

微纳耦合光纤模态声发射传感特性优化研究*

刘懿莹, 王霖洁, 付文成, 李凤梅, 冀敏慧

(西安交通大学电气学院 西安 710049)

摘要:为了改善微纳耦合光纤传感器声发射模态识别的能力,立足于模态声发射理论,实验研究了微纳耦合光纤有效传感区结构、长度以及对称性对传感器模态识别能力的影响,分析了优化后传感器模态识别能力的定向性。实验结果表明,当有效传感区结构为包括分离区、锥区和腰区的“X”型结构时,传感器不能识别 S_0 模态,且识别的 A_0 模态完整性差;当有效传感区结构为包括腰区和全部锥区的“---”型结构时,传感器能够识别出 S_0 模态,并完整地识别 A_0 模态;当有效传感区对称时,所测信号模态完整性好;而当有效传感区不对称时,所测信号完整性较差;“X”型结构时,分离区会衰减声波的部分能量,传感器灵敏度随着有效传感区长度的减小而增大;“---”型结构时,由于锥区起到应变放大作用,传感器灵敏度会随着锥区长度的减小而降低;传感器的模态识别能力随着检测角度的减小而减弱,其有效检测角度范围为 $45^\circ \sim 135^\circ$ 。该研究对本传感器应用于模态声发射具有指导意义。

关键词:微纳耦合光纤;模态声发射;模态识别;传感性能优化

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2040

Study on sensing characteristic optimization of micro/nono coupling fiber based on modal acoustic emission

Liu Yiying, Wang Linjie, Fu Wencheng, Li Fengmei, Ji Minhui

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the ability of acoustic emission modal recognition of Micro/nono Coupling Fiber Sensor (MCFS), based on the theory of modal acoustic emission, the influences of the effective sensing area structure, length and symmetry of micro/nono coupling fiber on the modal identification ability of the sensor has been studied in experiment, and the orientation properties of the optimized sensor have been analyzed. Experiment results show that: When the effective sensing area structure is “X” type, including separation zone, exact taper zone and waist zone, the sensor can't identify the S_0 modal and the integrity of the identified A_0 modal is poor; when the effective sensing area structure is “---” type, including waist zone and all the exact taper zones, the sensor can identify the A_0 modal and identify S_0 modal completely. When the effective sensing area is symmetric, the integrity of the measured signal is good; when the effective sensing area is asymmetric, the integrity of the measured signal is poor. For the “X” type structure, in the separation zone partial sound wave energy is attenuated, the sensitivity of the sensor increases as the length of the effective sensing area decreases; however, for the “---” type structure, the sensitivity of the sensor decreases as the length of the exact taper zone decreases due to the strain magnification effect of the exact taper. The modal identification ability of the sensor decreases as the detecting angle decreases, the effective detecting angle range is from 45° to 135° . This study has great significance to the application of this sensor in modal acoustic emission.

Keywords: micro/nono coupling fiber; modal acoustic emission; modal identification; sensing characteristic optimization

0 引言

声发射技术因其具有诸多优异性能,在电力设备诊断、航空航天、土木工程、石油化工等领域具有广泛的应用^[1-2]。传统的声发射技术分析声发射信号的时域波形参数(振铃计数、幅值能量及持续时间等),从而根据特定算法对声发射源进行识别^[3-4]。模态声发射技术在传统声发射技术的基础上,充分考虑了声发射波在介质中的传播特性,能够从信号中提取更多有用信息,从而提高源识别准确度同时减少传感器数量的使用^[5-8],成为近年来的研究热点。

模态声发射技术应用关键在于传感器的模态识别能力。现有文献中,常使用成熟的压电换能器作为传感器^[9-10],此类传感器具有较高的模态识别能力,但易受电磁干扰,不能在高温高压等恶劣环境下工作。相比之下,光纤传感器具有良好的抗电磁干扰能力,且质量轻、体积小^[11-12]。在已有的研究中主要使用光纤光栅传感器和干涉传感器进行声发射检测,但上述两类传感器均需要复杂的解调系统,且传感器的制作成本高。微纳耦合光纤传感器(micro/nono coupling fiber sensor, MCFS)采用光强调制,解调系统简单且制作成本低,同时在声发射检测中表现优异,有很好的实际应用前景。国内外研究者已针对该传感器展开了一些相关研究,Chen R 等人^[13]首次将微纳耦合型光纤器件应用于超声波传感技术,成功检测到了铅芯断裂模拟的超声波信号并利用时差法实现了一维声发射源的定位。随后,国内学者针对耦合型光纤声发射传感技术也展开了相应的研究,山东科学院祁海峰等人^[14]和山东大学的蒋奇等人^[15]研究了传感器对标准声发射源的时频域响应特性,哈尔滨工业大学的 Fu T 等人^[16]基于时差法,将该传感器应用于复合材料的声发射源定位。尽管微纳耦合光纤测量声发射信号取得了一定的进展,但在目前为止,微纳耦合光纤在模态声发射的应用方面,国内外还鲜有报道,在传感器模态识别能力的研究及优化方面还难以提供参考依据。因此,研究微纳耦合光纤的模态识别能力对传感器在模态声发射技术应用上具有十分重要的意义。

本文围绕微纳耦合光纤的模态识别能力展开研究。首先,基于模态声发射理论分析平板中主要存在的 S_0 模态和 A_0 模态的频散特性,利用 Gabor 变换对比分析未优化微纳耦合光纤和压电换能器的模态识别能力;其次,通过改变封装研究了有效传感区长度对传感器灵敏度和识别模态完整性的影响规律,研究了有效传感区的对称性对传感器识别模态完整性的影响规律;最后,研究了最优封装下微纳耦合光纤模态识别能力的定向性。

