

# 基于波前调控的激光超声显微成像技术及其应用 (特邀)

乔杰<sup>1</sup>, 冯甫<sup>1\*</sup>, 黄子嫣<sup>2</sup>, 胡斌<sup>2</sup>, 李江艳<sup>2</sup>, 马海祥<sup>1</sup>, 霍德旺<sup>1\*\*\*</sup>, 袁小聪<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>之江实验室前沿基础研究中心, 浙江 杭州 310000;

<sup>2</sup>深圳大学微纳光电子学研究院, 广东 深圳 518000

**摘要** 为了研究镍基高温合金声学表面波(SAW)的传播速度与晶向之间的关系,介绍了一种基于波前调控的新型激光超声技术。该技术采用光栅将激发光调制成周期排列的线性光源,从而在样品表面激发出具有特定波长且定向传播的SAW。通过对SAW传播速度的提取实现样品各向异性的分析。结合数值仿真与实验验证,实现了单晶镍基高温合金SAW速度的定量检测与各向异性分析。提出了基于波前调控的激光超声有限元数值仿真模型,通过数值仿真得到单晶镍基高温合金在(100)晶面和(001)晶面内的SAW速度各向异性比分别为0.073和0.18。基于镍基高温合金声速对晶向的依赖性,采用激光超声显微成像系统对单晶以及多晶镍基高温合金表面声速进行扫描成像,实现了表面缺陷以及晶粒分布状态的可视化分析。研究结果表明基于波前调控的激光超声显微成像技术为特种金属缺陷以及声速检测提供了一种新型快速的无损检测手段。

**关键词** 成像系统; 镍基高温合金; 声学表面波; 激光超声; 波前调控; 声速各向异性

**中图分类号** TN249

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231848

## 1 引言

作为航空发动机涡轮叶片主要制造材料之一的镍基高温合金,其力学性能与缺陷种类、晶格方向密切相关,因此对缺陷与晶向的严格把控是保障其服役性能的重要手段。超声检测通过提取材料的超声信号来解析材料的性质和缺陷,具有检测能力强、操作安全和成本低等优点<sup>[1-4]</sup>。传统的超声检测多数采用压电换能器收发信号,需要使用耦合剂来实现更好的声学阻抗匹配<sup>[5]</sup>。然而,对于很多检测对象来说,特别是复合材料以及金属材料,耦合剂的长期使用会腐蚀表面,从而对其性能造成二次损伤。激光超声作为一种新型的超声检测技术,使用脉冲激光轰击样品表面,激发出超声波,然后用另一束激光以非干涉或干涉的方式来实现超声波的探测<sup>[6-8]</sup>。激光超声采用全光的激发和探测,相比于传统缺陷检测方式,具有快速、无损、非接触、频带宽以及大视场等优点,在进行复杂结构和大尺寸结构件检测时显示出巨大的优势,适用于高温、辐射、有毒等极端环境中。

近年来,激光超声技术因其在缺陷和晶向评估方面的巨大潜力而受到越来越多的关注<sup>[9-15]</sup>。自1963年

White<sup>[16]</sup>和Askar'Yan等<sup>[17]</sup>分别发现脉冲激光可以在固体中和液体中激发超声波以来,在激光超声的激发机理、检测技术及其应用等方面涌现出了大量的研究成果。1984年Rose<sup>[18]</sup>利用经典热弹理论,研究了一种点源激发的激光超声波理论。2000年,Royer等<sup>[19]</sup>研究了激光光源在各向同性固体中激发表面声波的解析模型。这些理论和模型的发展为在金属表面采用激光激发超声波进行材料无损检测提供了基础。激光超声大多采用单点激发方式,将激发光聚焦成一个点源或一条线源来激发光声信号,通过辨别信号波形的变化或声波到达时间来判断材料的性质和缺陷的存在。2017年Manzo等<sup>[20]</sup>通过记录表面波到达时间的变化实现热影响区温度变化的探测。然而,此种方式激发的声波模式复杂,多种频率的超声波混合在一起,使得后续数据处理过程中的数学建模较复杂,无法准确得到超声波的传播速度,因此无法准确探测出材料的晶向分布。2003年,Sharples等<sup>[21]</sup>提出了一种新型的激光超声显微成像技术,通过波前调控的方法将激发光源调制成光栅状照射在材料表面,以此来激发出定向传播的具有特定模态的声学表面波(SAW),通过解析SAW的频率进一步计算其传播速度,最终获得材料表

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-01-12; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62205215, 62275167, 12304330)、浙江省自然科学基金(LQ23F050009)、浙江省实验室重点研发项目(2022MG0AC05)、之江实验室中心立项项目(113014-AL2209)、中国博士后科学基金会(2022M722906)

通信作者: \*xcyuan@zhejianglab.com; \*\*fufeng@zhejianglab.com; \*\*\*dwhuo@zhejianglab.com

面晶向分布信息<sup>[22-25]</sup>。相比于单个点源或者线源激发 SAW 的方式,基于波前调控的激光超声技术使得数据处理过程中的数学建模变得更加容易,从而能够更容易地获取材料的关键特性(例如声速、晶向、晶界等)。因此,基于波前调控的激光超声显微成像技术在特种金属结构件,特别是航空发动机单晶涡轮叶片等关键部件的无损探测应用中发挥重要的作用。2020年, Ma 等<sup>[26]</sup>利用该技术研究了表面声速与晶向之间的关系,并对其弹性模量各向异性进行了详细的计算。2021年, Kou 等<sup>[27]</sup>将该技术用于封闭表面裂纹的检测,研究了裂纹长度和深度对声非线性参数的影响,验证了基于波前调控的激光超声技术在表面封闭裂纹无损检测领域的可行性。

本文提出了基于波前调控的激光超声有限元数值仿真模型,采用数值仿真以及实验验证相结合的方法,探究了镍基高温合金 SAW 速度与晶向之间的关系,对其(100)晶面以及(001)晶面声速的各向异性进行了详细研究。同时搭建了一套基于波前调控的激光超声显微成像系统,并对单晶镍基高温合金(100)晶面声速进行了定量检测。进一步借助 SAW 声速对晶向的依赖性,通过激光超声显微成像系统

对单晶以及多晶镍基高温合金表面 SAW 速度进行扫描成像,实现了样品表面缺陷以及晶粒分布状态的可视化分析,验证了基于波前调控的激光超声显微成像技术在特种金属结构件缺陷以及声速检测领域的可行性。

## 2 原理介绍

### 2.1 激光超声原理

根据入射激光功率密度和材料损伤阈值的不同,激光激发超声波的方式可分为热弹机制和烧蚀机制,在两种机制下所形成的超声波的特征是不同的<sup>[28-29]</sup>。在热弹机制下,如图 1(a)所示,照射到材料表面的部分激光能量被材料吸收,被激光照射的区域温度迅速上升,导致局部的瞬间膨胀与收缩,产生超声波。在烧蚀机制下,如图 1(b)所示,入射激光功率密度相对较高,局部的升温在固体表面引起熔融、气化、等离子体现象,并且激光以很高的速度离开固体表面,在表面伴随着超声波的产生。虽然烧蚀效应下超声波强度较高,但是材料在烧蚀效应下会发生不可逆的损坏,因此在无损检测中,为了避免对待检部件造成不必要的损伤,一般选择热弹机制产生超声波。

