• 应力控制与理化测试技术 Stress Control and Physicochemical Testing Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.025

GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷超声相控阵检测信号的小波降噪研究

汪洪量,蒋诗超,潘 峥,朱国胜,郭 涛
(国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241000)

摘 要:针对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷的相控阵超声检测技术,分析了检测信号,采用一种随分解尺度变化的阈值设置准则对检测信号进行小波降噪处理以提高信噪比。结果表明,该方法可在较好保留盘件微小缺陷信号的同时滤除噪声信号,有效的提高了相控阵超声检测信号信噪比,对于提高 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷的相控阵超声检测能力具有重要作用。

关键词:微小缺陷;相控阵超声检测;小波降噪;信噪比

中图分类号:TG132.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)10-1121-04

Study on Wavelet De-noising Detective Signal of Micro Defect in Complicated Area of GH901 High Temperature Alloy Discs Tested by Ultrasonic Phased Array

WANG Hongliang, JIANG Shichao, PAN Zheng, ZHU Guosheng, GUO Tao
(State-owned Wuhu Machinery Factory, Wu'hu 241000, China)

Abstract: Phase array ultrasonic detection technology for micro defects in complex areas of GH901 superalloy disk parts was used to analyze the detection signal. In order to improve the signal-to-noise ratio (SNR), the wavelet denoising method was applied to the detection signal. The results show that the proposed method can effectively improve the signal-to-noise ratio of phased array ultrasonic detection signals while retaining the small defect signals of disk parts. It plays an important role in improving the capability of phased array ultrasonic detection of micro defects in complex areas of GH901 superalloy disk parts.

Key words: micro defects; phased array ultrasonic testing; wavelet noise reduction; signal to noise ratio

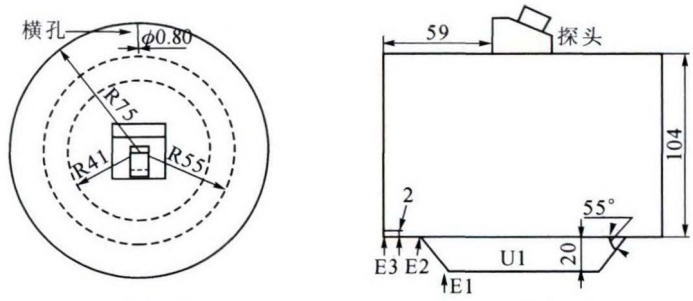
GH901 高温合金作为航空发动机核心部件材料,即使其存在微小缺陷也可能酿成严重后果。相控阵超声检测技术因具有声束变角、深度变焦以及多种成像模式等诸多优点,已用于检测聚乙烯管道、航空涡轮盘、铁轨、车轮轴[1-5]等。在采用相控阵超声检测技术对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷检测时,仪器电噪声以及材料晶粒散射噪声将严重影响检测信号,甚至微小缺陷信号可能湮没于噪声中导致无法识别[6]。因此,抑制检测信号中的噪声信号对提高检测精度具有重要作用。小波变换能实现在多分辨率下分解信号,且不断的滤除频率相对较高的频带上分量并保存这些分量以进行检测信号的重构,已被大量用于超声检测信号的分析与处理[7-9]。采用小波分解技术对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷相控阵超声检测信号进行降噪处理,基于统一阈值提出一种随分解尺度变化的阈值设置准则处理检测信号。

1 检测方法及检测信号分析

1.1 试验方法及试样制备

检测试样为高 124 mm,直径为 150 mm 的 GH901 高温合金锻件,在锻件一端加工一个高度为 20 mm、与加工面成 55°夹角、上下底面半径分别为 41 mm 和 55 mm 的锥形平台,同时在距锥形台面下底面 2 mm 处加工一个深度为 10 mm、直径为 0.8 mm 的圆孔以模拟涡轮盘复杂区域微小缺陷,如图 1 所示。采用频率为 5 MHz、阵元间距为 0.5 mm、阵元长度为 10 mm、阵元数为 32 的相控阵超声探头,为实现多角度扫查,安装了 38°的楔块。为检测 GH901 高温合金锻件中深度为 102 mm 的横孔,设置阵元数为 32、聚焦深度为 102 mm、扇扫范围为 5°~50°,将探头置于与横孔相对的端面且楔快前端与锻件边

收稿日期:2019-06-23
作者简介:汪洪量(1990-),安徽绩溪人,学士,助理工程师.主要从事金属超声检测方面的工作.
电话:18255330609,E-mail:530100934@qq.com



(a)俯视图　　(b)侧视图

图 1 检测试样及试验方法(单位:mm)

