

航空锻件的超声成像技术

蒋志峰^{1,2}, 陈继芳³

(1. 浙江科技学院机械与汽车工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江省计量科学研究院, 杭州 310013; 3. 秦山第三核电有限公司, 浙江海盐 314300)

摘要: 由于锻件表面不平整, 且厚度不均, 目前超声扫查系统普遍采用手工超声波探伤法检测锻件内部缺陷, 无法应用标准的 B 扫描成像和 C 扫描成像, 存在着效率低、探伤质量较差等不足之处。提出了以“厚度-灰度”超声检测为核心的基本成像过程, 包括路径规划、全波采样、信号处理、波形分析和缺陷扫描成像等方法, 并示例实现。该检测手段有助于促进航空锻件超声检测的智能化, 提高检测的效率和可靠性。

关键词: 超声成像; 缺陷识别; 锻件

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-02-0121-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.006

Ultrasonic imaging technology of aviation forged piece

JIANG Zhi-feng^{1,2}, CHEN Ji-fang³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310013, China; 3. The Third Qinshan Nuclear Power Company, Haiyan 314300, Zhejiang, China)

Abstract: Due to rough surface and thickness non-uniformity of forging pieces, manual ultrasonic testing has been commonly used in forging scanning system. As a result, low efficiency and poor quality are unavoidable for not being able to use the standard B-scan and C-scan imaging techniques. In this paper the ultrasonic testing methods of “depth-gray” imaging, which includes the path planning, full-wave sampling, signal processing, wave-form analysis and scanning imaging for flaw, is proposed, and thereafter illustrated with its promising effects in practical application. The approach is especially useful in promoting intelligence and automation of ultrasonic testing of aircraft forging and thereby improves the efficiency and reliability of testing.

Key words: ultrasonic imaging; flaw recognition; forge piece

1 引言

超声检测在航空锻件质量保证体系中起着重要的作用, 可降低航空锻件的制造成本。目前, 国内外的锻件扫查系统基本上采用手工超声波探伤, 劳动强度高, 效率低, 易出安全事故。由于探头不均匀扫描, 不可避免存在漏检, 探伤质量较差^[1], 并且只能进行波形 A 扫描显示, 不够直观。随着生产形势的发展, 探伤量逐年增加, 研制自动检测设备取代落后的人工探伤势在必行。开发一种适合于锻件的超声成像和缺陷识别方法将促进航空锻件超声检测的智能化和自动化, 提高检测效率和可靠性, 使锻件的发展能够适应航空工业发展的要求。

根据超声检测对象不同, 近年来出现了多种新的超声成像方法, 如振动声成像、兰姆波层析成像等^[2,3]。由于航空锻件表面不平整, 且厚度不均匀,

无法应用标准的 B 扫描成像和 C 扫描成像^[4,5]。为此, 提出了针对锻件超声检测的“厚度-灰度”超声成像法, 以便直观地识别出锻件内部缺陷。

2 锻件扫查策略和路径规划

在超声机械扫描成像的过程中, 声束需要作一维、二维或更多维的扫描。扫查路径规划一方面要保证自动扫查的效率, 另一方面要保证待检区域都被扫查到, 没有漏检, 并且能够接收到足够强度的超声反射信号。一般情况下, 只要保证按照采样间距均匀布置采样点, 就能保证扫查效率和没有漏检。但是在工件表面存在曲面的情况下, 曲率大的地方会造成超声波散射。

航空锻件表面是多个平面和曲面的组合, 在平面和平面之间一般用过渡曲面相连, 一般情况下过渡曲面的曲率都不是很大。锻件检测属于原材料检测, 要求有比较高的检测效率^[1,6], 在虚拟仪器架构下, 系统采用的高性能工业控制计算机能够满足实时信号处理的要求^[7,8]。综合考虑以上因素, 锻件自

