

多晶材料散射模型及识别实验研究*

刘昱¹⁾ 贺西平^{1)†} 贺升平²⁾

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 710119)

2) (泸州高新技术研究所, 泸州 646000)

(2023年9月27日收到; 2023年10月24日收到修改稿)

超声波识别在国防、军事、航空航天、核设施等高科技领域具有重要的应用价值. 利用超声波可以实现对个体金属材料的识别, 但现有研究侧重于识别材料超声信号差异的算法, 缺乏识别机理. 本文以 2A12 铝合金为例, 利用 6 个晶粒在尺寸、形状、排布方向以及排列顺序不同时, 建立了 10 个 2A12 铝合金微结构的初级模型, 以此类比多晶金属材料的复杂微观结构. 利用 Comsol 有限元软件仿真计算了金属材料不同微观结构中的超声波时域信号, 并将回波信号中的背向散射信号提取为超声指纹. 定义了特征差异 Q , 量化了具有不同微结构的散射模型间的超声指纹的差异. 结果表明, 微观结构的细微变化也会导致超声信号出现差异, 其中晶粒尺寸的变化对信号的影响更为显著. 随后提出了超声识别算法, 并对 4 块形状完全一致的 2A12 铝合金样品进行了识别实验. 识别结果表明, 利用超声指纹可以准确识别出目标样品, 且各样品间的超声指纹有显著区别. 最后对样品进行了扫描电子显微镜实验, 所得电子显微镜图片显示了各样品真实微观结构的形貌与差异, 证实了所建立的超声散射模型的有效性.

关键词: 超声散射, 微观结构, 多晶材料, 超声识别, 有限元方法

PACS: 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.73.20231578

1 引言

随着现代科学技术的快速发展, 作为世界三大公共隐患之一的假冒伪造技术日益猖獗, 伪造仿制出的赝品越来越难以分辨, 若重要物品被伪造替换, 国民经济将蒙受巨大的损失. 为此, 物品的防伪识别技术受到了不同领域的学者们的关注和研究, 其中超声识别凭借其无创、方便、经济有效的优点在国防、军事、航空航天、核设施等高科技领域得到了广泛的研究和应用.

金属制品通常属于多晶材料, 多晶材料由大量形状各异, 排列分布随机的晶粒组成. 多晶材料的物理性能的宏观各向异性一般取决于它的单晶弹性常数和晶粒在空间上的分布^[1-4]. 晶粒之间的边界称为晶界. 当超声波在多晶材料中传播时, 由于

晶粒弹性常数的各向异性和错向分布, 声束会在晶界上散射, 而且在每个单独的晶界处的散射都是随机的, 这种散射通常被称为颗粒噪声^[5]. 在缺陷检测领域中, 颗粒噪声是人们不希望得到的, 因为它可能会掩盖或干扰缺陷的回波信息^[6,7]. 但在材料微观结构的评估和表征领域中, 颗粒噪声则是一个重要且有效的工具, 此时颗粒噪声称为超声波背向散射^[8-12]. 背向散射与晶粒的形态特征和弹性特征密切相关, 因此可由背向散射无损地得到材料的微观结构信息, 例如疲劳特征、微结构形态和弹性性能等材料的独有特征^[13-17].

金属材料中晶粒的尺寸、形态、取向和分布具有天然的随机性, 每个金属材料的微观结构都具有类似指纹的唯一性, 因此金属材料中超声背向散射信号也具有类似指纹信号的唯一性. 利用超声背向散射原理提取多晶材料的超声指纹是近年来备受

* 国家自然科学基金 (批准号: 12174241) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hexiping@snnu.edu.cn

关注的研究方向, 这项技术主要用于重要物品的识别与保护, 例如太平洋西北国家实验室 (PNNL) 利用超声本征标签技术在装备拆卸过程中识别有关部件^[18]. 刘小荣等^[19]提出了利用超声衰减特征识别金属材料的方法; 以收发一体式的超声探头采集不锈钢的超声时域信号, 加窗截取背向散射信号, 并计算出局部背散信号的衰减谱作为金属样品的特征量, 识别不同热处理过的不锈钢样品; 超声衰减谱对金属材料的成分及热处理温度的改变非常敏感, 不同的热处理温度会导致不锈钢中碳含量、奥氏体转换度以及晶粒粗细程度均发生改变. 陶瓷也是典型的多晶材料, 超声识别同样适用于陶瓷材料, 安笑笑等^[20]提出了利用加权欧氏距离辨识陶瓷材料的超声识别方法; 采集了陶瓷样品的背散信号并计算每个信号与信号均值的加权欧氏距离, 以欧氏距离中最大值和最小值的差作为识别阈值, 根据待识别加权欧氏距离与阈值的关系完成了对陶瓷样品的识别; 对陶瓷样品的断面扫描电子显微镜实验表明, 陶瓷样品的晶粒排列杂乱无章, 且晶粒之间的分界限不明显; 陶瓷器的内部晶粒尺寸小于超声波波长, 超声波入射到其内部后, 会在陶瓷晶粒边界处发生瑞利散射. 本课题组^[21]提出了基于线性预测分析的多晶金属材料识别方法, 将不同微结构的样品视为不同参数的滤波器, 以线性预测系数作为其特征参数, 并将其提取为超声指纹用以识别; 为提高识别的准确率, 利用拉伊达判别准则确定了识别阈值, 完成了对形状、材料完全一致的 3Cr13 金属样品的识别. 以上研究所提出的方法虽然都取得了良好的识别效果, 但都侧重于对特征提取和识别算法的研究, 缺少对样品微结构模型的研究, 无法解释多晶材料微结构的差异, 以及对超声波产生影响的原因.