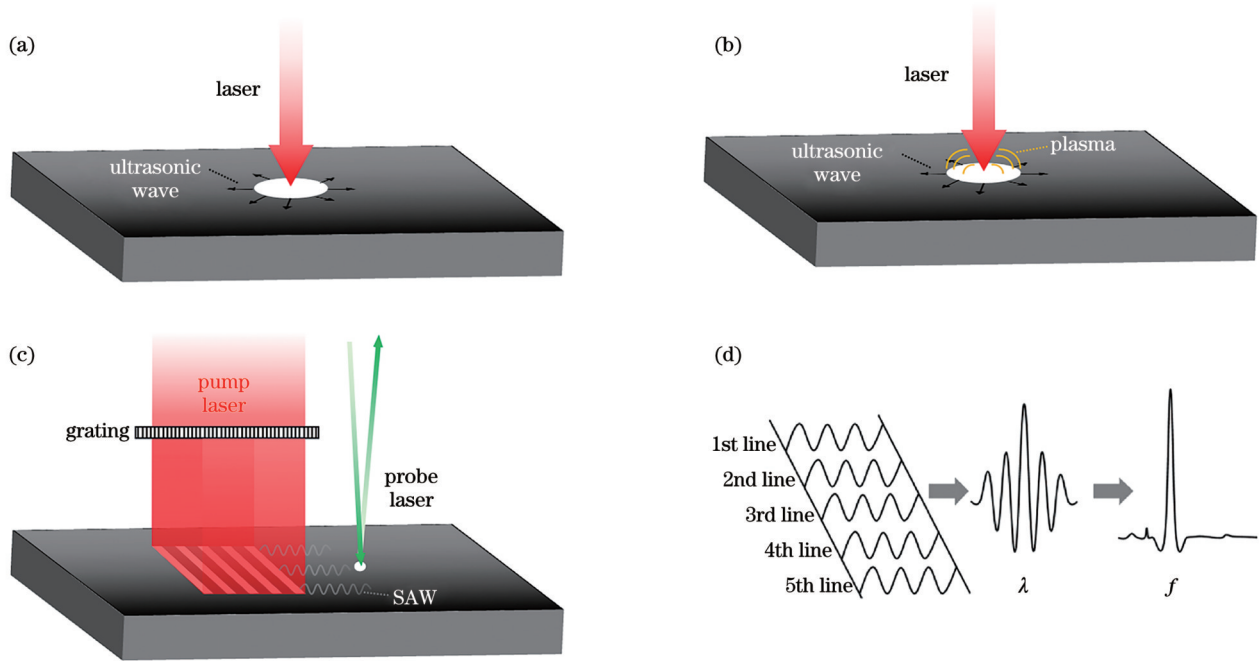


图 1 激光超声的激发机制。(a)热弹机制;(b)烧蚀机制;基于波前调控的激光超声 SAW(c)产生与(d)探测机制

Fig. 1 Excitation mechanisms of laser ultrasound. (a) Thermoelastic mechanism; (b) ablative mechanism; SAW (c) generation and (d) detection mechanisms of laser ultrasound based on wavefront regulation

热弹机制产生超声波的原理:当脉冲激光束照射到合金表面时,表面区域会吸收激光的电磁辐射能量,并产生热源。温度分布不均匀会引起较大的热弹性变形。随着加载时间的增加,热弹性变形会先增加后减小,这导致超声脉冲的产生。在这个过程中,当激光能量密度低于样品的烧蚀阈值时,热弹性效应起着重要

作用。脉冲激光诱导的超声信号<sup>[30]</sup>可以表示为

$$q_i = \frac{B\mu_1}{L \sqrt{\left(1 + \frac{\mu_1}{L}\right)^2 + 1}}, \quad (1)$$

式中: $q_i$ 是不同频率的超声信号; $L$ 是光学穿透深度; $\mu_1$ 是热扩散长度; $B$ 为常数。显然,穿透深度和扩散长度

是影响超声能量的主要因素。这些因素之间的相互关系可以表示为

$$\Delta t_{1/2} = \frac{L \ln 4}{\nu} + 2.22\tau, \quad (2)$$

式中： $\Delta t_{1/2}$ 是产生的超声脉冲的半峰全宽； $\nu$ 和 $\tau$ 分别是超声速度和激光脉冲宽度。式(2)指出，穿透深度和激光脉冲宽度直接影响超声谱。超声带宽与激光脉冲宽度成反比。穿透深度 $L$ 可以通过 $L=3[2kt/(\rho C_p)]^{1/2}$ 计算，其中 $k$ 、 $\rho$ 和 $C_p$ 分别是材料的热导率、密度和热容， $t$ 是温度下降到初始温度的1%以下所用的时间。

## 2.2 基于波前调控的激光超声原理

基于波前调控的新型激光超声技术采用光栅投影的方法，如图1(c)所示，将激发激光源调制成具有特定周期的光栅，照射在样品表面。由于热弹效应，每一条线性光源都会产生沿表面传播的具有混合模态的SAW<sup>[26-27]</sup>。然而，只有波长 $\lambda$ 与光栅周期相等的SAW之间才会相互叠加增强，并在垂直于光栅的方向上沿着表面传播，如图1(d)所示。通过对超声信号的解析可以得到其频率 $f$ ，利用公式 $v=\lambda f$ 可以直接计算得到SAW传播速度。对于各向异性材料而言，为了推导出在给定方向上SAW速度与材料特性之间的关系，必须考虑弹性波动方程。当弹性波在介质中传播时，将在轴 $x_i$ 法向的表面上沿 $x_j$ 方向施加的力记为 $T_{ij}$ 。因此，介质中的运动方程<sup>[31-32]</sup>为

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}, \quad i, j=1, 2, 3, \quad (3)$$

式中： $u_i$ 为 $x_i$ 方向上的位移； $\rho$ 为材料密度。根据胡克定律张量表达式，弹性介质中应力 $T_{ij}$ 与应变 $S_{kl}$ 呈线性关系：

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}, \quad i, j, k, l=1, 2, 3, \quad (4)$$

式中： $C_{ijkl}$ 为刚度张量大小。在各向异性介质中，任一方向的应力不仅与该方向的应变有关，还与其他方向的应变有关。此时， $S_{kl}$ 与 $\mu_k$ 之间的关系可以表示为

$$S_{kl} = \frac{\partial \mu_k}{\partial x_l}, \quad k, l=1, 2, 3. \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)，可得各向异性弹性介质的波动方程：

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j}, \quad i, j, k, l=1, 2, 3. \quad (6)$$

波动方程[式(6)]的解可以表示为

$$\mu_i = \alpha_i \exp\left\{j[\omega t - \beta(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3)]\right\}, \quad i=1, 2, 3, \quad (7)$$

式中： $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 为传播矢量的方向余弦； $\omega=2\pi f$ 为角频率； $\beta=2\pi/\lambda$ 为波数； $\alpha_i$ 为相应特征值的特征向量。该解定义了粒子位移和波的类型，而特征向量与波的速度对应的特征值相关联。将式(7)代入式(6)中，可得

$$\beta^2 C_{ijkl} l_i l_j \alpha_k - \rho \omega^2 \alpha_l = 0, \quad i, j, k, l=1, 2, 3, \quad (8)$$

