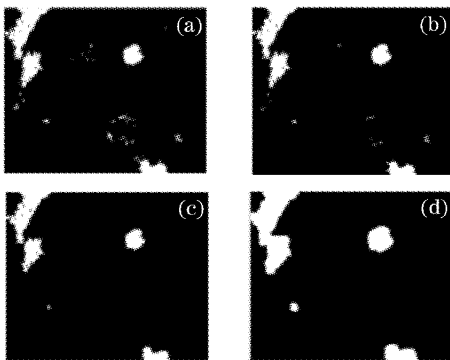


图 4 第一次(a), 第二次(b)去噪, 第三次(c), 可疑点的合并(d)

Fig4 Denoising for the first (a), the second (b), third time (c), combination of suspicious points (d)

### 3.3 缺陷的合并

缺陷中的可疑点分布相对稀疏的区域可能被误当作伪缺陷而去除掉, 使得原本是一个整体的缺陷分为两部分或者更多的部分。因此在进行去除噪声处理后应将被误分离的缺陷合并, 得到完整的缺陷区域。

把缺陷区域在空间上的位置作为合并可疑点的依据, 即如果几个可疑点在空间上的位置很接近的话, 就可合并。图 5 是两个可疑点(A 与 B)在空间的分布情况。设 A 在  $x$  方向上的长度为  $L_A$ , 在  $y$  方向上的长度为  $H_A$ , 中心坐标为  $(x_1, y_1)$ ; B 在  $x$  方向上的长度为  $L_B$ , 在  $y$  方向上的长度为  $H_B$ , 中心坐标为  $(x_2, y_2)$ 。则 A 与 B 在  $x, y$  方向上的接近程度分别为

$$\delta_x = |x_2 - x_1| - (L_A + L_B)/2, \quad (9)$$

$$\delta_y = |y_2 - y_1| - (H_A + H_B)/2, \quad (10)$$

显然, 当  $x_1 = x_2, y_1 = y_2$  时,  $\delta_x, \delta_y$  分别达到最小值  $-(L_A + L_B)/2, -(H_A + H_B)/2$ , 选取阈值为  $T_x, T_y$ 。如果

$$\delta_x < T_x, \quad \delta_y < T_y, \quad (11)$$

则可以认为 A 与 B 在空间位置上接近, 如图 6 所示。值得注意的是两个可疑点合并得到的新的缺陷区域必须是包含两个可疑点的最小矩形。

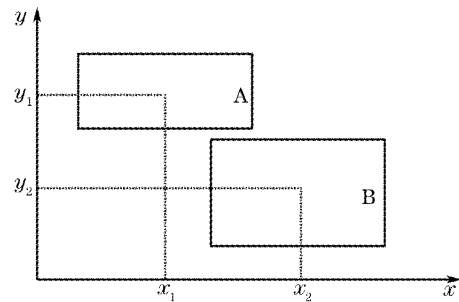


图 5 两个部分在空间的位置

Fig. 5 Position of two parts in space

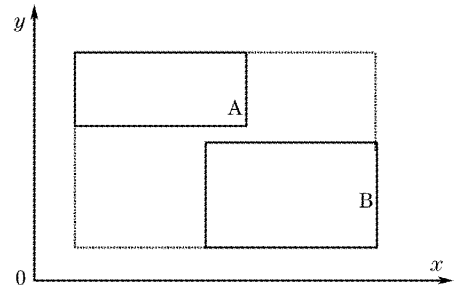


图 6 合并后的情况

Fig. 6 Combination instance

图 4(c) 中左上角的区域包含一个夹渣缺陷。该缺陷虽被分为两个可疑区域, 但这两个可疑区域中间的空隙并不大。按照上述方法判断处理, 如果满足(10)式, 则可采用数学形态学的方法, 适当放大每个可疑区域, 它们中间的空隙将减小甚至消失。当空隙消失时, 使得两个相近的可疑区域合并成一个, 合并的结果如图 4(d) 所示。至此, 缺陷的提取已经完成。一个夹渣缺陷和两个气孔已经被完整的分割出来, 可以作为缺陷样本输出。

### 3.4 二值图像的缺陷边缘提取

经过图像分割后, 原图变成二值图像, 缺陷边缘提取就变得相对简单。二值图像轮廓提取的算法就是挖去缺陷内部像素点, 最后剩余部分就是缺陷的边缘。对于二值图像, 设  $X$  为图像,  $B$  为结构元素,  $B_Z$  表示结构元素  $B$  平移  $Z$  后的结果,  $B^S$  代表结构

元素  $B$  关于原点的对称集合。

则腐蚀定义为:  $X \ominus B^s = \{Z; B_z \subseteq X\}$ ;

开运算定义为:  $X \circ B = (X \ominus B) \oplus B$ ;

