

# A Review of Ultrasonic Methods Used for Nondestructive Characterization of Polycrystalline Materials

Peng Li, Yang Zhao\*, Xue Bai, Jian Ma

Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan Shandong  
Email: [andyzhao@yeah.net](mailto:andyzhao@yeah.net)

Received: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Nov. 6<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 13<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Properties of polycrystalline materials are mainly evaluated by the linear and nonlinear ultrasonic methods in a nondestructive way. This paper reviews some typical research and application of ultrasonic characterization on polycrystalline materials, such as the evaluation of elastic modulus, average grain size, stress, and mechanical properties degradation. These parameters obtained by ultrasonic technology were used to evaluate the safety of materials in service. Ultrasonic methods applied to analyze flaws in the materials have obvious advantages compared to the traditional detection methods. Meanwhile, the investigation of correlation between ultrasonic parameters and polycrystalline microstructure was presented, especially for the characterization of the average grain size of titanium alloy. At last, we showed potential research on ultrasonic nondestructive characterization of polycrystalline materials in the future.

## Keywords

Polycrystalline Materials, Ultrasonic Testing, Elastic Modulus, Grain Size, Stress, Nonlinear Characterization

---

# 多晶金属材料超声无损表征方法研究综述

李 鹏, 赵 扬\*, 白 雪, 马 健

齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东 济南  
Email: [andyzhao@yeah.net](mailto:andyzhao@yeah.net)

收稿日期: 2019年10月22日; 录用日期: 2019年11月6日; 发布日期: 2019年11月13日

\*通讯作者。

## 摘要

线性及非线性超声技术是多晶金属材料特性无损表征的主要研究方法。本文介绍了超声技术在多晶金属材料特性无损表征的研究与典型应用,包括对弹性模量、平均晶粒度、应力、力学性能退化等。通过超声表征结果探究金属材料的内部特性,对材料能否安全服役做出无损评价;阐述了与传统检测方法相比,超声表征方法在分析多晶金属材料的内部缺陷与特性方面具有的优势。最后介绍了本团队在超声与多晶微结构之间的相关性以及对多晶材料平均晶粒尺寸超声表征所展开的工作与研究,并提出了该领域需要进一步研究的方向与目标。

## 关键词

多晶材料, 超声检测, 弹性模量, 晶粒度, 应力, 非线性表征

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

多晶金属材料广泛应用于航空、冶金、医疗、机械制造以及核能等多个重要领域,其材料内部常伴有裂纹、偏析、缩孔、气孔、非金属夹杂等缺陷,致使其服役疲劳强度、硬度、延伸率等力学性能降低从而极易导致事故发生,造成人员伤亡和财产损失,已经引起了科研人员的高度重视。因此对于多晶金属材料特性的检测方法研究成为了近年来的研究热点问题。

迄今为止,工业及研究领域主要使用的五大常规无损检测(Nondestructive Testing,简称 NDT)技术有:超声(UT)、射线(RT)、涡流(ET)、磁粉(MT)、渗透(PT),其中超声无损检测技术具有非接触、非破坏性等特点,并且有快速、直接、成本低、精度高、适用范围广等优点,逐渐成为多晶金属材料特性无损评价(Non-destructive Evaluation,简称 NDE)的主要研究方法[1] [2] [3] [4]。

通过对多晶金属材料的弹性模量、平均晶粒度、应力、力学性能退化等特性进行检测可以分析金属材料内部组织结构的完整性,与传统的检测方法相比,如金相法检测晶粒尺寸需要对试样进行腐蚀、抛光等处理;X 射线法测量多晶材料表面应力的测量速度不高,超声检测多晶金属材料特性可以在不损伤被检材料的前提下对材料组织、物理性能以及缺陷等进行快速表征及评价。

超声波在多晶体内部传播时,在介质界面(晶界、相界、孪晶界等)处发生反射、透射等,同时为实现振动的传播,损失一定的能量或速度用于克服分子、原子间结合力,进而改变超声波传播特性:在波形上表现为波高、间距发生改变,在频域上表现为不同频率下幅值、相位等发生变化,发生变化的超声波被传输到计算机并进行信号处理和特征值计算,分析超声波的时域、频域特征——声速、衰减系数、非线性系数、频率偏移等参数的变化,以此来反映多晶体内部组织的变化并据此评价,图 1 为超声检测原理框图。

多晶金属材料的超声无损表征是研究其内部结构与分析其性能的一种有效检测手段,可对金属锻件、铸件以及焊缝和金属棒材、板材等进行在线检测,并能够较为准确地定位缺陷,对材料的性能进一步做出无损评价,从而判断其能否继续安全服役,为多个领域的安全生产、质量控制和技术发展起到了至关重要的指导作用。

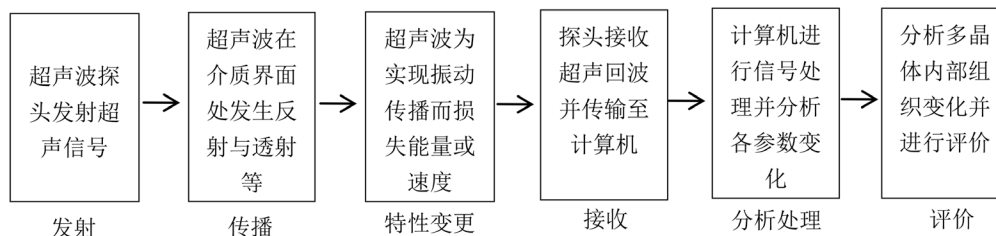


Figure 1. Basic principle block diagram of ultrasonic testing

图 1. 超声检测基本原理框图

## 2. 弹性模量、泊松比的超声表征方法

弹性模量的测量一般有动态法、静态法和超声波法。动态法主要通过测试材料的共振频率，但共振频率寻找较为困难，主要依靠主观判断且操作比较复杂；静态法参照国家标准，主要测试材料在弹性拉伸时应变与应力的线性关系，但检测过程易受外界因素干扰导致测量结果不准确。应用超声波法测定材料的弹性常数能够快速、准确地掌握材料的强度、硬度等力学性能，及时反馈样品、工件的质量信息，因此超声检测金属材料弹性模量的方法迅速发展起来。