式(8)两边分别除以 $\beta^2$ ，变为

$$(C_{ijkl} - \rho v^2 \delta_{ik}) \alpha_k = 0, \quad i, j, k, l=1, 2, 3, \quad (9)$$

式中： $v^2=\omega^2/\beta^2$ ，且 $\delta_{ik}=\begin{cases} 1, & i=k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$ 。根据式(9)，在材

料弹性常数 $C_{ijkl}$ 、SAW传播速度已知的情况下，可以推导出其对应的晶格方向。相比于传统的激光超声获取晶体SAW速度的方法，基于波前调控的激光超声技术可以更为直接简单地获得SAW速度，因此在晶向检测、材料各向异性分析等领域具有更大的应用潜力。本文将以镍基高温合金为研究对象，重点研究其SAW速度与晶向之间的相互关系，并借助SAW速度对晶向的依赖性，采用激光超声显微成像系统对合金表面声速分布进行成像，实现表面缺陷以及晶粒分布的可视化分析。

## 3 镍基高温合金声速各向异性仿真

近年来，有限元数值仿真已经成为激光超声领域重要的研究方法，通过将复杂的物理模型分割成许多小的有限元区域，并在每个区域内进行数值计算，来模拟和分析物理现象和工程问题<sup>[28, 33-35]</sup>。本文基于激光超声原理，采用COMSOL软件研究镍基高温合金SAW速度的各向异性。图2(a)为仿真模型示意图，实线为分布在模型表面周期(周期为80  $\mu\text{m}$ )排列的激发光源，圆点为探测点位置。其中，探测点与最近线光源之间的距离为30  $\mu\text{m}$ 。图2(b)为原始坐标系 $(x, y, z)$ 和旋转坐标系 $(X, Y, Z)$ 的空间排列示意图。首先研究(100)晶面上的各向异性声速，将欧拉角 $\gamma$ 和 $\beta$ 分别设置为90°和0°。通过改变欧拉角 $\alpha$ 可以研究(100)晶面上的SAW速度随角度的变化情况。图2(c)和(d)显示了在 $\alpha$ 为0°和90°的角度下，SAW传播导致的表面位移。由图2中声波的传播状态可以看出，SAW传播的快轴和慢轴旋转了90°，表明模型角度的变化可以影响SAW的传播速度，这与预期结果一致。

为了进一步研究(100)晶面SAW声速的各向异性，将 $\alpha$ 从0°变化到360°，间隔为15°。图3(a)和(b)分别显示了当 $\alpha$ 为90°和0°时，在探测点处获取的SAW时域光谱。由于不同晶向上材料的弹性常数不同，SAW在不同晶向上传播时的状态也不同，图中曲线的差异很好地阐释了这一现象。为了提取SAW的传播速度，利用傅里叶变换(FFT)对时域光谱进行处理，得到 $\alpha$ 在0°到90°范围内的频域光谱，如图3(c)所示。由图3中曲线可知，SAW主频率在25 MHz附近，并且随着 $\alpha$ 的增加，频率值也逐渐增加。为了进一步得到SAW的传播速度，利用公式 $v=\lambda f$ 进行计算，其中 $\lambda$ 的值为80  $\mu\text{m}$ ，与模型中所设置光栅的周期一致。计算得到的SAW速度如图4所示，在 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时声速最小，在垂直方向，即 $\alpha=90^\circ$ 时声速最大。其中，最

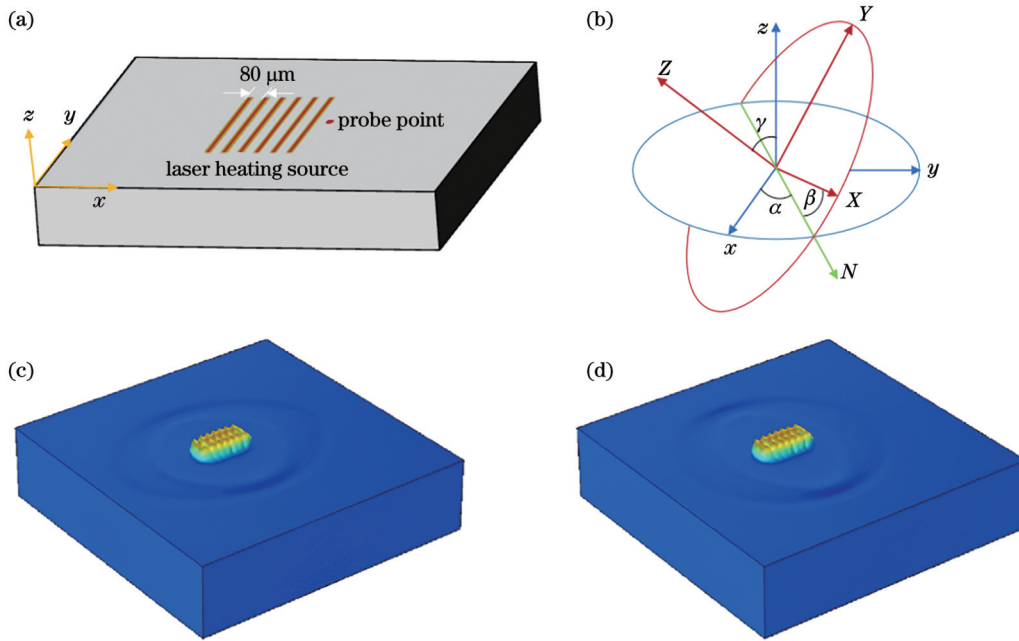


图 2 数值仿真模型。(a) 仿真模型示意图; (b) 原始坐标系  $(x, y, z)$  和旋转坐标系  $(X, Y, Z)$  空间配置示意图; 在  $\alpha$  分别为 (c)  $0^\circ$  和 (d)  $90^\circ$  时, SAW 传播导致的表面位移

Fig. 2 Numerical simulation model. (a) Schematic diagram of simulation model; (b) spatial configuration diagram of original coordinate system  $(x, y, z)$  and rotating coordinate system  $(X, Y, Z)$ ; surface displacements due to SAW propagation when  $\alpha$  is (c)  $0^\circ$  and (d)  $90^\circ$ , respectively