闭运算定义为:  $X \cdot B = (X \oplus B) \ominus B$ 。

这样,就有数学形态学边缘提取算子:

$$ED(X) = X - (X \ominus B), \quad (12)$$

式中  $ED(X)$  为图像  $X$  的边缘。

采用 MATLAB 编程,得到如图 7 所示的边缘检测结果,其中基于数学形态学的边缘检测采用的结构元素为  $3 \times 3$  的圆盘结构。

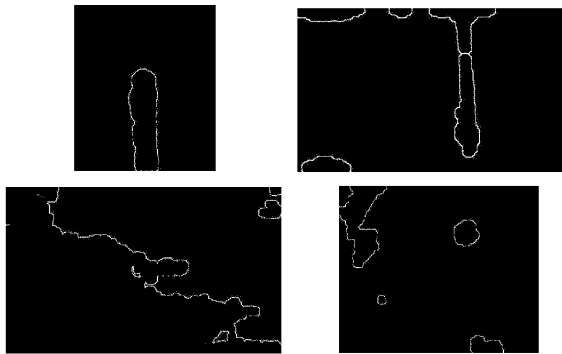


图 7 基于数学形态学的边缘检测

Fig. 7 Edge detection based on mathematical morphology

从图 7 可知,该方法检测到的缺陷边缘宽度仅为一个像素,因此具有较高的定位精度。同时,二值化处理后的图像具有完整的轮廓,所以轮廓提取检测到的边缘具有连续性。

## 4 结 论

目标边界算法能有效地切除图像背景,实现目标区域的提取;基于小波变换的图像增强算法能有效地增强衬比度差的细节部分,突出图像的边缘特征,改善了图像的质量,便于后续的缺陷提取。

缺陷提取取决于最佳分割阈值和像素本身的灰度值,迭代算法使最佳分割阈值几乎不受噪声影响,因此缺陷点完全由自身的灰度值确定,避免了噪声影响范围的扩大。

用数学形态学结合阈值法提取出的缺陷,能很好地保持缺陷原来的形状和大小。且该法并不局限于缺陷的类型与大小,可推广至其他类似 X 射线图

像中目标的提取和分割。

数学形态学的腐蚀算法保证了检测得到的缺陷边缘仅有一个像素的宽度,边缘定位精确。同时避免了边缘宽度增加而引起邻近缺陷边缘的重叠。能够提取完整的图像轮廓,使检测所得边缘具有连续性。即使缺陷的边缘比较模糊,也能通过阈值分割得到增强,运用腐蚀算法能可靠地提取边缘。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Xian, Liu Yilun, Gong Haifei *et al.*. A discussion on detection methods of carbon material flaws[J]. *Non-Destructive Testing*, 2005, **27**(3): 132~134 (in Chinese)  
周 贤,刘义伦,龚海飞等. 炭素材料内部缺陷检测方法的探讨[J]. *无损检测*, 2005, **27**(3): 132~134
- 2 Gang Tie, Wang Huangdong. Defect extraction of X-ray images based on adaptive morphology filtering[J]. *Chin. J. Mechanical Engineering*, 2001, **37**(5): 85~89 (in Chinese)  
刚 铁,王华东. 基于自适应形态学滤波的 X 射线图像的缺陷提取[J]. *机械工程学报*, 2001, **37**(5): 85~89
- 3 W. Daum, P. Rose, H. Heidt *et al.*. Automatic recognition of weld defects in X-ray inspection[J]. *British J. Non-Destructive Testing*, 1987, **29**(2): 79~82
- 4 A. Keboe, G. A. Parker. Image processing for industrial radiograph inspection; image enhancement [J]. *British J. Non-Destructive Testing*, 1990, **32**(4): 183~190
- 5 Katsumori Inoue, Masatoshi Sakai. Automation of inspection for weld-fundamental consideration[J]. *Transaction of Japan Weld Recognition*, 1985, **14**(1): 35~44
- 6 Gang Tie, Wang Huangdong. Defect extraction and segmentation automatically in X-ray inspection images[J]. *Weld*, 2001, (5): 6~10 (in Chinese)  
刚 铁,王华东. X 射线检测图像中缺陷的自动提取与分割[J]. *焊接*, 2001, (5): 6~10
- 7 Jiang Lihui, Zhao Chunhui, Wang Qi. Speckle noise suppressing based on a new nonlinear weighted averaging multidirectional morphological filtering algorithm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 81~84 (in Chinese)  
蒋立辉,赵春晖,王 骐. 用非线性加权均值多方向形态滤波算法抑制散斑噪声[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 81~84
- 8 Nie Shouping, Liu feng, Wang Hong. Region encode and region logical algorithm for object detection[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 185~189 (in Chinese)  
聂守平,刘 峰,王 弘. 目标检测的区域编码和区域逻辑运算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 185~189
- 9 Li Ping, Chen Rui. Ultrasonic nondestructive testing technique for graphite products [J]. *Carbon*, 1997, (4): 32~36 (in Chinese)  
李 平,陈 锐. 石墨制品的超声波无损检测技术[J]. *炭素*, 1997, (4): 32~36
- 10 Ren Dahai, You Zheng. The improvement of the image quality in radiography[J]. *Appearance Technology and Sensor*, 2001, (1): 36~37 (in Chinese)  
任大海,尤 政. X 射线检测中图像质量的改善[J]. *仪表技术与传感器*, 2001, (1): 36~37