1 微纳耦合光纤传感器声发射信号的模态分析

1.1 微纳耦合光纤传感原理

图1所示为微纳耦合光纤的示意图。可以看到其结构可分为分离区、锥区和腰区3部分,且具有对称结构。

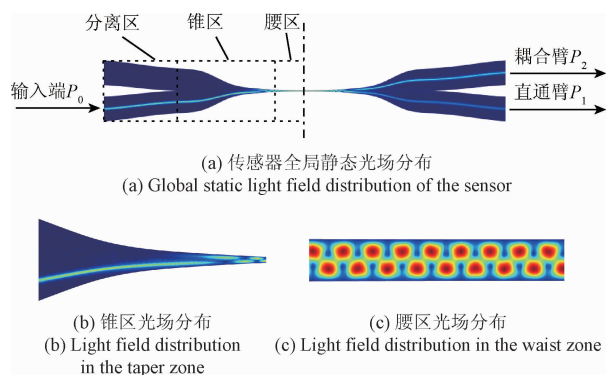


图1 微纳耦合光纤示意图

Fig. 1 Illustration of the micro/nono coupling fiber

若在直通臂的输入端通光,那么根据耦合理论,光会在传感器锥区开始耦合至耦合臂,此时为弱耦合;到腰区形成强耦合,光在两臂之间相互交替,最后以一定的分光比输出。若输入功率为 P_0 ,则最后两端输出功率为^[17]:

$$\begin{cases} P_1 = \sin^2\left(\int_{-l/2}^{l/2} C(x) dx\right) \\ P_2 = P_0 - P_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C(x)$ 为沿着 x 轴方向分布的耦合系数, l 为锥区和腰区的总长, P_1 、 P_2 分别为直通臂和耦合臂的输出功率,两输出功率之间的关系为此消彼长,变化量相同。

当传感器受到声波作用时,声波从两个端口耦合进来沿着两臂传播,在传感器的 x 轴方向上产生应变,这将导致耦合系数 $C(x)$ 的改变,最终引起两端输出光功率的变化。考虑弹光效应和应力场的作用,直通臂的输出光功率的变化量 ΔP_1 示为^[18]:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = & \Delta l \cdot \sin(2Cl) \cdot \{C + \\ & (3\pi\lambda V^2 n [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] / 64k^2 r_w^2 (1 + V)^2 - \\ & 3\pi^3 n^3 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] / 8k^2 \lambda (1 + V)^3) \} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: V 为归一化频率, r_w 为腰区的半径, n 为微纳耦合光纤纤芯折射率, λ 为光波波长, k 为传感器截面的横纵比, p_{ij} 和 ν 分别为弹光张量和泊松比, Δl 为传感器 x 轴向的形变量。式(2)中,除了 Δl ,其他参数均由材料本身决定。因此,声发射信号可通过检测传感器的光输出变化获得。

1.2 声发射信号的模态分析

根据模态声发射理论,声发射波在薄板中主要以 Lamb 波的形式传播,Lamb 波是一种在厚度与激励声波波长为相同数量级的薄板波导中由于薄板上下边界多次反射致使纵波和横波多次耦合而形成的特殊形式的应力波。

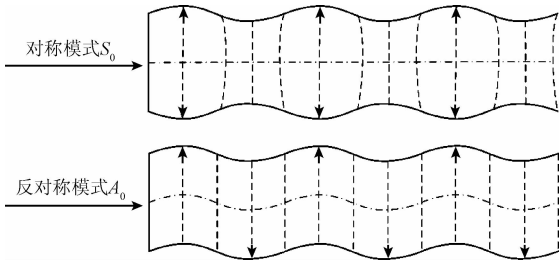


图 2 固体中 S_0 和 A_0 模态传播特性示意图

Fig. 2 Propagation illustration of S_0 and A_0 modals in solid

如图 2 所示,Lamb 波主要包括对称模态 (S_0, S_1, S_2, \dots) 和反对称模态 (A_0, A_1, A_2, \dots) 两种传播模态^[6]。通常情况下, A_0 与 S_0 模态的能量最大,也最为常见,其高阶模态如 A_1, S_1 等的能量相对很小,且难以激发,故 Lamb 波的研究最主要集中于 A_0 和 S_0 两个最基本的模态。

对于不同的传播介质, S_0 和 A_0 模态的传播速度不同,其值可通过求解 Rayleigh-Lamb 方程而确定^[19]。本文选用具有高抗疲劳强度的各向同性防锈铝板 5052,其各项参数如表 1 所示,代入 Rayleigh-Lamb 方程可求解得到平板中 A_0 与 S_0 模态的传播特性。

表 1 5052 铝板材料性能参数

Table 1 Material property parameters of 5052 aluminum plate

材料	横波速 $c_s /$ ($m \cdot s^{-1}$)	纵波速 $c_l /$ ($m \cdot s^{-1}$)	密度 $\rho /$ ($kg \cdot m^{-3}$)	厚度 h / mm
5052 铝板	3 287	6 444	2 713	2

如图 3 所示,频率在 0 ~ 300 kHz 时, A_0 模态的群速度随着频率增加明显增大,而 S_0 模态的群速度几乎不变,且 S_0 模态的群速度大于 A_0 模态的群速度。对于从材料外部激发的声发射信号,能量主要集中在 A_0 模态。本文中研究频段主要集中在 0 ~ 300 kHz,因此可根据 A_0 模态频散特性明显的特点对其进行识别,再根据 A_0 模态和 S_0 模态去群速度相差大,能量相差大的特点去识别 S_0 模态。

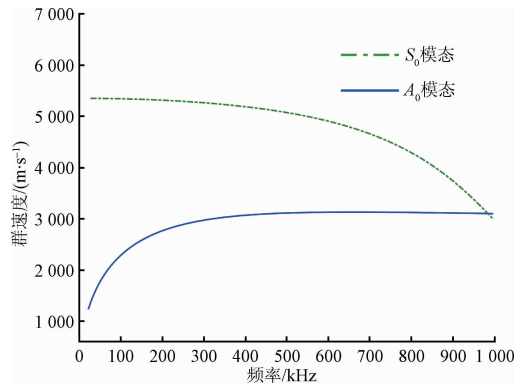
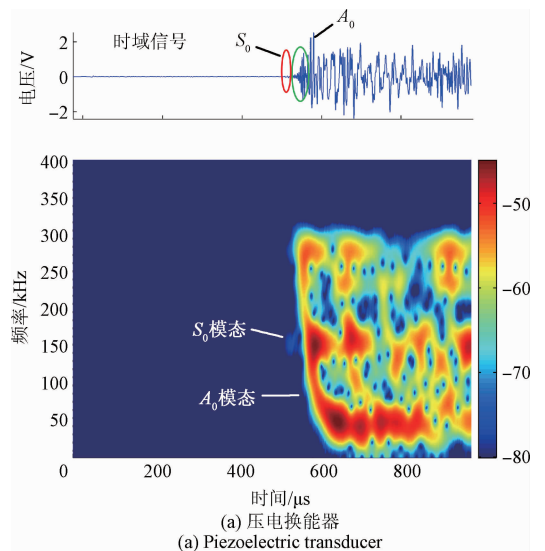


图 3 实验铝板上 S_0 和 A_0 模态传播速度曲线

Fig. 3 Velocity curve of S_0 and A_0 modal propagation on the experiment aluminum plate