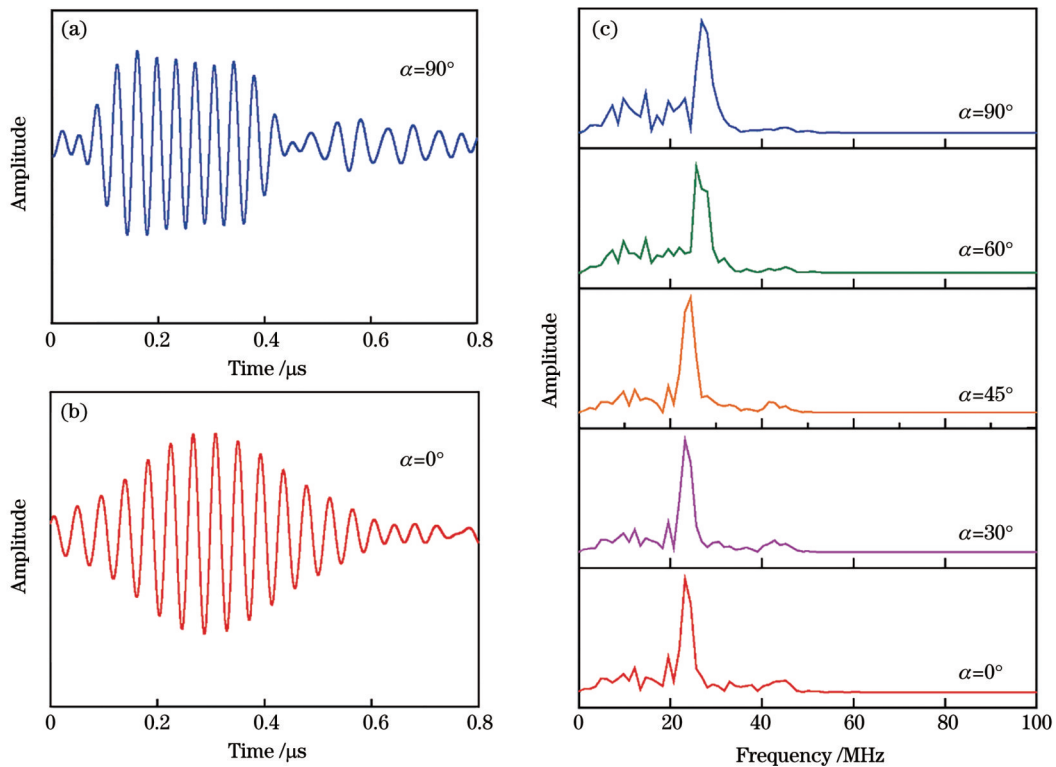


图 3 SAW 时域和频域光谱。(100) 晶面内 (a)  $\alpha=90^\circ$  和 (b)  $\alpha=0^\circ$  时在探测点处获取的 SAW 时域光谱; (c)  $\alpha$  为  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围内的 SAW 频域光谱

Fig. 3 Time-domain and frequency-domain spectra of SAW. Time-domain spectra of SAW obtained at detection points in (100) crystal planes when (a)  $\alpha=90^\circ$  and (b)  $\alpha=0^\circ$ , respectively; (c) frequency domain spectra of SAW for  $\alpha$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$

大声速为 2148.4 m/s, 最小声速为 1855.5 m/s。为了量化材料的各向异性, 通过  $R=(v_{\max}-v_{\min})/(v_{\max}+v_{\min})$

计算得到各向异性比  $R$  约为 0.073, 其中  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  分别是最大和最小速度。由式 (9) 可知, SAW 传播速度与

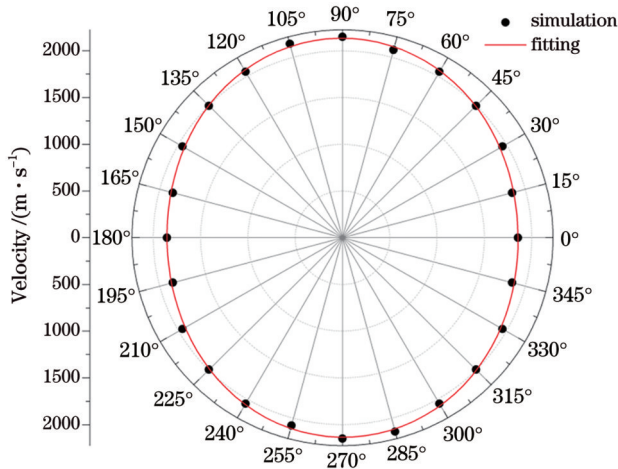


图 4 (100)晶面内 SAW 速度随角度的变化曲线

Fig. 4 SAW velocity curve varying with angle in (100) plane

材料弹性常数成正比,即 SAW 速度越大,在该方向内所对应的弹性常数越大,反之越小。弹性常数是描述金属材料抵抗弹性变形能力的指标,它反映了金属材料在受力作用下的拉伸或压缩变形时,单位应力产生的应变程度。弹性常数越大,表示金属材料越难发

生弹性变形,材料具有较高的刚性。因此,采用基于波前调控的激光超声技术,通过 SAW 速度的测量可以得到材料的弹性性能,这是一种更加直观快速的表征手段。

为了研究其他面内的声速各向异性,进一步将欧拉角  $\gamma$  沿逆时针旋转  $90^\circ$ ,同时将  $\beta$  设定为  $0^\circ$ 。在这种配置下,模型的顶面等效于(001)晶面。之后,将  $\alpha$  从  $0^\circ$  改变到  $360^\circ$ ,步幅为  $15^\circ$ 。图 5(a)和(b)分别为当  $\alpha$  为  $90^\circ$  和  $0^\circ$  时 SAW 的时域光谱。图 5(c)显示了(001)晶面内在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围内不同  $\alpha$  值下的频域光谱,由图中曲线可知,SAW 的主频出现在 20 MHz 附近,且在  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围内频率依然随着  $\alpha$  的增加而增加。利用公式  $v = \lambda f$  计算(001)晶面的 SAW 速度,结果如图 6 所示。图 6 中曲线表明,在  $\alpha = 0^\circ$  和  $\alpha = 180^\circ$  时声速最小,在垂直方向,即  $\alpha = 90^\circ$  时声速最大,该结果与(100)晶面趋势一致。不同的是,此时最大声速为 2079.84 m/s,最小声速为 1440 m/s,相比(100)晶面声速有所降低,(001)晶面的 SAW 速度各向异性比  $R$  约为 0.18,远大于(100)晶面声速各向异性比。这表明(001)晶面内具有更大的力学各向异性。