收稿日期: 2008-01-09; 修回日期: 2008-05-12

作者简介: 蒋志峰(1965-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为检测与机电一体化。

通讯作者: 蒋志峰, E-mail: jzf-hz@163.com

动检测系统采用扫查方法是：不进行曲面造型，超声探头只进行设定矩形范围内的平面扫描，由计算机实现超声信号的补偿和波形的动态跟踪。这样效率高，操作简单。

平面扫查的路径规划比较简单，一般情况下平面扫查区域可以用低方次的数学方程加以描述，扫查过程也可以由两个或多个自由度的线性或低方次曲线进动实现。

3 锻件界面回波和锻件缺陷扫描成像

在锻件自动检测过程中，系统得到的是超声采样信号，波形分析由计算机自动完成。这样就降低了对检测人员的要求，增加了超声检测的可靠性，但同时需要建立一套计算机超声波形分析的理论 and 算法。需要分析和实时演算的参数包括界面回波位置、界面回波宽度、底波位置、底波高度、工件厚度、缺陷分析区间、缺陷波高与位置等。

3.1 有效分析区间

确定分析区间，也就是超声波形的采样区间，是波形分析的基础。如果分析区间过大，会造成耗用计算机资源，增加了高速采样负荷，同时垃圾数据过多也会对分析工作造成干扰；分析区间过小，则会使得有效信息丢失，造成漏判、误判。

采用水浸法时，由于近场盲区超声信号强烈而杂乱，并不包含有效信息，因此必须把近场盲区排除在有效分析区间之外。界面回波表征了工件入射点的超声反射信息，因此必须保证所有可能的界面回波都包含在分析区间内，水深距最小时的界面回波必须在分析区间内。在盲区和界面回波之间是水深距，不包含有效信息，因此分析区间的起始点应尽可能地靠近最近点界面回波，并保证一定的安全余量。

底波和界面回波之间包含了工件内部的超声反射信息。缺陷分析区间也在底波和界面回波之间。因此，分析区间的终点应选在所有可能的底波之后。为了保证二次反射界面回波污染分析区间，必须调整水深距使得二次反射波在底波之后。分析区间终点选在底波和二次反射波之间，并尽可能地靠近底反射波。

分析区间的确定如图 1 所示。分析区间之前波形采用软件延迟技术，以便能够精确计算界面回波、底波位置，并减少采样长度。分析区间之后波形可以根据情况决定是否采样、显示和保存，以便提供给检测人员作为判废时候的参考。

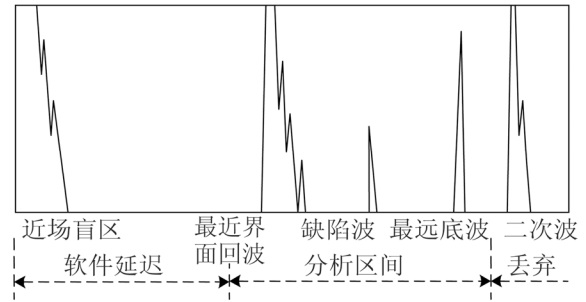


图 1 分析区间的确定

Fig.1 Definition of the analytic zone

3.2 界面回波跟踪、检峰与测厚

由于锻件的表面是凹凸不平的，因此在超声检测过程中，界面回波的位置也是不断变化的。必须确定界面回波的起始位置和宽度，才能确定演算工件厚度、确定缺陷计算区间。

对于界面回波起始位置的确定相对比较简单。因为界面回波的能量相当大，其峰值在正常情况下会超出显示屏幕，并且波形起始处显得比较陡。所以只要当分析区间内某一值最先超过阈值，就可以认为该点为界面回波起始点。

因为受超声换能器性质和工件表面性质影响，如表面粗糙、有气泡等，界面回波会出现多个相邻的波峰的，这给确定界面回波的宽度带来了困难。因为界面回波宽度与缺陷计算区间相关，如果宽度被估计小了则容易把始波当作缺陷波处理，造成误判；如果宽度估计过大，则会造成近表面缺陷漏检。一般利用 J-K 法对波形的上升沿、波峰、下降沿进行分析^[9,10]。该方法能够顺利地找到上升沿或者下降沿，但是对多峰情况考虑不足，容易造成误判。

为此可通过平均值法查找始波终止点，当始波起始点找到以后，计算机检查后续若干点的平均值。计算长度由计算机根据当前采样频率、工件类型自动确定。当平均值低于某一阈值时候，认为界面回波终止。该阈值必须比缺陷阈值小，并大于超声信号直流偏移后的平均值。该方法对缺陷计算区间造成的损失就是平均值的计算长度，大约在几十个采样点以内，属于允许误差范围内。

