

# 基于多晶材料超声背向散射信号 时频域特征的识别方法

刘 昱<sup>1</sup>, 贺西平<sup>1</sup>, 贺升平<sup>2</sup>, 周 越<sup>1</sup>, 王 杰<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院 陕西省超声重点实验室, 西安 710000)

(2. 泸州高新技术研究所, 泸州 646000)

**摘 要:** 利用多晶材料微结构差异对超声波传播的影响特性, 提出了一种计算超声回波信号特征量的算法, 根据拉依达准则设定了识别阈值并编译了识别程序。采用所提方法对金属材料和陶瓷材料样品进行超声检测试验。试验结果表明, 该方法可对材料和尺寸完全一致的样品实现准确识别。

**关键词:** 超声识别; 超声背向散射; 晶粒尺寸; 拉依达准则

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)06-0012-05

## Identification method based on time and frequency domain features of ultrasonic backscattering signals of polycrystalline materials

LIU Yu<sup>1</sup>, HE Xiping<sup>1</sup>, HE Shengping<sup>2</sup>, ZHOU Yue<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonic, College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Luzhou High-tech Research Institute, Luzhou 646000, China)

**Abstract:** An algorithm for calculating the features of ultrasonic echo signals was proposed based on the influence characteristic of the microstructure difference of polycrystalline materials on ultrasonic waves. The recognition threshold was determined according to the Pauta criterion and the identification algorithm was compiled as an application program. The ultrasonic identification experiments were carried on the samples of metal materials and ceramic materials. The results showed the objects with the same materials and sizes can be identified accurately.

**Key words:** ultrasonic identification; ultrasonic backscattering; grain size; pauta criterion

当今, 超声技术已被广泛应用在工业的各个领域。针对日益棘手的伪造偷换现象, 利用超声技术对不同材料进行防伪识别, 是超声检测领域的一个新方向<sup>[1]</sup>。近年来我国对外交流不断加强, 一些文物、重要设备、贵重物品等也经常走出国门参与交流, 物品识别就显得尤为重要。

超声识别的方法有很多, 如背向散射、衰减系数、频谱分析等方法<sup>[2]</sup>。安笑笑等<sup>[3]</sup>利用超声波在物体内部传播时产生的背向散射信号信息, 计算了待识别陶瓷材料的背向散射信号与标准陶瓷材料的背向散射信号之间的加权欧式距离, 对其进行比较从而完成了材料的识别。贺西平等<sup>[4]</sup>基于金属材料散射信号衰减谱的相关系数计算方法, 成功地对成分相近的金属材料进行了识别。但由于阈值计算方法以及探头位置固定方法不完善, 测量结果会出现偏差。刘小荣等<sup>[5]</sup>研究了金属材料的微观组织对超声衰减的影响, 并利用金属间超声衰减谱相关系数, 对成分相近、热处理温度相同以及成分相同但热处理温度不同的多个金属材料进行了识别。

收稿日期: 2022-10-25

基金项目: 装备预研共用技术项目 (XXXXX040302); 国家自然科学基金项目 (12174241)

作者简介: 刘 昱 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超声信号处理

通信作者: 贺西平 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声检测和功率超声, Hexiping@snnu.edu.cn

笔者提出了一种计算超声信号特征量的算法,根据拉依达准则设定了识别阈值,利用 MATLAB 软件将特征量算法和阈值编译成超声识别程序,并对陶瓷样品和金属样品进行了识别。试验结果表明,笔者提出的超声识别方法可有效识别出各类样品。

### 1 识别原理

超声波的声速、衰减、背向散射等声参量与多晶材料晶粒的排列、尺寸和分布等微观特征密切相关<sup>[6]</sup>。多晶材料中超声衰减主要由晶粒尺寸决定,超声衰减随晶粒尺寸的增大而急剧增大,而超声纵向速度和剪切速度则会受相含量和晶粒尺寸的影响<sup>[7]</sup>。多晶材料晶粒的尺寸和排列方向是无规律的,超声回波信号能敏感地反映出其中的差异,多晶材料无规律的微观结构会导致相同材料的若干个体的超声信号出现不同程度的背向散射<sup>[8-10]</sup>,基于此,可利用超声波对其进行识别。