Fig.1 Test specimen and method

缘相距 59 mm,扫查角度设置为 38°,此时探头可较好接收到横孔缺陷信号。为与无缺陷位置检测信号做对比，在不改变试验参数将探头顺时针旋转 5°,得到无缺陷位置信号。

1.2 检测信号分析

图 2 为扫查角为 38°下不同位置相控阵超声检测信号。可以看出,图 2(a)、(b)分别为含缺陷、无缺陷处检测信号。其中,端部 E3 的反射信号 SE3 位于 36.67 μs 处,横孔反射信号 SK1 位于 36.26 μs 且紧挨端部 E3 的反射信号 SE3 以至于两者很难区分。此外,由于仪器电噪声以及材料晶粒散射噪声对缺陷信号产生较大干扰,因此,采用小波分解技术对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷相控阵超声检测信号进行降噪处理,以提高 GH901 盘件检测信号质量。

为比较相控阵超声检测信号降噪前后结果,以信噪比作为相控阵超声检测信号降噪结果度量值,信噪比公式为[10]:

$$\mathrm{SNR}=20\lg\frac{|A|}{|B|} \tag{1}$$

式中,A 为盘件缺陷反射波最大幅值,B 为噪声信号最大幅值。

计算出含缺陷相控阵超声检测信号信噪比为 22.55 dB。

2 盘件中微小缺陷相控阵超声检测信号的小波降噪原理及方法

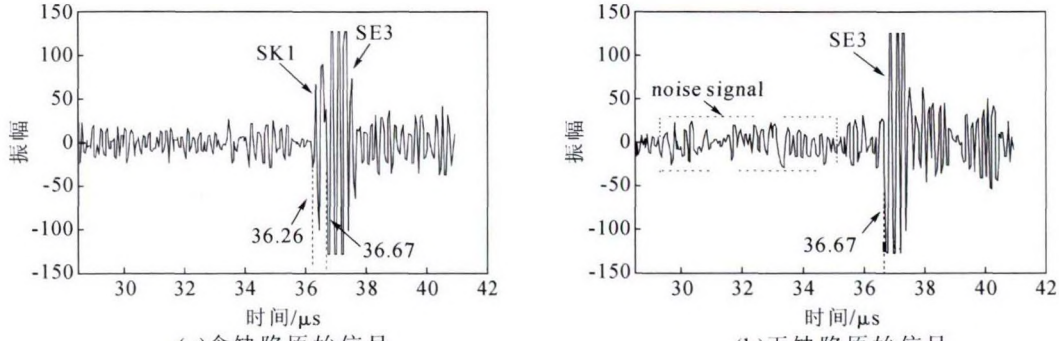
2.1 小波降噪原理

小波分析由于其具有对低频部分频率分辨率较高、时间分辨率低,而对高频部分时间分辨率高、频率分辨率低的特点，因此其对非平稳信号具有很好的自适应性以及分析能力。GH901 高温合金盘件相控阵超声检测信号由有用信号和噪声信号构成,其中有用信号通常位于低频部分且在频域中能量较为集中，故而有用信号经小波分解后小波系数绝对值通常较大；而噪声信号通常位于高频部分且在频域中能量较弱，故而噪声信号经小波分解后小波系数绝对值较小。小波降噪的原理就是将信号进行小波分解,通过设定合理阈值,将低于该阈值的小波分解系数置 0,高于该阈值的小波分解系数则保留,最后将处理后的小波系数进行重构以实现信号的降噪处理。

小波降噪基本步骤如下:

(1)选择合适的小波基以及分解层数对相控阵超声检测信号进行小波变换以得到各层的小波系数。

(2)设置一个合适的阈值作为门槛,对相控阵超声检测信号各层高频系数进行处理。



(a)含缺陷原始信号　　(b)无缺陷原始信号

图 2 盘件不同位置相控阵超声检测信号

Fig.2 Phased array ultrasonic detection signals at different positions of the disk

(3)将处理后的相控阵超声检测信号各高频系数以及最后一层的低频系数进行重构以得到降噪后的信号。

2.2 小波降噪方法

选择“db3”小波基对相控阵超声检测信号进行3层小波分解，如图3所示。其中，S为原始信号，CA1~CA3分别为第一至第三层低频部分、CD1~CD3分别为第一至第三高频部分。

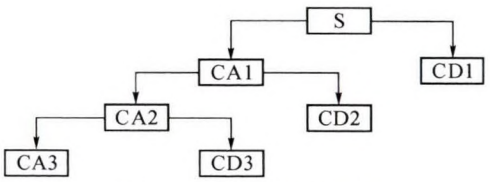


图3 三层小波分解示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-layer wavelet decomposition