为了更为直观地识别 A_0 模态和 S_0 模态,采用 Gabor 变换对所测声发射信号进行时频分析。图 4 (a) 所示为采用压电换能器 (R15a) 测到典型声发射信号及其 Gabor 变换。其中时频分布图横坐标为时间,纵坐标为频率,颜色图例为对 Gabor 系数取对数,数值表征能量大小,显示阈值设为最大能量的 0.05%,从图 4 (a) 的时域信号中可读出信号的峰峰值约 5 V。从时域信号中可以看出,在大约 $t = 500 \mu s$ 时出现且幅值较小;约在 $t = 520 \mu s$,为 A_0 分量的起始时刻。同时,由该信号的 Gabor 分布图可见,在 $t = 500 \mu s$ 时,最先出现频率分量约为 300 kHz,之后,频率越小的分量到达时间越慢,表现出明显的群速度变化特征,根据模态声发射理论,此模态应为 A_0 模态。此外,在 $t = 500 \mu s$ 时在 150 kHz 附近有微弱的分量到达,且分量到达时间无明显变化。根据此分量能量小、传播速度快、无明显群速度变化的特征可判断此分量为 S_0 模态。由此可得,与时域分析相对比,Gabor 变化可以有效地识别出 S_0 和 A_0 的频域信号。



(a) 压电换能器
(a) Piezoelectric transducer

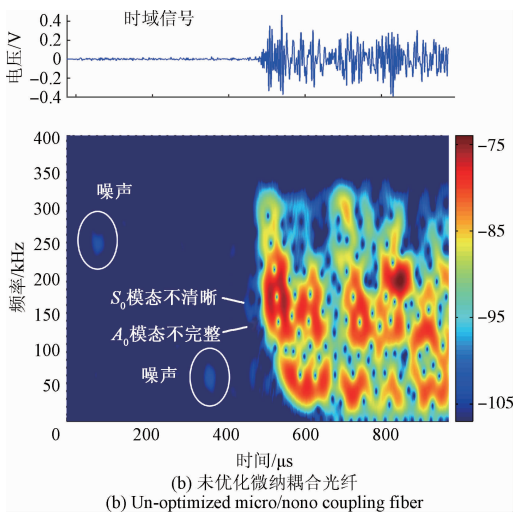
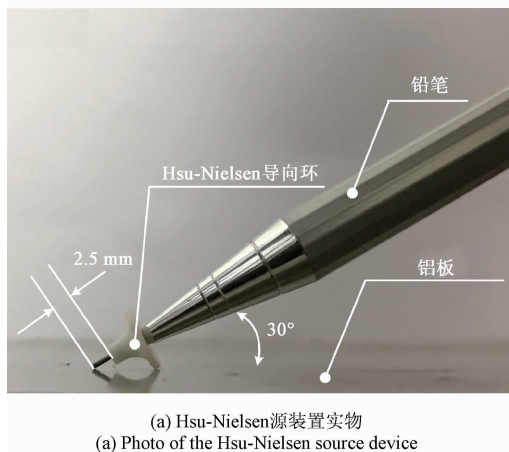


图4 两种传感器所测声发射信号的 Gabor 变换
Fig.4 Gabor transform of the measured acoustic emission signals for piezoelectric transducer and micro/nono coupling fiber

为了对比,在测试时同时安装了未优化的微纳耦合光纤对同一声发射源进行测试,微纳耦合光纤与压电换能器距声发射源的距离相同,均为 30 cm。测试结果如图 4(b)所示,微纳耦合光纤所测信号时域图中读出信号峰峰值为 0.5 V。观察其 Gabor 分布图,信号频散特征与 A_0 模态一致,即高频信号到达快,低频信号到达慢;然而,在 100、160、230 kHz 等多处频率分量有缺失,即信



(a) Photo of the Hsu-Nielsen source device

号的 A_0 模态完整性较差,且只能模糊地识别 S_0 模态。这表明,微纳耦合光纤虽然成功地测量到声发射信号,但其 A_0 模态前段部分的频率分量缺失,同时 S_0 模态的识别能力较弱,这样会影响模态到达时间的准确判断,从而影响微纳耦合光纤应用于模态声发射法的有效性。因此,需要对微纳耦合光纤模态识别能力进行优化。

2 微纳耦合光纤模态识别能力的优化

2.1 声发射源的一致性

在实验中,声发射源均通过铅笔芯断裂法进行模拟。然而,不同角度不同断裂长度产生的声发射信号不一致,由于对微纳耦合光纤进行优化需要对比不同参数下传感器对同一个信号的响应结果,因此需要保证声源的一致性。

如图 5(a)所示,使用 Hsu-Nielsen 导向环套在铅笔笔尖处,将铅芯伸出导向环口 2.5 mm,这样导向环可使铅笔与铝板之间稳定保持 30° 夹角,保证了断铅法模拟声发射源的一致性。图 3(b)所示为使用微纳耦合光纤重复测量距离其 30 cm 处的 Hsu-Nielsen 源的测试结果,为了区分开来,分别将第 1 次和第 3 次测试结果向上、下平移了 0.5 V。可以看到,3 次的测试波形与能量基本一致,因此可以认为 Hsu-Nielsen 源具有很好的重复性,为后面传感器的优化奠定基础。

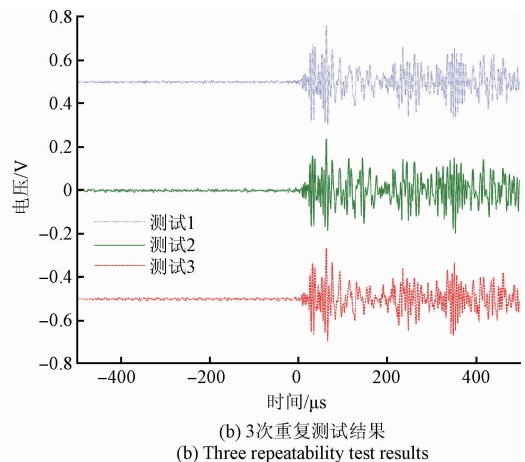


图5 Hsu-Nielsen 源及重复性测量结果

Fig.5 Hsu-Nielsen source and its repeatability test results

2.2 有效传感区对传感器模态识别能力影响

图 6 所示为微纳耦合光纤得典型封装示意图。使用封装胶将微纳耦合光纤的两端固定于 V 型槽 (1.5 mm × 1.7 mm × 44.0 mm) 内,封装好的传感器再通过声波耦合剂黏贴于测试件上,本文中使用的封装

