

# 激光超声技术在工业检测中的应用与展望\*

卢明辉<sup>1,2</sup>, 丁雷<sup>2</sup>, 颜学俊<sup>2</sup>, 陈延峰<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学固体微结构物理国家重点实验室 南京, 210093)

(2. 南京大学现代工程与应用科学学院 南京, 210093)

**摘要** 国防和工业现代化建设的发展对无损检测技术的需求越来越高, 激光超声技术(laser ultrasonic technology, 简称 LUT)作为一种完全非接触式无损检测技术(nondestructive testing, 简称 NDT), 可以在高温、高压、辐射等环境中对复杂结构件进行原位检测与监测。首先, 介绍了超声的激光检测技术及 LUT 的优势; 其次, 举例说明激光超声无损检测技术(LUT&NDT)在工业中的具体应用案例以及存在的一些问题, 并给出解决途径; 然后, 对超声信号的处理方法进行阐述; 最后, 对 LUT&NDT 在先进制造中的应用前景进行了讨论与展望。

**关键词** 激光超声无损检测技术; 先进制造; 极端环境; 深度学习

**中图分类号** O439; O426.9; TH878

## 引言

随着国防和现代化工业的飞速发展, 航空航天、机械、能源和石化等领域的机械装备日趋大型化、集成化、高速化和自动化。高温、高压、高速度运行及高负荷的工作条件成为现代化工业的重要标志。为了保证这些机械设备器件的安全可靠, 需要对其表面以及内部裂纹缺陷、弹性模量、残余应力以及晶粒尺寸等特征进行结构健康检测, 这种检测方法即为无损检测技术<sup>[1-2]</sup>。无损检测技术是根据电、声、磁、光等物理形态特征, 在不改变被测物构件表面几何形貌的基础上, 对被测物体进行检测。目前, 检测手段主要包括目视检测、X 射线法<sup>[3-6]</sup>、磁粉法<sup>[7-8]</sup>、渗透法<sup>[9]</sup>、涡流法<sup>[10]</sup>和超声检测<sup>[11-14]</sup>。激光超声无损检测属于超声无损检测的范畴, 是通过高能激光脉冲在材料表面产生瞬时热作用, 进而在材料表面形成应变和应力场, 激发出超声波, 再通过光学检测系统接收携带材料信息的超声波信号, 从而提取出所需的材料特性信息。激光超声技术作为一种重要的无损检测技术, 在无损探伤领域有着巨大应用价值。

## 1 超声的激光检测技术

与传统压电换能器相比, 光学检测方法是真正

意义上的非接触式超声检测方法<sup>[15]</sup>。首先, 光学探测不会干扰待测超声场, 加入振镜扫描系统, 激励点和探测点可快速移动, 且具有很高的空间分辨率; 其次, 短脉冲激光可激励高频超声信号<sup>[16-18]</sup>。光学探测的频带很宽, 而压电换能器在高频段很难实现这一点。光学探测有个明显的缺点, 就是对待测试样表面的平整度有一定的要求, 当材料表面粗糙对光的散射严重时, 激光测振仪探测到的灵敏度会大幅度下降, 这也是目前制约激光超声无损检测技术大规模推向市场的一个重要因素。

在激光超声声光学探测技术中, 根据探测器探测原理进行分类, 可分为强度调制技术和相位(频率)调制技术。因为光波频率太高, 目前使用的光电探测器无法直接记录其相位信息, 只能先将相位信息调制转换为强度信息, 再通过对强度信息的解调获取其相位信息。图 1<sup>[19-22]</sup>和图 2<sup>[23-26]</sup>分别为强度调制技术和相位调制技术常见光学探测声波方法。

强度调制技术主要包括刀口法、泵浦-探针技术、差分光偏转法以及光栅衍射技术。相位(频率)调制技术主要包括双光束零差干涉技术(迈克尔逊干涉仪)、双波混合干涉技术、激光多普勒干涉技术以及 Fabry-Perot 干涉技术。一般情况下, 由于相位(频率)调制的灵敏度优于强度调制技术, 因此强度调制技术在无损检测技术中的应用

\* 国家重大科研仪器研制资助项目(52027803)

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-03-24

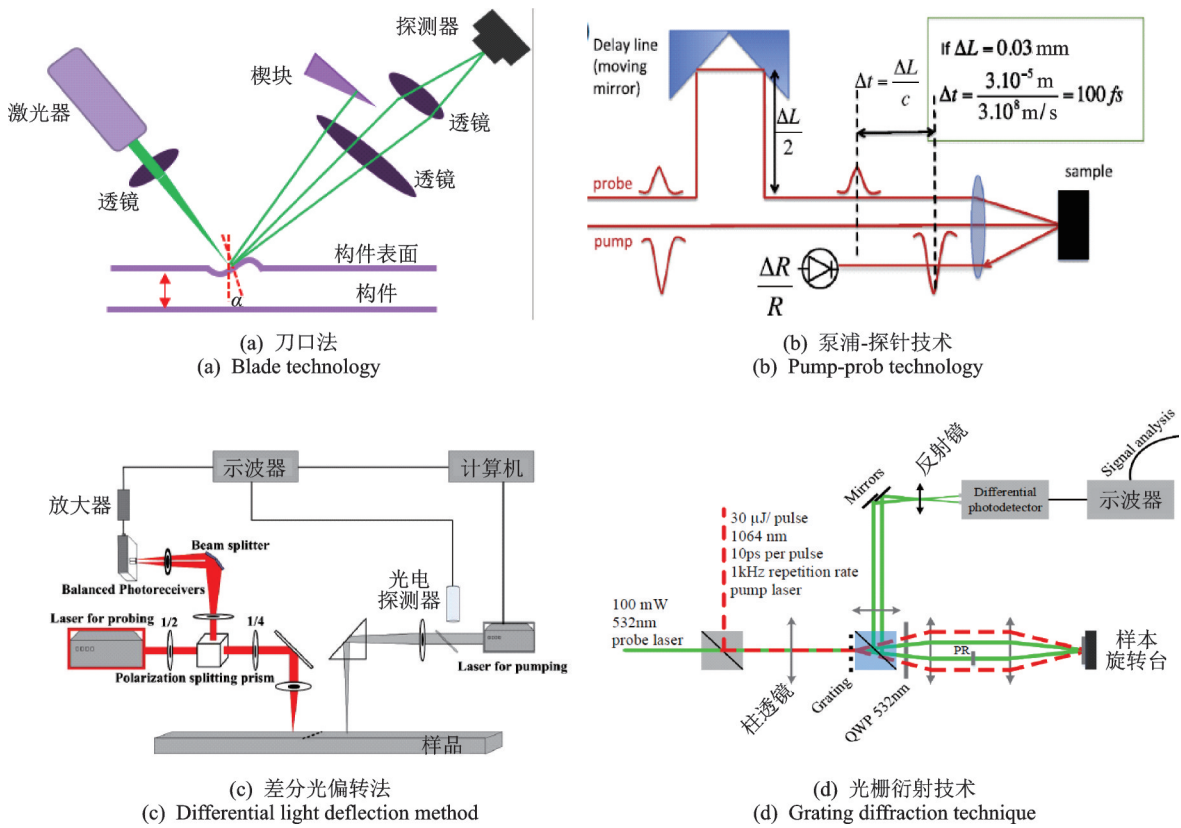


图 1 强度调制技术中常见光学探测声波方法<sup>[19-22]</sup>

Fig.1 Common acoustic detection method of intensity modulation technique based on optics<sup>[19-22]</sup>

