

# 柔性超声传感结构健康监测技术现状与展望\*

郭师峰<sup>1,2,3</sup>, 李叶海<sup>1,2,3</sup>, 李振<sup>1,2,3</sup>, 冯伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳, 518055) (2. 深圳市智慧传感与系统检测重点实验室 深圳, 518055)  
(3. 中国科学院人机智能协同系统重点实验室 深圳, 518055)

**摘要** 现有硬质传感器因黏接耦合到待测结构所带来的检测结果可靠性差、附加质量重及体积大等局限,难以在实际工程结构中全面应用。针对此问题,新型柔性传感技术利用聚合物等柔性材料,结合新型制备工艺,可将整个传感网络直接制备于待测结构,灵活布置于复杂形廓位置,具有检测灵敏度高、重量轻、柔性好和可设计等优点。针对主流的基于超声技术的结构健康监测方法,柔性传感单元可形成大面积、高密度的完备传感网络,并且具备信号调制能力,能够完成多种形式的主被动监测任务,为结构健康监测技术在航空航天、轨道交通和石油管道等工程结构的应用提供关键的技术保障。

**关键词** 柔性传感器; 传感网络; 超声波; 健康监测

**中图分类号** TH17; TP212

## 引言

结构健康监测技术在提高结构安全性、降低维护成本及延长结构服役寿命等方面有着重大意义,因此在航空航天、土木工程及管道运输等领域广泛应用。然而,随着新型材料和制造工艺的发展,结构外形轮廓趋于复杂,由硬质材料制备的传统传感器面临着严峻挑战。另一方面,受传感器自身质量和体积所限,使得大量布置传感网络会对结构造成额外负担,降低结构的力学性能和服役安全性。以飞行器或风力发电机叶片为例,由于其对结构的表面流体性能要求较高,大量布置的传统传感器会影响流场分布,增加运行阻力,严重影响稳定性。现有传感器因黏接耦合到待测结构所带来的检测结果可靠性差、附加质量重、体积大等局限,无法形成全面、有效和完备的传感网络,并且在恶劣的服役环境和交变载荷下容易引发结构损坏和脱离。

柔性传感技术的发展为研究新一代传感器及传感网络提供了重要基础。相较于传统传感技术,柔性传感技术结合了新材料、新成型工艺,所制备的传感网络易集成于复杂结构表面,避免了因几何外形

不匹配带来的易脱离、测量误差大等问题。同时由于重量超轻、体积超薄以及成本低廉,使大面积、高密度的传感网络布置成为可能,对于扩大监测范围、提高监测精度大有裨益。

笔者基于近年来国内外传感技术研究现状,从传感器材料的制备、成型工艺以及基于超声波的结构健康监测应用等方面,系统地比较现有柔性传感技术,并对柔性传感技术的发展及应用提出总结和展望。

## 1 柔性压电超声传感器

压电材料是压电传感器的关键,相较于其他材料,压电材料的突出优势表现为既可以制备激励传感器<sup>[1]</sup>,也可以制备接收传感器<sup>[2]</sup>,同时,由压电材料制成的传感元件还可用于其他工程场景,如机械控制<sup>[3]</sup>、能量收集<sup>[4]</sup>等。目前,常用的压电材料主要分为陶瓷类和聚合物类,研究人员均提出了相应的成型工艺来制备具有柔性的传感器,并将其用于结构健康监测。

### 1.1 压电陶瓷膜

压电陶瓷材料是最早被广泛应用于制作超声传

\* 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1813222);广东省前沿与关键科技创新基金资助项目(2017B090910013);深圳市科技计划基础研究资助项目(ZDSYS20190902093209795, JCYJ20180507182239617, JCYJ20170818153048647)  
收稿日期:2019-12-19;修回日期:2020-04-20

传感器的材料,所制备的超声换能器已经应用于商业无损检测行业。由压电陶瓷材料制备的小型压电晶片也作为传感网络单元,大量应用于结构健康监测的相关研究。常见的单相压电陶瓷材料以铅基材料为主,有钛酸铅(PT)、锆钛酸铅(PZT)、铌镁酸铅(PMN)和铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)<sup>[5]</sup>等,具有高介电常数、高压电应变常数、高居里温度、低压电电压常数和低介电损耗等特点。

压电陶瓷的高密度、高刚度特性,使得由其制造的传感器具有硬质、易碎、不易安装于复杂结构表面以及高声阻抗等缺点,限制了其在结构健康监测领域的应用。为制备柔性传感材料,Kobayashi等<sup>[6]</sup>利用溶胶-凝胶法,首先制作陶瓷超细粉体,将其均匀分散到前驱体溶液中。该溶液可配合多种制备工艺制作成膜,如流延法<sup>[7]</sup>、溶液浇铸法<sup>[8]</sup>、旋涂<sup>[9]</sup>或浸涂<sup>[10]</sup>。此外,还有一类新型直写式打印技术,可将柔性传感器直接成型于结构表面,所采用的制备技术包括喷涂<sup>[6, 11]</sup>、喷射打印<sup>[12]</sup>、丝网印刷<sup>[13]</sup>及喷墨打印<sup>[14]</sup>等。直写式打印技术采用基于增材制造的离散-堆积原理,通过“自下而上”的材料累加实现传感器的制备。采用这一技术用于传感器或传感网络制造,将单个传感器制备和网络布局结合在一起,极大简化了传感网络制备过程,具有轻质、极易黏附于任意形状表面、无需耦合剂及固定装置等优点,可以有效增强传感器与待检工程结构间的声学耦合,避免胶层引起的信号衰减及老化脱落等问题,对在航空航天、海洋平台等工业中实施原位健康监测有巨大优势。Barrow等<sup>[15]</sup>采用溶胶-凝胶法制备出了完整、不开裂的厚度为5~200  $\mu\text{m}$ 的PZT膜,压电常数能够达到 $d_{33} = 325 \text{ pC/N}$ , $d_{31} = -80 \text{ pC/N}$ 。