超声波背向散射与超声识别密切相关. 国内外学者对超声波在晶粒中散射的机理进行了大量研究. Du 等^[22]建立了伸长方向上的平均晶粒半径为缩短方向上平均半径的 5 倍的椭圆晶粒状模型, 并对晶粒建立了二阶近似模型和 3 维有限元模型. 在高频随机散射区, 晶粒伸长对超声波的衰减有明显的方向性效应, 它依赖于波传播方向上的平均晶粒半径. Yang 等^[23]建立了细长椭球形晶粒的超声后向散射模型, 从理论上研究了正交各向异性晶体取向的多晶介质中的超声衰减和后向散射, 虽然两个相同的钛合金样品的晶粒尺寸相似, 但微结构参数

的不同导致二者的超声衰减系数有 10 倍的差异. Rokhlin 等^[24]在远场散射玻恩近似模型的基础上, 提出了利用超声反演法来量化椭球形微结构区域平均参数的理论模型, 阐述了背向散射和衰减系数在椭球形微结构区不同散射方向上的不同表现. 上述研究的重点为微观颗粒单体与超声波的关系, 难以说明多晶材料中的多个特征各异的晶粒对超声波的影响, 也未能在宏观上反映出微结构特征变化导致的实际超声波信号的差异. 目前超声识别的相关研究仍缺乏对识别原理解释, 因此本文尝试从模型计算和实验测试的角度对超声识别的原理进行初步的研究.

受以上研究的启发, 本文在单体椭球模型的基础上, 提出了类比多晶金属材料的复杂微观结构的超声散射模型, 建立了 10 个简化的 2A12 铝合金样品的微结构模型, 各模型间的晶粒的尺寸、形状、间距和排列方式均有不同程度的区别. 利用有限元方法仿真计算了微结构中超声波的时域回波信号, 并分别计算了各模型间超声信号的特征差异. 对实验室中材料、形状完全一致的 2A12 铝合金样品进行了识别实验和扫描电子显微镜测试, 实验结果验证了本文提出的超声散射模型的有效性.

2 细长椭球单晶粒散射模型

超声波的散射和衰减与多晶金属材料的微观结构密切相关, 利用超声散射信号可无损地表征多晶金属材料的重要微结构信息, 如晶粒尺寸、断裂韧性和金属疲劳等. 为了表征钛合金的疲劳状况, Yang 等^[25]和 Rokhlin 等^[26]在背向散射一般理论和实际金属加工中晶粒形状共性的基础上建立了细长椭球散射衰减模型. 在该模型中, 晶粒形状可视为图 1 所示的一般椭球形, 椭球晶粒的轴线与全局坐标系 (X, Y, Z) 的坐标轴重合, 图 1 中 (T_x, T_y, T_z) 为织构方向.

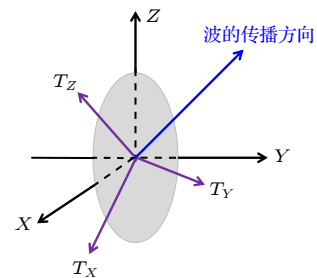


图 1 椭球形晶粒模型

Fig. 1. Model of ellipsoidal grain.

在单一散射理论和玻恩近似的基础上, 纵波在任意传播方向 p 下的后向散射系数可表示为

$$\eta(k) = Q \frac{8\pi a_x a_y a_z k^4}{(1 + 4k_x^2 a_x^2 + 4k_y^2 a_y^2 + 4k_z^2 a_z^2)^2} = \frac{QV k^4}{(1 + k^2 l^2)^2}, \quad (1)$$

式中, Q 为归一化弹性协方差, $Q = \langle \delta C_{3333} \delta C_{3333} \rangle / (4\pi C_{3333}^0)^2$, 其中 C_{3333} 为晶粒的有效弹性张量, δC_{3333} 为弹性张量的微小随机扰动, C_{3333}^0 为平均宏观弹性常数; V 为晶粒的有效体积, $V = \int w(x, y, z) d^3 X = 8\pi a_x a_y a_z$, \mathbf{X} 为半径矢量, $X = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $w(x, y, z)$ 为两点相关函数, $w(x, y, z) = \exp\left(-\sqrt{\frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_z^2}}\right)$, a_x, a_y, a_z 为晶粒半径; l 为相互作用长度, $l = 2\sqrt{n_x^2 a_x^2 + n_y^2 a_y^2 + n_z^2 a_z^2}$, \mathbf{n} 为波法向量; k 为波数, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$. $\eta(k)$ 的平方根 $\eta^{1/2}$ 与背散散射信号均方根 (RMS) 的可测量光谱振幅成比例, 因此在背向散射分析中通常以 $\eta^{1/2}$ 为分析对象, 并称之为背向散射幅值.