胶与声波耦合剂均为 UV 胶。可以看到,封装胶长度 l 固定之后,其剩余悬空部分即为传感器的有效传感区,这表明通过控制封装胶长度 l_1 和 l_2 ,即可控制传感器有效传感区。对于实验室制备的微纳耦合光纤,初始的封装胶长度 $l_1 = l_2 = 6$ mm。

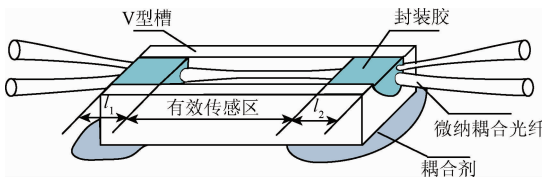


图 6 微纳耦合光纤封装示意图

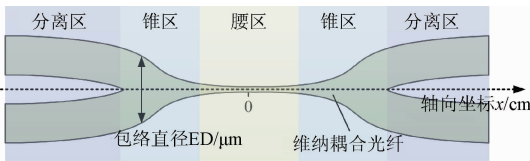
Fig. 6 Packaging illustration of the micro/nono coupling fiber

为了研究不同有效传感区对传感器响应特性的影响,将传感器固定于实验 5052 铝板上,采用重复性高的 Hsu-Nielsen 源模拟声发射源,声源与传感器距离保持为 30 cm,并垂直于传感器轴向(90°)。将传感器两端的封装胶长度以 1 mm 为步长分别逐步增加,对每一个封装胶长度下的传感器进行一次测试,从以下 3 个方面对测试结果进行分析。

2.2.1 有效传感区结构对识别模态完整性的影响

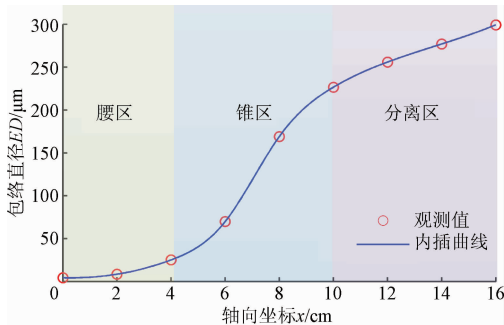
图 7(a) 所示为微纳耦合光纤的观测示意图,使用光学显微镜沿着轴向坐标方向,以传感器中心为原点,每 2 mm 为步长对传感器包络直径进行观测,观测结果如图 7(b) 所示。

图 7(b) 中,圆圈表示实际观测值,实线表示对观测值的 3 次样条插值曲线。可以看到,分离区和腰区的包络直径变化较慢,锥区的包络直径变化较快。下面研究不同有效传感区长度下传感器的响应特性,通过控制图 6 中的封装胶长度 l_1 、 l_2 ,间接控制传感器的有效传感区。



(a) 微纳耦合光纤观测示意图

(a) Observation illustration of the micro/nono coupling fiber



(b) 微纳耦合光纤包络直径观测结果

(b) Envelope diameter observation result of the micro/nono coupling fiber

图 7 微纳耦合光纤结构观测结果

Fig. 7 Structure observation result of the micro/nono coupling fiber

根据微纳耦合光纤传感器结构特征,选取 4 个典型有效传感区状态进行研究 a-两臂分离、b-两臂接近、c-两臂相融、d-两臂过融合(锥区)。对传感器两端进行对称封装,使 $l_1 = l_2 = l$ 。图 8 所示为微纳耦合光纤在不同封装胶长度 l 下有效传感区的结构示意图,图中 a、b、c、d 4 点分别对应图 7(b) 中的 $x = 14$ mm、 $x = 12$ mm、 $x = 10$ mm、 $x = 8$ mm 四点。如图 8 所示,当封装胶长度为 l_a 和 l_b ,此时传感器有效传感区可视为“X”结构,而当封装胶长度为 l_c 和 l_d ,传感器有效传感区可视为“---”结构。

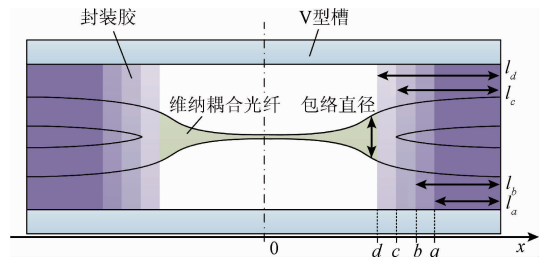


图 8 不同封装长度下的微纳耦合光纤

Fig. 8 The micro/nono coupling fiber with different package length

图 9 所示为 4 种典型有效传感区结构的微纳耦合光纤所测信号的 Gabor 分布。如图 9(a) 所示,当封装胶长度为 l_a 时,传感器两臂距离较远,呈“X”结构,此时测到的信号能够勉强识别出 A_0 模态,但频率分量在多处均有缺失;当封装胶长度为 l_b 时,传感器两臂距离较近,如图 9(b) 所示所测信号的 A_0 模态在 100 ~ 250 kHz 处较为完整,但在 100 kHz 以下部分仍有缺失,除此之外,在 $t = 380 \mu s$ 时刻,在 250 kHz 附近识别到先于 A_0 模态到达的分量,且该分量群速度变化不明显,相对于 A_0 模态能量很小,符合 S_0 模态特征,因此可以认为成功识别到 S_0 模态;当封装胶长度为 l_c 时,传感器结构由“X”转变为“---”,如图 9(c) 所示,从所测信号 Gabor 分布可以看出传感器几乎完整地识别出 A_0 模态,同时,传感器也成功识别出 $t = 400 \mu s$ 左右出现的 S_0 模态,因此可以推测有效传感区为“---”结构的传感器模态识别能力优于有效传感区为“X”型结构的传感器;图 9(d) 证明了该推测,可以看出,封装胶长度延伸至 l_d 时,传感器仍能完整地识别出 A_0 模态,但相对于图 9(c) 中的信号,其识别的 S_0 模态分量较少。