对界面回波进行跟踪并得到界面回波的起始点和宽度以后，便可以确定缺陷计算区间。

从界面回波终止点开始，如果某一点的峰值超过了缺陷阈值，那么该反射波可能是缺陷反射波、也可能是底反射波。如果是底反射波，那么当前点的位置就是底波的位置，底波位置和界面回波位置相减就得到了两者的采样点间隔，并可以根据采样频率得到两者的渡越时间，从而换算出工件厚度。如果是缺陷反射波，那么当前点的位置就是缺陷波

的位置, 同理就可以得到缺陷到工件表面的距离。这是本文锻件基于“厚度-灰度”成像的基础。

3.3 锻件界面波扫描成像

在锻件扫查过程中, 界面回波不包含缺陷信息, 所以界面回波成像不能作为判废依据。但是界面回波表征了锻件表面超声入射点到超声换能器的距离和反射状况。对界面回波进行扫描成像, 能够得到锻件的表面形状和外部轮廓。

界面回波一定处在分析区间内。这样, 就可以用界面回波在分析区间内所处的位置为特征进行成像。如果把整个分析区间长度映射到一个灰度空间, 那么界面回波在分析区间内的某一个位置就对应了一个灰度值。灰度值大小为 0~255, 显示为最暗黑色到最亮白色的灰度, 值越小则越暗, 用该方法成像显示为灰度图^[11,12]。其数学表征为:

$$\text{界面回波特征灰度值} = \frac{\text{界面回波波位}}{\text{分析区间长度}} \times 255$$

图 2 是对某锻件进行界面回波成像的结果。其灰度变化反应了工件表面的形状变化, 并且工件的外形轮廓也相当的清晰。



图 2 界面回波位置特征成像
Fig.2 Feature imaging of boundary-wave location

3.4 锻件缺陷扫描成像

由于锻件形状复杂、厚度不均, 缺陷计算区间不是固定的, 因此传统的 C 扫描成像很难实现。为此, 本文对 C 扫描成像方法加以改进, 设计了基于“厚度-灰度”变化的锻件缺陷成像方法。

对扫描过程中分析区间内的波形进行界面回波跟踪和检峰处理, 总共有四种可能的情况(图 3)。

(a) 无缺陷波。这是超声波在工件上方入射时候的正常波形。此时通过波形分析可以得到界面波的位置和底波位置, 并由此可以得到入射点处的工件厚度。

(b) 有缺陷波。当入射点处工件有缺陷时, 在界面回波和底波之间出现缺陷波。界面回波和缺陷波之间的距离即为缺陷深度。

(c) 有界面回波无底波。在工件入射面或底面某些曲率比较大的入射点上, 因为超声信号损失比较大, 可能找不到底波。在工件边缘也可能因为能

量损失致使底波不够强烈。

(d) 没有有效波形。扫描过程中当超声探头不在工件上方时, 由于没有反射面, 超声探头接收不到有效波形。

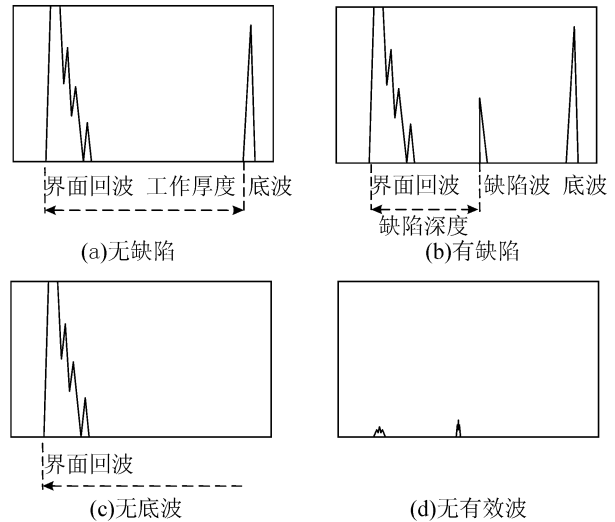


图 3 波形分析
Fig.3 Wave-form analysis

由图 3 分析可知, 可以用界面回波和后续一个有效波形之间的距离作为特征量进行成像。在正常情况图 3(a)下, 该特征量表征了入射点的工件厚度; 在有缺陷波的图 3(b)情况下, 该特征量表征了入射点处靠近表面的第一个缺陷的埋藏深度; 在图 3(c)、(d)两种情况下, 因为没有足够的有效信息, 没有底波或者界面回波, 该特征量没有意义。