陶瓷类压电材料的耐热性较好,一般可以达到400  $^{\circ}\text{C}$ ,但在其制备过程中往往也需要较高的结晶温度,因此对在航空结构中常用的铝材或复合材料上直接制备传感器难度极大,有时需要隔热层处理<sup>[16]</sup>。水热法<sup>[17]</sup>是一种较低温的化学合成工艺,需要将原材料置于热溶剂和高压中进行晶体生长,因此需要使用高压反应釜。Ishikawa等<sup>[18]</sup>在180  $^{\circ}\text{C}$ 和0.95 MPa压力下用水热法在钛基底上成功制备了厚度约为20  $\mu\text{m}$ 的PZT薄膜。

尽管PZT材料具有优异的压电性能,但因其含有对人体和环境有害的铅元素,被一些国家及地区相继立法禁止或限制使用<sup>[19]</sup>。因此,国内外学者围绕开发性能优异的无铅压电材料展开了大量研究工作,研究对象主要包括基于钛酸钡(BT)<sup>[20]</sup>、钛酸铋

钠(BNT)<sup>[21]</sup>或铌酸钾钠(KNN)<sup>[22]</sup>等压电材料,所制备的压电传感器在压电性能方面已经接近于PZT传感器,但在稳定性方面还有待提升。在利用无铅压电材料制备柔性传感器方面,Chen等<sup>[23-24]</sup>制备了KNN基浆料,球磨分散后处理成粉末,通过热喷涂工艺在铝合金和不锈钢上直接制备成KNN基涂层,如图1所示,压电系数 $d_{33}$ 可达125  $\text{pC/N}$ 。

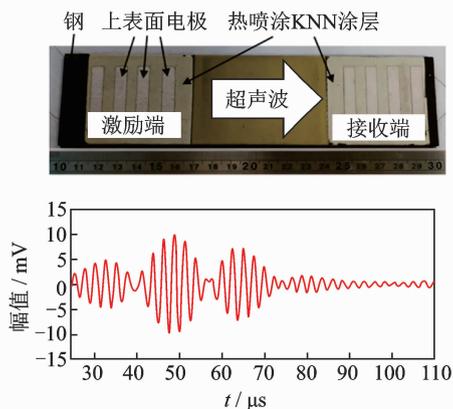


图1 钢板上热喷涂成型的KNN涂层及超声波激发与接收应用

Fig. 1 Thermal sprayed KNN on stainless steel plate for actuating and detecting ultrasonic waves

## 1.2 压电聚合物

尽管采用溶胶-凝胶法和直写式打印技术能够制备具有一定柔性的压电陶瓷传感器,可用于曲面结构,但是陶瓷类材料脆、硬的物理属性不变,以此制备的传感单元所能承受的最大拉伸应变只有0.1%左右<sup>[25]</sup>,无法布置于大应变结构表面以及具有复杂形廓的结构表面,因此影响整个传感网络的大面积布置,不能有效覆盖关键部位。

传感网络对柔韧性的要求促使研究人员尝试采用有压电特性的聚合物材料来制备薄膜类传感单元,如聚偏二氟乙烯(PVDF)、聚氯乙烯(PVC)和聚氨酯(PU)等。与陶瓷类压电材料相比,压电聚合物具有低介电常数、低压电应变常数、高压电电压常数、频响宽、低声阻抗以及极高的柔韧性等特点。PVDF作为应用最广泛的压电聚合物,晶体结构为多相混合,需通过单轴机械热拉伸等处理方法来增加 $\beta$ 相以提升其压电性能。而基于PVDF发展的共聚物,如聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)(P(VDF-TrFE))不需要特殊处理就可以获得高 $\beta$ 相,制备的简便性使得P(VDF-TrFE)近几年受到高度关注。

高压极化是制备基于压电聚合物材料的薄膜类传感单元必不可少的过程,通过高压极化对 $\beta$ 晶的

取向进行控制,能够明显改善压电聚合物的压电性和铁电性。极化方法分为接触式和非接触式两种。接触式极化需要在薄膜上、下表面准备电极,接通直流高压电,同时为防止空气电离,整个极化过程需要将样品放入硅油中进行。非接触式电晕极化在空气中就可完成,只需薄膜具备底电极,利用高压金属探针将空气电离,使空气中的带电离子打入薄膜自由面,与底电极在压电材料中形成电场。

由于聚合物材料易溶于有机溶剂,因此大部分基于溶液的成膜工艺以及直写式打印技术都适用于压电聚合物传感器的制备,如流延法、旋涂、喷涂及喷墨打印等。除此之外,典型的制备方法还有热压法和静电纺丝法<sup>[26]</sup>。热压法通过将PVDF聚合物加热到熔点,配合一定的压力成膜。静电纺丝法是一种特殊的成型工艺,通过高压静电场直接、连续地将压电聚合物拉伸成纤维射出到收集面上,由于制备过程融合了机械拉伸和高压极化处理,因此直接收集到的材料已经获得优异的铁电、压电性能,无需后续处理,极大地简化了制备工艺。但是静电纺丝制备的传感器易损坏,通常需要配合封装工艺才能使用。

压电聚合物制备成的传感单元压电应变性能较弱, $d_{33}$ 通常在20 pC/N左右,相对于压电陶瓷来说非常弱,但是压电电压系数高,响应频带宽,因此通常用来接收信号。Bae等<sup>[27]</sup>利用热压法制备的P(VDF-TrFE)传感器用于接收超声波信号,对复合材料进行损伤探测。此外,也有部分研究者利用压电聚合物作为激励单元。如图2所示,笔者将P(VDF-TrFE)传感器直接喷涂制备于钛合金表面,用来激发超声波信号,同时采用激光测振仪作为超声信号的接收端<sup>[28]</sup>。然而,压电聚合物的居里温度较低,性能易受温度影响,工作温度不宜过高或过低,通常在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内使用。