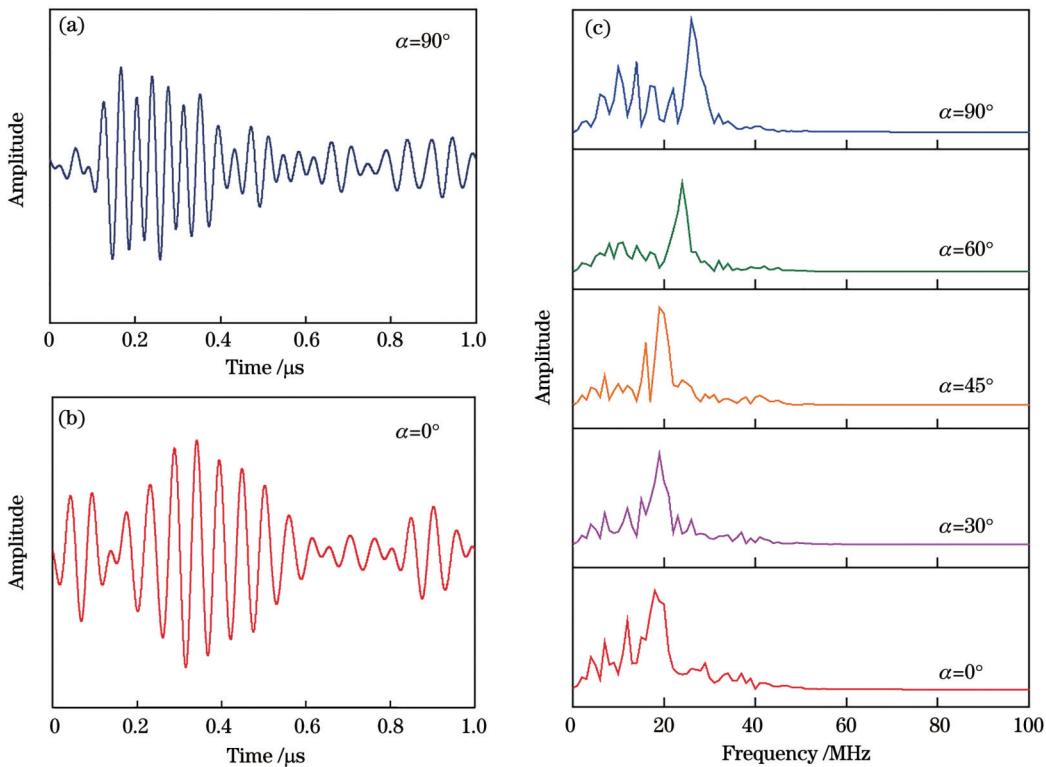


图 5 在(001)晶面内探测点处获取的 SAW 时域和频域光谱。(a)  $\alpha = 90^\circ$  和(b)  $\alpha = 0^\circ$  时在探测点处获取的 SAW 时域光谱;(c)  $\alpha$  为  $0^\circ$  到  $90^\circ$  范围内的 SAW 频域光谱

Fig. 5 Time-domain and frequency domain spectra of SAW in (001) crystal plane. Time-domain spectra of SAW obtained at detection points when (a)  $\alpha = 90^\circ$  and (b)  $\alpha = 0^\circ$ , respectively; (c) frequency domain spectra of SAW for  $\alpha$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$

数值仿真结果表明,对于高温镍基合金而言,不同晶面的声速各向异性比不同,且声速也存在差别。这意味着材料在不同方向上对声波传播的速度敏感,这

是因为晶格的结构与取向差异导致材料各个方向上弹性常数不同,从而导致声速不同<sup>[36]</sup>。研究高温镍基合金的声速各向异性非常重要,因为它直接关系到材料

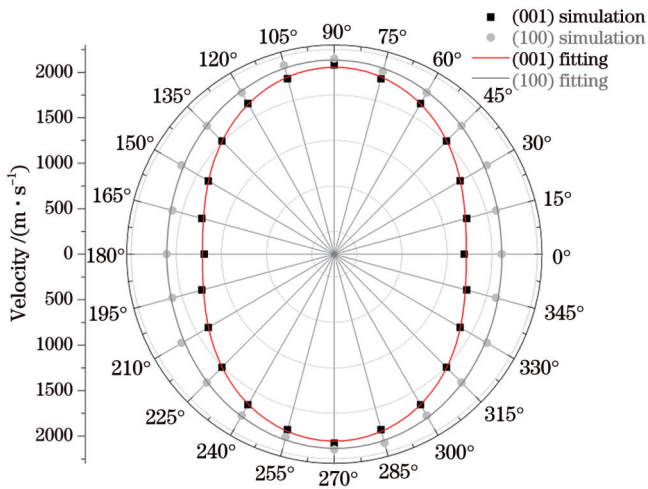


图6 (001)晶面内SAW速度随角度的变化曲线  
Fig. 6 SAW velocity varying with angle in (001) plane

的声学性能以及在高温环境下的应用。通过了解不同晶面的声速差异,可以优化材料的设计和制备过程,以获得更好的声学性能和力学性能。为了实现对高温镍基合金声速的精确控制和预测,需要综合考虑晶面的各向异性、温度效应以及材料的微观结构。这需要采用先进的数值模拟和实验技术,以获取准确的声速数据,并结合材料的热力学和力学性质进行综合分析。这样的研究有助于推动高温镍基合金在航空航天、汽车、能源等领域的应用,并通过优化材料性能满足不同

工程需求。

## 4 实验

### 4.1 实验系统

为了进一步验证数值仿真结果,实验室中搭建了一套基于波前调控的自动化激光超声系统。如图7(a)所示,系统包括特定模态SAW的激发、探测、运动控制以及数据采集等模块。其中SAW激发模块主要包括1064 nm纳秒激光器、特定周期光栅、4f系统等,探测模块主要包括532 nm连续激光器、显微物镜以及刀边探测器(KED)等。系统中采用Nb:YAG纳秒激光器作为超声波激发光源,其波长为1064 nm,脉冲持续时间为6 ns,单脉冲能量为1 mJ,重复频率为5 kHz。光束通过特定周期的光栅后被调制为周期分布的线性光源,经过4f系统后,样品表面形成强度周期分布的光栅图案,进而使得样品表面激发出沿表面传播的SAW。值得注意的是,为了提高SAW的激发效率,需要确保在样品表面的光栅至少有5个周期。因此,实验中采用小周期(200  $\mu\text{m}$ )光栅对光源进行调制,经过4f系统后,在样品表面形成周期为20  $\mu\text{m}$ 的线性排列光斑。其中,特定波长(与光栅周期一致)的SAW之间将会相互干涉增强,并沿垂直于光栅的方向传播。同时,采用另外一束波长为532 nm的连续激光作为探测光源,经过物镜后聚焦在激发光源一侧,焦点在距离第一条线性光源20  $\mu\text{m}$ 的位置处,如图7(b)所示。

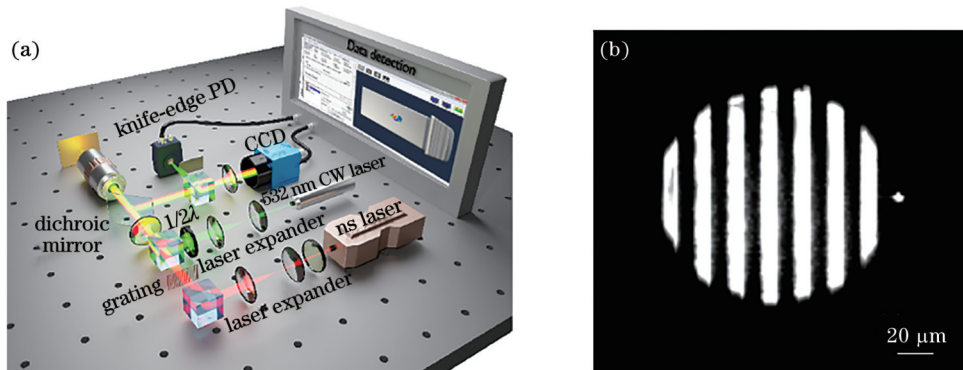


图7 基于波前调控的激光超声显微成像系统光路图和样品表面光斑照片。(a)基于波前调控的激光超声显微成像系统光路图;  
(b)样品表面光斑照片

Fig. 7 Optical path of laser ultrasound microimaging system based on wavefront regulation and photo of laser spots on sample surface.  
(a) Optical path of laser ultrasound microimaging system based on wavefront regulation; (b) photo of laser spots on sample surface