实际的多晶金属材料由数量庞大的晶粒和尺寸很小的微晶组成, 两个相同材料的金属制品的微观结构也会有不同程度的差异, 例如晶粒的尺寸、形状、排列顺序和排列间距. 不同样品间可能存在这些晶粒特征差异的多种组合, 也可能同时存在这些特征差异. 因此, 本文利用 6 个晶粒在尺寸、形状、排布方向以及排列顺序不同时, 建立了

10 个 2A12 铝合金微结构的初级模型, 以此类比多晶金属材料的复杂微观结构.

3 类比多晶金属材料的散射模型

建立了 10 个 2A12 铝合金样品的简化散射模型, 不同模型中晶粒的尺寸、形状以及排列方式互不相同, 模型如图 2 所示. 模型中晶粒形状有 3 种, 即水平长轴椭圆、圆形、竖直长轴椭圆, 并分别记为 H, S, V; 对应的长轴尺寸、短轴尺寸和圆形半径分别记为 $(R_{HL}, R_{HS}), R_S, (R_{VL}, R_{VS})$; 第 1, 2 列晶粒的中心间距记为间距 1, 第 2, 3 列晶粒的中心间距记为间距 2. 其中模型 A 和 B 的主要差异为晶粒的排列顺序; 模型 B 和 C 的主要差异为晶粒的排列顺序及间隔; 模型 B 和 D 的主要差异为晶粒的形状; 模型 F 和其余模型的主要差异为晶粒的尺寸. 椭圆形微晶尺寸 (R_{CL}, R_{CS}) 及模型参数见表 1.

4 散射信号的仿真计算及分析

以 Comsol 有限元分析软件仿真计算了 2A12 铝合金样品中的不同微观结构所引起的超声信号的差异. 利用 pzt-4 压电陶瓷模拟收发一体式超声探头, 激励幅值为 40 V、频率为 5 MHz、脉宽为 4 μ s 的高斯脉冲, 向铝合金样品发射并接收超声波. 样品外观尺寸为长 2600 μ m, 宽 2000 μ m. 以模型 A

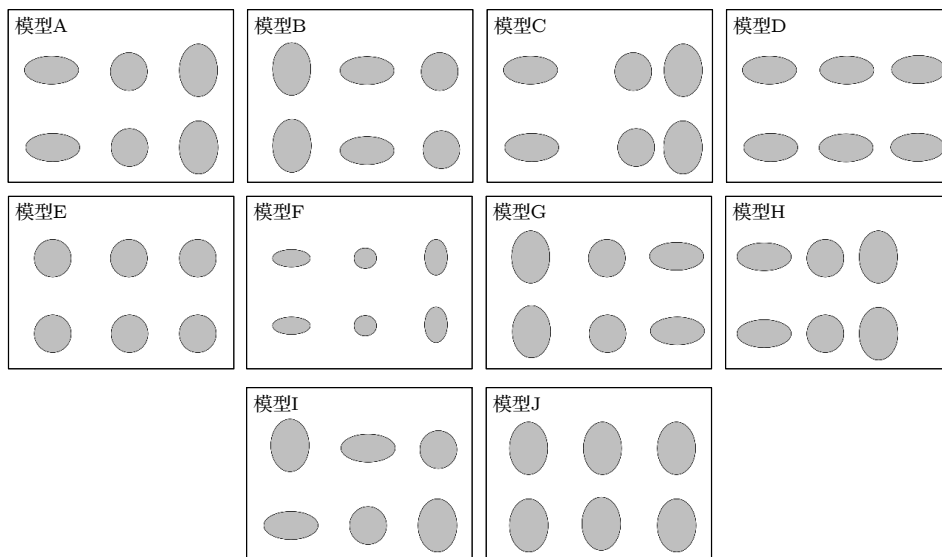


图 2 样品的微观结构模型
Fig. 2. Microstructure models of the samples.

表 1 模型参数
 Table 1. Model parameters of the models.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
排列顺序	HSV HSV	VHS VHS	HSV HSV	HHH HHH	SSS SSS	HSV HSV	VSH VSH	HSV HSV	VHS HSV	VVV VVV
间距1/ μm	900	900	1300	900	900	900	900	600	900	900
间距2/ μm	800	800	500	800	800	800	800	500	800	800
$R_{\text{CL}}/\mu\text{m}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$R_{\text{CS}}/\mu\text{m}$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$R_{\text{HL}}/\mu\text{m}$	300	300	300	300	300	200	300	300	300	300
$R_{\text{HS}}/\mu\text{m}$	150	150	150	150	150	100	150	150	150	150
$R_{\text{S}}/\mu\text{m}$	200	200	200	200	200	100	200	200	200	200
$R_{\text{VL}}/\mu\text{m}$	300	300	300	300	300	200	300	300	300	300
$R_{\text{VS}}/\mu\text{m}$	200	200	200	200	200	100	200	200	200	200