为提高压电聚合物的压电性能,研究人员采用掺杂颗粒等手段,掺杂的颗粒通过表面化学官能团吸引PVDF分子链从而影响其原子排列,强化 $\beta$ 相的形成。常见的掺杂颗粒包括自身具有一定压电性的压电陶瓷类颗粒(如PZT, ZnO等),一方面利用颗粒成核强化 $\beta$ 相,另一方面利用了颗粒自身的压电性能。Firmino等<sup>[29]</sup>研究了PZT颗粒大小及在PVDF中的组分对整体复合材料性能的影响,掺杂PZT的PVDF复合材料的 $d_{33}$ 可达140 pC/N<sup>[30]</sup>。Li等<sup>[31]</sup>则通过添加表面活性剂分散ZnO于P(VDF-TrFE)中,将 $d_{33}$ 提高了73.5%。研究人员发现,PVDF基复合材料的压电性能随压电颗粒掺

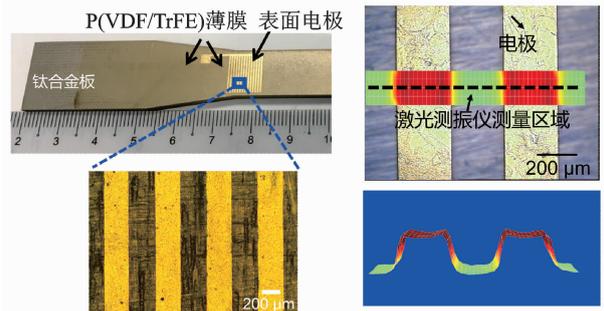


图2 直写式喷涂法制备于钛合金表面的压电聚合物传感器及压电常数测试

Fig. 2 Direct-write P(VDF-TrFE) transducers on Ti alloy plate and piezoelectric constant measurement

杂浓度的增高而增大,但过多的压电颗粒容易团聚,造成分散性差,反而会降低材料的压电性能,因此压电颗粒的掺杂浓度通常控制在(1~20) wt%之间。Han等<sup>[32]</sup>将纳米ZnO颗粒掺入到P(VDF-TrFE)中,发现浓度在7.5 wt%时压电性能最优,过多的ZnO纳米颗粒形成的团聚影响压电薄膜的结晶,导致压电性能反而下降。此外,碳基纳米颗粒也是一类常见的掺杂颗粒,包括石墨烯(graphene)、炭黑(CB)、碳纳米管(CNT)等。Wu等<sup>[33]</sup>在P(VDF-TrFE)中掺杂了石墨烯,再通过拉伸和热处理使压电电压性能提高了2倍。由于大部分碳基纳米材料具有优良的导电性,因此将其作为掺杂颗粒时需要精确控制浓度,量太少无法有效提升性能,量太多容易造成材料导电,损失介电性。因此,理想的掺杂浓度通常在(0.05~2) wt%之间。Huang等<sup>[34]</sup>的研究结果表明,当PVDF中添加的石墨烯浓度达到0.3 wt%时, $\beta$ 相已经接近饱和,继续掺杂将不能继续有效提高材料的压电性能。

### 1.3 压电纤维复合材料

压电陶瓷材料与压电聚合物材料的结合除了掺杂混合外,还有一类称为压电纤维复合材料(macro-fiber composite, 简称MFC)。MFC同样结合了压电陶瓷的高压电性能和聚合物材料的柔性,最初由NASA开发<sup>[35]</sup>,并且已经成功商用化。如图3所示,MFC由分布在树脂基(如环氧树脂)中的压电纤维和上、下表面电极封装而成,压电纤维可由陶瓷粉末与黏接剂混合挤压成型<sup>[36]</sup>,或直接由压电陶瓷晶片切条得到<sup>[37]</sup>。MFC可以灵活地配合电极拓扑形状有效实现指定方向地极化和激励/响应能力(利用 $d_{33}$ 或 $d_{31}$ )<sup>[38]</sup>。Mańka等<sup>[39]</sup>在此基础上采用了一种新型双面电极结构的MFC用于超声导波的结构健

康监测,在方向性、频率和模态筛选方面均优于商用MFC的性能。

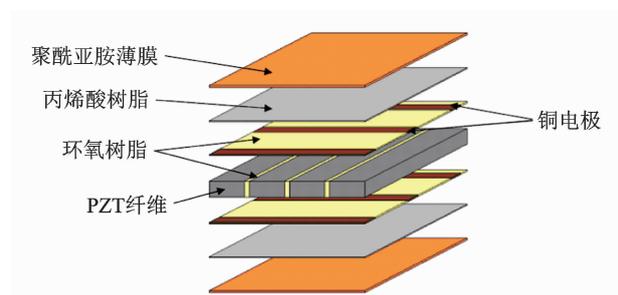


图3 压电复合材料传感器示意图

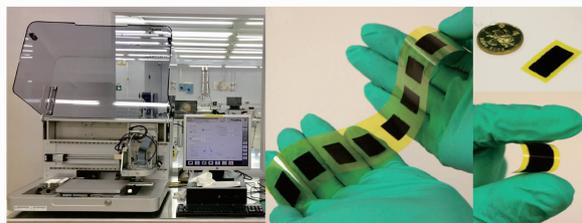
Fig. 3 Layout of MFC actuator

## 2 柔性纳米压阻超声传感器

传统压阻应变片的金属敏感栅能够以箔片形式存在,已经具有一定的柔性,可以适应于小曲率表面。但是受限于材料特性,形变范围小,在复杂结构表面依然难以安装,同时由于灵敏度低,以及动态响应弱等问题,使其在结构健康监测中的应用具有明显的局限性。新型柔性纳米压阻复合材料主要利用“隧穿效应”<sup>[40]</sup>,使导电纳米颗粒在聚合物中形成微观传导网络,当施加外在载荷时颗粒间距发生变化,引起微观网络电阻率的改变,以此响应宏观应力、应变的变化。纳米压阻复合材料不仅结合了聚合物的柔性高、密度小的优点,同时结合了纳米颗粒传导网络的高灵敏度以及宽频域响应的优点,以此制备的新型压阻传感器可以方便地安装于关键结构的复杂表面,并且超轻、超薄,不会增加过多质量和体积上的负担<sup>[41-42]</sup>。