超声法是一种非破坏性的动态弹性模量无损检测方法，这种方法越来越多地应用于金属材料、复合材料以及高分子材料弹性模量的检测。19 世纪 40 年代，J. W. Ballou [5]利用图 2 中所示装置，采用声速法对材料的杨氏模量进行测量。

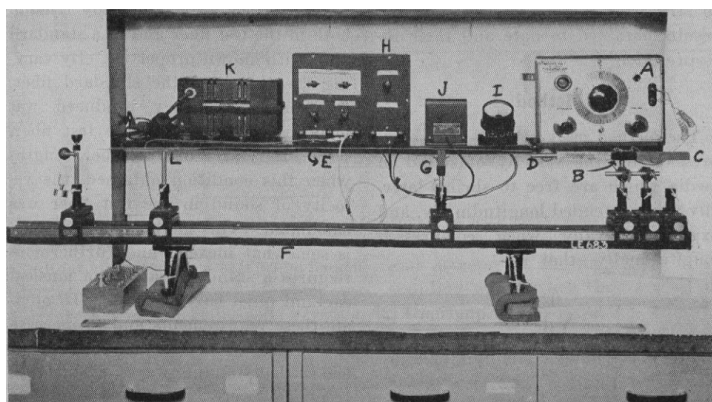


Figure 2. Apparatus used for determining Young's Modulus of Elasticity for fibers and films by sound velocity measurements [5]. (A. audio oscillator B. rochelle salt crystal C. steel resonating bar D. yarn clamp E. yarn sample F. optical bench mounting G. crystal pick-up H. amplifier for pick-up signal I. out-put meter J. filter to remove 60 cycle from I K. voltage regulating transformer for power supply)

图 2. 声速法测定材料杨氏模量装置[5]。(A. 音频振荡器 B. 酒石酸钾钠晶体 C. 钢共振棒 D. 纱线夹 E. 纱线样品 F. 光纤平台装置 G. 晶体拾音器 H. 信号提取放大器 I. 输出仪表 J. 信号过滤器 K. 电源调压变压器)

Schneider W. C. [6]等对超声波法在固体弹性常数测定中的应用进行了深入研究，结果表明固体材料中超声透射率与入射波角成函数关系，可以确定板中横波和膨胀波的速度，进而可以确定泊松比和力学模量。针对某些方法不能在高温环境下测量的缺陷，Carnevale E. H. [7]等利用瞬时接触法测量了几种材料的横波和纵波速度，并计算出其弹性模量和泊松比，温度测量范围已从室温达到 1000℃以上，图 3 即为其利用的瞬时接触系统，装置通过将探头放在可移动的滑动轨道或轴承上，可以轻松实现瞬时接触并

将探头插入高温系统中。在此基础上, Smith R. T. [8]等通过对单向应力试样中横波和纵波速度的测量, 确定了几种各向同性多晶金属的三阶弹性模量。即在弹性(非塑性)区域内, 观察到的超声波速度和外加应力之间的线性相关性可以用有限变形的宏观理论来解释。

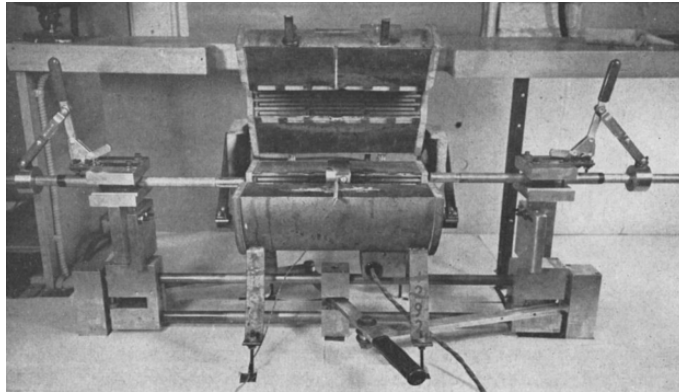


Figure 3. Momentary-contact system [7]  
图 3. 瞬时接触系统[7]

Aussel J. D. [9]等提出了一种基于连续回波来测量固体材料的声速和弹性常数的激光超声方法。利用激光超声波在热弹区域中激发的超声脉冲进行测量, 这可以在样本处进行无限次射击并可以同时测量纵向剪切速度。为进一步提高弹性模量的检测精度, 陈以方[10]等研究了棒、板等工件材料的声场, 研制出一种弹性模量检测系统, 可以利用纵波探头准确测量横波与纵波的速度值, 从而得以使用声测法对工件的泊松比和弹性模量实现在线测量, 测量精度高达 0.2%。针对文献[6] [7]中横波信号分辨困难, 测量速度时存在较大误差, 不易在特殊环境中使用的问题, 周辛庚[11]等提出通过测量由激光脉冲轰击试件表面产生的表面波与纵波速度, 进而求得材料弹性常数。这种方法避免对横波速度直接测量, 提高了信噪比, 可在特殊环境下对弹性常数进行非接触式测量。国防科学技术大学樊程广[12]利用激光超声方法对复合材料的弹性模量进行了测量, 图 4(a)为弹性模量激光超声测量系统, 图 4(b)为美国 IOS 公司生产的用于接收激光超声信号的 AIR-1550-TWM 激光超声接收仪。

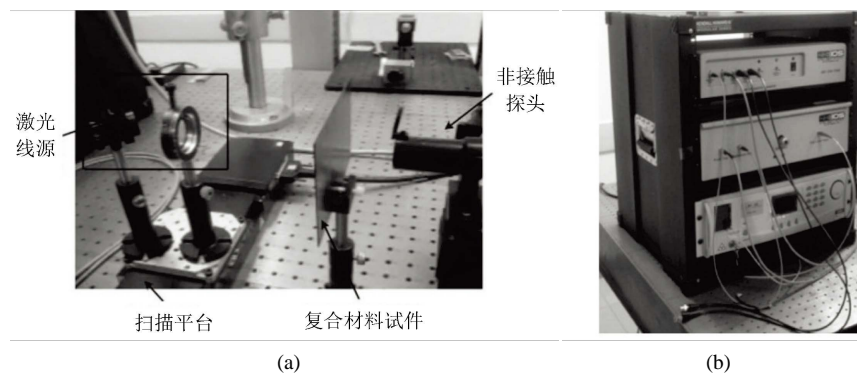


Figure 4. The substance diagram [12], (a) laser ultrasonic measurement system, (b) laser ultrasonic receiving instrument