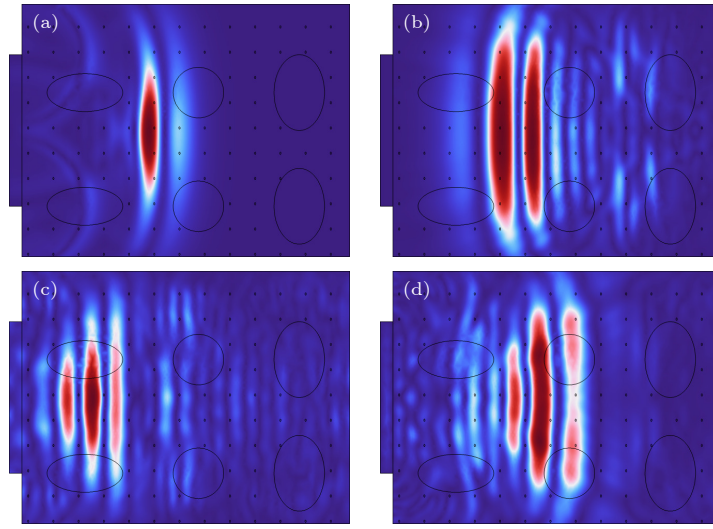

 图 3 模型 A 中不同时刻的超声波 (a) 4.0×10^{-7} s; (b) 9.4×10^{-7} s; (c) 1.34×10^{-6} s; (d) 4.82×10^{-6} s

 Fig. 3. Ultrasonic waves at different moments in model A: (a) 4.0×10^{-7} s; (b) 9.4×10^{-7} s; (c) 1.34×10^{-6} s; (d) 4.82×10^{-6} s.

为例, 传播的超声波在不同时刻引起的样品表面质点振动如图 3 所示.

图 4 为不同微结构散射模型的超声回波时域信号, 各次回波之间的草状信号即超声背向散射信号, 也是对微结构变化最敏感的部分. 本文提取了超声回波时域信号中一次回波和二次回波之间的背向散射信号, 为量化背向散射信号间的差异, 定义了特征差异 Q , 表达式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^N \left| \ln \left(\frac{A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \right) - \ln \left(\frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i} \right) \right|, \quad (2)$$

式中, A_i 为 1# 样品背向散射信号在第 i 个采样点处的幅值, B_i 为 2# 样品在第 i 个采样点处的幅值, N 为总采样点数. 特征差异 Q 计算了 2 个背向散射信号在每一时刻处对应的信号幅值的对数差. 依

次计算了每个样品与其他样品的特征差异, 如表 2 所列

由表 2 可清晰地看出, 晶粒排列、形状和尺寸的不同导致各样品间散射信号产生了不同程度的差异.

1) 模型 F 与其他模型的特征差异明显大于其余 9 个模型间的差异, 由此可看出晶粒尺寸的变化对超声信号的影响较大.

2) 除模型 F 外, 对于模型 A, 其与模型 B 的特征差异最大, 比较模型结构可看出, 模型 A 与模型 B 的晶粒形状相同但排列顺序不同, 模型 A 中第 1 列晶粒为 H 椭圆, 而模型 B 中第 1 列晶粒为 V 椭圆. 由此可见, 即使晶粒的形状相同, 散射信号也会因晶粒的排列不同而产生差异.