高纵横比、高比表面积的导电纳米颗粒通常有利于传导网络的形成,碳基纳米颗粒包括石墨烯、炭黑、碳纳米管等,相比于金属纳米颗粒,在同等质量分数下碳基纳米颗粒更易构成网络<sup>[43]</sup>,是制备纳米压阻传感器的理想材料。研究人员采用碳基纳米颗粒掺入聚合物基体的方式制备纳米压阻材料,制备工艺与压电聚合物材料的制备工艺类似,大部分基于溶液的成膜工艺以及直写式打印技术都能适用,并且不需要通过高温结晶、机械拉伸或极化等复杂处理来获得传感性能。Zeng等<sup>[44]</sup>利用热压法制备的CB/PVDF薄膜应变片静态和动态振动灵敏度达到5。Zhou等<sup>[45]</sup>制备的CB/PVP溶剂能通过喷墨打印机印刷于柔性聚酰亚胺薄膜上,从而可以方便地黏贴于待检结构部位,得到的传感器静态应变灵敏度达到31,如图4所示。碳基纳米压阻传感器在低频范围响应与应变片的比较中占据明显优势,而

超声波引起的扰动相较于低频应变来说能量小、频率高,引起的局部应变也非常小( $<10 \mu\epsilon$ ),因此对压阻传感器的频响和灵敏度要求较高。通过研究发现,当导电纳米颗粒组分处于渗流阈值(表征掺杂类复合材料从绝缘向导电转化的颗粒组分阈值)附近时,整体复合材料的电阻率随外在应变呈指数级变化,如此制备而成的压阻传感器灵敏度有明显提高<sup>[46]</sup>。Liao等<sup>[47]</sup>利用溶剂喷涂法于复合材料表面直接制备石墨烯基纳米压阻传感器,灵敏度高达55,并且能够捕捉高达1.4 MHz的超声波信号。



(a) 喷墨打印机

(b) 在薄膜上制备的CB传感器

(a) Inkjet printer

(b) The CB sensors fabricated on the film

图4 柔性压阻传感器喷涂制备

Fig. 4 Inkjet printed piezoresistive sensors on PI film

采用直写式打印技术制备的传感器虽然免去耦合黏接带来的问题,但其外置安装方式仍易受到外界环境的影响,存在失效的可能。因此,Li等<sup>[48]</sup>将石墨烯纳米颗粒网络弥散分布于复合材料树脂基中,将整个材料功能化为富含无数传感单元的智能结构,赋予了自感应特性,并将其用于准静态应变测量、低频振动感知和高达500 kHz的超声波响应。这样的智能结构凭借自身感知特性,能够有效捕捉冲击引起的声发射被动信号,或是配合主动激励单元构成扫查网络,进而感知与结构损伤相关的超声信号特征<sup>[49]</sup>。

柔性纳米压阻传感器传感能力来源于碳基纳米颗粒在基体中形成的传导网络,而碳基纳米颗粒温度稳定性非常高,有氧环境下的最高耐受温度可达400℃,无氧环境更是高达2 000℃。因此,基于纳米颗粒的压阻传感器耐热性能主要取决于基体聚合物材料。通过对灵敏度随温度变化规律的研究,Liao等<sup>[47]</sup>发现在航空结构温度载荷范围内(-50~80℃)纳米压阻传感器的灵敏度具有良好的一致性;当温度低至-60℃和-90℃时,灵敏度呈现显著提高。形成这一现象的原因来自于基体材料在低温环境中的收缩现象,使得纳米网络与基体接触更为紧密,电阻率变化对应变的响应更为敏感。

### 3 超声结构监测应用

柔性材料制备的传感器在结构健康监测中可替代传统的硬质传感器,充分结合其柔韧性高、体积小和成本低的优点,可制成无线传感单元<sup>[50]</sup>。不同的柔性材料赋予传感器不同的特点,如表 1 所示。因

此,在应用于实际结构的健康监测时,需要综合考虑诸多问题,如传感器设计、监测任务分配及传感器安排布局等,以形成大面积、高密度的全面和有效的传感网络,可以胜任多种形式的监测任务。研究人员为此进行了大量研究和尝试,主要包括调制传感器使之能够捕捉敏感信号,以及针对特定损伤形式布局传感网络,进行主被动实时评估等。

表 1 不同柔性超声传感器的对比  
Tab. 1 Comparison of different flexible ultrasonic transducers

对比项目	压电陶瓷膜	压电聚合物	MFC	压阻纳米聚合物
压电常数 $d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	200~600	18~32	200~600(PZT/环氧树脂)	—
柔韧性	低	高	中	高
比重	大	小	中	小
是否可直写(无需黏接耦合)	是	是	否	是
稳定工作温度	-40~170℃ (PZT)	-40~80℃ (PVDF 聚合物)	-40~170℃ (PZT/环氧树脂)	-50~180℃ (环氧树脂)
静态响应	弱	弱	弱	强
能否响应超声波	能	能	能	能
能否激励超声波	能	能	能	否

#### 3.1 超声信号调制

在基于结构弹性波的结构健康监测应用中,由于超声信号的多模态特性使其在结构中的传播非常复杂,为此需对传感器进行调制以得到对特定损伤敏感的诊断信号。例如对于分层、脱胶一类的损伤形式,通常采用反对称模态(anti-symmetric mode,简称 A 波)配合穿透法进行检测;而对于沿厚度方向扩展的裂纹,则采用对称模态(symmetrical mode,简称 S 波)配合回波法进行检测。传统压电陶瓷晶片需要通过多个晶片阵列或相控阵技术对激励或接收的超声信号进行调制。基于柔性薄膜传感器的特点,研究人员开始关注薄膜传感器电极拓扑结构对超声波的调制功能,包括频率、模态和方向等<sup>[51-54]</sup>。电极拓扑形状设计主要分为梳状和叉指状,最初都起源于表面波发射/接收的压电器件<sup>[55]</sup>。以压电薄膜作为超声波激励单元时,对于模态  $k$  的激励强度可表示为

$$P_k(z) = V(\omega)C_k(z)Q(k)k \quad (1)$$

其中: $V(\omega)$ 为传感器频率响应; $C_k(z)$ 为耦合因子,由模态结构决定; $Q(k)$ 为激励载荷,与电极形状有关。

梳状电极可表示为

$$Q_z(k) = \sum_{n=1}^N \int_{r_{1n}}^{r_{2n}} \tau_z J_0(kr) r dr \quad (2)$$

叉指电极可表示为

$$Q_z(k) = \sum_{n=1}^N \left( \int_{r_{1n}}^{r_{2n}} \tau_z J_0(kr) r dr - \int_{r'_{1n}}^{r'_{2n}} \tau_z J_0(kr) r dr \right) \quad (3)$$