阈值函数的选取对信号降噪效果影响很大，目前主要为硬、软阈值，其基本原理为[10]：

硬阈值：

$$\hat{\omega}_{jk}=\begin{cases}\omega_{jk} & |\omega_{jk}|\geqslant\lambda\\ 0 & |\omega_{jk}|<\lambda\end{cases} \tag{2}$$

软阈值：

$$\hat{\omega}_{jk}=\begin{cases}\mathrm{sgn}(\omega_{jk})(|\omega_{jk}|-\lambda) & |\omega_{jk}|\geqslant\lambda\\ 0 & |\omega_{jk}|<\lambda\end{cases} \tag{3}$$

式中，λ 为设置阈值，ω_{jk} 为小波分解系数，$\hat{\omega}_{jk}$ 为阈值处理后的小波分解系数，$\mathrm{gn}(\omega_{jk})$则为符号函数。

选择合适的阈值对降噪十分重要，阈值过大可将有用信号滤除，反之阈值过小噪声信号不能除尽。Donoho提出了一种主要针对多维对立正态变量联合分布的名为Sqtwolog阈值[11]，阈值定义为：

$$\lambda=\sigma\sqrt{2\ln(N)} \tag{4}$$

$$\sigma=\sqrt{\mathrm{median}(|fi|)/0.674\,5} \tag{5}$$

式中，f_i 是最低分解尺度下的小波分解系数，median为函数中值，λ 为设置阈值，σ 为高斯白噪声标准差，N 为被处理信号长度。

据式(4)、式(5)可知，Sqtwolog阈值为一固定值，显然用该阈值对各尺度下相控阵超声检测信号小波分解系数处理并不够合理，因此，本研究基于Sqtwolog阈值提出一种随分解尺度(j)变化的阈值设置准则对检测信号进行小波降噪处理以提高信噪比，其表达式为：

$$\lambda=\frac{\sigma\sqrt{2\ln(N)}}{\lg(j+1)} \tag{6}$$

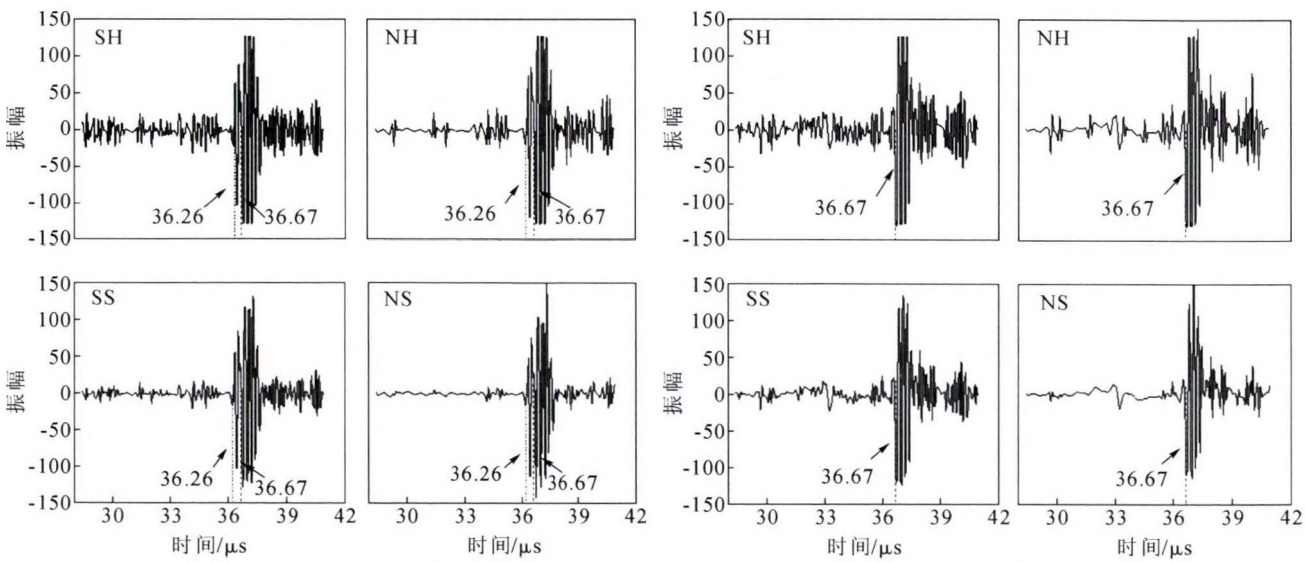
据式(4)~式(6)，采用两种阈值对GH901高温合金盘件相控阵超声检测信号进行降噪处理，并对比硬、软阈值函数的降噪效果，降噪结果如图4所示，图4(a)为含缺陷的检测信号降噪结果，图4(b)为无缺陷的检测信号降噪结果。结果显示：四种降噪参数组合均能抑制噪声信号的同时较好保留有用信号。将四种降噪参数组合进行编号，如表1所示。