3) 模型 D, E, J 的主要差异为晶粒的形状. 将

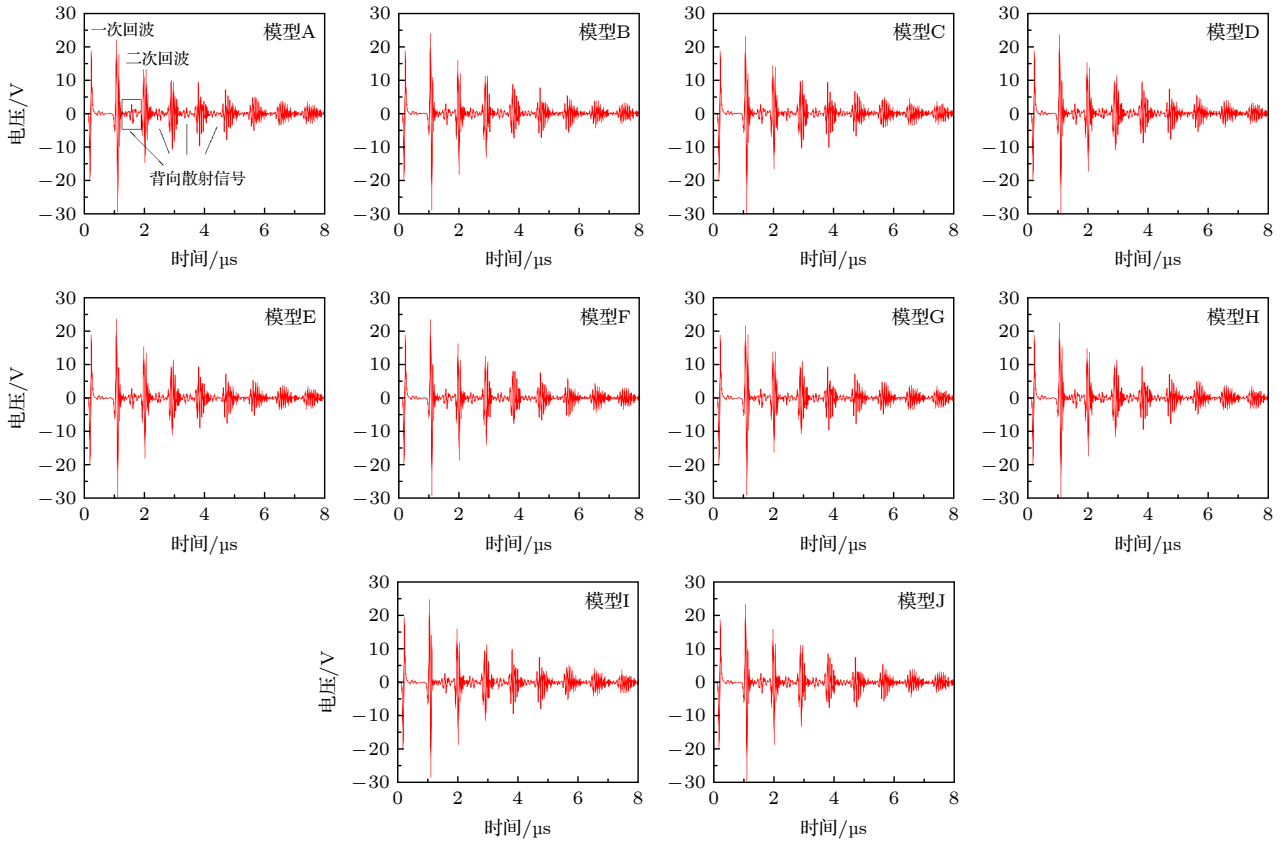


图 4 各模型中超声回波的时域信号

Fig. 4. Time-domain signals of ultrasonic echos of each model.

表 2 各模型间特征差异

Table 2. Feature differences of each model.

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A		4.2043	0.2362	0.6463	1.3433	6.3421	2.3561	2.4869	2.7060	2.8057
B	4.2043		3.9681	3.5580	2.8610	2.1378	1.8482	1.7174	1.4983	1.3986
C	0.2362	3.9681		0.4100	1.1071	6.1059	2.1199	2.2507	2.4698	2.5695
D	0.6463	3.5580	0.4100		0.6971	5.6958	1.7098	1.8406	2.0598	2.1595
E	1.3433	2.8610	1.1071	0.6971		4.9988	1.0127	1.1436	1.3627	1.4624
F	6.3421	2.1378	6.1059	5.6958	4.9988		3.9860	3.8552	3.6360	3.5364
G	2.3561	1.8482	2.1199	1.7098	1.0127	3.9860		0.1308	0.3500	0.4497
H	2.4869	1.7174	2.2507	1.8406	1.1436	3.8552	0.1308		0.2191	0.3188
I	2.7060	1.4983	2.4698	2.0598	1.3627	3.6360	0.3500	0.2191		0.0997
J	2.8057	1.3986	2.5695	2.1595	1.4624	3.5364	0.4497	0.3188	0.0997	

模型 E 的 9 次识别的特征差异从大到小排列, 模型 D 与模型 J 的差异排第 3. 同理, 模型 E 与模型 J 的差异排第 4. 由此可见, 当晶粒的形状不同时, 散射信号也会不同.

4) 模型 A, C, H 的主要差异为晶粒的间距. 相较于模型 A, 模型 C 中第 1、3 列晶粒位置不变, 将第 2 列的圆形晶粒向右平移, 缩短了第 2, 3 列晶粒的间距; 模型 H 将第 2, 3 列晶粒向左平移, 并整体缩短了这 3 列晶粒的间距. 由表 2 可见这两种

改变间距的方法产生了不同结果, 模型 A 和模型 C 特征差异很小, 却与模型 H 差异较大. 可见即使晶粒的尺寸、形状、排列顺序均相同, 不同的间距也会导致超声信号产生不同程度的差异.

5 实验及讨论

实验样品如图 5 所示, 为同一生产批次的形状、尺寸完全一致的 4 块 2A12 铝合金样品, 并记

为 1#, 2#, 3# 和 4#. 样品表面蓝色直角贴片用以固定探头位置, 采集信号时令探头边缘与两直角边相切, 以确保每次采集信号的位置相同.

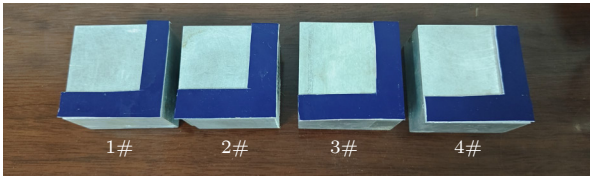


图 5 2A12 铝合金样品
Fig. 5. 2A12 aluminum alloy samples.