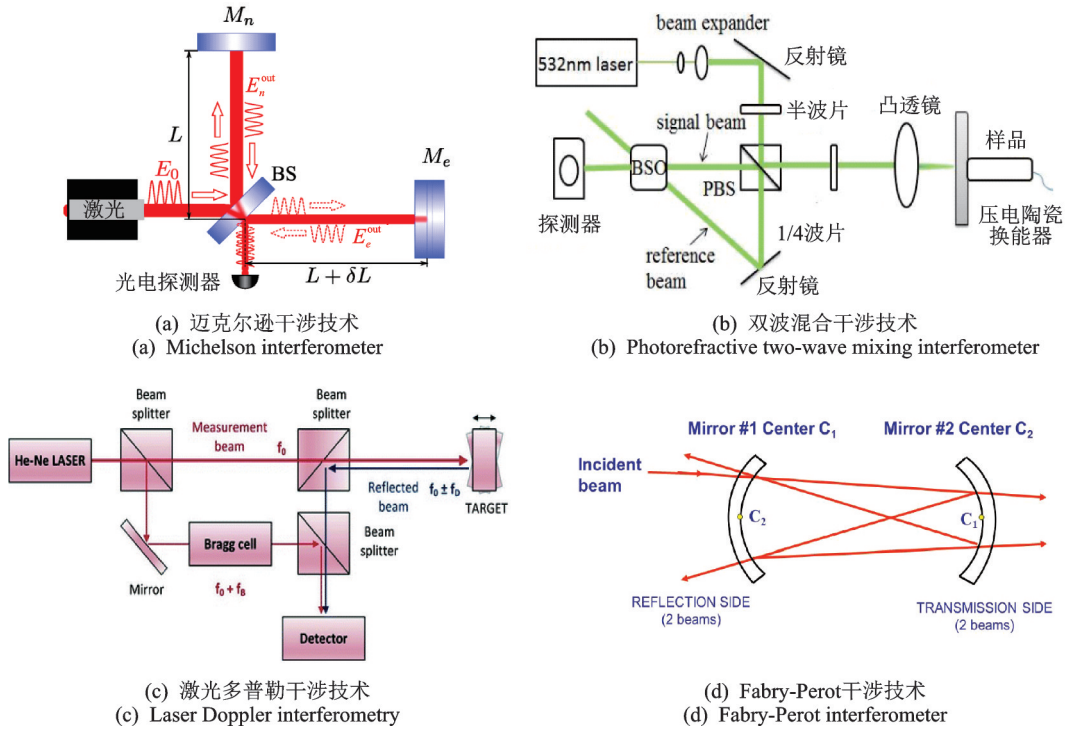


图 2 相位(频率)调制技术中常见光学探测声波方法<sup>[23-26]</sup>

Fig.2 Common acoustic detection method of phase (frequency) modulation technique based on optics<sup>[23-26]</sup>

受到了一定限制。泵浦-探针技术可作为一种超快激光超声无损检测技术(通常通过飞秒脉冲激光激励,飞秒脉冲激光探测),其激发的超声频率

及探测到的超声带宽远大于常规的激光超声无损检测技术。因此,该技术在纳米级别可以表征材料的显微结构。

超声引起构件表面的微弱振动会改变反射光的相位和频率,从而携带一定的超声信息。在图 2 所示的 4 种调制技术中,迈克尔逊干涉仪对实验环境要求苛刻,只在两束光相位正交情况下,其信号输出才与超声位移成线性关系。然而,实际情况是由于环境温度及低频环境振动的影响,两束光很难保持稳定的光程差,因此在实际工程应用中几乎不采用该检测技术。由于因素制约,Fabry-Perot 干涉技术测量动态范围较小,目前很少报道。相比之下,双波混合干涉技术和激光多普勒干涉技术应用广泛。其中,激光多普勒测振仪由于其稳定的抗干扰性,在工业应用中最为广泛。自 1842 年奥地利科学家 Doppler C J 提出多普勒效应 (Doppler effect) 理论之后,研究人员开发了各种设备产品,在医疗<sup>[27-30]</sup>、机器人<sup>[31]</sup>、天文学<sup>[32]</sup>等领域有着广泛应用。其中,激光的多普勒频移是由于激光器的光波源和振动物体之间的相对运动产生的。物体振动引起的多普勒频移如图 3 所示。当激光光波经过振动物体表面被反射,最后被光电探测器捕获,接收到的频率也发生了改变,这被称作多普勒频移。

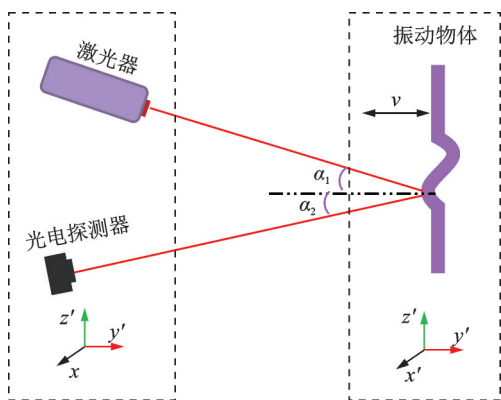


图 3 物体振动引起的多普勒频移

Fig.3 Object vibration-induced Doppler shift

激光多普勒测振仪在航空航天测试、声学和超声波检测、汽车、工业在线质量监测、材料研究和测试、微纳米技术、生物学和医学、电子半导体和太阳能以及数据存储等领域有着广泛的应用。目前,国内一些企业推出了高精度、小型化的激光多普勒测振仪,在商业化激光多普勒测振仪方面的龙头企业是舜宇光学科技。南京光声超构材料研究院有限公司在测振仪研发方面发展迅猛。

## 2 激光超声的优势

激光超声技术一直是国内外无损检测领域中

的研究热点,与传统的压电超声相比,激光超声无损检测的优势如图 4 所示。通过光激发和光探测,激光超声有着天然的优势。光的传播无需介质,准直性好,相干性高,可实现远距离完全非接触式检测,可对高温、高压、有毒及腐蚀性强的待测构件进行原位监测。一方面,通过光束整形,改变激励光的照射图案,实现点(阵列)/线(阵列)/环/面激发,针对不同的检测条件采用不同的激励方式,大大提高了检测效率和精度;另一方面,运用激光干涉原理进行超声波信息的读取,能提取非常微弱的超声信号。此外,随着智能机器人的不断发展,将激光超声系统搭载到智能机械臂上可实现智能自主检测,对结果进行自主分析判断。传统的超声检测可实现 A/B/C 扫描检测,通过光激励-光探测也可以完成同样的检测。此外,超声在与结构组织相互作用时,其传播路径、飞行时间、幅值、声速和中心频率等参数会发生改变,这也为反演出待测构件的裂纹缺陷、晶粒尺寸、残余应力和弹性常数等材料特征量带来了思路。和 X 射线检测技术相比,激光超声无损检测技术无辐射、低能量的超声波对人体无害。利用短脉冲激光能激发高频的超声波,分辨率高。



图 4 激光超声无损检测的优势

Fig.4 Advantages of laser ultrasonic nondestructive testing

## 3 激光超声无损检测技术在工业中的具体应用

### 3.1 石油/化工/天然气/核能管道裂纹缺陷检测

管道传输广泛应用于石油、化工、核能等工业生产中。由于高温、高压、内外腐蚀、凹痕以及焊缝缺



陷等因素的综合作用<sup>[33]</sup>,给管道在运行过程中带来严重的安全隐患,因此针对管道潜在的裂纹缺陷实施安全、高效、快速的检测具有重要意义<sup>[34]</sup>。文献<sup>[35-38]</sup>指出,激光超声无损检测技术特别适合管道表面微小裂纹的检测。

管道裂纹检测如图 5 所示。Klein 等<sup>[39]</sup>将激光超声检测技术与混合激光电弧焊设备集成在一起,实现了对管道环形焊缝的自主检测。Yang 等<sup>[40]</sup>开

发了一种用于核电站管道监测的抗高温、抗辐射的激光超声系统,对暴露在 350 °C, 125 kGy 辐射计量的不锈钢管进行测试验证。Lee 等<sup>[41]</sup>开发了一种光纤引导激光超声系统和无基线损伤检测方法,实现了核电站高温环境下管道结构健康监测。Ochi-ai 等<sup>[42]</sup>开发了一套基于激光超声的核反应堆内部部件维修系统,通过激光激励声表面波来检测部件表面破坏的裂纹,检测精度优于 200 μm。