### 2 识别算法

选取若干材料相同的样品并依次编号为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 等。在这些样品中选择一个样品作为“目标样品”,其他样品则为“干扰样品”。

采集“目标样品”的超声回波信号,为减小各类误差,采集时需在同一位置采集  $M$  次超声信号(取  $M=20$ )。所采集到的时域超声信号记为  $X$ ,  $N$  为采样点数,每个采样点的超声信号幅值记为  $X_n$ ,  $n=1,2,3,\dots,N$ 。

首先,对  $X$  做归一化处理,即

$$S_n = \frac{X_n - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: $S_n$  为归一化处理结果; $X_{\min}$  为超声信号最小幅值; $X_{\max}$  为超声信号最大幅值。

然后计算时域信号序列的幅值特征参量  $V_m$  ( $m=1,2,3,\dots,M$ ),即

$$V_m = S_n \sqrt{\sum_{n=1}^N S_n^2} \quad (2)$$

接着,计算  $V_m$  的平均值  $V$ ,即

$$V = \left( \sum_{m=1}^M V_m \right) / M \quad (3)$$

最后,对  $V_m$  降维处理,得到  $M$  个超声识别特征量  $W_m$  ( $m=1,2,3,\dots,M$ ),即

$$W_m = \sum_{n=1}^N \left| \ln \frac{V_m}{V} \right| + \sum_{n=1}^N \left| \ln \frac{V}{V_m} \right| \quad (4)$$

此时即获得了  $M$  个目标样品的时域特征量。

而超声信号的频谱同样携带了大量的特征信息,为了更全面地提取样品的特征量,还需计算目标样品的频域特征量,其计算方法与时域计算基本相同,唯一区别在于:在第一步归一化处理之前,先将时域信号做快速傅里叶变换,将后续所有的时域幅值替换为频域幅值即可。

至此,就完成了目标样品时域和频域特征量的计算。以相同的方法可计算出任意待识别样品的超声信号时域和频域特征量。

### 3 设定阈值

由于实际应用中难以避免系统误差和操作误差,故超声识别系统易受这些影响而出现错误识别。因此需设定识别阈值,提高超声识别的稳定性和容错率。

根据中心极限定理可知,如果一个事件受到多种因素的影响,将其综合后,结果的平均值呈高斯分布<sup>[11]</sup>。因此每次采集到的信号即使受多种因素影响而出现波动,但多次采集后的结果仍呈高斯分布,因此可以使用拉依达准则进行判定。拉依达准则以正态分布 3 倍标准差 99.7% 的置信率为基础,以 3 倍标准差作为极限偏差,超过此界限即判断该次测量结果属于异常值而非随机误差<sup>[12]</sup>。

由式(5)计算 3 倍标准差,即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{m=1}^M (W - W_m)^2 / M} \quad (5)$$

式中: $W$  为  $W_m$  的平均值,则阈值  $\Delta = W + 3\sigma$  ( $\sigma$  为标准差)。

因此,只需判断待识别样品的时、频域特征量是否均在阈值范围内即可识别出该样品是“目标样品”还是“干扰样品”。

### 4 识别过程

首先对样品进行编号,选出一个样品作为目标样品,其余样品作为干扰样品。采用超声探头对目标样品进行 20 次信号采集(时域信号),对此 20 个信号分别进行 FFT(快速傅里叶变换),得到 20 个频域信号。分别对时、频域数据进行归一化处理,并提取出时、频域特征量各 20 个,最后得到时、频域阈值各 1 个。

然后将目标样品与干扰样品混合,以相同方法采集所有样品的待识别超声信号,以相同方法提取出每个样品的时、频域特征量。经超过 500 次试验

验证,待识别信号只需采集 5~7 次即可(笔者取 5 次)。因此每个样品可得时、频域阈值各 5 个。

最后将每个样品的 5 对特征量分别与阈值进行比较,时、频域特征量均小于阈值时,“目标样品”的计数器加 1;时、频域特征量均大于阈值时,“干扰样

品”的计数器加 1;时、频域特征量中 1 个大于阈值,1 个小于阈值时不计数。最后统计计数结果,识别结果判定为计数更大者,若数值相同则需重新采集该待识别样品的超声信号。超声信号识别流程图如图 1 所示。