实验装置由 5077PR 超声脉冲发射仪、TektronixDPO5034B 示波器及超声探头组成. 超声脉冲发射仪的重复频率为 100 Hz, 激励电压为 100 V. 所用超声探头的中心频率为 5 MHz, 晶片直径为 10 mm. 实验装置如图 6 所示.

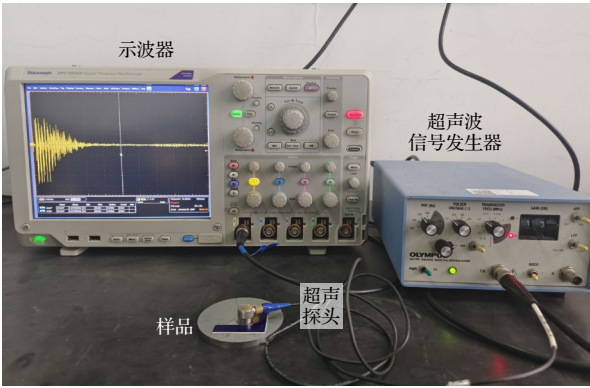


图 6 实验装置
Fig. 6. Experimental setup.

采集到样品的超声信号后, 需利用识别算法量化不同样品之间的信号差异. 本文提出了幅值的对数差识别算法, 计算了 2 个时域信号在每一时刻处对应的信号幅值对数差, 对其绝对值求和, 以此作为超声指纹. 为提高识别的准确率, 利用 3 倍标准差准则确定了识别阈值. 以 1# 样品为例, 超声指纹的提取及识别过程如下.

以 1# 样品作为目标样品, 提取其超声指纹, 然后将 1# 样品混放于 2#, 3# 和 4# 样品中, 最后

通过超声指纹将 1# 样品识别出来.

1) 以超声探头在目标 1# 样品上采集 20 次时域背向散射信号 C_k ($k = 1, 2, 3, \dots, 20$), 且每次采集的位置相同. 对 20 次时域背向散射信号 C_k 计算出平均值 C_v , 对 C_k 和 C_v 归一化后利用下式分别计算出 20 个 C_k 对 C_v 的超声指纹 Q_k ($k = 1, 2, 3, \dots, 20$):

$$Q_k = \sum_{i=1}^N |\ln C_k - \ln C_v|. \quad (3)$$

2) 计算出 Q_k 的平均值 Q_v 以及标准差 Q_s .

3) 定义识别阈值 $\Delta = Q_v + 3Q_s$.

4) 将 1# 样品与 2#, 3# 和 4# 样品打乱顺序混放, 任取 1 个样品作为待识别样品, 以超声探头采集 7 次时域信号 D_k ($k = 1, 2, \dots, 7$).

5) 对 D_k 归一化后利用下式再次计算出 7 个 D_k 对 C_v 的超声指纹 P_k ($k = 1, 2, \dots, 7$):

$$P_k = \sum_{i=1}^N |\ln D_k - \ln C_v|. \quad (4)$$

6) 比较 P_k 与阈值 Δ 的大小, 当 P_k 小于阈值 Δ 的个数大于等于 4 时, 则判定该待识别样品非 1# 样品. 若 P_k 小于阈值 Δ 的个数小于 4 时, 则判定该待识别样品为 1# 样品, 需继续采集其他样品的信号进行识别, 直至找到 1# 样品. 识别结果如表 3 所列.

由表 3 可以看出, 4 个样品间的超声指纹差异明显, 非目标样品的超声指纹远超识别阈值. 对样品 A 所采集的 7 个超声指纹中, 有 1 个略高于阈值, 其原因可能为该次采集信号的位置偏差较大或者探头未紧密贴合样品. 此外, 分别以剩余的 3 个为目标样品, 逐一进行了识别实验, 结果表明, 每个目标样品均由超声指纹方法快速、准确地识别出来.

为从微观上说明样品间结构的区别, 本文对 1#, 2#, 3# 和 4# 样品进行了扫描电子显微镜 (SEM) 实验, 放大 5000 倍的 SEM 形貌如图 7 所示.

表 3 超声指纹识别结果

Table 3. Identification results of the ultrasonic fingerprints.

	1	2	3	.....	7	阈值	超出阈值次数
P_k (1#)	1.1474	0.8247	0.7687	.....	0.7652	1.0362	1
P_k (2#)	4.3000	4.3018	4.3559	.....	4.4523		7
P_k (3#)	4.5489	4.5639	4.5547	.....	4.6969		7
P_k (4#)	3.8497	3.4267	3.5947	.....	3.7984		7