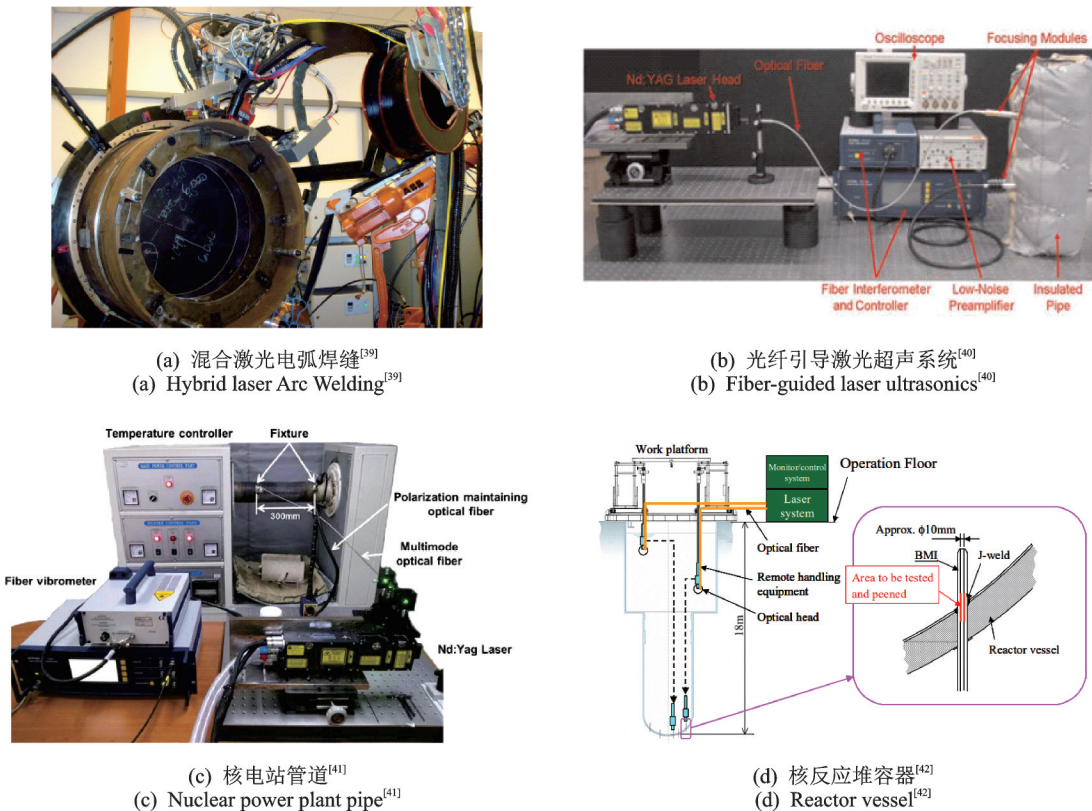


图 5 管道裂纹检测

Fig.5 Pipeline crack detection

虽然激光超声无损检测技术在管道表面裂纹检测方面取得一系列进展,但仍有不足。一方面,目前大多数的研究工作是通过点脉冲激励宽频的超声信号,对裂纹的精确定量研究(裂纹的深度、宽度)存在一定困难;另一方面,理论结果与实验结果存在一定的偏差。对于前者,通过调控激励光斑的图案激发窄带高频声表面波,通过激光测振仪探测不同长、宽、深裂纹相互作用后的超声信号,利用卷积神经网络(convolutional neural network,简称 CNN)对每个 A 扫信号的时频图进行训练,最终让其对裂纹自动识别。Yan 等<sup>[43]</sup>通过深度学习,对天然气管道的焊缝裂纹进行模式识别,识别精度达到 93.75%。对于后者,采用有限元模拟(例如 COMSOL Multiphysics, Matlab 等软件)分析与实验研究相结合的思路。

### 3.2 碳纤维增强复合材料结构健康检测

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastic,简称 CFRP)因其高比强度和耐腐蚀性,被广泛用于飞机和汽车的结构材料,其在飞机上的应用不仅局限于次要结构部件(如襟翼、尾翼、发动机罩),还扩展到主要结构部件(如机身和主翼)。随着航空航天产业的快速发展,近年来航空航天飞行器中大量使用纤维增强复合材料<sup>[44-45]</sup>。截止到 2019 年,国际上先进民机的复合材料用量已经突破 50%,重量减轻达 20%~30%,维护成本下降 30%<sup>[45]</sup>。由于 CFRP 结构件必须满足严格的指标要求,以确保其安全性和可靠性,因此对这些组件在制造和使用过程中进行无损检测是必不可少的。



激光超声技术在 CFRP 结构健康无损评估方面一直有报道。图 6 为 CFRP 结构健康检测示例。Choquet 等<sup>[46]</sup>最早开发工业激光超声设备并将其用于 CF-18 飞机几个部件的检测,如图 6(a)所示。Qiu 等<sup>[47]</sup>将声-激光技术用于 CFRP-黏结混凝土系统的缺陷检测,如图 6(b)所示。Kusano 等<sup>[44]</sup>比较了

中红外激光和传统 Nd:YAG 激光的超声产生特性,发现中红外激光在 CFRP 层合板中产生了更大的超声振幅,如图 6(c)所示。文献[48-49]开发了一套基于关节机器人的激光超声检测系统,机器人安装在线性导轨上,能够高速检测形状复杂的复合材料焊缝的焊接质量,如图 6(d)所示。

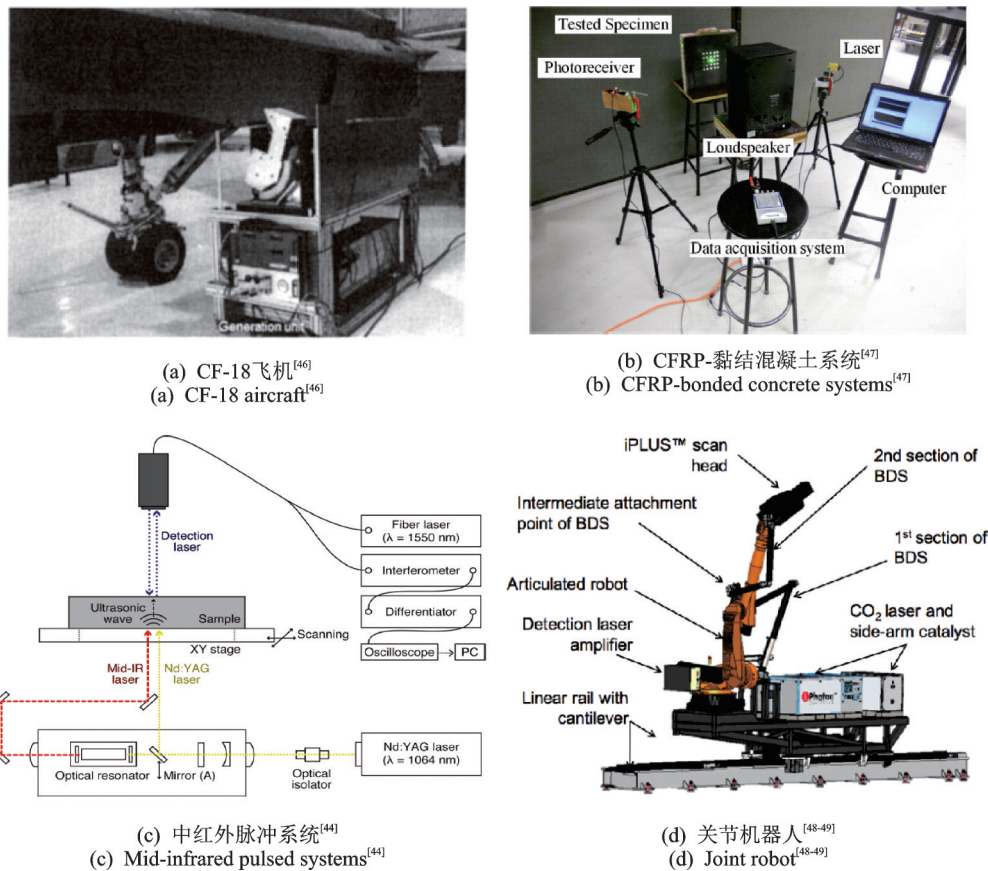


图 6 CFRP 结构健康检测  
Fig.6 Structural health inspection of CFRP

虽然激光超声技术在一些金属材料的研究和应用方面已被广泛报道,但在聚合物材料中应用有限。主要原因是:①与传统超声检测相比,激光超声的信噪比略低;②超声在复合材料中衰减严重。Dubois 等<sup>[50]</sup>研究发现,CFRP 的波长接近  $3.2 \mu\text{m}$  的激光束产生超声波的效率最高,这是因为在该波长范围内存在环氧基体中碳氢拉伸振动和氢氧拉伸振动的吸收带,然而这种波长的激光器并不容易获得。