图 4. 实物图[12], (a) 激光超声测量系统, (b) AIR-1550-TWM 激光超声接收仪

针对超声法测量弹性模量不易观测数据的问题, 候金弟[13]等研究了一种可通过示波器波形变换来测试固体材料杨氏模量和泊松比的方法。这种方法由声波在两种介质交界处上产生反射和折射时的波形变

换, 根据斯涅尔定律测得横波与纵波声速, 再由固体材料泊松比、杨氏模量与横波、纵波声速间关系测得固体材料的泊松比与杨氏模量。

对于多晶金属弹性模量与泊松比的超声表征方法, 主要是利用超声声速法, 测量横波、纵波和表面波的速度进而利用公式计算出材料的弹性模量及泊松比。此外, 还有超声脉冲法、超声相控阵法及激光超声法等都可以对金属材料弹性模量进行测量。随着计算机与人工智能的日益发展, 弹性模量与泊松比的测量还可以通过计算机来进行, 如采用有限元法对均匀介质中的正向波传播进行建模或利用编程软件采用反演算法将弹性模量与泊松比不断迭代得到近似最优解, 这无疑会进一步提高测量的精度, 为进一步的研究提供更好的思路。

### 3. 晶粒度的超声表征方法

多晶金属材料在应用过程中由于受到外力重负荷会使其内部产生大量微裂和微孔洞等微观缺陷, 这将引起材料的逐步劣化导致不能继续服役。因此对于材料微观组织的早期缺陷检测和性能评估具有重大意义, 对金属材料内部微观晶粒度的检测能够对材料的性能评估起到指导作用。传统的金相法检测晶粒尺寸需要对试样进行腐蚀、抛光等处理, 对材料有一定的破坏性。与金相法对比, 超声评价技术可以在不损伤材料内部结构的前提下实现在线检测, 这极大地提高了检测效率并得到广泛应用。

目前, 国内外大量研究学者利用超声波对金属材料的微观晶粒度进行检测与探究。早在 20 世纪 40 年代, Firestone [14]和 Sokolov [15]提出利用超声波的散射对金属组织进行研究, 但是受限于实验条件, 理论并未得到实验结果支撑, 研究随即停滞。为进一步评价超声信号与材料微观结构间的关系, Grayali 和 Shyne [16]研究了材料微观组织对超声波在 4140 钢(0.4%C)中传播速度衰减的影响。在此研究基础上, Smith [17]推导了多晶材料中晶粒尺寸对超声衰减频率依赖性影响的表达式。结果表明, 平均晶粒度相同的两个试样, 如果晶粒分布不同, 超声衰减频率曲线会有显著差异。夏纪真[18]等利用超声衰减法对锻模材料的晶粒度进行测量, 并建议采用液浸法来替代接触法进行测量以减小测量误差。基于超声波在传播过程中发生的散射衰减问题, Stanke [19]等使用自相关函数来表征颗粒的几何形状并对具有三次对称晶粒和逆指数空间自相关函数的非织构等轴材料进行数值计算, 解决了由散射引起的单相多晶介质中弹性波的衰减和相速度变化的问题。Hirse Korn [20]等基于先前提出的具有独立且均匀分布晶粒取向多晶体中的超声波传播理论, 计算纹理化多晶体中横波和纵波的散射系数、相位和群速度, 采用二阶微扰理论对三维对称多晶体中平面波的影响进行计算。李雄兵[21]等通过水浸式脉冲反射方法获取材料的超声信号, 并在每种材料上获取 20 组信号, 最终利用超声衰减法对平均晶粒尺寸进行了评估, 图 5 所示为其使用的超声信号采集系统。

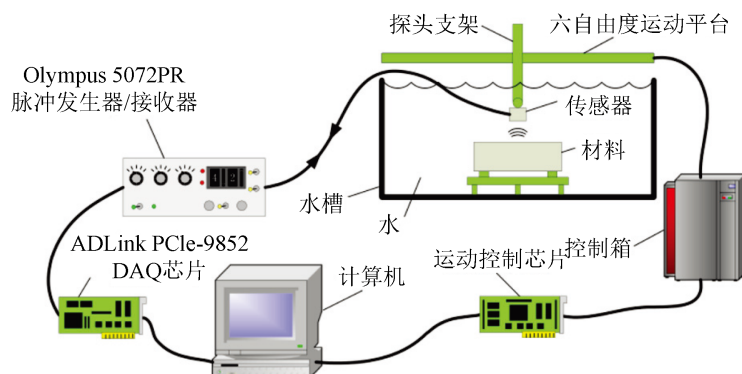


Figure 5. The schematic diagram of the ultrasonic signal acquisition system [21]  
图 5. 超声信号采集系统示意图[21]

东北石油大学的张颖等[22]利用美国日泰公司生产的 RAM-5000 SNAP 非线性超声检测系统对 20#钢的不同晶粒度工件的超声特性进行了研究, 图 6 为非线性超声检测系统示意图。Pamel 和 Huthwaite [23] 实现在二维(2D)和三维(3D)中模拟等轴多晶材料中纵波的超声散射能力。结果表明, 与超声衰减和相速度已有理论预测相比, 2D 和 3D 数值在一系列散射过程中展现出良好的一致性。

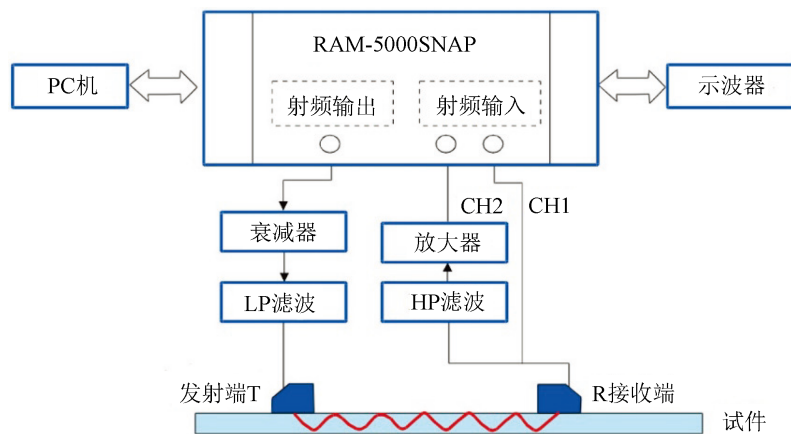


Figure 6. Non-linear ultrasonic testing system diagram for different grain size specimens [22]