系统中采用刀边探测器(KED)探测超声波,其探测原理为:当SAW传播到样品表面上的探测点时,反射的探测激光的角度会发生偏转,其偏转角度正好是该点下的表面倾角的两倍。当反射光束经过物镜后,角度位移转化为空间平行位移,采用KED可以将光束位移变化转化为光强变化,并以电压信号输出。通过解调电压信号,可以获得SAW的振幅、频率等信息,进而得到其传播速度。

### 4.2 镍基高温合金各向异性声速测量

本文选用一种单晶镍基高温合金作为研究对象,表面为(100)晶面,该合金的详细化学成分已在表1中列出。为了获得较高的信噪比、提高测量精度,对样品表面进行机械抛光处理,使表面平整度小于1  $\mu\text{m}$ 。为了研究SAW速度随角度的变化情况,将样品固定在电动旋转位移台(OPTOSIGMA/OSMS-YAWs)中心,控制其旋转方向。

如图8所示,示波器采集得到的SAW时域信号呈

表 1 单晶镍基高温合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of single crystal nickel based superalloy

unit: %

Element	Ni	Cr	W	Co	Mo	Al	Ti	Fe	Si
Atomic number fraction	62.258	16.884	6.897	6.918	5.079	0.699	1.147	0.072	0.047

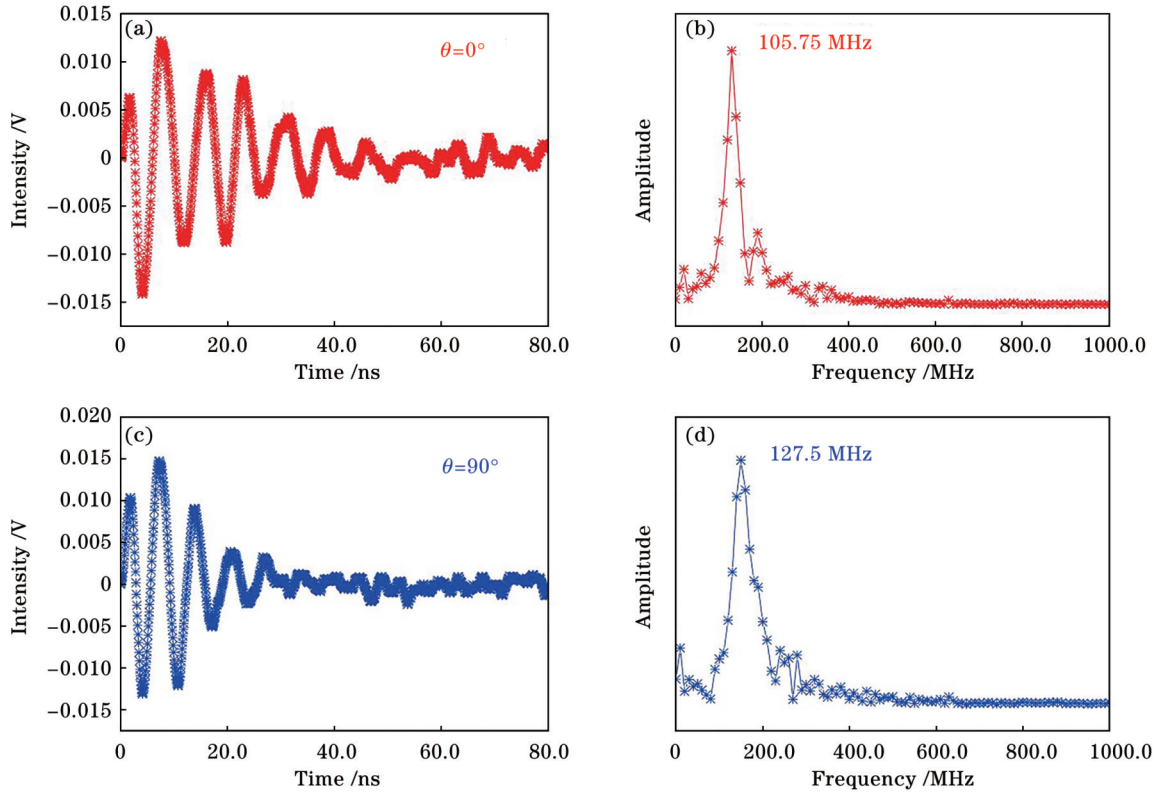


图 8 系统采集到的 SAW 信号。 $\theta$  为  $0^\circ$  时 SAW 的 (a) 时域信号和 (b) 傅里叶变换后得到的频域谱;  $\theta$  为  $90^\circ$  时 SAW 的 (c) 时域信号和 (d) 傅里叶变换后得到的频域谱

Fig. 8 SAW signals collected by system. (a) Time domain spectrum and (b) frequency domain spectrum of SAW when  $\theta$  is  $0^\circ$ ; (c) time domain spectrum and (d) frequency domain spectrum of SAW when  $\theta$  is  $90^\circ$

正弦曲线,持续时间约为几十纳秒。图 8(a)和(b)分别为当  $\theta$  为  $0^\circ$  时 SAW 的时域信号和傅里叶变换后得到的频域谱,其主频率约为 105.75 MHz。将样品旋转  $90^\circ$  后,采集到的 SAW 的时域信号和傅里叶变换后得到的频域谱如图 8(c)和(d)所示,其主频率增加到 127.5 MHz。系统中的光栅周期为  $20 \mu\text{m}$ ,因此根据公式  $v = \lambda f$ ,可得在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  时,SAW 的传播速度分别为 2102 m/s 和 2550 m/s。进一步将样品旋转一周,每隔  $15^\circ$  采集一次数据,绘制 SAW 速度随角度  $\theta$  变化的极坐标曲线,结果如图 9 所示。在  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围内,SAW 传播速度随角度呈现周期性变化,整体为椭圆形。当  $\theta$  为  $0^\circ$  时,单晶镍基高温合金具有最小的 SAW 速度。相反,当  $\theta$  等于  $90^\circ$  时,SAW 速度最大,其声速各向异性比约为 0.082。这些测量结果进一步验证了单晶镍基高温合金 SAW 速度的角度依赖性,为其力学性能和结构研究提供了重要依据,并有助于研究人员在实际应用中对其进行更全面的表征和理解。

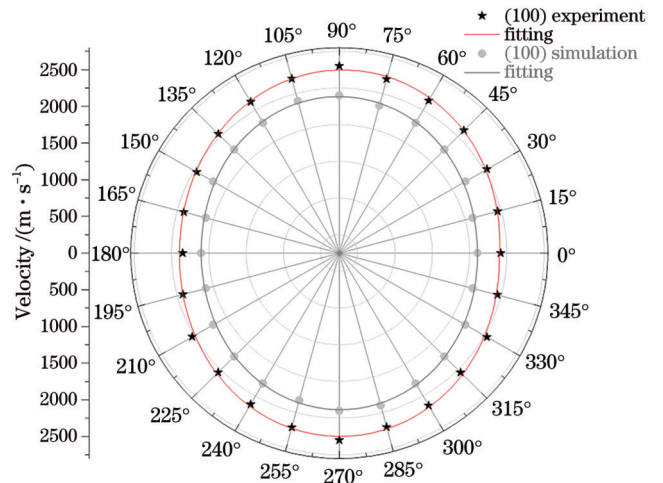


图 9 SAW 速度随角度  $\theta$  的变化曲线

Fig. 9 SAW velocity curve varying with angle  $\theta$

### 4.3 材料表面声速成像

SAW 速度对晶格方向的敏感性,使得基于波前调控的激光超声显微成像技术成为了一种更加便捷、快

速的新型晶向检测手段。为了验证该技术在晶向检测领域的潜力,利用4.2节中所述的激光超声显微成像系统,分别对单晶以及多晶镍基高温合金样品表面SAW速度分布进行扫描成像。实验中将样品固定在三维电动位移台上,采用自编软件控制位移台的运动以及进行数据采集。