把工件的最大厚度映射到一个灰度空间, 那么正常情况下灰度大小表征了厚度的大小, 而由于缺陷埋藏深度一定小于工件厚度, 所以在有缺陷的区域灰度值会出现突变, 这是缺陷识别的基础。没有波形的地方对应图像的背景色。其数学表征为^[11]:

$$\text{特征灰度值} = \frac{\text{界面波与最近的波之间距离}}{\text{最大厚度}} \times 255$$

图 4 是对一个工件进行超声成像的结果, 图中坐标单位为 mm。工件中部有一个层孔, 图像上该区域很暗(灰度值很小)。在工件的左侧有两个尺寸分别为 $\phi 1\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的两个缺

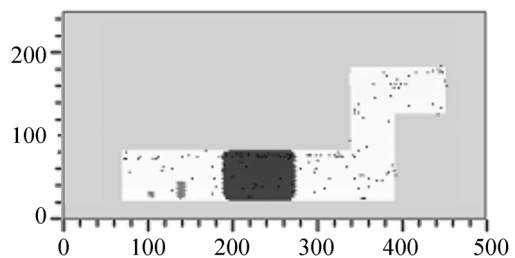


图 4 “厚度-灰度”特征成像
Fig.4 “Depth-gray” feature imaging

陷,较暗(灰度值也较小),在图中能够用肉眼明显的识别出来。

4 结论

以“厚度-灰度”超声成像为核心的基本成像过程,包括了路径规划、全波采样、信号处理、波形分析和缺陷扫描成像等方法。在自行研制的航空锻件超声检测系统上所进行的初步实验研究表明该检测手段的可行性,在正确的理论模型指导下,将促进航空锻件超声检测的智能化和自动化,提高检测效率和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 刘明军,张建国,魏国平. 锻造过程质量控制与检验读本[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
LIU Mingjun, ZHANG Jianguo, WEI Guoping. Reading of quality control and inspection for forging process[M]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [2] 何培忠,夏荣民,段世梅,等. 一种新的超声成像方法-振动声成像[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 34-38.
HE Peizhong, XIA Rongmin, DUAN Shimei, et al. A new ultrasound imaging method: vibro-acoustography[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 34-38.
- [3] 张海燕,吕东辉,袁瀚贝. 超声检测中的兰姆波层析成像[J]. 声学技术, 2004, 23(3): 138-140.
ZHANG Haiyan, LU Donghui, YUAN Hanbei. Lamb wave tomography in ultrasonic testing[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(3): 138-140.
- [4] 罗雄彪,陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 148-152.
LOU Xiongbiao, CHEN Tiequn. Development of ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(3): 148-152.
- [5] 毛捷,简晓明,李明轩,等. 信号处理在超声检测中的应用[J]. 应用声学, 2000, 19(3): 45-47.
MAO Jie, JIAN Xiaoming, LI Mingxuan, et al. Applications of signal processing in ultrasonic testing[J]. Applied Acoustics, 2000, 19(3): 45-47.
- [6] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Nondestructive Testing Institution of Chinese Mechanical Engineering Society. Ultrasonic testing, 2nd ed[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [7] 马宏伟,杨平. 智能化超声检测高速数据采集系统[J]. 制造业自动化, 2001, 23(4): 43-45.
MA Hongwei, YANG Ping. The intelligence system of ultrasonic high-speed data acquisition[J]. Manufacturing Automation, 2001, 23(4): 43-45.
- [8] Jarmulak J, Kerckhoffs E J H, et al. Case-based reasoning for interpretation of data from non-destructive testing[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14(4): 401-417.
- [9] 吴德新,杨小林. 超声检测中的波形识别与缺陷定性[J]. 无损检测, 2002, 24(7): 312-314.
WU Dexin, YANG Xiaolin. Identification of waveforms and defects in ultrasonic inspection[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(7): 312-314.
- [10] 吕炎. 锻件缺陷分析与对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
LU Yan. Analysis and countermeasures of forging defects[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [11] 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
HE Bin, MA Tianyu, WANG Yunjian, et al. Visual C++ digital image processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2002.
- [12] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Gonzalez R C. Digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.