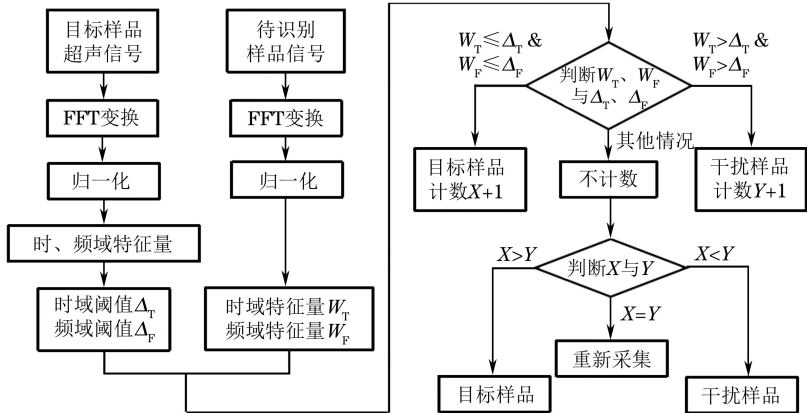


图 1 超声信号识别流程图

5 识别试验

5.1 对金属材料的识别

试验所用样品种类很多,包含铝合金、铁合金等不同材料、不同形状和不同热处理工艺的样品共 62 个,部分样品实物如图 2 所示。笔者以一组(3 个)样品为例,将其分别编号为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>进行识别试验,其中 1<sup>#</sup>样品和 2<sup>#</sup>样品材料为 1Cr17Ni2,3<sup>#</sup>样品材料为 2Cr13,3 个样品的外形尺寸形状完全一致,其实物如图 3 所示,图中下方放置 1 元硬币以便直观展现样品尺寸,样品表面贴有深蓝色直角探头定位器,以使每次探头放置位置相同从而采集到稳定信号。为实现所提超声识别算法在实际应用中的自动化和便捷化操作,笔者基于 MATLAB 软件编写了超声识别程序,操作者只需在程序中输入目标物品的信号和待识别物品的信号,点击识别即可直接得到识别结果。

首先对 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>样品采集 20 次标准信号,然

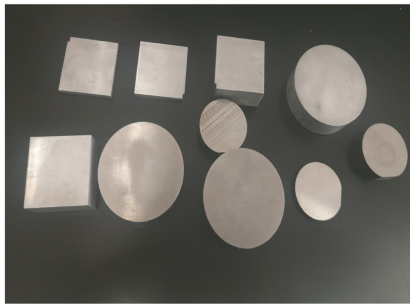


图 2 部分样品实物

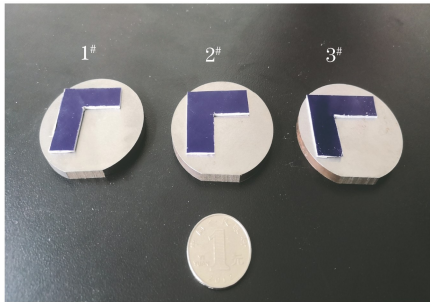


图 3 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试验样品实物

后遮盖样品编号并打乱顺序,对 3 个样品分别采集 5 次待识别信号。当 1<sup>#</sup>样品为“目标样品时”,将 1<sup>#</sup>样品信号导入编写的识别程序,识别程序界面如图 4 所示,识别程序按照第 2 节所述算法计算得到时、频域特征量各 20 个,进而确定阈值。然后依次导入 3 个待识别信号,识别程序将计算出每个待识别信号的特征量。点击“识别”按钮后识别程序会根据其特征量与阈值的关系给出识别结果。