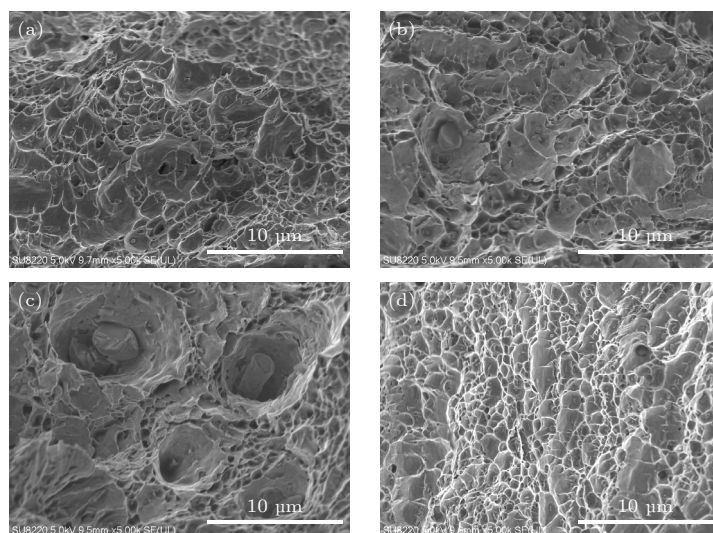


图 7 2A12 铝合金的 SEM 断面图 (a) 1#样品; (b) 2# 样品; (c) 3#样品; (d) 4#样品

Fig. 7. SEM cross-sections of 2A12 aluminum alloy samples: (a) Sample 1#; (b) Sample 2#; (c) Sample 3#; (d) Sample 4#.

由图 7 可以清晰看出: 1) 各样品中晶界明显; 2) 虽为相同材料, 但样品间晶粒尺寸仍存在明显差异; 3) 2#和 4#样品中晶粒分布较为紧密, 而 1#和 3#样品中则出现了一些孔洞, 致密度相对较低, 该特征的形成与加工工艺有关; 4) 本文提出的超声散射模型在理论上的结构差异与图 7 所示的样品的真实微观形貌差异基本一致。

识别实验和 SEM 实验表明, 相同材料的多晶金属样品在微观上仍有不同程度的结构差异, 超声波对这些微观结构差异很敏感, 超声结合识别算法可准确识别出目标样品, 实验结果也证明了本文所提出的超声散射模型是有效且准确的。

6 结 论

本文提出了类比多晶金属材料的复杂微观结构的超声散射模型. 为模拟真实多晶金属材料的复杂微观结构, 以椭球晶粒为单元, 建立了 10 个具有不同晶粒形状、尺寸、间距和排列方式的 2A12 铝合金微观模型. 对所建模型进行了仿真计算, 算得了超声波的时域信号. 定义了特征差异 Q , 进而量化了不同结构的超声信号的特征差异. 当模型中晶粒的尺寸、形状、排列间距和排列顺序的变化时, 均会引起超声信号产生不同程度的差异, 其中晶粒尺寸的影响最为显著。

对 4 个形状、尺寸完全一致的 2A12 铝合金样品进行了超声识别实验, 非目标样品的超声指纹明

显超出阈值, 约为阈值的 4 倍; 目标样品的超声指纹则低于阈值, 约为阈值的 0.7 倍, 最终准确识别出了目标样品. 为观测所用样品的实际微观结构, 进行了 SEM 实验, 结果表明, 多晶材料微观结构在晶粒尺寸和致密度等特征上存在直观的差异. 以上实验结果验证了所提出的超声散射模型的有效性, 本文工作为超声识别的机理、模型和算法的研究提供了参考。

参考文献

- [1] Yang L Y, Turner J A, Li Z 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 50
- [2] Ghoshal G, Turner J A 2009 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **56** 1419
- [3] Huang M, Sha G, Huthwaite P, Rokhlin S I, Lowe M J S 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **149** 2377
- [4] Thompson R B, Margetan F J, Haldipur P, Yu L, Wasan H 2008 *Wave Motion* **45** 655
- [5] Huntington H B 1950 *J. Acoust. Soc. Am.* **22** 362
- [6] Lobkis O I, Rokhlin S I 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 161905
- [7] Li J, Rokhlin S I 2015 *Wave Motion* **58** 145
- [8] Song Y F, Kube C M, Turner J A, Li X 2017 *Ultrasonics* **80** 58
- [9] Yang L, Li J, Rokhlin S I 2013 *Wave Motion* **50** 1283
- [10] Li J, Yang L, Rokhlin S I 2014 *Ultrasonics* **54** 1789
- [11] Jia X F, He L 2014 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **44** 185 (in Chinese) [贾晓菲, 何亮 2014 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **44** 185]
- [12] Li S, Li X B, Song Y F, Chen C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 234301 (in Chinese) [李珊, 李雄兵, 宋永锋, 陈超 2018 *物理学报* **67** 234301]
- [13] Yang L, Rokhlin S I 2013 *J. Nondestruct. Eval.* **32** 142
- [14] Li J, Rokhlin S I 2016 *Int. J. Solids Struct.* **78–79** 110
- [15] Hu P, Turner J A 2015 *J. Acoust. Soc. Am.* **137** 321
- [16] Liu Y, Tian Q, Yu P, He J, Guan X 2022 *NDT and E Int.*