其中: $r_{1n}, r_{2n}$ 和 $r'_{1n}, r'_{2n}$ 分别为第  $n$  个单元正极或负极的位置; $J$ 为贝塞尔函数; $\tau$ 为每个电极单元由薄膜产生的压电应力。

如图 5 所示,梳状电极位于薄膜压电传感器的上表面,与下表面电极组合,利用逆压电效应激励压电薄膜的质点产生面外振动,因此梳状电极薄膜传

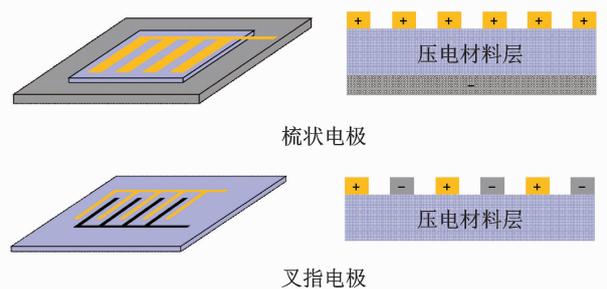


图 5 梳状和叉指电极拓扑形状示意图

Fig. 5 Comb type and inter-digital type configuration

传感器易激发 A 波;又指电极采用面内交叉双电极结构,在超声波发射中用于激励压电薄膜质点的面内振动,因此 S 波的激发效率较高<sup>[52]</sup>。由于正逆压电效应存在互易性,因此,作为接收单元时的传感单元亦可采用相同的拓扑结构设计方法。

### 3.2 主动监测

结构健康监测通常可分为主动与被动两种形式,主动健康监测首先需要通过传感网络中的驱动单元激励检测信号并输入结构,利用分布的传感单元接收响应信号。通过提取接收信号的变化特征,监测结构变化,从而实现损伤评估。超声导波在板壳类结构中具有传播距离远、能量集中等优点,因此基于超声导波的主动健康监测技术被广泛应用于关键结构的监测,如机翼蒙皮、机身壁板、管道及燃料箱等,监测范围涵盖了金属疲劳损伤和腐蚀、复合材料分层和脱胶等常见损伤类型。

百分之八十以上的金属破坏来自于循环载荷导致的疲劳缺陷。疲劳缺陷的初期阶段伴随着塑性变形和诸多微裂纹的产生,而传统检测手段无法对初期阶段的缺陷进行有效检测。利用超声波非线性特征可以有效提高检测极限,使得结构疲劳状态能够在早期得到量化表征。柔性压电薄膜类传感网络通过特定电极拓扑结构设计,传感特定倍频超声信号,能够显著提高信号中非线性部分,提高超声信号的信噪比。如图 6<sup>[56]</sup>所示,笔者利用扇形梳状电极在航空铝合金试样上产生具有一定方向性的表面波,利用柔性传感器组分别接收超声信号的基波与二次谐波信号,以此建立基于非线性损伤因子的材料塑性变形表征方法。与压电类传感器不同,压阻类传感器只能作为被动传感器,用于感知超声信号。Cao 等<sup>[57]</sup>采用喷墨打印技术制备纳米炭黑压阻柔性传感器,并结合作为驱动单元的超声压电晶片,组成具备主动监测功能的传感网络,通过建立多重扫查路径对铝板损伤进行了监测,如图 7 所示。

随着工程结构需求的变化,大量针对金属材料的紧固件连接被通过黏接的复合材料所代替,此外复合材料本身也是通过多个铺层黏接而成。脱胶、分层损伤是复合材料最常见损伤形式,因此,实现对复合材料内部的胶层黏接状态以及各种黏接结构的胶层状态的实时健康评估具有重大

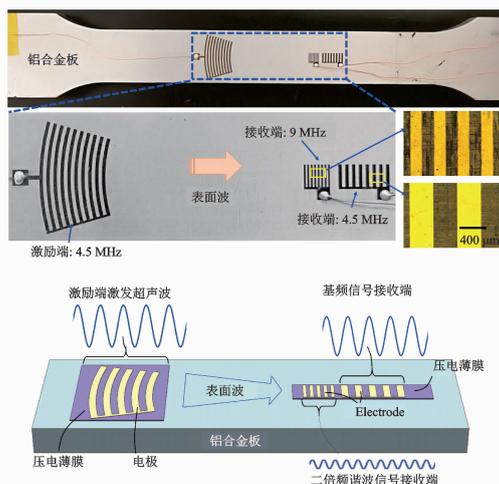


图 6 喷涂制备的 P(VDF-TrFE)传感器和光刻制备的梳状电极及基于表面波的塑性变形检测应用

Fig. 6 Sprayed P(VDF-TrFE) sensors with comb-shaped electrodes for determining yielding using rayleigh waves



图 7 纳米传感网络在超声波健康监测中的应用

Fig. 7 Application of nano-sensor network in ultrasonic waves-based structural health monitoring

意义。复合材料本身的各向异性力学行为使得导波具有复杂的传播特征,包括多种导波模态在结构中共同传播、导波的相速度和群速度随频率和传播方向的变化以及不同模态-频率组合下导波幅值随传播距离的增加而表现出不同的衰减规律,给信号采集和分析带来巨大的挑战。柔性传感器特别是聚合物类的薄膜传感器厚度在微米级别,相比于传统的压电晶片或光纤类传感器,可以更加方便地嵌入复合材料形成智能夹层结构,且不引起铺层畸变、树脂富集和应力集中等问题<sup>[58]</sup>。Rathod 等<sup>[59]</sup>将 PVDF 薄膜布置于复合材料中接收超声板波,通过不同铺层位置传感器信号的叠