### 3.3 高温合金中的应用

高温合金一般指能够在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温下承受较大复杂应力,并具有表面稳定性的高合金化铁基、镍基和钴基奥氏体金属材料<sup>[51]</sup>。高温合金具有优异的高温强度、良好的抗氧化、抗热腐蚀性能以及

良好的疲劳性能和断裂韧性,是飞机发动机、燃气轮机、汽车发动机常用材料。镍基高温合金在  $650 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内具有较高强度和良好的抗氧化、抗燃气腐蚀能力<sup>[52]</sup>,广泛应用于航天发动机及航空发动机涡轮盘。钴基高温合金广泛用于燃气涡轮发动机的燃烧室和球轴承<sup>[53-54]</sup>,还是心脏瓣膜和支架等生物医学设备的候选材料。因此,研究高温合金的热力学性能特性对我国航天航空、生物医学事业的发展具有重要意义。

激光超声通过激光产生和激光检测超声脉冲,是一种完全非接触式检测技术,可用于检测任何温度的热材料,非常适合用于原位研究固态金属或陶瓷材料的热力学特性。超声脉冲的性能与晶粒尺寸、晶粒尺寸等微观组织特征有关。

像医学超声可以对人体内部结构成像一样,超声波可以用来对固体内部缺陷成像。在冶金学领域,超声波是一种灵敏的技术,用于测量弹性、内部组织、相、晶体结构、晶粒尺寸等。如图7所示,美国

Dynamic Systems公司开发的LUMet设备<sup>[55]</sup>可在热机械加工过程中对上述材料特性进行实时原位测量。

超声速度的变化和频率的相关衰减系数与金属显微组织结构变化密切相关<sup>[56-57]</sup>。Moreau等<sup>[58]</sup>在这方面的研究取得了一系列进展。图8为高温合金物理模拟过程中实时原位监测图<sup>[58]</sup>。

通过光-声-光对高温高压应力条件下的合金物理特性实施原位在线检测具有重要的工业应用价值。一方面,结合电子显微镜实时观察高温合金晶粒尺寸、表面形貌、相变等参数的变化,并记录对应的超声信号;另一方面,通过机器学习找出超声信号与合金特性参数的一一映射关系,从而建立数据库,对高温合金的特性进行自主识别。

图9为高温真空拉伸激光超声测试系统。如图9(a)所示,南京大学陈延峰教授团队通过将高温拉伸真空系统与激光超声系统整合,对镍基合金进行了初步探索,实验结果如图9(b)~(c)所示。在室温下,对镍基合金拉伸的过程中,随着拉应力的增大,声速也逐渐下降(图9(b)),在对其施加550℃温度时,声时差随着拉应力的增加变化关系如图9(c)所示。

### 3.4 金属增材制造中的应用

金属增材制造(metal additive manufacturing,简称MAM)技术是20世纪80年代发展起来的一种基于离散堆积思想的新型材料成形技术<sup>[59]</sup>。目前,

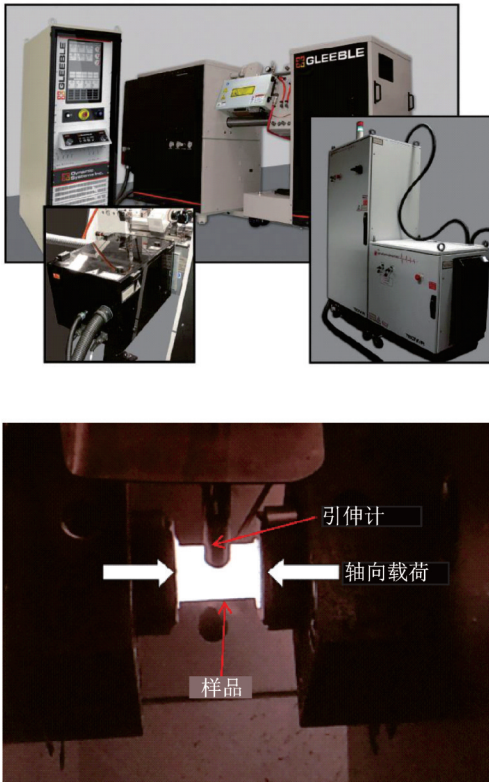


图7 LUMet设备<sup>[55]</sup>

Fig. 7 LUMet equipment<sup>[55]</sup>

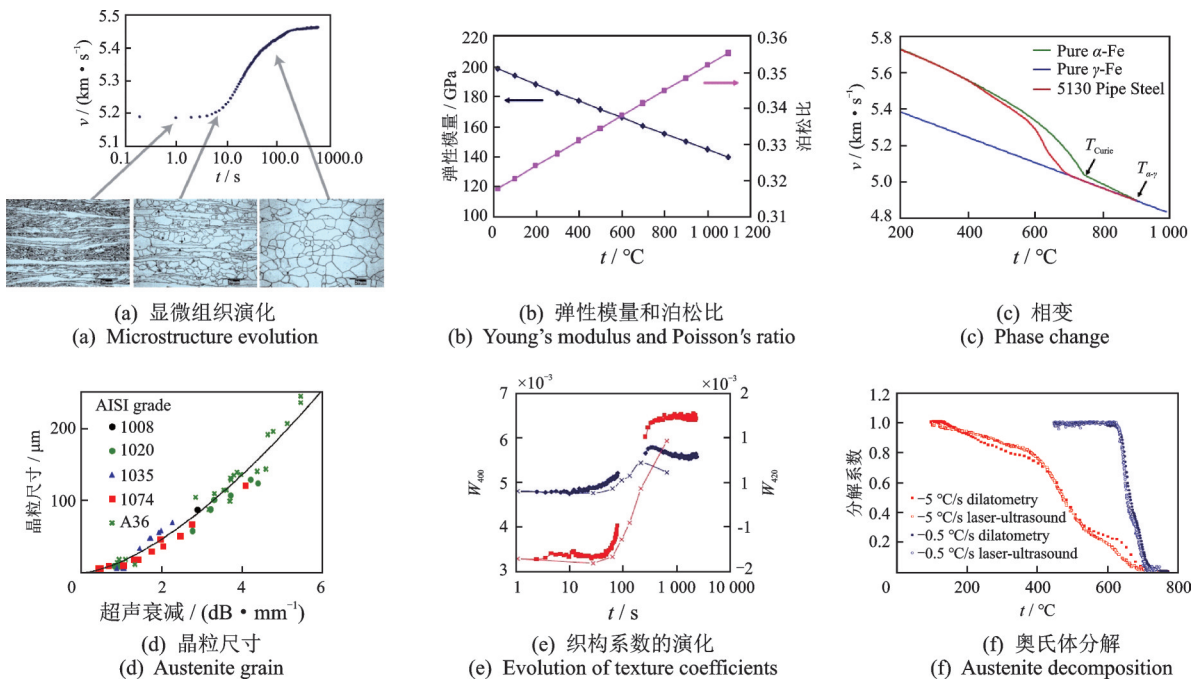


图8 高温合金物理模拟过程中实时原位监测<sup>[58]</sup>

Fig.8 In-situ monitoring during physical simulation of superalloys<sup>[58]</sup>



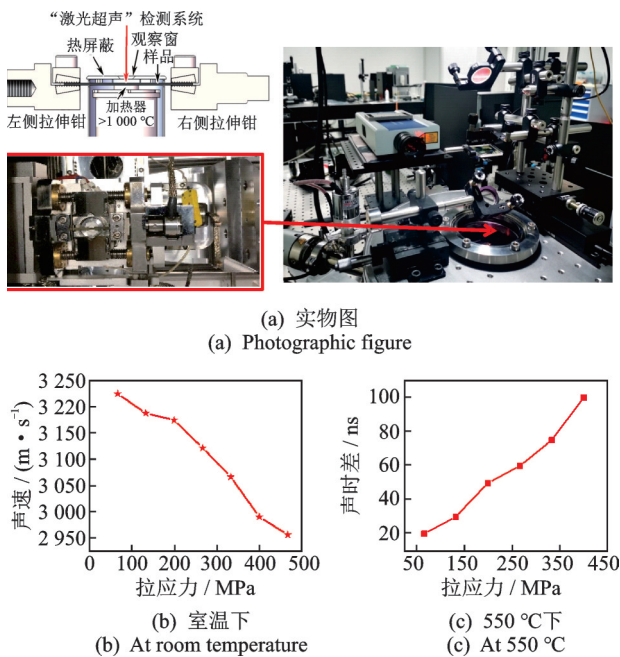


图9 高温真空拉伸激光超声测试系统  
Fig.9 High temperature vacuum tension based on laser ultrasonic testing system