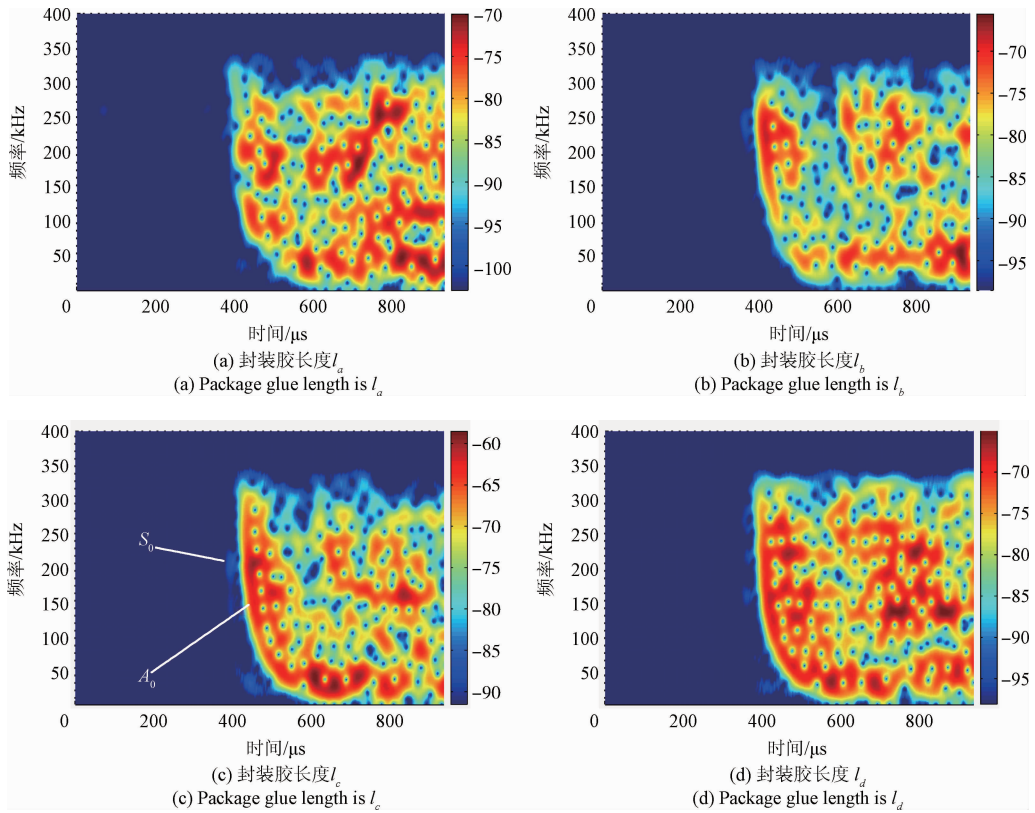


图9 不同封装长度下传感器所测信号的 Gabor 变换

Fig. 9 The Gabor transform of the measured AE signals for the sensors under different package length

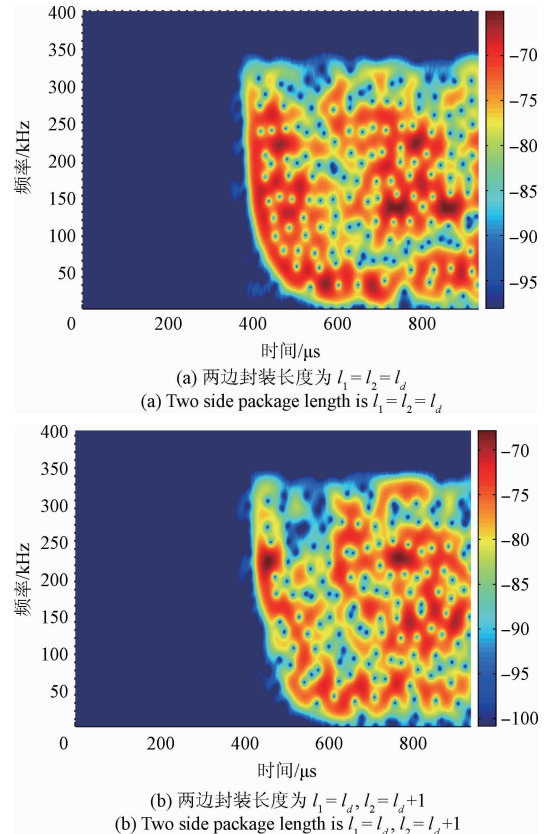
2.2.2 有效传感区对称性对识别模态完整性的影响

当封装胶长度 $l_1 = l_2 = l_d$ 时,此时传感器有效传感区为对称结构,传感器具有很好的模态识别能力。为了研究有效传感区对称性对传感器模态识别能力的影响,先使其中一端的封装胶长度 l_1 延伸 1 mm,为 $l_d + 1$,另一端封装胶长度保持不变,为 l_d ,对此状态下的传感器进行测试;然后再将另一端封装胶长度延伸 1 mm,使传感器两边重新保持对称,即 $l_1 = l_2 = l_d + 1$,对此状态下的传感器进行测试。对比这 3 种状态下传感器的模态识别能力。

测试结果如图 10 所示,图 10 (a) 所示为两端对称封装 l_d 时传感器所测信号 Gabor 分布,图中能够完整地识别出 A_0 模态;但当封装胶长度不对称时,如图 10 (b) 所示,识别出的 A_0 模态除了 200 kHz 分量左右比较完整之外,信号频率成分有较多的缺失;而当两端封装胶重新对称之后,如图 10 (c) 所示,传感器又恢复了其模态识别的能力。由此对比可以看出,有效传感区对称的微纳耦合光纤相对于不对称时其模态识别能力更好。

2.2.3 有效传感区长度对传感器灵敏度的影响

实验发现,有效传感区长度不仅影响传感器识别模态的完整性,同时也对其灵敏度有一定影响。为了研究有效



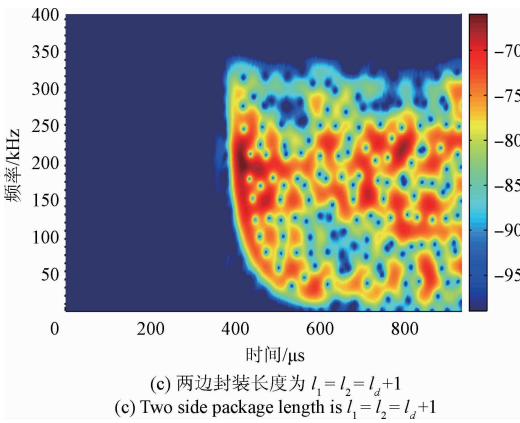


图 10 有效传感区对称性对识别模态完整性的影响
Fig. 10 Influence of the effective sensing area symmetry on the integrity of the identified modal

传感区长度对传感器灵敏度具体的影响规律,将传感器两端封装胶以 1 mm 为步长逐渐增加,对每种对称封装胶长度下的传感器,利用 Hsu-Nielsen 源对其重复测试 5 次,记录每一次信号的均方根值(mV),以代表该信号的灵敏度。对任一长度为 n 的信号 x 的均方根值计算如下:

$$V_{\text{均方根}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (3)$$

根据式(3)计算得到不同有效传感区长度下微纳耦合光纤传感器的所测信号均方根值,最后根据 $20 \times \log_{10}(V_{\text{均方根}}/V_{\text{噪声}})$ 计算得到传感器的信噪比(dB),由于对称封装,因此只需绘制有效传感区半长与所测信号 $V_{\text{均方根}}$ 的关系。本文中的噪声均方根值测得为 $V_{\text{噪声}} = 0.1559 \text{ V}$ 。