加处理,实现了模式筛选,能够独立提取 A 波或 S 波特征。使用这类柔性薄膜类传感器组成传感网络时,往往可以结合电极拓扑结构设计和不同铺层位置进行布局,能够有效提高信号传播距离,激励对脱胶敏感的模态-频率组合超声波,从而增强对损伤的辨别能力。

### 3.3 被动监测

在被动监测中,分布于结构中的传感器可用于被动信号的收集,如温度、应力及应变等状态变化<sup>[60]</sup>。压电聚合物类传感器由于具有较高的压电电压系数,通常作为接收单元,在大型工程结构中多用于动态应变测量和监测<sup>[61]</sup>,但压电类传感器不适用于静态感知。压阻传感器在静态或准静态载荷下也具备响应能力,因此在结构健康监测传感网络多任务布局中,压阻传感器既可以作为动态结构弹性波信号的接收端,也可以替代传统网络中的应变片和光纤的功能,监测结构受静载变形或低频振动模态的情况。Xu 等<sup>[62]</sup>将 CB/PVDF 柔性压阻传感器和传统金属应变片黏接于悬臂梁上,悬臂梁受动态载荷振动,响应结果表明,CB/PVDF 传感器在带宽及灵敏度的表现均优于金属应变片,因而利用柔性压阻传感器宽响应特点,能够监测多阶谐振频率变化,对附加质量等损伤形式进行诊断。

另一类典型的被动监测是针对异物撞击,如飞行器飞行过程中受到鸟类撞击。由于飞行速度快,和鸟类形成较大的相对速度,足以使得撞击部位变形甚至破坏。当结构受到外界冲击时,会在冲击位置产生应力波信号,并沿着材料的各个方向传播。在航空结构中,大量使用的板结构将引导信号沿着板的表面传播,形成导波,并被分布的传感器接收。多个传感器通过组网形成传感网络,结合导波在材料中的传播特征,从而实现逆向推导冲击位置和冲击能量,这种方法又称为声发射法。然而在实际复杂结构中,由于开孔、加强筋或复杂形状的存在,导致声源产生的声波无法沿直线从声源传播到传感器,从而对通过传统稀疏传感网络布局进行声源定位造成困难。Liu 等<sup>[63]</sup>基于 CB/PVDF 柔性压阻传感器在复合材料结构上制备被动传感网络。由于柔性薄膜类传感器体积及重量均大幅小于现有硬质传感器,因此可以大面积、高密度布置于结构上,形成致密传感网络。通过捕捉弹性波信号,对损伤进行识别和成像,从而实现复杂结构遭受撞击的精确

监测,如图 8 所示。

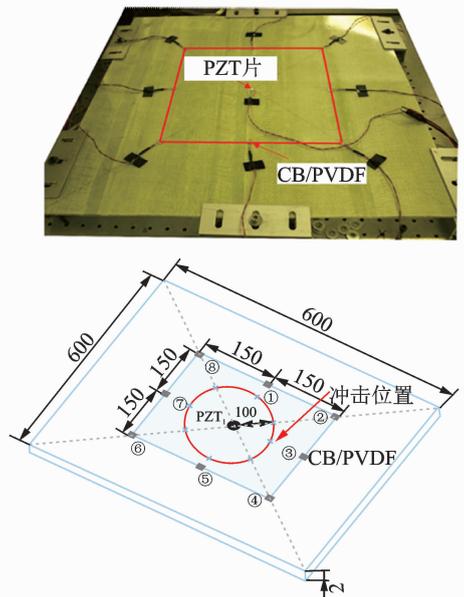


图 8 纳米传感网络在被动冲击定位中的应用(单位: mm)

Fig. 8 Application of nano-sensor network in passive impact localization(unit: mm)

## 4 结论

1) 在柔性传感器的电极制备方面,目前大部分采用真空镀膜、磁控溅射或光刻法等,这一类方法可以精确地在柔性薄膜传感器上制备所需的电极拓扑结构,但其成本较高,耗时长,并且只适应于小规模样品制备。此外,在传感器的电路方面,大部分依然采用黏接导线的方式。对于采用直写式打印技术制备的柔性传感器,如何最大限度地实现传感器的便捷、快速及原位制备,设计合适的电路和电极制备工艺,将传感网络一体化成型于结构上,是今后柔性传感技术在传感网络实际应用中需要重点考虑的问题。

2) 在柔性传感网络设计方面,由于不同类型的柔性传感器各有其优点和不足,在针对具体结构或损伤问题时,如何根据结构不同位置的具体情况(如载荷类型、温度范围及需要监测数据种类等),结合不同类型传感器的特点,提出相应的监测方法,制定出足够全面、高效和完备的传感网络方案,是推进柔性健康监测技术在具体工程结构应用中不可或缺的条件。

3) 在超声健康监测方法方面,金属疲劳裂纹以及复合材料分层缺陷早期表现为极其微小的损伤,对其进行精确诊断必须依赖超声信号的非线性特性,基于捕捉信号的非线性特征,如二阶谐波、混合频率响应及共振频率偏移等对微小损伤进行识别。

而现有的非线性超声技术局限于定性表征, 仅能推断损伤是否存在, 并且易受测试系统非线性和人为因素的影响。如何通过柔性传感器电极拓扑结构的设计与超声信号分析算法的优化, 提高非线性特征捕捉的灵敏度和稳定性, 使之能够实现损伤位置和损伤程度的定量评估, 是未来基于超声波的柔性传感结构健康监测技术的重要发展方向之一。

4) 柔性超声传感技术的发展能够有力推动结构健康监测技术在实际工程结构中的应用, 解决现有传感网络技术自身局限性带来的诸多问题。除了在传统的工程结构中进行健康监测应用外, 柔性传感技术在生物传感、人体监测和人机交互中也将发挥重要作用, 推动物联网产业以及健康大数据的高速发展。