表1 降噪参数组合编号

Tab.1 Combination number of noise reduction parameters

	Sqtwolog	New
硬阀值	SH	NH
软阀值	SS	NS

为进一步说明降噪效果，据公式(1)计算出各降噪参数组合下含缺陷信号信噪比如表2所示。结果



(a)含缺陷处小波降噪信号　　(b)无缺陷处小波降噪信号

图4 检测信号的小波降噪效果

Fig.4 Detection signal wavelet noise reduction effect

表 2 各组合参数小波降噪结果

Tab.2 Wavelet denoising results of each combination parameter

	SH	SS	NH	NS
SNR/dB	25.15	31.06	27.4	46.74

显示，阈值相同，软阈值降噪效果更佳；阈值函数相同，提出的一种随分解尺度变化的阈值降噪效果更佳。

3 结论

针对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷相控阵超声检测信号，基于 Sqtwolog 阈值提出一种随分解尺度变化的阈值设置准则对检测信号进行小波降噪处理以提高信噪比。降噪结果表明，采用本方法降噪效果明显，且选择软阈值降噪效果更佳，这对 GH901 高温合金盘件复杂区域微小缺陷的检测具有重要意义。

参考文献：

[1] 单宝华，喻言，欧进萍. 超声相控阵检测技术及其应用[J]. 无损检测，2004，26(5): 235-238.

[2] 王少军，裘爱东，宋盼，等. 埋地聚乙烯管道热熔接头的超声相控阵检测[J]. 无损检测，2017，39(5): 21-23.

[3] 危荃，邬冠华，吴伟，等. 钛合金厚板焊缝超声相控阵信号和图像的特征与识别[J].无损检测，2008，30(8): 540-542.

[4] LAO J, LU C. Application of portable Ultrasonic Phased Array Instrument for Rail Welds Ultrasonic Inspection [C]. 2013 2nd International Conference on Key Engineering Materials and Computer Science (KEMCS 2013 Ⅱ), Melbourne, Australia: 2013, 384-389.

[5] 陈昌华，汤志贵，陈能进，等. 列车车轮缺陷的超声波相控阵分析[J]. 物理测试，2012，30(1): 34-39.

[6] 卢超，任吉林，唐昊. 高温合金中微小超声检测信号的小波去噪研究[J]. 信号处理，2003，19(2): 174-178.

[7] 陈朝阳. 基于小波变换的超声检测信号降噪处理技术 [J]. 福建电力与电工，2005(4):20-22.

[8] 王群，宋文爱. 在超声检测中利用小波分析降噪并提取伤信号[J]. 科技情报开发与经济，2005(3):186-187.

[9] 马驰，岳艳侠，肖兴明. 超声波检测中的小波降噪[J]. 数据采集与处理，2006(S1):44-46.

[10] 段永刚，马立元，李永军，等. 基于小波分析的改进软阈值去噪算法[J]. 科学技术与工程，2010，10(23): 5755-5758.

[11] Donoho D. L. De-Noising by Soft-Thresholding[J]. IEEE Trans. On IT, May 1995, 41(3): 612-627.

RX 榕霞

福建省榕霞石英砂有限责任公司
漳浦县榕霞矿业开发有限公司

公司简介
Company

我公司创办于1976年，是国内较早从事石英砂系列产品生产、销售一体化经营的综合性企业。公司拥有丰富的优质石英砂矿产资源，矿区面积1000多亩，年开采量可达40万吨。公司生产的石英砂产品具有SiO2含量高，含泥量低、角形系数小等特点，是高品位的天然石英砂。

"榕霞"天然石英砂系列产品现广泛应用于国内铸造行业、机械制造行业、全国各水处理行业及玻璃制造、钢铁冶金行业等，质量达到国际先进水平。公司已通过ISO9001、ISO14001管理体系认证，先进的生产工艺及完善的品质保障体系确保了产品质量的长期稳定，专业的销售团队为客户提供优质完善的售后服务。

产品主要理化性能

Sio2 > 98%	角形系数 < 1.3
灼烧减量 < 0.5%	含泥量 < 0.3%
含水量(干砂) < 0.2%	耐温 > 1700℃

地址:福建省晋江市金井　电话:0595-85332410 85332410　传真:0595-85331410　www.rxsgy.com　E-mail:rxsgy@163.com