图 11 所示为不同对称封装下有效传感区半长与传感器灵敏度的关系,图中圆点表示 5 次测量信号均方根值的平均值。从平均值来看,在有效传感区半长由 13 mm 缩减至 10 mm 的过程中,传感器信号信噪比逐渐增加,表示传感器灵敏度随有效传感区的减小反而增大;当有效传感区半长达到 10 mm 时,传感器灵敏度达到最高,为 46 dB;超过 10 mm 之后,传感器灵敏度随着有效传感区长度的减小而降低。

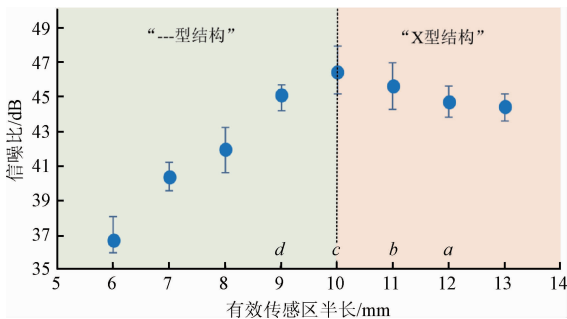


图 11 有效传感区半长与传感器灵敏度的关系
Fig. 11 Relations between half-length of the effective sensing area and sensor sensitivity

对传感器灵敏度随有效传感区长度的变化关系作如下解释:首先,当有效传感区的长度大于 10 mm 时,此时传感器结构为“X”结构,两端存在两臂分离的情况。当声波由封装胶耦合进来,首先沿着分离的两臂传播而后在两臂相融处汇合,这个过程中两臂分离的结构自由度更高,将部分轴向传播的应变转换为了横向应变,吸收了部分轴向传播的能量,使能量会有所衰减。因此,对于有效传感区为“X”型结构的传感器,其有效传感区长度越长,其灵敏度越低。当有效传感区转变为“---”结构,传感器去掉了“X”型结构分离两臂带来的信号衰减,其灵敏度有一定的提升,然而,随着有效传感区的进一步减小,封装胶覆盖了一部分的锥区,由于锥区为应变放大区^[9],当锥区被封装胶覆盖后,其应变放大作用减弱,导致传感器灵敏度的降低。

综上所述,为了使传感器灵敏度最大化,有效传感区应为“---”型结构,且完整地恰好包括腰区和锥区。

2.3 传感器模态识别能力的定向性

传感器模态识别能力的定向性是其应用于模态声发射法的重要特性,特别是在平面二维源定位中具有重要影响。图 12 所示为微纳耦合光纤不同角度下的模态识别能力实验布局示意图。DFB 激光光源(1 mW, 1 310 nm)产生的光接入微纳耦合光纤输入端,光一分为二从传感器两输出端输出,连接至两个光电转换器(THORLABS, DET01CFC),转换成的两电信号 V_1 和 V_2 接入低噪声前置放大器 $A(V_1 - V_2)$ (标准, SR560)进行差分放大,放大倍数 $A = 200$,最后由示波器采集并传输至电脑进行处理。此处微纳耦合光纤的有效传感区半长控制为 10 mm(对应图 8 中封装胶长度为 l_c 的情况),即封装胶截止处恰好为两臂相融处。声发射源采用高重复性的 Hsu-Nielsen 源进行模拟,模拟源距传感器 30 cm,以每 22.5° 为步长,由 90° 开始测试至 0° ,分析每一个角度下传感器所测信号的 Gabor 分布。

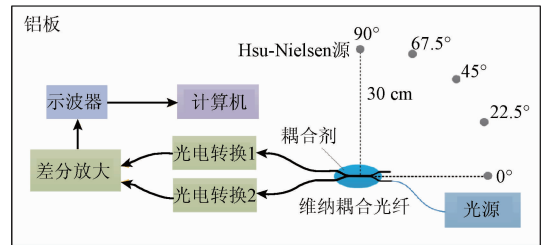


图 12 微纳耦合光纤模态识别能力定向性实验布局
Fig. 12 Experiment distribution diagram of the orientation property of micro/nano coupling fiber modal identification ability

不同角度下传感器所测信号测试结果如图 13、14 所示, 90° 所测信号能够完整地识别 S_0 和 A_0 模态,与图 9(c)

一致;67.5°时,传感器可以看到识别出的 A_0 模态频率范围相对 90°时有所减小,虽有缺失,但在 60 ~ 250 kHz 完整性仍然较好,而 S_0 模态消失;45°时,传感器所测信号识别的 A_0 模态仍然具有缺失,但在 120 ~ 200 kHz 范围仍较为完整;而当角度减小至 22.5°时, A_0 模态缺失分量较为严重,完整性较差,已不能满足应用;特别是角度为 0°时,传感器所测信号与其他角度信号差异较大,完整性最差;与图 13 类似,在图 14 中,对称封装长度为 l_d 时传感器在不同方向上的模态识别能力随着角度的减小而减弱。在 45° ~ 90°范围内,传感器模态识别能力较好;而在 0° ~ 45°范围内,传感器模态识别能力较差。

由此可以得出结论:传感器在 90°时的模态识别能力最好,能够完整地识别 A_0 模态;随着声发射源角度的减小,传感器模态识别能力逐渐降低,但在 45° ~ 90°,传感器的模态识别能力较好;当声发射源角度小于 45°后,传感器所测信号 A_0 模态的频率分量缺失较多。且由于传感器的对称结构,微纳耦合光纤模态声发射的有效检测角度为 45° ~ 135°。