图 6. 不同晶粒度试件非线性超声检测系统示意图[22]

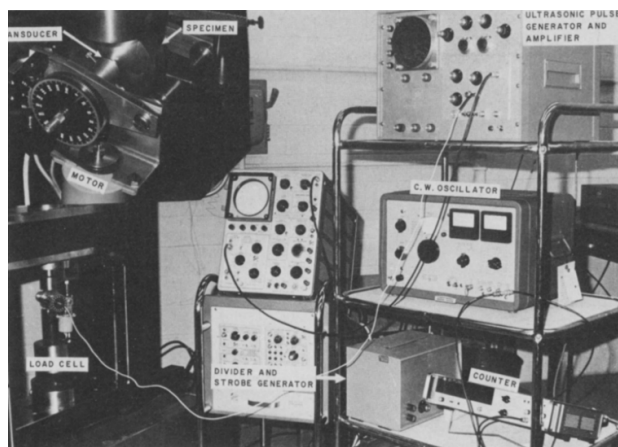
金属晶粒度常用的检测方法有: 金相法、X 射线法、超声能量衰减法、脉冲反射法、超声纵波声速法、频谱分析法、液浸法、背散射法等。经研究发现, 许多方法存在一定局限性。随着智能化算法的进一步发展, 可以利用线性拟合函数表示超声多个特征值映射参数与晶粒尺寸之间的关系, 使用进化算法定量求解晶粒尺寸之间的绝对平均误差并进行优化, 得到用于映射和拟合函数的系数, 然后生成完整的多参数超声评估模型[24]。

#### 4. 残余应力的超声表征方法

金属内部残余应力一般对材料性能不利, 当零件因工作应力与残余应力叠加, 使总应力超过强度极限时, 便容易出现裂纹和断裂。残余应力作为内应力对材料的各项性能都有一定影响, 尤其是对材料的疲劳性能有严重影响, 材料的疲劳寿命、结构强度也会因此严重下降。目前残余应力的测定主要有机械测量法和物理测量法, 前者会对材料有一定损伤, 后者则具有非破坏性。目前 X 射线法是较为成熟的无损测量方法, 但只能测量材料表面应力且对表面有较高要求。超声波法以声弹性理论为基础, 利用弹性介质中声速或频谱变化与弹性介质内部应力间的线性关系进行测量[25], 其检测速度快、灵敏度好、可靠性高, 是一种应用前景较好的残余应力检测方法。

1940 年时 S. Oka 就已发现由材料内部应力引起的声双折射现象, 但并未有实际应用。1950 年 D. S. Hughes [26] 等根据有限形变理论, 研究了超声波在材料中传播时应力与速度间的关系并给出各向同性材料声弹性理论表达式, 为超声波应力测量奠定基础。根据超声波速度与材料内部应力间的关系, Crecraft [27] 实测了钢、铝、铜三种金属材料的横向和纵向超声波速度在内部应力影响下变化的结果, 并计算了相应的三阶弹性常数。Nelson N. Hsu [28] 设计了一种利用超声波进行应力分析的实验, 发现了铝和钢试样在单轴压缩下, 其速度变化与施加应力之间存在的线性关系, 实验装置如图 7 所示。Allen 和 Sayers [29] 由材料内部产生的声双折射现象, 利用横波双折射技术中两个正交偏振横波、纵波的时延和由立方晶体组成的正交对称聚集体的超声速度表达式对钢中组织残余应力进行了测量。由于声速的相对变化比较小

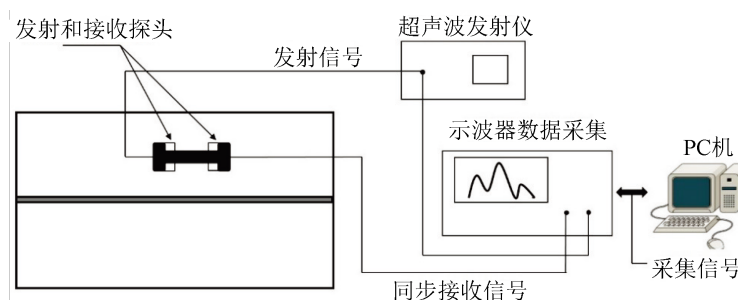
且与外加应力成正比,对金属材料内部残余应力的测量精度要求也相应提高, Karabutov [30]与 Sanderson [31]研究了利用激光发射的瞬时超声波对金属表面和焊缝的残余应力进行测量,进一步提高了测量精度。



**Figure 7.** Picture of the transducer assembly and the setup of the instruments for velocity measurement on an aluminum disk under diametric compression [28]

**图 7.** 换能器组件及铝盘测速装置[28]

路浩[32]等基于传统的声弹性效应,利用基于界折射纵波的超声波法焊接残余应力系统无损测量了低碳钢的焊接残余应力并使用激光全息小孔法验证了实验结果,其应力测量系统如图 8 所示;设备的重要组成:全息激光头如图 9 所示。



**Figure 8.** Ultrasonic stress measurement system [32]

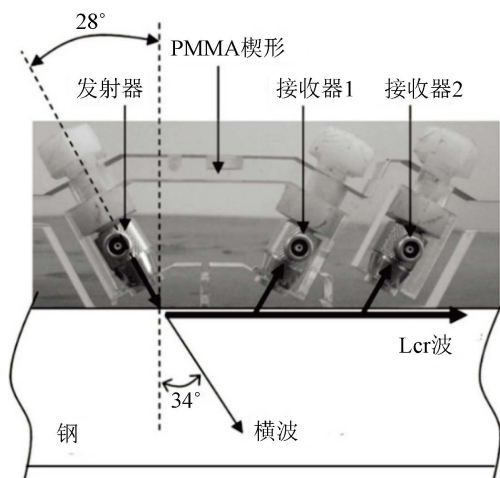
**图 8.** 超声波法应力测量系统[32]