图10分别为单晶和多晶样品表面的SAW速度分布图。在图10(a)中,单晶样品的SAW速度成像显示了均匀的颜色分布,表明晶体取向一致。然而,图10中个别点处显示了不同的颜色分布,这主要是由于机械

抛光引起的表面缺陷对SAW传播状态产生影响,进而导致SAW传播速度的改变。图10(b)展示了多晶样品表面SAW速度分布图像,图中显示出多种颜色分布,这主要是由于样品表面具有不同取向的多个晶粒。以上结果表明,基于波前调控的新型激光超声显微成像技术为缺陷以及晶向检测提供了一种更为便捷、可靠、快速的检测手段,摒弃了传统的超声换能器,克服了传统接触式超声检测技术所面临的关键难题,使其更加适用于形状不规则、高温、强腐蚀等极端环境下工件的原位检测,实现真正意义上的非接触式无损检测。

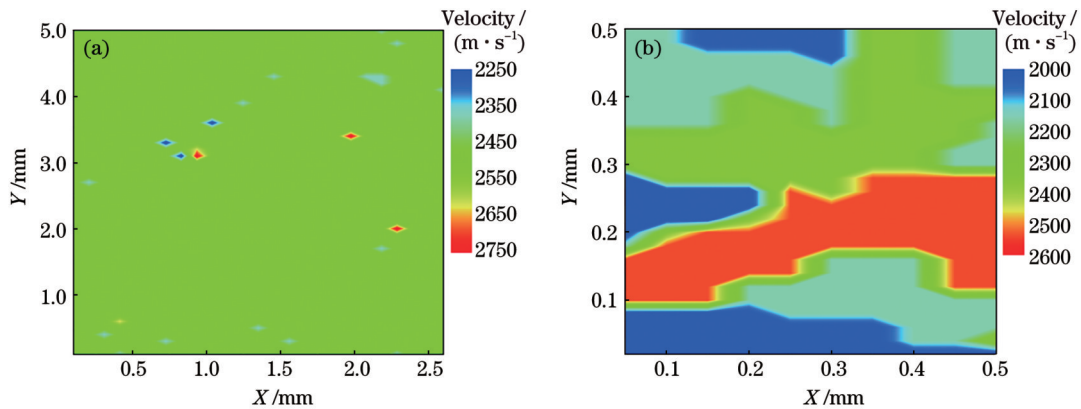


图10 单晶和多晶镍基高温合金样品表面的SAW速度分布。(a)单晶;(b)多晶

Fig. 10 SAW velocity distributions on surface of monocrystalline and polycrystalline nickel-based superalloys. (a) Monocrystalline; (b) polycrystalline

## 5 结 论

本文介绍了一种基于波前调控的激光超声显微成像技术,通过对激发光源的调控,使样品表面形成具有特定周期排列的线性光源,进而产生具有特定波长且定向传播的SAW。结合数值仿真和实验,成功地实现了对镍基高温合金的SAW速度的定量检测与各向异性分析。运用COMSOL软件建立了有限元仿真模型,深入研究了镍基高温合金(100)和(001)晶面上SAW速度与晶格方向之间的重要关联,这为特种合金力学各向异性的研究提供了一种更加直观且快速的表征手段。此外,搭建了一套基于波前调控的激光超声显微成像系统,并分别对单晶和多晶镍基高温合金样品表面SAW速度分布进行了扫描成像。这些实验数据证实了SAW速度对晶向以及缺陷的敏感性,同时也突显了基于波前调控的激光超声显微成像技术在非接触无损检测领域的应用潜力。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡家藩, 聂勇, 周礼峰, 等. 核电厂超声检测技术的应用[J]. 无损检测, 2018, 40(5): 10-16.  
Cai J F, Nie Y, Zhou L F, et al. Application of ultrasonic testing technology in nuclear power plant[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(5): 10-16.
- [2] Wei Y L, Liang H J, Wang G, et al. Ultrasonic thermometric measurement system for solid rocket combustion chambers[J]. Ultrasonics, 2021, 113: 106361.
- [3] 郑杰, 沈中华, 倪辰荫. 模拟裂纹闭合的激光超声实验研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212003.  
Zheng J, Shen Z H, Ni C Y. Experimental study on simulated crack closure using laser ultrasonic[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1212003.
- [4] 张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.  
Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.
- [5] Trtnik G, Gams M J U. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 66-75.
- [6] Drain L E. Laser ultrasonics techniques and applications[M]. Milton Park: Routledge, 2019.
- [7] Pelivanov I, Buma T, Xia J J, et al. A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(11): 113105.
- [8] 胡平, 艾琳, 邱梓妍, 等. 金属增材制造构件的激光超声无损检测研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402803.  
Hu P, Ai L, Qiu Z Y, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive manufacturing components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402803.
- [9] Sharples S D, Clark M, Smith R J, et al. Laser ultrasonic microscopy[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4): 367-384.
- [10] Amziane A, Amari M, Mounier D, et al. Laser ultrasonics evaluation and testing of coated HTR nuclear fuel[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8082: 808224.
- [11] Xu Z, Tian Q, Hu P, et al. Laser ultrasonic detection of submillimeter artificial holes in laser powder bed fusion