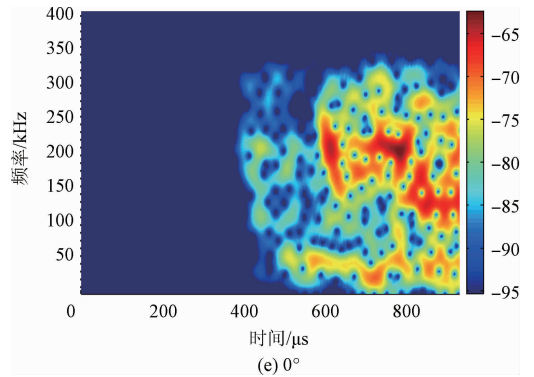
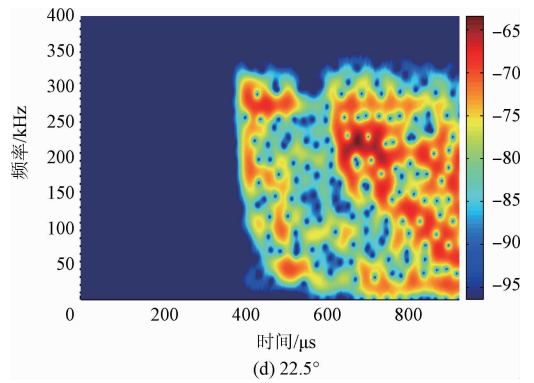
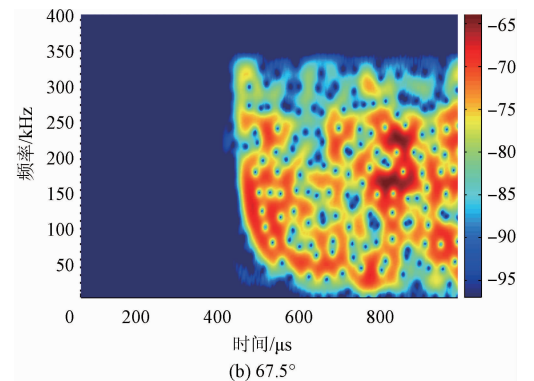
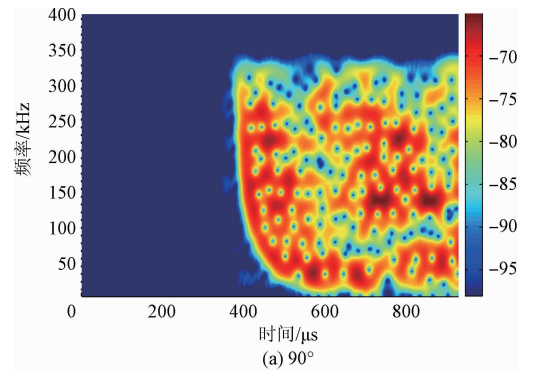
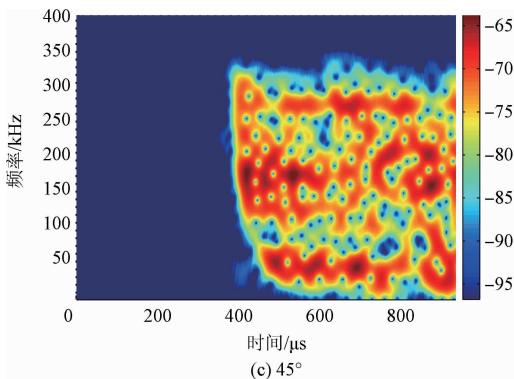
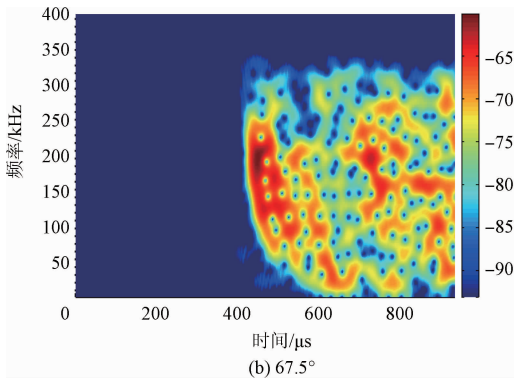
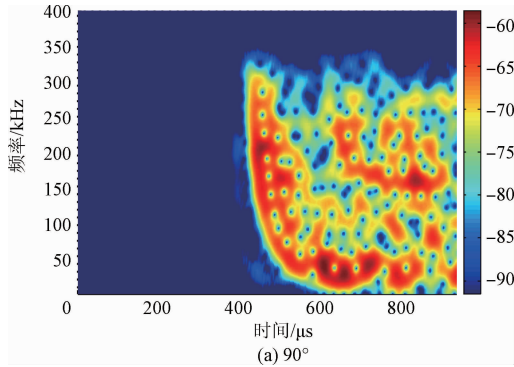


图 13 封装胶长度 $l_1 = l_2 = l_c$ 时不同角度下传感器所测信号的 Gabor 分布

Fig. 13 Gabor transform distribution diagram of the measured AE signals of the sensor for different angles under package length $l_1 = l_2 = l_c$



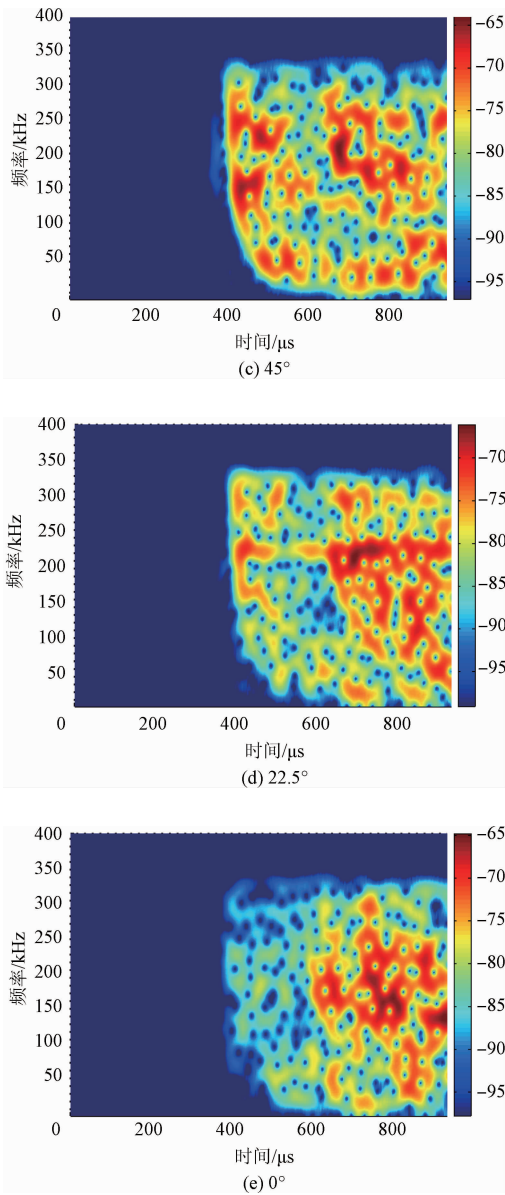


图 14 封装胶长度 $l_1 = l_2 = l_d$ 时不同角度下传感器所测信号的 Gabor 分布

Fig. 14 Gabor transform distribution diagram of the measured AE signals of the sensor for different angles under package length $l_1 = l_2 = l_d$