**Figure 9.** Photograph of holographic laser head assembly [32]

**图 9.** 全息激光头组件图示[32]

为进一步模拟材料内部残余应力, Javadi [33]等采用有限元分析方法, 对 304 奥氏体不锈钢板的焊接残余应力进行了分析, 通过采用钻孔法对有限元模型进行了验证并与基于声弹性的超声应力测量模型进行比较后发现, 这种使用纵向临界折射(LCR)波的方法可以有效测量钢板内部的残余应力。图 10 为通过传感器楔于钢上测量 LCR 波的探针。



**Figure 10.** Schematic diagram of a probe device for measuring LCR waves [33]

**图 10.** 测量 LCR 波的探针装置示意图[33]

多晶金属内部残余应力常用的检测方法有: X 射线法、声弹性法、超声横波法、超声纵波法、超声双折射测试法、激光超声波法等。其中超声波法不受材料种类的限制并可用于较厚样品的在线检测, 具有较好的应用前景。目前, 复杂曲面下残余应力的检测仍然面临很大挑战, Qinxue Pan [34]等在工业机器人技术与残余应力超声无损检测技术相结合的基础上, 构建了双机械手残余应力超声检测机器人系统并建立了临界折射纵波法测量残余应力的模型, 实现了曲面下残余应力的自动无损测量, 这无疑是残余应力超声表征的一大突破, 利用人工智能机器人与超声无损检测技术相结合进行超声表征无疑为人们接下来的研究方向提供了思路。

## 5. 性能退化的超声表征方法

对于机械设备中在役的金属结构工件来说, 其寿命在使用过程及外界载荷的压力下可分为三个阶段: 早期性能退化、损伤累积和最后的断裂失效[35]。声学、力学、材料学的各领域专家经过多年研究发现材料的性能退化与超声波穿透材料传播过程中的非线性效应十分相关, 因此对材料力学性能退化的超声无损检测与评价也逐渐发展起来。

材料性能退化总是伴随着某种形式的非线性力学行为, 随即引发超声波的非线性传播, 即产生高次谐波[36]-[46]。Buck [38]等通过非线性声学试验发现单晶和多晶金属材料能承受的疲劳循环次数与高次谐波间存在紧密联系。Cantrell [39] [40] [41]和 Frouin [42]等研究发现, 金属材料在疲劳退化失效中的各个阶段都可由非线性系数来表征。Nagy [43]采用一种特殊的实验技术, 对复合材料、塑料、金属等多种材料的二阶声弹性系数进行了测试。实验结果表明: 非线性声学参数比线性声学参数能够更早、更灵敏地反映出材料的疲劳损伤。Jhang [44]等尝试测量在材料中产生的高阶谐波分量, 并构建了利用外差信号检测技术分析的大功率非线性超声信号系统。结果发现利用非线性超声效应评价材料退化是可行的, 图 11 为典型的二次谐波频率分量测量系统。



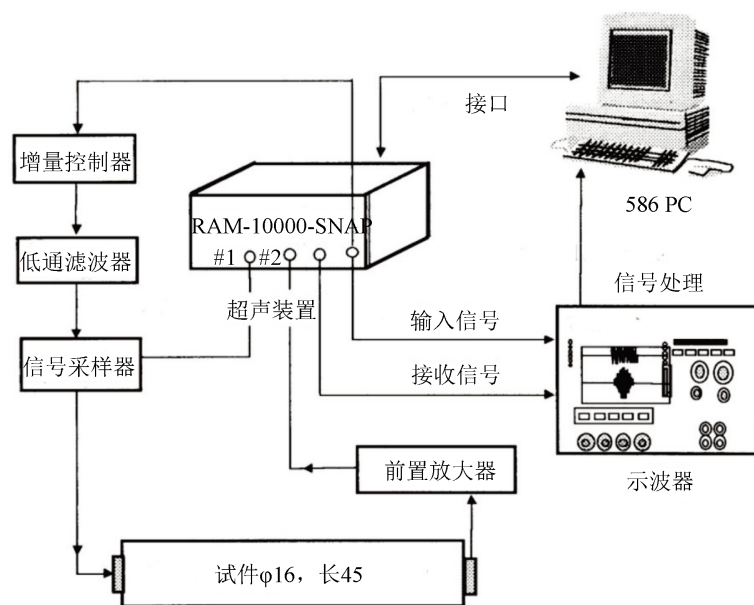


Figure 11. Measurement system for the second-order harmonic frequency component [44]

图 11. 二次谐波频率分量测量系统[44]

税国双[47]等提出利用直接激发 Rayleigh 波的方法测量材料声学非线性系数, 经验证这种方法有效, 为材料早期性能退化的无损检测提供了方法。Cantrell [40]提出两个互相作用的位错偶模型, 发现在金属疲劳过程中形成的位错偶极子结构会使超声波在疲劳材料中的传播产生如图 12(a)所示的较大失真畸变, 图 12(b)为接收信号经傅里叶变换后与  $\beta$  间的关系。

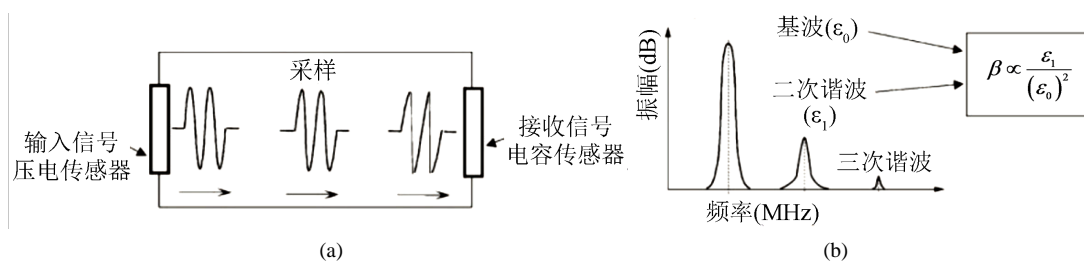


Figure 12. (a) Ultrasonic signal distorts as it propagates through the material, (b) Fourier spectrum of the received signal after transmission and relation to  $\beta$  [40]