129 102634

- [17] Thompson B R 2002 *Top. Appl. Phys.* **84** 233
- [18] Good M S, Simpkins B E, Kirihara J L, Skorpik R J, Willett J A 2003 *Ultrasonic Intrinsic Tagging for Nuclear Disarmament: A Proof-of-Concept Test* (Richland: Pacific Northwest National Laboratory) PNNL-14462
- [19] Liu X R, He X P, Zhang H P, He S P, Ni T, Cui D, Lu K 2016 *Chin. Sci. Bull.* **61** 844 (in Chinese) [刘小荣, 贺西平, 张宏普, 贺升平, 尼涛, 崔东, 卢康 2016 *科学通报* **61** 844]
- [20] An X X, He X P, Lu K 2018 *Acta Electron. Sin.* **46** 1737 (in Chinese) [安笑笑, 贺西平, 卢康 2018 *电子学报* **46** 1737]
- [21] Liu Y, He X P, He S P 2023 *Acoust. Phys.* **69** 574
- [22] Du H 2022 *Ultrasonics* **119** 106633
- [23] Yang L, Li J, Lobkis O I, Rokhlin S I 2012 *J. Nondestr. Eval.* **31** 270
- [24] Rokhlin S I, Sha G, Li J, Pilchak A L 2021 *Ultrasonics* **115** 106433
- [25] Yang L, Lobkis O I, Rokhlin S I 2011 *Ultrasonics* **51** 697
- [26] Lobkis O I, Yang L, Li J, Rokhlin S I 2012 *Ultrasonics* **52** 694

Ultrasonic scattering model and identification experiment of polycrystalline materials*

Liu Yu¹⁾ He Xi-Ping^{1)†} He Sheng-Ping²⁾

1) (*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonic, School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

2) (*Luzhou High-tech Research Institute, Luzhou 646000, China*)

(Received 27 September 2023; revised manuscript received 24 October 2023)

Abstract

Ultrasonic identification has an important application value for national defense, military affairs, aerospace, nuclear facilities and other high-tech fields. Ultrasonic waves can be used to identify any metal material. At present, the researches focus on algorithms for identifying the difference in ultrasonic signal among materials, but the study on the corresponding identification theory is lacking. In this work, 10 primary models of the microstructure of 2A12 aluminum alloy are established as analogies to the complex microstructures of polycrystalline metallic materials. The grains of these models are different from each other in size, separation distance, shape, arrangement directions and orders. The time-domain ultrasonic echo signals of different microstructures are calculated by making use of the finite element method. The grass-like signals between two echoes are ultrasonic backscattering signals, which are sensitive to any change of microstructure. The backscattering signals between the primary echo and the secondary echo in the ultrasonic echo time domain signals are extracted as ultrasonic fingerprints. The feature difference Q is defined to quantify the difference in ultrasonic fingerprint of each sample. The results show that the slight variation in microstructure will lead to difference in ultrasonic signal, and the difference caused by the variation in grain size is more distinct. And then, an ultrasonic identification algorithm is proposed, and the identification experiments are conducted on four 2A12 aluminum alloy samples with the same shape. The identification results show that the target sample can be accurately identified by using ultrasonic fingerprints and the ultrasonic fingerprints of the target sample are distinctly different from those of the other samples. The microstructure morphologies of the samples are examined by using scanning electron microscopy (SEM). The SEM results show that there are significant differences in grain size, separation distance and densification between samples although they are the same material. The features of the microstructure in the proposed ultrasonic scattering model in this work are confirmed by the actual y micromorphologies observed in the SEM images. The identification experiments and SEM results demonstrate that the established ultrasonic scattering model is effective. This work can provide a reference for theoretically studying ultrasonic identification and present an idea for developing some new identification algorithms in future.

Keywords: ultrasonic scattering, microstructure, polycrystalline materials, ultrasonic identification, finite element methods

PACS: 43.35.+d

DOI: [10.7498/aps.73.20231578](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231578)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12174241).

† Corresponding author. E-mail: hexiping@smu.edu.cn



多晶材料散射模型及识别实验研究

刘昱 贺西平 贺升平

Ultrasonic scattering model and identification experiment of polycrystalline materials

Liu Yu He Xi-Ping He Sheng-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 034302 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231578

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231578>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑晶粒分布的多晶体材料超声散射统一理论

Ultrasonic scattering unified theory for polycrystal material with grain sizes distribution

物理学报. 2018, 67(23): 234301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181751>

质子辐照对永磁合金微观结构演化的研究

Effect of proton irradiation on microstructure evolution of permanent magnet

物理学报. 2018, 67(1): 016104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172025>

三维浅水下弹性结构声辐射预报的有限元-抛物方程法

Acoustic radiation from a cylinder in shallow water by finite element-parabolic equation method

物理学报. 2019, 68(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181452>

两种Ge-Sb-Se薄膜的光学性质及微观结构

Optical properties and microstructure of two Ge-Sb-Se thin films

物理学报. 2020, 69(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200145>

超声图像中复合材料褶皱形态的Mask-RCNN识别方法

Mask-RCNN recognition method of composite fold shape in ultrasound images

物理学报. 2022, 71(7): 074302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212009>

基于双高斯衰减模型的超声回波处理方法

Ultrasonic echo processing method based on dual-Gaussian attenuation model

物理学报. 2019, 68(8): 084303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182080>