3 结 论

本文基于模态声发射理论对微纳耦合光纤的模态识别能力进行了优化,研究了微纳耦合光纤有效传感区结构、长度及对称性对传感器模态识别能力的影响,并在此基础上研究了传感器模态识别能力的定向性。

1) 有效传感区“---”型结构优于“X”型结构。当有效传感区包括分离区、锥区和腰区时,其结构可视为“X”型,传感器不能识别 S_0 模态,且识别的 A_0 模态完整性

差;当有效传感区恰好包括腰区和全部锥区时,其结构可视为“---”型,传感器此时不仅能够完整地识别出 A_0 模态,还能够较好地识别出 S_0 模态;当有效传感区包括腰区和部分锥区时,其结构仍可视为“---”型,传感器此时仍能很好地识别 A_0 模态,但 S_0 模态识别能力减弱。

2) 有效传感区对称性对传感器识别模态完整性有较大影响。当有效传感区对称时,所测信号模态完整性很好;而当有效传感区不对称时,所测信号完整性较差。

3) 有效传感区长度对传感器灵敏度有非常大影响。当有效传感区为“X”型结构时,其分离区会衰减声波的部分能量,传感器灵敏度随着有效传感区长度的减小而增大;当有效传感区为“---”型结构时,由于锥区起到应变放大作用,有效传感区减小会导致锥区的减少,这样传感器灵敏度会随着有效传感区的减小而减小。

4) 微纳耦合光纤的模态识别能力与声发射源的方位有关:当声发射源垂直于传感器时(90°),传感器模态识别能力最好,且随着角度的减小其模态识别能力也逐渐减小;但在 $45^\circ \sim 90^\circ$,传感器的模态识别能力仍能满足模态声发射法应用条件;当声发射源角度低于 45° 后,传感器所测信号 A_0 模态的频率分量缺失较多,不能够满足应用条件。又由于传感器的对称结构,微纳耦合光纤模态声发射的有效检测角度为 $45^\circ \sim 135^\circ$ 。

参考文献

- [1] 张强,张石磊,王海舰,等. 基于声发射信号的煤岩界面识别研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(2): 230-237.
ZHANG Q, ZHANG SH L, WANG H J, et al. Study on identification of coal-rock interface based on acoustic emission signal[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 230-237.
- [2] 李小亭,卢庆华,方立德,等. 基于声发射技术和小波变换的气-液两相流动噪声特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12):1031-1036.
LI X T, LU Q H, FANG L D, et al. Study on characteristic of gas-liquid two-phase flow noise based on acoustic emission and wavelet transform[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(12): 1031-1036.
- [3] HOLFORD K M, CARTER D C, DAVIES A W, et al. Damage location in steel bridges by acoustic emission[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2001, 12(8):567-576.
- [4] ALJETS D, CHONG A, WILCOX S, et al. Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 30(7):91-102.
- [5] 焦敬品,何存富,吴斌,等. 基于模态分析和小波变换

- 的声发射源定位新算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5):482-485.
- JIAO J P, HE C F, WU B, et al. A new acoustic emission source location technique based on wavelet transform and mode analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(5):482-485.
- [6] KAPHLE M, TAN A C C, THAMBIRATNAM D P, et al. Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like structures [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2012, 19(2): 187-198.
- [7] BAKER C, MORSCHER G N, PUJAR V V, et al. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis[J]. Composites science and Technology, 2015, 116(9):26-32.
- [8] 李帅永, 王鹏飞, 严冬, 等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2068-2075.
- LI SH Y, WANG P F, YAN D, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):2068-2075.
- [9] 周勃, 张士伟, 陈长征, 等. 风力机叶片多裂纹扩展声发射信号的特征识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1):110-117.
- ZHOU B, ZHANG SH W, CHEN CH ZH, et al. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):110-117.
- [10] 阳能军, 王新刚, 王蒙. HHT 在复合材料损伤声发射信号处理中的应用[J]. 电子测量技术, 2011, 34(8): 45-47.
- YANG N J, WANG X G, WANG M. Preliminary application of HHT to the acoustic emission signal processing of composite materials [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(8):45-47.
- [11] 马丹, 葛俊峰, 叶林, 等. 光纤点式液位传感技术的研究现状[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9):92-95.
- MA D, GE J F, YE L, et al. Review on fiber optic point liquid-level sensors[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9):92-95.
- [12] 宋世德, 张作才, 王晓娜. 光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1002-1008.
- SONG SH D, ZHANG Z C, WANG X N. Optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel under water[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1002-1008.
- [13] CHEN R, BRADSHAW T, BADCOCK R, et al. Linear location of acoustic emission using a pair of novel fibre optic sensors[J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(8):2313-2318.
- [14] 祁海峰, 马良柱, 常军. 熔锥耦合型光纤声发射传感系统及其应用[J]. 无损检测, 2011, 30(6):66-69.
- QI H F, MA L ZH, CHANG J. An optical fiber acoustic emission sensing system based on the fiber fused tapered and coupling technique and its application [J]. Nondestructive Testing, 2011, 30(6):66-69.
- [15] 蒋奇, 马宾, 李术才, 等. 单模光纤耦合声发射传感器及其应用研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 340-344.
- JIANG Q, MA B, LI SH C, et al. Single mode fiber-optic coupling acoustic emission vibration sensor and application Chinese [J]. Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(3):340-344.
- [16] FU T, LIU Y, LAU K T, et al. Impact source identification in a carbon fiber reinforced polymer plate by using embedded fiber optic acoustic emission sensors[J]. Composites Part B Engineering, 2014, 66(4):420-429.
- [17] ZHANG J L, MAO Z M, LIN Z Q. Measurements and analyses of fields in fused tapered single-mode fiber couplers [J]. Applied Optics, 1989, 28(11): 2026-2030.
- [18] LI F, LIU Y Y, WAGN L J, et al. Investigation on the response of fused taper couplers to ultrasonic wave. [J]. Applied Optics, 2015, 54(23):6986-6993.
- [19] GORMAN M R. Plate wave acoustic emission [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(1):358-364.

作者简介



Liu Yiying received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Xi'an Jiaotong University in 2003, 2006 and 2011, respectively. Now, she is a lecturer in Xi'an Jiaotong University. Her main research interest includes optical fiber sensing technology, acoustic emission measurement technology and DC heavy current detection technology.

刘懿莹, 分别在 2003 年、2006 年和 2011 年于西安交通大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西安交通大学讲师, 主要研究方向为光纤传感技术、声发射检测技术及直流大电流检测技术。

E-mail: liuyiying@mail.xjtu.edu.cn