MAM技术主要包括激光选区熔化技术、激光工程化净成形技术和电弧增材制造技术等<sup>[60-61]</sup>。如图10所示,MAM具有对任意复杂形状构件成形精度高的特点,被广泛应用于航空航天、汽车制造和生物医学等领域<sup>[62]</sup>。但是,MAM过程复杂,容易带来材料的不连续性,最常见的是位于熔融材料主体中的空隙裂纹和气孔。这些缺陷严重影响了工件的力学性能,给MAM工艺的发展和应用带来一定的限制<sup>[63]</sup>。因此,迫切需要能对MAM过程中工件质量实时监测评估的无损检测技术。

目前,表征MAM零件内部缺陷最常用的技术是X射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography,简称XCT)技术和超声检测(ultrasonic technolo-

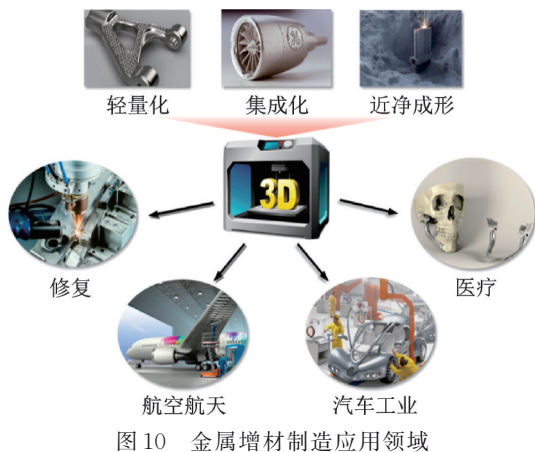


Fig.10 Applications of metal additive manufacturing

gy,简称UT)技术。由于XCT设备尺寸较大,且UT需要偶联剂,因此应用受到了一定限制。激光超声无损检测由于其非接触式、与MAM设备兼容性良好的特点,特别适合于对复杂几何零件的实时在线监测;但目前的研究仅局限于实验室。图11为镍基合金增材制造内部孔洞缺陷的检测。文献[64]基于激光超声技术,对Ti-6Al-4V材质金属增材制造构件中的内部孔洞缺陷进行评估,检测出直径为800 μm的孔洞缺陷,如图11(a)所示。笔者课题组优化检测系统,将Ti-6Al-4V合金检测分辨率提高至200 μm,如图11(b)所示。Lévesque等<sup>[65]</sup>结合合成孔径聚焦技术(SAFT),对Ni基合金内部缺陷进行B扫描检测,如图11(c)所示。

### 3.5 超快光声无损检测技术

激光超声无损检测技术广义上指的是通过纳秒脉冲激光激励-激光干涉仪接收的探测技术。通过皮秒/飞秒脉冲激光激励-皮秒/飞秒脉冲激光探测技术本质上属于激光超声无损检测的范畴,即超快光声无损检测技术。

超快光声技术是近30年发展起来的新型微纳检测技术<sup>[66]</sup>,结合了脉冲激光的超高时间、空间分辨率优势和高频超声波的穿透性特点,利用飞秒级时间分辨率的脉冲激光来产生和探测材料中的高频超声波,从而实现高分辨率的光声相互作用检测与成像,是一种能够实现纳米级分辨率的尺寸测量、微结构成像、显微组织分析、声学与弹性力学特性表征的非接触式无损检测方法。该技术基于超快激光的泵浦-探测(pump-probe)原理,利用泵浦脉冲激光产生1 GHz以上的高频相干超声脉冲波(coherent acoustic pulses),具有特定频率和相位信息的高频超声波;经过分辨率约几十到几百飞秒的时间延迟后,通过一系列跟进的脉冲激光,检测由前面泵浦激发的高频声波在材料中传播及相互作用的信息。通过分析超声波与材料的相互作用特征,反演材料的微结构、组分和弹性力学性质。

超快光声检测技术已经逐步进入到实际产业应用中,在集成电路行业已经研制出成熟的产线级检测设备<sup>[67]</sup>。其中,专注于集成电路超快光声检测设备的Rudolph公司相继开发出Alpha原型机、Beta自动化装备以及MetaPULSE系列产线检测设备,已经广泛应用于一些知名半导体厂商,成为集成电路生产线的标准检测设备之一。

目前,我国在超快光声技术研究方面还处于



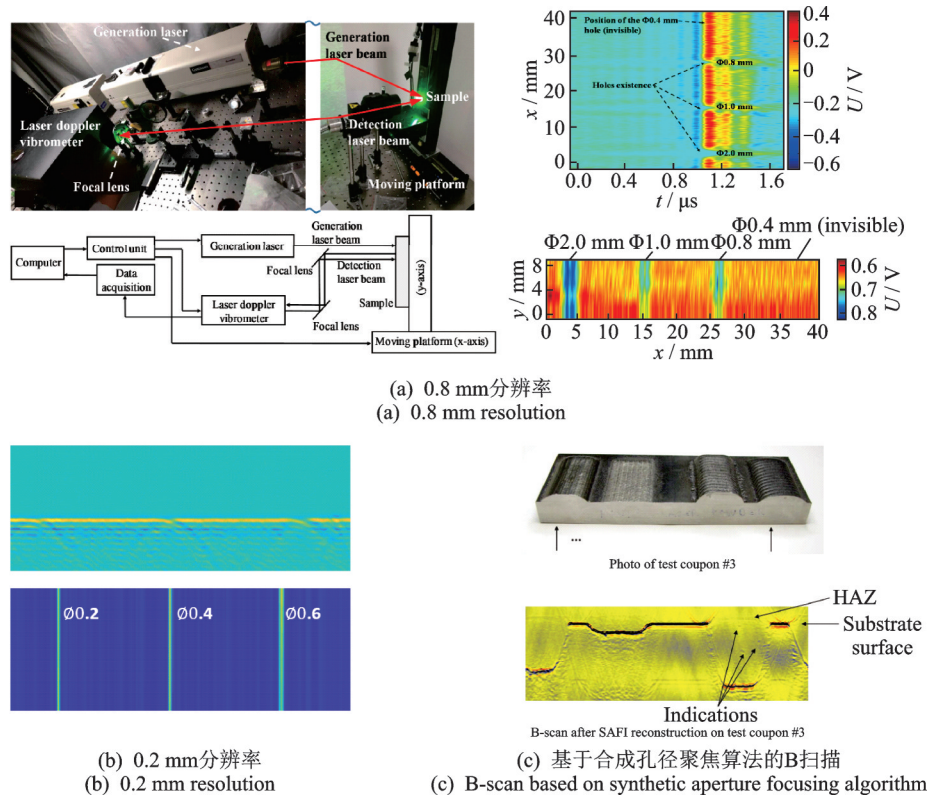


图 11 镍基合金增材制造内部孔洞缺陷的检测

Fig.11 Detection of internal hole defects in nickel base alloy of additive manufacturing