图 12. (a) 超声波信号在传输过程中失真, (b) 信号经傅里叶变换后与  $\beta$  间关系[40]

目前材料的性能退化主要可用非线性超声检测技术进行评价, 其主要利用基波、二次、三次谐波与非线性超声系数对材料的早期疲劳损伤进行无损评价。另有研究学者采用有限元数值模拟的方法来分析金属材料的力学性能退化规律或者通过建立物理模型的方法对力学性能退化进行分析。非线性超声目前大多应用于金属材料, 构建的理论模型也十分有限, 因此我们需要将材料的力学特性与超声波的非线性效应紧密结合, 利用计算机对材料的力学性能退化进行客观的无损评价。

## 6. 团队研究工作

本团队对多晶金属材料的超声表征进行了研究, 包括对材料弹性模量、晶粒度、应力等特性进行了一定探究。之前的研究表明: 晶粒分布对材料的力学性能会产生可测的影响。基于此, 我们研究了晶粒

分布对激光超声波在  $\alpha$  钛合金中衰减的影响并进行量化。实验通过在 800℃ 退火下保持不同的时间，从而获得具有 26~49  $\mu\text{m}$  的不同平均晶粒尺寸的微观结构，此时获得的晶粒尺寸大致为正态分布。通过经典的 Rokhlin 模型和改进的 Turner 模型进行测量，结果表明当考虑单个平均晶粒尺寸时，其衰减率比经典理论预测的衰减率要大。另外由于大晶粒的概率比假设的泊松统计量大，其衰减频率依赖性也大幅降低，这将有利于我们用激光超声技术来无损评估多晶材料中的晶粒尺寸分布[48]。图 13 为激光超声实验系统原理图。

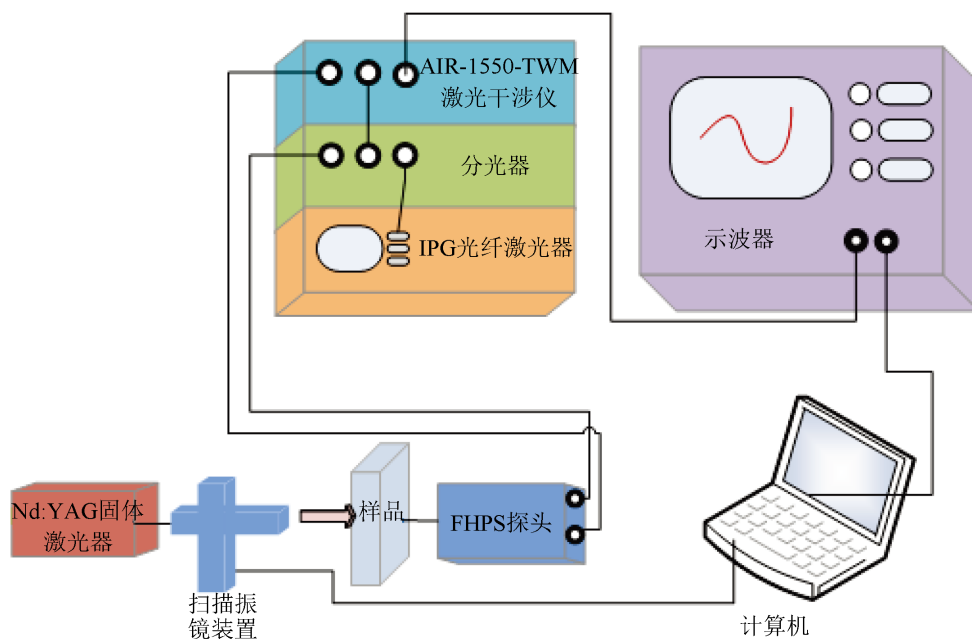


Figure 13. Schematic diagram of experimental system by laser ultrasonics [48]  
图 13. 激光超声实验系统原理图[48]

为了解决超声衰减方法测量晶粒尺寸精度相对较低且易受到噪声信号影响的问题，我们利用质心频移方法对多晶材料平均晶粒尺寸进行超声表征并建立了高斯脉冲在衰减频率相关的非线性介质中传播时，平均晶粒尺寸与质心频率下移间关系的模型[49]。另外，我们还提出了一种利用有限元方法对多晶材料微观结构的非均匀性引起的超声散射问题进行研究，并在时域和频域内进行量化[50]。

目前，随着互联网的快速发展，将超声无损检测技术与人工智能相结合来研究多晶金属材料的内部特性是很好的思路，这将会极大地提高测量的精度，为发现早期材料的内部缺陷与性能退化提供有效检测手段，当然也为我们的研究提出了新的挑战。

## 7. 总结与展望

多晶金属材料特性的超声表征方法非常广泛，对金属弹性模量、晶粒度、应力、力学性能退化的检测方法研究也逐渐深入。目前国内外学者为了能够更加快速准确而且无损伤地检测金属材料的内部特性而展开了研究。

超声检测由于可以实现对材料非接触、高精度、无损伤的检测而越来越受到研究者的青睐。而且随着人工智能和深度学习算法的不断发展，对于材料的超声线性表征也会很快地应用其中。通过计算机不断地优化学习计算，我们可能会对材料内部的超声表征有更加客观地无损评价。

从科学研究方面来讲，现有的国内外研究成果支撑着学科发展，对于材料的超声无损表征可能会在

增材制造、孔隙非均匀性检测与评价等方面有更多的研究价值。从工程应用方面来讲, 超声 LCR 波法在测量材料内部残余应力和表面应力方面被证明较为准确和实用, 利用非线性超声构建物理模型从而对多晶材料的力学性能退化进行无损评估也被证明是一种有效的方法, 但目前可用的物理模型较少, 还需要进一步扩充完善。目前待发展的有效检测手段可能会在科学研究和工程应用方面有更大的实用价值。