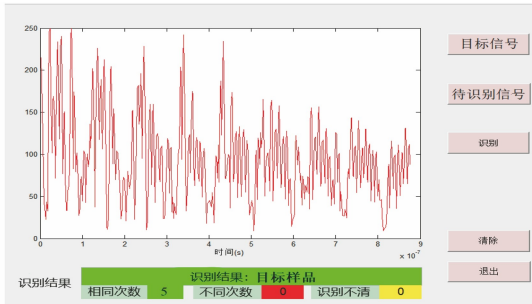


图 4 识别程序界面示意

按照识别程序步骤依次导入标准信号和待识别



信号,点击识别按钮,仅需 3 步操作便可完成识别。若识别的是目标样品的待识别信号,则结果一栏呈绿色底框并显示“目标样品”;若识别的是干扰样品的待识别信号则结果一栏呈红色底框并显示“干扰样品”。因此可以得到打乱顺序后的待识别信号与 1<sup>#</sup> 样品标准信号的识别结果,取下编号遮盖以验证识别结果是否准确,接着对 2<sup>#</sup> 样品和 3<sup>#</sup> 样品按同样方法进行识别。

程序后台可以导出识别数据,用 1<sup>#</sup> 样品阈值识别 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 样品时的时域识别数据如表 1 所示,频域数据如表 2 所示。从表 1,2 中可看出 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 样品的特征量明显超出阈值;由于 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 样品材料相同,而 3<sup>#</sup> 样品材料与 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 材料不同,因此 3<sup>#</sup> 样品的特征量超出阈值的程度更大;1<sup>#</sup> 样品待识别信号的第 3 组数据,即第 3 次采集待识别信号时可能出现了误差,因此特征量在时域和频域均略微超出了阈值,但其他 4 组均小于阈值,故最终识别结果为“目标样品”,识别正确。用相同方法分别进行了以 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 样品作为目标样品的试验,结果均识别正确。

表 1 金属样品待识别信号时域特征量  
(1<sup>#</sup> 样品阈值)

样品 编号	信号编号					阈值
	1	2	3	4	5	
1 <sup>#</sup>	1.004 9	1.057 7	1.856 7	0.785 2	0.964 3	
2 <sup>#</sup>	6.321 6	6.357 4	6.434 4	6.390 7	6.389 2	1.682 8
3 <sup>#</sup>	17.627 9	17.731 5	17.669 1	17.808 8	17.7380	

表 2 金属样品待识别信号频域特征量  
(1<sup>#</sup> 样品阈值)

样品 编号	信号编号					阈值
	1	2	3	4	5	
1 <sup>#</sup>	8.765 3	9.383 8	15.114 9	7.389 0	8.441 8	
2 <sup>#</sup>	58.811 2	59.194 4	58.848 8	58.851 3	58.836 4	13.352 3
3 <sup>#</sup>	86.445 9	86.775 0	85.950 3	85.711 5	86.1145	

5.2 对陶瓷材料的识别

笔者也对多种陶瓷样品进行了识别试验,部分陶瓷样品实物如图 5 所示。

以图 5(b)中的 3 个陶瓷盘为例,将其分别编号为 4<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>, 以 4<sup>#</sup> 样品为目标样品时,待识别信号的时域、频域特征量如表 3,4 所示。由表 3,4 可以看出,5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup> 样品的特征量远超出阈值;4<sup>#</sup> 样品的第 3 组特征量高于其他 4 组,应是采集过程中的误差所致,但未超出阈值,所以识别结果仍然正确,