起步阶段,仍然以理论研究和少量的实验研究为主。如图 12 所示,笔者课题组自主搭建了飞秒激光泵浦-探测实验平台,以及基于皮秒激光超声

和时域布里渊散射等超快光声原理,开展了金属薄膜、二维材料薄片的厚度和声速检测研究<sup>[68-69]</sup>。

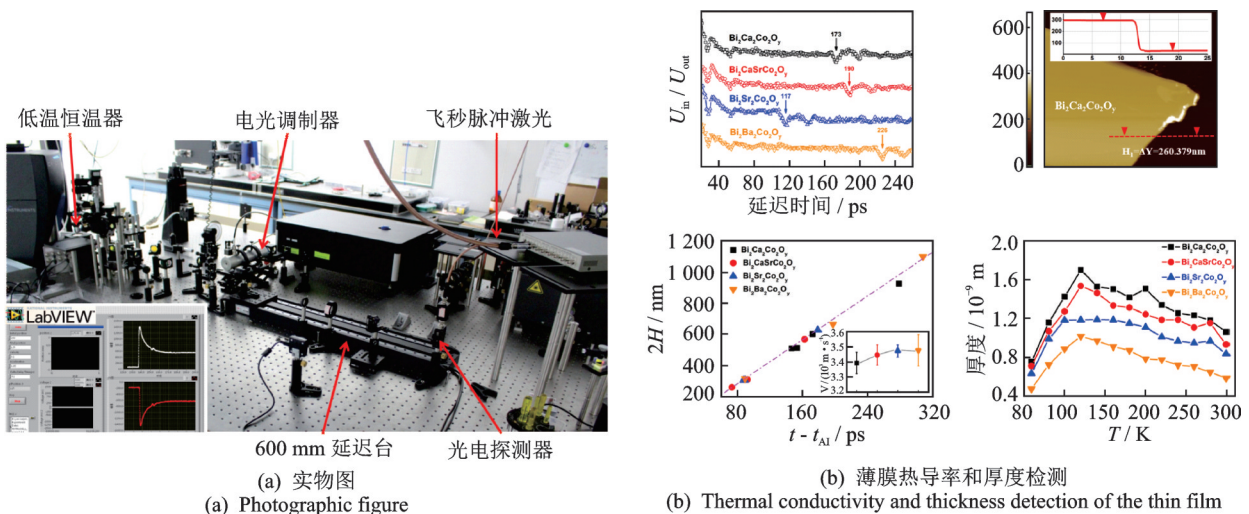


图 12 飞秒激光泵浦-探测实验平台及其应用<sup>[68-69]</sup>

Fig.12 Femtosecond laser pump-probe experimental platform and it's application<sup>[68-69]</sup>

### 4 超声信号处理

激光超声信号属于非平稳信号,一般的数字滤波方法对白噪声的抑制效果比较明显,但对结构噪

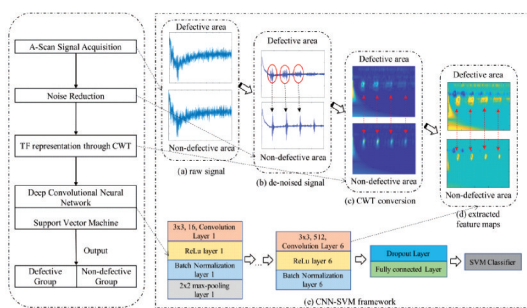
声、散射噪声等非随机信号的处理有一定的局限性。当激光超声无损检测系统工作时,脉冲激光激励的高频超声信号被探测光探测。通过分析超声 A 扫描信号来揭示待测物的一系列性质。但是,对

A 扫描信号的解释通常依赖于人们的经验知识,为了减少人工判断造成的误差,研究人员在超声模式识别方法上投入大量精力,包括特征提取和决策算法,涉及到各种信号处理和人工智能技术。通常情况下,超声模式识别包括 3 个步骤:①获取超声信号;②特征提取和筛选;③信号分类<sup>[70-71]</sup>。这 3 个步骤中,特征提取和筛选最为重要,直接决定最后的检测精度。

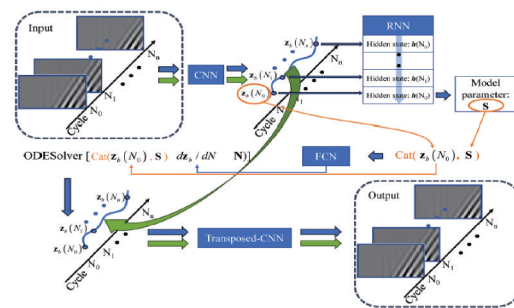
传统的超声信号特征提取和选择算法包括离散小波变换<sup>[72]</sup>、小波包变换<sup>[73]</sup>、香农熵<sup>[74]</sup>和统计特征等。这些算法对低阶的时域或时频域超声信号比较敏感,但对高阶信号分量不敏感。

近年来,深度学习技术特别是神经网络的发展

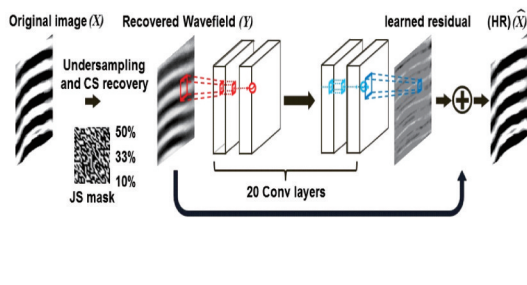
极大地促进了信号特征提取和选择的研究,并逐渐应用于无损检测领域。图 13 为深度学习在超声信号处理中的应用。Yan 等<sup>[43]</sup>提出了一种基于深度卷积神经网络和支持向量机分类器相结合的超声模式识别方法,用于获取和识别管道环焊缝 A 扫描信号裂纹相关特征,识别精度达到 93.75%,如图 13(a)所示。Tao 等<sup>[75]</sup>用深度学习直接处理和表征从纤维增强聚合物层合板的间断拉伸疲劳实验中通过激光超声测量得到的导波信息,如图 13(b)所示。Yasamin 等<sup>[76]</sup>将压缩感知和卷积神经网络相结合,从低分辨率图像中恢复高空间频率信息。Tran 等<sup>[77]</sup>基于激光超声技术,利用 VGG 结构模型的 CNN 对螺栓松动进行诊断,如图 13(d)所示。



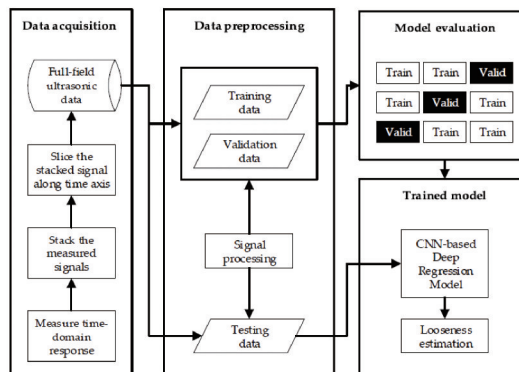
(a) 焊缝开裂模式识别<sup>[43]</sup>  
(a) Weld crack pattern recognition<sup>[43]</sup>



(b) 层合板疲劳损伤表征<sup>[75]</sup>  
(b) Fatigue damage characterization for composite laminates<sup>[75]</sup>



(c) 优化波场图像质量<sup>[76]</sup>  
(c) Enhancing wavefield image quality<sup>[76]</sup>



(d) 螺栓松动诊断<sup>[77]</sup>  
(d) Bolt loosening diagnosis<sup>[77]</sup>

图 13 深度学习在超声信号处理中的应用

Fig. 13 Applications of deep Learning in ultrasonic signal processing

## 5 结论与展望

1) 石油/化工/天然气/核能管道裂纹缺陷检测。目前,激光超声在管道检测方面应用最为广泛,由于管道本身是金属材质,光热转化效率高,对于弧形弯曲构件来说,不存在检测盲区,这一点是常规超声检测无法比拟的。不足的是,有些管道在长期使

用过程中表面生锈,会在一定程度上影响检测效率。

2) 碳纤维增强复合材料结构健康检测。由于 CFRP 构件在航空航天领域应用广泛,因此对其进行结构健康无损检测尤为重要。波长为 1 064 nm 的脉冲激励光对金属材质可产生较高的光热转换效率,用于 CFRP 材料检测时其激发效率降低。Dubois 等<sup>[50]</sup>发现,对于 CFRP 材料,波长接近 3.2 μm 的

激光束产生超声波的效率最高。因此,该波段脉冲激光器的研制是一个研究方向。目前,工业常用的检测是搭载机器扫查系统的超声检测。

3) 高温合金性能参数表征。激光超声无损检测技术非常适合在高温下对材料性能参数表征。目前,美国 Dynamic Systems 公司开发的 LUMet 设备已用于工业应用,并得到非常全面的检测效果。笔者认为,若将高温原位拉伸系统与激光超声系统相结合,并借助扫描电镜原位观察,获取海量的不同材质金属在不同温度、不同拉伸应力载荷下的超声信号,以及对应的电镜图像,通过机器学习找出不同材料特性与超声信号之间的映射关系,建立一套数据库,可以实现对高温合金性能参数的自主表征,从而大大提高检测效率和精度。

4) 金属增材制造中的应用。MAM 组件在加工过程中会产生各种缺陷,这些裂纹缺陷的存在会严重影响构件的机械性能和安全性。最优的解决方案是在增材制造过程中,对结构件实时原位监测以便及时调整加工参数条件。笔者认为,激光超声技术非常适合与 MAM 系统集成一体。为了提高监测的准确率,可搭载一套机器视觉系统,即可实施全面多角度监测。