注 本工作由郭师峰与李叶海共同完成。

### 参 考 文 献

- [1] PARK S, YUN C B, INMAN D J. Structural health monitoring using electro-mechanical impedance sensors [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(8): 714-724.
- [2] YU L, SANTONI-BOTTAI G, XU B, et al. Piezoelectric wafer active sensors for in situ ultrasonic-guided wave SHM [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(8): 611-628.
- [3] MOHEIMANI S R, FLEMING A J. Piezoelectric transducers for vibration control and damping [M]. Berlin, Germany: Springer, 2006: 37-72.
- [4] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003 - 2006) [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(3): 1-21.
- [5] PRAMANIK R, SAHUKAR M K, MOHAN Y, et al. Effect of grain size on piezoelectric, ferroelectric and dielectric properties of PMN-PT ceramics [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5731-5742.
- [6] KOBAYASHI M, JEN C K. Piezoelectric thick bismuth titanate/lead zirconate titanate composite film transducers for smart NDE of metals [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(4): 951-956.
- [7] GALASSI C, RONCARI E, CAPIANI C, et al. PZT-based suspensions for tape casting [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, 17(2): 367-371.
- [8] OHNO T, KUNIEDA M, SUZUKI H, et al. Low-temperature processing of  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}, \text{Ti}_{0.43})\text{O}_3$  thin films by sol-gel casting [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(9B): 5429-5433.
- [9] LUKACS M, SAYER M, FOSTER S. Single element high frequency ( $<50$  MHz) PZT sol gel composite ultrasound transducers [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, 47(1): 148-159.
- [10] GENTRY K L, ZARA J M, SANG-DON B, et al. Thick film sol gel PZT transducer using dip coating [C]//2000 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings An International Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 977-980.
- [11] RATHOD V T, JEYASEELAN A A, DUTTA S, et al. Ultrasonic guided wave sensing characteristics of large area thin piezo coating [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(10): 105009.
- [12] ADACHI H, KURODA Y, IMAHASHI T, et al. preparation of piezoelectric thick films using a jet printing system [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36(3A): 1159-1163.
- [13] YANG C. Distributed piezoelectric transducers and their applications in structural health monitoring [D]. Siegen, Germany: Universität Siegen, 2017.
- [14] ZHAO X, EVANS J R G, EDIRISINGHE M J, et al. Direct ink-jet printing of vertical walls [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, 85(8): 2113-2115.
- [15] BARROW D A, PETROFF T E, TANDON R P, et al. Characterization of thick lead zirconate titanate films fabricated using a new sol gel based process [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(2): 876-881.
- [16] LIU Z, XING Z, WANG H, et al. Fabrication and post heat treatment of  $0.5\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.5\text{Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$  coatings by supersonic plasma spray [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(11): 3511-3519.
- [17] SHIMOMURA K, TSURUMI T, OHBA Y, et al. Preparation of lead zirconate titanate thin film by hydrothermal method [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, 30(9B): 2174-2177.
- [18] ISHIKAWA M, KUROSAWA M K, ENDOH A, et al. Lead zirconate titanate thick-film ultrasonic transducer for 1 to 20 MHz frequency bands fabricated by hydrothermal polycrystal growth [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(6B): 4342-4346.
- [19] 刘文凤, 周超, 高景辉, 等. 无铅压电陶瓷的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2016, 35(6): 423-428.  
LIU Wenfeng, ZHOU Chao, GAO Jinghui, et al. Progress in lead-free piezoelectric ceramics [J]. *Materials China*, 2016, 35(6): 423-428. (in Chinese)
- [20] HUAN Y, WANG X, FANG J, et al. Grain size effects on piezoelectric properties and domain structure of  $\text{BaTiO}_3$  ceramics prepared by two-step sintering [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96

- (11); 3369-3371.
- [21] ZHANG S T, YANG B, CAO W. The temperature-dependent electrical properties of  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3\text{-Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$  near the morphotropic phase boundary[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(2): 469-475.
- [22] WANG X, WU J, XIAO D, et al. Giant piezoelectricity in potassium-sodium niobate lead-free ceramics[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(7): 2905-2910.
- [23] CHEN S, TAN C K I, YAO K. Potassium - sodium niobate-based lead-free piezoelectric ceramic coatings by thermal spray process[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(10): 3293-3299.
- [24] CHEN S, TAN C K I, TAN S Y, et al. Potassium sodium niobate (KNN)-based lead-free piezoelectric ceramic coatings on steel structure by thermal spray method[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(12): 5524-5533.
- [25] 卿新林, 王奕首, 赵琳. 结构健康监测技术及其在航空航天领域中的应用[J]. *实验力学*, 2012, 27(5): 517-526.  
QING Xinlin, WANG Yishou, ZHAO Lin. Structural health monitoring technology and its application in aeronautics and astronautics [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(5): 517-526. (in Chinese)
- [26] AHN Y, LIM J Y, HONG S M, et al. Enhanced piezoelectric properties of electrospun poly (vinylidene fluoride) / multiwalled carbon nanotube composites due to high  $\beta$ -phase formation in poly (vinylidene fluoride) [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(22): 11791-11799.
- [27] BAE J H, CHANG S H. Characterization of an electroactive polymer (PVDF-TrFE) film-type sensor for health monitoring of composite structures[J]. *Composite Structures*, 2015, 131:1090-1098.
- [28] GUO S, CHEN S, ZHANG L, et al. Plastic strain determination with nonlinear ultrasonic waves using in situ integrated piezoelectric ultrasonic transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control*, 2017, 65(1): 95-101.
- [29] FIRMINO M S, COSTA C M, SENCADAS V, et al. Effect of the ceramic grain size and concentration on the dynamical mechanical and dielectric behavior of poly (vinilidene fluoride) /  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  composites[J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(4): 899-908.
- [30] ANJANA J, PRASHANTH K J, SHARMA A K, et al. Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: a review[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2015, 55(7): 1589-1616.
- [31] LI J, ZHAO C, XIA K, et al. Enhanced piezoelectric output of the PVDF-TrFE/ZnO flexible piezoelectric nanogenerator by surface modification [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 463:626-634.
- [32] HAN J, LI D, ZHAO C, et al. Highly sensitive impact sensor based on PVDF-TrFE/Nano-ZnO composite thin film[J]. *Sensors*, 2019, 19(4): 830.
- [33] WU L, JING M, LIU Y, et al. Power generation by PVDF-TrFE/graphene nanocomposite films[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 703-709.
- [34] HUANG L, LU C, WANG F, et al. Piezoelectric property of PVDF/graphene composite films using 1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorooctyltriethoxysilane as a modifying agent [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 688:885-892.
- [35] WILLIAMS R B, PARK G, INMAN D J, et al. An overview of composite actuators with piezoceramic fibers[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4753: 421-427.
- [36] GENTILMAN R, MCNEAL K, SCHMIDT G, et al. Enhanced-performance active fiber composites [C] // *Smart Structures and Materials 2003: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. Bellingham, WA, USA: International Society for Optics and Photonics, 2003: 350-359.
- [37] HIGH J, WILKIE W. Method of fabricating NASA-standard macro-fiber composite piezoelectric actuators [R]. Hampton, VA, USA: NASA Langley Research Center, 2003.
- [38] COLLET M, RUZZENE M, CUNEFARE K A. Generation of Lamb waves through surface mounted macro-fiber composite transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025020.
- [39] MAŃKA M, ROSIEK M, MARTOWICZ A, et al. Lamb wave transducers made of piezoelectric macro-fiber composite[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(8): 1138-1158.
- [40] HU N, KARUBE Y, YAN C, et al. Tunneling effect in a polymer/carbon nanotube nanocomposite strain sensor[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(13):2929-2936.
- [41] LI C, THOSTENSON E T, CHOU T W. Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites; a review [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(6): 1227-1249.
- [42] HU N, KARUBE Y, ARAI M, et al. Investigation on sensitivity of a polymer/carbon nanotube composite strain sensor[J]. *Carbon*, 2010, 48(3): 680-687.
- [43] MA P C, SIDDIQUI N A, MAROM G, et al. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites; a review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(10): 1345-1367.