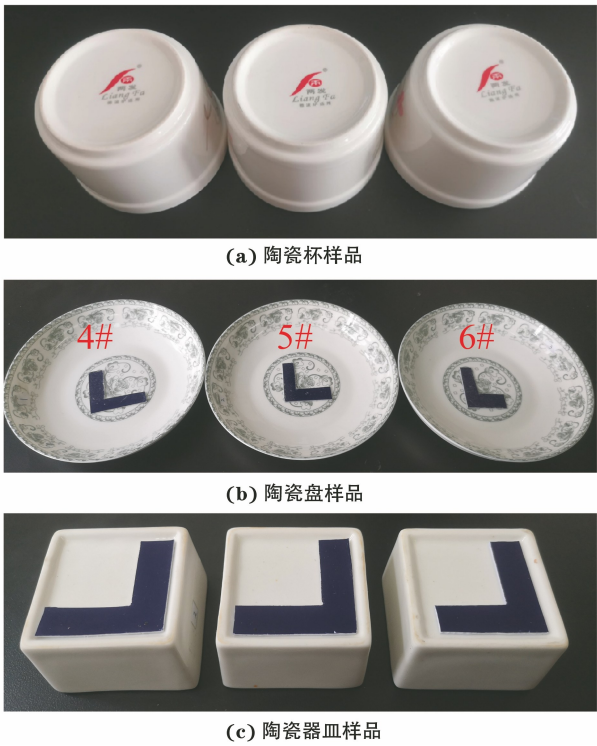


图 5 部分陶瓷样品实物

由此可见阈值的设定一定程度上提高了识别系统的容错率。采用图 5 中的每个样品依次作为“目标样品”进行完整的识别试验,识别结果均正确。

表 3 陶瓷样品待识别信号时域特征量  
(4<sup>#</sup> 为目标样品)

样品 编号	信号编号					阈值
	1	2	3	4	5	
4 <sup>#</sup>	0.785 1	0.764 5	2.684 5	1.074 5	0.924 6	
5 <sup>#</sup>	18.478 0	17.752 7	17.845 6	17.680 6	18.060 6	5.0316
6 <sup>#</sup>	27.015 9	26.505 8	26.627 6	27.121 6	26.746 3	

表 4 陶瓷样品待识别信号频域特征量  
(4<sup>#</sup> 为目标样品)

样品 编号	信号编号					阈值
	1	2	3	4	5	
4 <sup>#</sup>	5.737 6	6.723 4	22.886 8	7.881 7	6.960 5	
5 <sup>#</sup>	89.871 6	86.450 6	85.161 8	85.994 0	85.243 7	41.8731
6 <sup>#</sup>	93.984 9	94.102 8	94.071 2	96.782 0	94.0893	

6 结语

提出了一种基于信号特征量的算法,在拉依达准则的基础上设定了识别阈值,并将识别算法编译为 MATLAB 识别程序,随后对金属材料 and 陶瓷材料进行了识别试验。试验结果表明,不同样品间特征量差异明显,而且阈值的设定有效提高了识别的

准确率和系统容错率。各样品的识别结果均正确,能有效识别材料、外型、尺寸等参数均相同的各类样品。该方法对贵重物品的识别有较高的参考价值,可应用于文物鉴定、工业产品自动化、无人化仓储管理等领域。

参考文献:

[1] 刘小荣,贺西平,崔东,等. 基于超声衰减谱的金属材料无损辨识[J]. 无损检测,2015,37(11):47-50,67.

[2] 卢康,贺西平,崔东,等. 一种基于计算相关系数的成分相近金属材料的超声辨识方法[J]. 云南大学学报(自然科学版),2015,37(3):410-414.

[3] 安笑笑,贺西平,卢康. 基于加权欧氏距离的陶瓷器超声波辨识方法[J]. 电子学报,2018,46(7):1737-1741.

[4] 贺西平,刘小荣,张宏普,等. 超声背向散射衰减系数谱的金属防伪辨识[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2014,42(6):40-44.

[5] 刘小荣,贺西平,张宏普,等. 金属材料的超声衰减特征及辨识的新方法[J]. 科学通报,2016,61(8):844-854.

[6] PALANICHAMY P,JOSEPH A,JAYAKUMAR T, et al. Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel[J]. NDT & E International,1995,28(3):179-185.

[7] VIJAYALAKSHMI K, MUTHUPANDI V, JAYACHITRA R. Influence of heat treatment on the microstructure,ultrasonic attenuation and hardness of SAF 2205 duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering:A,2011,529:447-451.

[8] RICHTER A, BABICK F, RIPPERGER S. Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit [J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2005,118(3):1394-1405.

[9] 呼剑,苏明旭,蔡小舒,等. 高频宽带超声衰减谱表征纳米颗粒粒度的方法[J]. 化工学报,2010,61(11):2985-2991.

[10] YANG L, LI J, LOBKIS O I, et al. Ultrasonic propagation and scattering in duplex microstructures with application to titanium alloys [J]. Journal of Nondestructive Evaluation,2012,31(3):270-283.

[11] 于进伟,赵舜仁. 大数定律与中心极限定理之关系[J]. 高等数学研究,2001,4(1):15-17.

[12] 王小凯,朱小文. 计量检定中3种判别和剔除异常值的统计方法[J]. 中国测试,2018,44(S1):41-44.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告