- manufactured alloys[J]. Optics and laser Technology, 2024, 169: 110030.
- [12] Yang J, Lee H, Lim H J, et al. Development of a fiber-guided laser ultrasonic system resilient to high temperature and gamma radiation for nuclear power plant pipe monitoring[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085003.
- [13] An Y K, Park B, Sohn H. Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate[J]. Smart Material Structures, 2013, 22(2): 025022.
- [14] Choi Y S, Jeong H, Lee J R. Laser ultrasonic system for surface crack visualization in dissimilar welds of control rod drive mechanism assembly of nuclear power plant[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014: 296426.
- [15] 陶程, 殷安民, 应志奇, 等. 基于激光超声在高温下对超声波声速的数值模拟[J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 815-820.  
Tao C, Yin A M, Ying Z Q, et al. Numerical simulation of ultrasonic velocity at high temperature based on laser ultrasonic[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(7): 815-820.
- [16] White R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2123-2124.
- [17] Askar'Yan G A, Prokhorov A M, et al. The effects of a laser beam in a liquid[J]. Soviet Physics: JETP, 1963, 17(6): 1463-1465.
- [18] Rose L R F. Point-source representation for laser-generated ultrasound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 75(3): 723-732.
- [19] Royer D, Chenu C. Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source[J]. Ultrasonics, 2000, 38(9): 891-895.
- [20] Manzo A J, Helvajian H. Pulsed laser ultrasonic excitation and heterodyne detection for *in situ* process control in laser 3D manufacturing[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012012.
- [21] Sharples S D, Clark M, Somekh M G. All-optical adaptive scanning acoustic microscope[J]. Ultrasonics, 2003, 41(4): 295-299.
- [22] Li W Q, Sharples S D, Clark M, et al. Frequency spectrum spatially resolved acoustic spectroscopy for microstructure imaging[C]//2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, September 20-23, 2009, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2009: 791-794.
- [23] Li W Q, Coulson J, Aveson J W, et al. Orientation characterisation of aerospace materials by spatially resolved acoustic spectroscopy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520(1): 012017.
- [24] Smith R J, Li W Q, Coulson J, et al. Spatially resolved acoustic spectroscopy for rapid imaging of material microstructure and grain orientation[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(5): 055902.
- [25] Ellwood R, Stratoudaki T, Sharples S D, et al. Imaging textural variation in the acoustoelastic coefficient of aluminum using surface acoustic waves[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(5): 2811-2819.
- [26] Ma R R, Li Z X, Gu W B, et al. Measurement of micro-region elastic anisotropy in textured metal by laser-ultrasonics[J]. AIP Advances, 2020, 10(10): 105301.
- [27] Kou X, Pei C, Liu T, et al. Noncontact testing and imaging of internal defects with a new laser ultrasonic SAFT method[J]. Applied Acoustics, 2021, 178: 107956.
- [28] Kou X, Pei C X, Liu T, et al. Noncontact testing and imaging of internal defects with a new Laser-ultrasonic SAFT method[J]. Applied Acoustics, 2021, 178: 107956.
- [29] Krishnaswamy S. Theory and applications of laser-ultrasonic techniques[M]//Ultrasonic nondestructive evaluation. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [30] Dubois M, Drake T E, Jr. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4): 213-228.
- [31] Oliner A A. Acoustic surface waves[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [32] Li W Q. Laser ultrasonic method for determination of crystallographic orientation of large grain metals by spatially resolved acoustic spectroscopy (SRAS) [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2012.
- [33] Guo H L, Zheng B, Liu H. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 58-64.
- [34] Kou X, Pei C X, Chen Z M. Fully noncontact inspection of closed surface crack with nonlinear laser ultrasonic testing method[J]. Ultrasonics, 2021, 114: 106426.
- [35] Qiu J X, Pei C X, Yang Y, et al. Remote measurement and shape reconstruction of surface-breaking fatigue cracks by laser-line thermography[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 142: 105950.
- [36] Abbas I A, Othman M I A. Plane waves in generalized thermo-microstretch elastic solid with thermal relaxation using finite element method[J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33(12): 2407-2423.

## Laser Ultrasonic Microimaging Technology Based on Wavefront Modulation and Its Applications (Invited)

Qiao Jie<sup>1</sup>, Feng Fu<sup>1\*</sup>, Huang Ziyang<sup>2</sup>, Hu Bin<sup>2</sup>, Li Jiangyan<sup>2</sup>, Ma Haixiang<sup>1</sup>, Huo Dewang<sup>1\*\*\*</sup>,  
Yuan Xiaocong<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Frontier Fundamental Studies, Zhejianglab, Hangzhou 310000, Zhejiang;

<sup>2</sup>Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China

### Abstract

**Objective** Nickel-based superalloys have already been extensively used in aviation manufacturing, particularly in the production of jet engine components such as turbine blades, airframe parts, and nuclear power plant components. The

mechanical properties of these alloys make them highly desirable for these applications. To ensure the successful application of single crystal nickel-based superalloys, it is crucial to have a comprehensive understanding of their anisotropic properties. This includes knowledge of the elastic coefficients, thermal expansivity, and thermal conductivity. For these purposes, acoustic wave velocity is often employed as a primary quantity to access the parameters of these alloys since it is influenced by the module of elasticity and density. Any variation in material properties like porosity, residual stress, or even coating thickness in the case of surface waves can lead to changes in acoustic wave velocity. Monitoring the acoustic wave velocity can provide valuable information about the ongoing processes and their effects on material properties. Measuring the changes in acoustic wave velocity makes it possible to assess and track the progress of these processes. This information is important in evaluating the quality and integrity of manufactured components, as it helps in identifying deviations or abnormalities that may affect the final product.

**Methods** Nondestructive testing (NDT) has offered a powerful approach for safety critical material inspections such as those in aerospace and nuclear industries by minimizing the risk of failure, thereby reducing costs and maximizing safety. Laser ultrasound technology (LUT) uses a pulsed laser source to locally heat the sample, and acoustic waves are then generated due to thermal elastic processes. A second laser is used to probe the generated acoustic wave. As thermal elastic constants are highly related to samples' density, stress, as well as crystallographic structures, one can then access the macroscopic or microscopic information of the sample and thus find the defects at both scales. As a consequence, LUT is receiving growing attention thanks to its great potential in the evaluation of defects, crystallographic orientation, and residual stress. Moreover, as LUT uses lasers to excite and detect the signals, the entire process is contactless, and it thus shows great advantages when inspecting samples with complex geometric structures and brings great convenience when used in environments with elevated temperatures or toxicity. In addition, LUT can inspect small specimens with high spatial resolution by using lenticular systems that allow the pump and probe lasers to focus on the surface of the sample. In recent years, laser ultrasound systems combined with wavefront modulation techniques have shown the capability of generating and detecting surface acoustic wave (SAW) with a specific frequency, which makes the mathematical modeling much simpler during data processing and in turn leads to an easier approach to access critical material properties such as crystallographic structures.

**Results and Discussions** We discuss a new LUT that utilizes wavefront control to investigate the relationship between SAW velocity and crystal orientation in nickel-based superalloys. Nickel-based superalloys are widely used in aerospace turbofan blades due to their thermal resistance. Understanding the mechanical anisotropy of these materials is crucial for ensuring the mechanical performance and flight safety of turbofan blades. The technology combines numerical simulation and experiments to accurately measure the propagation velocity of SAWs and analyze the material's mechanical properties. A laser ultrasonic finite element numerical simulation model based on wavefront control is proposed. The simulation results reveal that the anisotropy ratios of SAW velocity in single crystal nickel-based superalloys in the (100) and (001) planes are 0.073 and 0.18, respectively (Fig. 4 & Fig. 6). To further investigate the relationship between crystal orientation and acoustic velocity in nickel-based superalloys, a laser ultrasonic microscopy system is employed (Fig. 7). This system enables the scanning and imaging of the surface acoustic velocity in both single crystal and polycrystalline nickel-based superalloys, facilitating the visualization analysis of surface defects and grain distribution (Fig. 10).

**Conclusions** The simulation and experiment results indicate that the SAW velocity is sensitive to the orientation of the crystalline axis, which proves the capability of laser ultrasound systems combined with wavefront modulation techniques in the field of crystalline orientation determination and defect detection in an NDT manner

**Key words** imaging systems; nickel-based superalloy; acoustic surface wave; laser ultrasound; wavefront control; acoustic velocity anisotropy