材料科学与制造技术的进步不断推动着航空、冶金、医疗、机械制造以及核能等多个领域的协同发展, 新型材料、结构、工艺等不断涌现并投入应用, 制造质量、设备性能以及对应用安全可靠性的提高迫使无损检测技术不断发展[51]。应用于多晶金属材料内部缺陷与特性检测的电磁超声、激光超声、相控阵超声、空气耦合超声、静电耦合超声等无损检测技术都存在一定的优劣势与技术难点。其中: 电磁超声技术对金属自然缺陷较为敏感且无需耦合, 但受限于提高距离限制及易受环境噪声干扰; 激光超声技术因其可激发高频声波, 适用于微观组织结构评价与微小缺陷检测, 且能够用于具有复杂几何形状材料的检测, 但该技术受限于激光激励声波的光声转换效率, 不适用于大厚度材料以及表面光反射率较低材料的检测; 相控阵超声技术的控制算法较为复杂, 针对特定工件检测时的方案设计和控制参量设置较为困难; 空气耦合超声技术受限于气固交界面显著的超声衰减性质, 对横向和纵向的超声波信号分辨率较低; 静电耦合超声技术对静电换能器和前置放大器的要求较高且对湿度、灰尘等外界干扰较为敏感, 不适用于恶劣的工业检测环境。这些都对我们的应用研究提出了极大挑战。

实现工业设备的智能化、高质量制造和高可靠性应用, 攻关并研制标准化、自主化、精量化、智能化的超声无损检测技术与设备是今后研究的重要课题。无损表征检测方法与成像方法的交叉融合以提高检测方法的可靠性、适用性和经济性是无损检测技术研究的重要方向[52]。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51805304), 山东省自然科学基金项目(ZR2017QEE002、ZR201807060455), 齐鲁工业大学(山东省科学院)青年博士合作基金项目(2018BSHZ004), 山东省重点研发计划(创新产业集群项目 2016ZDJQ040), 山东省重点研发计划(公益类专项 2019GSF111058)。

## 参考文献

- [1] Li, J., Yang, L. and Rokhlin, S.I. (2014) Effect of Texture and Grain Shape on Ultrasonic Backscattering in Polycrystals. *Ultrasonics*, **54**, 1789-1803. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.02.020>
- [2] Thompson, R.B., Margetan, F.J., Haldipur, P., et al. (2008) Scattering of Elastic Waves in Simple and Complex Polycrystals. *Wave Motion*, **45**, 655-674. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2007.09.008>
- [3] Yang, L., Li, J. and Rokhlin, S.I. (2013) Ultrasonic Scattering in Polycrystals with Orientation Clusters of Orthorhombic Crystallites. *Wave Motion*, **50**, 1283-1302. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2013.06.003>
- [4] Du, H. and Turner, J.A. (2014) Ultrasonic Attenuation in Pearlitic Steel. *Ultrasonics*, **54**, 882-887. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.10.017>
- [5] Ballou, J.W. and Silverman, S. (1944) Sound Velocity Measurements. *Textile Research*, **14**, 282-292. <https://doi.org/10.1177/004051754401400902>
- [6] Schneider, W.C. and Burton, C.J. (1949) Determination of the Elastic Constants of Solids by Ultrasonic Methods. *Journal of Applied Physics*, **20**, 48-58. <https://doi.org/10.1063/1.1698236>
- [7] Carnevale, E.H., Lynnworth, L.C. and Larson, G.S. (1963) Ultrasonic Measurement of Elastic Moduli at Elevated Temperatures, Using Momentary Contact. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **35**, 1883. <https://doi.org/10.1121/1.2142644>
- [8] Smith, R.T., Stern, R., Stephens, R.W.B. (1966) Third-Order Elastic Moduli of Polycrystalline Metals from Ultrasonic Velocity Measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **40**, 1002-1008. <https://doi.org/10.1121/1.1910179>
- [9] Aussel, J.D. and Monchalain, J.P. (1989) Precision Laser-Ultrasonic Velocity Measurement and Elastic Constant Determination. *Ultrasonics*, **27**, 165-177. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(89\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0041-624X(89)90059-0)