5) 超快光声无损检测技术。与纳秒激光超声检测技术相比,超快光声无损检测结合了皮秒/飞秒脉冲激光的超高时间、空间分辨率优势和高频超声波的穿透性特点,是一种能够实现纳米级分辨率的非接触式无损检测方法,检测效率和精度更高、尺度更微观。目前,超快光声检测技术最成功的产业应用是在半导体和集成电路领域,已经应用于芯片制造工艺中的金属薄膜厚度测量、成膜质量分析等重要技术环节,成为处理器、存储器和光电器件产线的标准检测仪器之一。

6) 超声信号处理算法。对超声信号数据处理是否得当,直接决定最终检测的效率和精度。除了依靠检测人员的直观经验对 A 扫描信号进行判别外,传统的超声信号算法还包括离散小波变换、小波包变换、香农熵和统计特征等。机器学习特别是深度学习算法的应用是无损检测算法领域发展的一个新的趋势。

7) 国防和工业需求的不断变化给无损检测领域提出了更高的要求,高检测效率、高精度、高自动化、高智能化将是未来先进激光超声无损检测技术的发展趋势。

## 参 考 文 献

- [1] LI Q, LIN X, WANG X, et al. Research on the grain boundary liquation mechanism in heat affected zones of laser forming repaired K465 Nickel-based superalloy [J]. *Metals*, 2016, 6(3): 64-73.
- [2] SUN C, ZUO X, XIANG Y, et al. Investigation on hot deformation behavior and hot processing map of BSTMUF601 super-alloy [J]. *Metals*, 2016, 6(3): 70-75.
- [3] KRIL C E, BIRNINGER R. Estimating grain-size distributions in nanocrystalline materials from X-ray diffraction profile analysis [J]. *Philosophical Magazine A*, 1998, 77(3): 621-640.
- [4] KIM K, CHOI J, LEE Y. Effectiveness of non-local means algorithm with an industrial 3 MeV LINAC high-energy X-ray system for non-destructive testing [J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2634-2645.
- [5] TAO W, XU Y, LIU H, et al. Machining accuracy detection of PCB hole by X-ray micro-CT [J]. *Micron*, 2020, 131: 102826-102832.
- [6] WANG Q, LIU X E, YANG S, et al. Non-destructive detection of density and moisture content of heartwood and sapwood based on X-ray computed tomography (X-CT) technology [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, 77(6): 1053-1062.
- [7] LONG L, YUN Y, XIANG C, et al. Investigation on the formation mechanism of crack indications and the influences of related parameters in magnetic particle inspection [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6805-6820.
- [8] ZHANG X, ZHANG X, ZHANG M, et al. Optimization design and flexible detection method of wall-climbing robot system with multiple sensors integration for magnetic particle testing [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4582-4600.
- [9] VERRUIJT A. Penetration testing, vol.1: proceedings of the second european symposium on penetration testing, amsterdam [M]. [S. l.]: CRC Press, 2021: 24-27.
- [10] TERUYOSHI S, WATARU Y, KEIJI E, et al. Rectangular wave eddy current testing using for imaging of backside defects of steel plates [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 64(1/4): 1-8.
- [11] CHENG J, POTTER J N, CROXFORD A J, et al. Monitoring fatigue crack growth using nonlinear ultrasonic phased array imaging [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(5): 055006.
- [12] LI J B, ZHONG R, SHEN X W, et al. Ultrasonic nondestructive testing method for mechanical properties



- of metallic nanomaterials [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632 (5) : 052094.
- [13] YA M, MARQUETTE P, BELAHCENE F, et al. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 382 (1/2): 257-264.
- [14] JASIŪNIENĖ E, RAIŠUTIS R, ŠLITERIS R, et al. Ultrasonic NDT of wind turbine blades using contact pulse-echo immersion testing with moving water container [J]. Ultragarsas, 2012, 63(3): 28-32.
- [15] MONCHALIN J P. Optical detection of ultrasound [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1986, 33: 485-499.
- [16] ZEMP R J, BITTON R, SHUNG K K, et al. Photoacoustic imaging of the microvasculature with a high-frequency ultrasound array transducer [J]. Journal of Biomedical Optics, 2007, 12(1): 010501.
- [17] STROHM E M, BERNDL E S, KOLIOS M C. Probing red blood cell morphology using high-frequency photoacoustics [J]. Biophysical Journal, 2013, 105(1): 59-67.
- [18] LU Q B, LIU T, DING L, et al. Probing the spatial impulse response of ultrahigh-frequency ultrasonic transducers with photoacoustic waves [J]. Physical Review Applied, 2020, 14(3): 034026.
- [19] ADLER R, KORPEL A, DESMARES P. An instrument for making surface waves visible [J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1968, 15: 157-160.
- [20] RUELLO P, GUSEV V E. Physical mechanisms of coherent acoustic phonons generation by ultrafast laser action [J]. Ultrasonics, 2015, 56: 21-35.
- [21] LI J, ZHANG H, NI C, et al. Analysis of laser generated ultrasonic wave frequency characteristics induced by a partially closed surface-breaking crack [J]. Applied Optics, 2013, 52 (18): 4179-4185.
- [22] YIN A, XU X, ZHANG S, et al. Analysis for angular dispersions of surface acoustic wave velocities in BCC crystals [J]. Ultrasonics, 2021, 113: 106374.
- [23] DANILISHIN S L, KHALILI F Y. Quantum measurement theory in gravitational-wave detectors [J]. Living Reviews in Relativity, 2012, 15(1): 1-14.
- [24] JIACHEN K, CHANGQI D, WEI Y, et al. Application of an adaptive two-wave mixing interferometer for detection of surface defects [C] // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). [S. l.]: IEEE, 2016: 2142-2146.
- [25] VARGHESE R, VISWAN R, JOSHI K, et al. Magnetostriction measurement in thin films using laser Doppler vibrometry [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 363: 179-187.
- [26] MONCHALIN J P. Laser-ultrasonics: principles and industrial applications [J]. Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, 2007, 24(16): 79-115.
- [27] KENWRIGHT D A, ANDERSON T, MORAN C M, et al. Assessment of spectral doppler for an array-based preclinical ultrasound scanner using a rotating phantom [J]. Ultrasound in Medicine and Biology, 2015, 41(8): 2232-2239.
- [28] DUBBINS P. Renal artery stenosis: duplex Doppler evaluation [J]. The British Journal of Radiology, 1986, 59(699): 225-229.
- [29] GINTHER O J, UTT M D. Doppler ultrasound in equine reproduction: principles, techniques, and potential [J]. Journal of Equine Veterinary Science, 2004, 24(12): 516-526.
- [30] FREDRIKSEN T D, EKROLL I K, LOVSTAKKEN L, et al. 2D tracking Doppler: a new method to limit spectral broadening in pulsed wave doppler [C] // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. Piscataway: IEEE, 2012: 334-337.
- [31] AGARWAL S, GAURAV A K, NIRALA M K, et al. Potential and sampling based RRT star for real-time dynamic motion planning accounting for momentum in cost function [C] // International Conference on Neural Information Processing. Cham: Springer International Publishing, 2018: 209-221.
- [32] PERCIVAL W J, SAMUSHIA L, ROSS A J, et al. Redshift-space distortions [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Athematical Physical and Engineering Sciences, 2011, 369 (1957): 5058-67.
- [33] 陈春刚, 王毅, 杨振坤. 长输油气管道泄漏检测技术综述 [J]. 石油与天然气化工, 2002(1): 52-54.  
CHEN Chungang, WANG Yi, YANG Zhenkun. Researches on pipeline leak detetion methods [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2002 (1) : 52-54. (in Chinese)
- [34] 李海生, 吴之楠. 油气管道完整性管理技术的进展与对策 [J]. 无线互联科技, 2018, 15(17): 165-166.  
LI Haisheng, WU Zhinan. Progress and countermeasures of oil and gas pipelines integrity management technology [J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15 (17): 165-166. (in Chinese)
- [35] HERNANDEZ-VALLE F, DUTTON B, EDWARDS R S. Laser ultrasonic characterisation of branched surface-breaking defects [J]. NDT & E International, 2014, 68: 113-119.