- [44] ZENG Z, LIU M, XU H, et al. Ultra-broadband frequency responsive sensor based on lightweight and flexible carbon nanostructured polymeric nanocomposites[J]. *Carbon*, 2017, 121:490-501.
- [45] ZHOU P, LIAO Y, LI Y, et al. An inkjet-printed, flexible, ultra-broadband nanocomposite film sensor for in-situ acquisition of high-frequency dynamic strains[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125: 105554.
- [46] DUAN F, LIAO Y, ZENG Z, et al. Graphene-based nanocomposite strain sensor response to ultrasonic guided waves[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 174:42-49.
- [47] LIAO Y, DUAN F, ZHANG H, et al. Ultrafast response of spray-on nanocomposite piezoresistive sensors to broadband ultrasound[J]. *Carbon*, 2019, 143: 743-751.
- [48] LI Y, WANG K, SU Z. Dispersed sensing networks in nano-engineered polymer composites: from static strain measurement to ultrasonic wave acquisition[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1398.
- [49] LI Y, LIAO Y, SU Z. Graphene-functionalized polymer composites for self-sensing of ultrasonic waves: an initiative towards "sensor-free" structural health monitoring[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 168:203-213.
- [50] GU H, ZHAO Y, WANG M L. A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2005, 12 (3/4): 329-343.
- [51] LIN B, GIURGIUTIU V. Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(4): 1085-1093.
- [52] KODURU J P, ROSE J L. Transducer arrays for omnidirectional guided wave mode control in plate like structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 22(1): 015010.
- [53] SHEN Z, CHEN S, ZHANG L, et al. Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for non-destructive testing of metal plates [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3354-3361.
- [54] RATHOD V T, MAHAPATRA D R. Ultrasonic guided wave sensing properties of PVDF thin film with inter digital electrodes[C]// *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2014*. Bellingham, WA, USA: International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [55] 吴连法. 声表面波叉指换能器(二)[J]. *压电与声光*, 1984(1): 65-79.
- WU Lianfa. Surface acoustic wave inter-digital transducer (two)[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1984 (1): 65-79. (in Chinese)
- [56] GUO S, CHEN S, ZHANG L, et al. Design and fabrication of direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for determining yielding of aluminum alloy[J]. *NDT & E International*, 2018, 98: 186-194.
- [57] CAO W, ZHOU P, LIAO Y, et al. A spray-on, nanocomposite-based sensor network for in-situ active structural health monitoring [J]. *Sensors*, 2019, 19 (9): 2077.
- [58] ANDREADES C, MAHMOODI P, CIAMPA F. Characterisation of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for nonlinear ultrasonic applications[J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 456-466.
- [59] RATHOD V T, RAIU G, UDPA L, et al. Embedded thin film sensors based multi-mode guided wave filter [C]// *2018 IEEE Sensors*. [S.l.]: IEEE, 2018:1-4.
- [60] KHAN A, ABAS Z, SOO K H, et al. Piezoelectric thin films: an integrated review of transducers and energy harvesting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(5): 053002.
- [61] MA C C, HUANG Y H, PAN S Y. Investigation of the transient behavior of a cantilever beam using PVDF sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(2): 2088-2117.
- [62] XU H, ZENG Z, WU Z, et al. Broadband dynamic responses of flexible carbon black/poly (vinylidene fluoride) nanocomposites: a sensitivity study[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 149:246-253.
- [63] LIU M, ZENG Z, XU H, et al. Applications of a nanocomposite-inspired in-situ broadband ultrasonic sensor to acousto-ultrasonics-based passive and active structural health monitoring [J]. *Ultrasonics*, 2017, 78:166-174.



**第一作者简介:**郭师峰,男,1983年4月生,博士、研究员、博士生导师。深圳市智慧传感与系统检测重点实验室主任。主要研究方向为柔性传感器及传感器网络技术、机器人/智能无损检测与健康监测、智能材料与系统、激光超声、扫描探针显微术等。先后主持/参与国家(中国及新加坡)及省部级科研项目10余项。在《*Nature Nanotechnology*》,《*IEEE Transactions on UFFC*》,《*ACS Applied Materials and Interfaces*》,《*Smart Materials and Structures*》,《*NDT & E International*》等SCI收录期刊上发表论文50余篇,申请及授权美国专利、新加坡及中国专利25项,其中PCT专利4项。  
E-mail: sf.guo@siat.ac.cn