- [10] 陈以方, 张家骏. 超声检测工件弹性模量的研究[J]. 无损检测, 1997(9): 241-244.
- [11] 何存富, 周辛庚, 戴福隆. 一种非接触式测定材料弹性常数的新方法[J]. 力学学报, 1997, 29(6): 720-725.
- [12] 樊程广, 潘孟春, 罗飞路, 罗诗途, 谭项林. 复合材料弹性模量的激光超声测量方法研究[J]. 测试技术学报, 2012, 26(1): 78-82.
- [13] 侯金弟, 等. 测量固体材料泊松比和杨氏模量的新方法[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 75-78.
- [14] Firestone, F.A. (1946) The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **17**, 287-299. <https://doi.org/10.1121/1.1916330>
- [15] Sokolov, S.J. (1948) Absorption of Ultrasonic Oscillations by Solid Bodies. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **59**, 883.
- [16] Grayeli, N. and Shyne, J.C. (1984) Effect of Microstructure and Prior Austenite Grain Size on Acoustic Velocity and Attenuation in Steel. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **4B**, 927-937.
- [17] Smith, R.L. (1982) The Effect of Grain Size Distribution on the Frequency Dependence of the Ultrasonic Attenuation in Polycrystalline Materials. *Ultrasonics*, **20**, 211-214. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(82\)90021-X](https://doi.org/10.1016/0041-624X(82)90021-X)
- [18] 夏纪真, 陈文霖. 用超声衰减法检查锻模材料的晶粒度[J]. 无损检测, 1980, 2(4): 26-28.
- [19] Stanke, F.E. and Kino, G.S. (1984) A Unified Theory for Elastic Wave Propagation in Polycrystalline Materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **75**, 665-681. <https://doi.org/10.1121/1.390577>
- [20] Hirsekorn, S. (1985) The Scattering of Ultrasonic Waves in Polycrystalline Materials with Texture. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **77**, 832-843. <https://doi.org/10.1121/1.392052>
- [21] Li, X., Song, Y., Liu, F., et al. (2015) Evaluation of Mean Grain Size Using the Multi-Scale Ultrasonic Attenuation Coefficient. *NDT & E International*, **72**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.02.002>
- [22] 张颖, 吴昊, 李彬, 李栋山. 20#钢不同晶粒度试件非线性超声特性实验研究[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 123-126.
- [23] Van Pamel, A., Brett, C.R., Huthwaite, P., et al. (2015) Finite Element Modelling of Elastic Wave Scattering within a Polycrystalline Material in Two and Three Dimensions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **138**, 2326-2336. <https://doi.org/10.1121/1.4931445>
- [24] Chen, X., Wu, G., Chen, H., et al. (2019) A Multi-Parameter Ultrasonic Evaluation of Mean Grain Size Using Optimization. *NDT & E International*, **106**, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.003>
- [25] 贺玲凤, 刘军. 声弹性技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 134-140.
- [26] Hughes, D.S. (1950) Ultrasonic Velocity in an Elastic Solid. *Journal of Applied Physics*, **21**, 294-301. <https://doi.org/10.1063/1.1699656>
- [27] Crecraft, D.I. (1967) The Measurement of Applied and Residual Stresses in Metals Using Ultrasonic Waves. *Journal of Sound and Vibration*, **5**, 173-192. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1)
- [28] Hsu, N.N. (1974) Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis. *Experimental Mechanics*, **14**, 169-176. <https://doi.org/10.1007/BF02323061>
- [29] Allen, D.R. and Sayers, C.M. (1984) The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique. *Ultrasonics*, **22**, 179-188. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(84\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(84)90034-9)
- [30] Karabutov, A., Devichensky, A., Ivochkin, A., et al. (2008) Laser Ultrasonic Diagnostics of Residual Stress. *Ultrasonics*, **48**, 631-635. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.07.006>
- [31] Sanderson, R.M. and Shen, Y.C. (2010) Measurement of Residual Stress Using Laser-Generated Ultrasound. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **87**, 762-765. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.10.001>
- [32] 路浩, 刘雪松, 杨建国, 方洪渊. 激光全息小孔法验证超声波法残余应力无损测量[J]. 焊接学报, 2008(8): 77-79+117.
- [33] Javadi, Y., Akhlaghi, M. and Najafabadi, M.A. (2013) Using Finite Element and Ultrasonic Method to Evaluate Welding Longitudinal Residual Stress through the Thickness in Austenitic Stainless Steel Plates. *Materials & Design*, **45**, 628-642. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038>
- [34] Pan, Q., Shao, C., Xiao, D., et al. (2019) Robotic Ultrasonic Measurement of Residual Stress in Complex Curved Surface Components. *Applied Bionics and Biomechanics*, **2019**, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2019/2797896>
- [35] 税国双, 汪越胜, 曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 52-68.
- [36] Hikata, A., Chick, B.B. and Elbaum, C. (1965) Dislocation Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves. *Journal of Applied Physics*, **36**, 229. <https://doi.org/10.1063/1.1713881>
- [37] Hikata, A., Sewell, F.A. and Elbaum, C. (1966) Generation of Ultrasonic Second and Third Harmonics due to Dislocations. II. *Physical Review*, **151**, 442-449. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.151.442>

- [38] Buck, O. (1976) Harmonic Generation for Measurement of Internal Stresses as Produced by Dislocations. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, **23**, 346-350. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1976.30889>
- [39] Cantrell, J.H. and Yost, W.T. (1994) Acoustic Harmonic Generation from Fatigue-Induced Dislocation Dipoles. *Philosophical Magazine A*, **69**, 315-326. <https://doi.org/10.1080/01418619408244346>
- [40] Cantrell, J.H. and Yost, W.T. (2001) Nonlinear Ultrasonic Characterization of Fatigue Microstructures. *International Journal of Fatigue*, **23**, 487-490. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00162-1](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00162-1)
- [41] Na, J.K., Cantrell, J.H. and Yost, W.T. (1996) Linear and Nonlinear Ultrasonic Properties of Fatigued 410Cb Stainless Steel. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1\\_176](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1_176)
- [42] Frouin, J., Sathish, S., Matikas, T.E., *et al.* (1999) Ultrasonic Linear and Nonlinear Behavior of Fatigued Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Research*, **14**, 1295-1298. <https://doi.org/10.1557/JMR.1999.0176>
- [43] Nagy, P.B. (1998) Fatigue Damage Assessment by Nonlinear Ultrasonic Materials Characterization. *Ultrasonics*, **36**, 375-381. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00040-1)
- [44] Jhang, K.Y. and Kim, K.C. (1999) Evaluation of Material Degradation Using Nonlinear Acoustic Effect. *Ultrasonics*, **37**, 39-44. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(98\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(98)00045-6)
- [45] Jhang, K.Y. (2000) Applications of Nonlinear Ultrasonics to the NDE of Material Degradation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **47**, 540-548. <https://doi.org/10.1109/58.842040>
- [46] Abeele, E.A.V.D., Johnson, P.A. and Sutin, A. (2000) Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, **12**, 17-30. <https://doi.org/10.1080/09349840009409646>
- [47] 税国双, 汪越胜, Jianmin, 等. 利用直接激发 Rayleigh 表面波的方法测量材料的声学非线性系数[J]. *声学学报*, 2008, 33(4): 378-384.
- [48] Bai, X., Zhao, Y., Ma, J., *et al.* (2019) Grain-Size Distribution Effects on the Attenuation of Laser-Generated Ultrasound in  $\alpha$ -Titanium Alloy. *Materials*, **12**, 102. <https://doi.org/10.3390/ma12010102>
- [49] Bai, X., Zhao, Y., Ma, J., *et al.* (2019) Grain size Characterization by Laser-Based Ultrasonics Based on the Centroid Frequency Shift Method. *Materials Characterization*, **155**, Article ID: 109800. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109800>
- [50] Bai, X., Tie, B., Schmitt, J.H., *et al.* (2018) Finite Element Modeling of Grain Size Effects on the Ultrasonic Microstructural Noise Backscattering in Polycrystalline Materials. *Ultrasonics*, **87**, 182-202. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.02.008>
- [51] 沈功田. 中国无损检测与评价技术的进展[J]. *无损检测*, 2008(11): 787-793.
- [52] 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 1-10.