- [36] KOU X, PEI C, CHEN Z. Fully noncontact inspection of closed surface crack with nonlinear laser ultrasonic testing method[J]. *Ultrasonics*, 2021, 114: 106426.
- [37] MAJHI S, MUKHERJEE A, GEORGE N V, et al. Corrosion monitoring in steel bars using Laser ultrasonic guided waves and advanced signal processing [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149: 107176.
- [38] CLORENNEC D, ROYER D, CATHELIN S. SAW propagation on cylindrical parts using laser-ultrasonics: application to crack detection [C] //2002 IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway: IEEE, 2002: 207-210.
- [39] KLEIN M B, ANSARI H. Automated laser ultrasonic inspection of hybrid laser arc welding for pipeline construction[C]//8th International Pipeline Conference. [S.l.]: IPC, 2010: 817-822.
- [40] 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.
- [41] LEE H, YANG J, SOHN H. Baseline-free pipeline monitoring using optical fiber-guided laser ultrasonics [J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11 (6) : 684-695.
- [42] OCHIAI M, MIURA T, YAMAMOTO S. Laser-ultrasonic testing and its applications to nuclear reactor internals[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 975: 231-238.
- [43] YAN Y, LIU D, GAO B, et al. A deep learning-based ultrasonic pattern recognition method for inspecting girth weld cracking of gas pipeline [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 7997-8006.
- [44] KUSANO M, HATANO H, WATANABE M, et al. Mid-infrared pulsed laser ultrasonic testing for carbon fiber reinforced plastics [J]. *Ultrasonics*, 2018, 84: 310-318.
- [45] 宁莉, 杨绍昌, 冷悦, 等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(5): 123-128.  
NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(5): 123-128. (in Chinese)
- [46] CHOQUET M, HÉON R, PADIOLEAU C, et al. Laser-ultrasonic inspection of the composite structure of an aircraft in a maintenance hangar [C] //Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Vol. 14. THOMPSON D O, CHIMENTI D E, ed. Boston, MA: Springer US, 1995: 545-552.
- [47] QIU Q, LAU D. The sensitivity of acoustic-laser technique for detecting the defects in CFRP-bonded concrete systems [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, 35(2): 33-42.
- [48] BENTOUHAMI F, CAMPAGNE B, CUEVAS E, et al. LUCIE-a flexible and powerful laser ultrasonic system for inspection of large CFRP components[C]//2nd International Symposium on Laser Ultrasonics. Talence, France: [s.n.], 2010.
- [49] CAMPAGNE B, VOILLAUME H, GOUZERH L, et al. Laser ultrasonic developments for NDT of aeronautic composite parts [C]//The 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII). Le Mans, France: [s.n.], 2013: 20-24.
- [50] DUBOIS M, DRAKE T E. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2011, 26(3/4): 213-228.
- [51] 郭茂文, 刘春荣, 郑雪萍, 等. 粉末高温合金的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(20): 11-13.  
GUO Maowen, LIU Chunrong, ZHENG Xueping, et al. Research status of powder metallurgy superalloy [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(20): 11-13. (in Chinese)
- [52] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 25(S2): 482-486.  
WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of Ni-based superalloys [J]. *Material Review*, 2011, 25(S2): 482-486. (in Chinese)
- [53] COUTSOURADIS D, DAVIN A, LAMBERIGTS M. Cobalt-based superalloys for applications in gas turbines [J]. *Materials Science and Engineering*, 1987, 88: 11-19.
- [54] RESTALL J E, STEPHENSON D J. High temperature erosion of coated superalloys for gas turbines [J]. *Materials Science and Engineering*, 1987, 88: 273-282.
- [55] LUMet: laser-ultrasonic sensor for in-situ metallurgical studies [EB/OL]. [2021-03-03]. <https://www.gleeble.com/products/specialty-systems/laser-ultrasonic-measurement-system-lumet.html>
- [56] KEYVANI M, GARCIN T, FABRÈGUE D, et al. Continuous measurements of recrystallization and grain growth in cobalt super alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(5): 2363-2374.
- [57] SARKAR S, MOREAU A, MILITZER M, et al. Evolution of austenite recrystallization and grain growth

- using laser ultrasonics [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(4): 897-907.
- [58] MOREAU A, KRÜGER S E. In-situ monitoring of physical simulations using laser-ultrasonics[M]. [S.l.]: Industrial Materials Institute, 2007:35-42.
- [59] SAMES W J, LIST F A, PANNALA S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(5): 315-360.
- [60] SHU X, CHEN G, LIU J, et al. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication [J]. *Materials Letters*, 2018, 213: 374-377.
- [61] LIU S, SHIN Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: a review [J]. *Materials & Design*, 2019, 164: 107552.
- [62] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 9-21.
- YANG Yongqiang, CHEN Jie, SONG Changhui, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 9-21. (in Chinese)
- [63] SHEN B, LI H, LIU S, et al. Influence of laser post-processing on pore evolution of Ti-6Al-4V alloy by laser powder bed fusion [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 818: 152845.
- [64] YU J, ZHANG D, LI H, et al. Detection of internal holes in additive manufactured Ti-6Al-4V part using laser ultrasonic testing [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(1): 365-376.
- [65] LÉVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics [C] // AIP Conference Proceedings. [S.l.]: AIP Publishing LLC, 2016: 130003.
- [66] GUSEV V E, RUELLO P. Advances in applications of time-domain Brillouin scattering for nanoscale imaging [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(3): 031101.
- [67] MARIS H J. Non-destructive testing using picosecond ultrasonics [C] // AIP Conference Proceedings. [S.l.]: American Institute of Physics, 2006: 210-217.
- [68] LI L, YAN X J, DONG S T, et al. Ultra-low thermal conductivities along c-axis of naturally misfit layered Bi<sub>2</sub>[AE]2Co<sub>2</sub>O<sub>y</sub> (AE = Ca, Ca<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>, Sr, Ba) single crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(3): 033902.
- [69] DI C, PAN J H, DONG S T, et al. Ultralow cross-plane lattice thermal conductivity caused by Bi-O/Bi-O interfaces in natural superlattice-like single crystals [J]. *CrystEngComm*, 2019, 21(41): 6261-6268.
- [70] SONG S J, KIM H J, LEE H. A systematic approach to ultrasonic pattern recognition for real-time intelligent flaw classification in weldments [M] // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Vol.18A/18B*. THOMPSON D O, CHIMENTI D E, ed. Boston, MA: Springer US, 1999: 865-872.
- [71] LLATA J, SARABIA E, PÉREZ-ORIA J. Pattern recognition with ultrasonic sensors: a neural networks evaluation [J]. *Sensor Review*, 2001, 21: 45-51.
- [72] SHENSA M J. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(10): 2464-2482.
- [73] SUN Z, CHANG C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(10): 1354-1361.
- [74] LIN J. Divergence measures based on the Shannon entropy [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, 37(1): 145-151.
- [75] TAO C, ZHANG C, JI H, et al. Fatigue damage characterization for composite laminates using deep learning and laser ultrasonic [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216: 108816.
- [76] YASAMIN K E, BILODEAU M, MASSON P, et al. Deep learning for enhancing wavefield image quality in fast non-contact inspections [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 19(4): 1003-1016.
- [77] TRAN D Q, KIM J W, TOLA K D, et al. Artificial intelligence-based bolt loosening diagnosis using deep learning algorithms for laser ultrasonic wave propagation data [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(18): 5239-5263.



**第一作者简介:**卢明辉,男,1979年10月生,教授、博士生导师。南京大学现代工程与应用科学学院副院长,中国材料协会下属超材料协会常务理事,中国显微仪器仪表协会理事,中国声学学会物理声学分会委员。获国家自然科学基金杰出青年基金,国家“万人计划”科技领军人才,首批中组部青年拔尖人才,江苏省特聘教授,教育部新世纪优秀人才等项目支持。研究方向为人工微结构材料和凝聚态光电声功能材料及器件的设计、制备和应用,主要为人工带隙材料及其微结构器件。发表SCI论文250余篇,包括 *Science*, *Nature Mater.*, *Nature Phys.*, *Phys. Rev. Lett.*, *Nature Commun.*, *PNAS*, *NSR* 等国际一流期刊。“在声子晶体中实现声波双负折射”的研究成果入选2007年度中国基础研究十大新闻。荣获2015年国家自然科学二等奖(排名第二)。

E-mail: luminghui@nju.edu.cn