

## 压电纤维复合材料的管道结构 健康监测应用

王露<sup>1</sup>, 刘盛文<sup>1</sup>, 谢文韬<sup>1</sup>, 汤林<sup>1</sup>, 袁晰<sup>2</sup>, 周科朝<sup>1</sup>, 张斗<sup>1</sup>

(1. 中南大学 粉末冶金研究院, 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 化学化工学院, 长沙 410083)

**摘要:** 管道实时结构健康监测对工程应用具有重要意义, 压电纤维复合材料在与管道结构共形时保持压电阻抗特性, 对管道结构进行健康监测。本文制备了压电纤维复合材料, 研究了复合材料厚度对电阻抗特性的影响, 厚度大于250  $\mu\text{m}$ 时阻抗峰值下降50%。基于压电纤维复合材料进行了结构载荷监测应用验证, 通过相关系数偏差值( $R_C$ )和均方根偏差( $R_M$ )方法对结构受到损伤时的压电纤维复合材料阻抗敏感特征进行量化, 并基于无损状态建立了损伤阈值( $U_I$ )。当管道结构受到50 N载荷时,  $R_C$ 指数达到0.51( $U_I=0.005$ ); 螺栓结构松动50%时,  $R_M$ 指数达到7.96( $U_I=0.63$ )。结果表明, 压电纤维复合材料可以对管道结构应力状态变化和螺栓松动进行灵敏响应, 适用于管道等复杂曲面结构进行结构健康监测, 应用前景广阔。

**关键词:** 压电纤维复合材料; 柔性; 压电阻抗; 结构健康监测

文章编号: 1004-0609(2023)-04-1085-11

中图分类号: TB321

文献标志码: A

**引文格式:** 王露, 刘盛文, 谢文韬, 等. 压电纤维复合材料的管道结构健康监测应用[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(4): 1085–1095. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43029

WANG Lu, LIU Sheng-wen, XIE Wen-tao, et al. Pipeline structural health monitoring application of piezoelectric fiber composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(4): 1085 – 1095. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43029

管道结构件在输运、航空、机械工程中的应用十分广泛, 在其服役期间会受到冲压、腐蚀等作用。这些因素会引起管道结构件的应力、应变变化, 导致可能出现的结构损伤。如果不能有效地检测到这些结构变化, 可能会出现管道件的结构失效, 增大发生灾难性事故的风险<sup>[1]</sup>。通过实施实时的管道结构健康监测来快速、准确地评估管道结构健康状况对于降低事故风险、减少损失至关重要, 此外, 管道结构健康监测可以减少运营和维护的成本, 对于工程实际具有很大的现实意义<sup>[2-3]</sup>。

随着智能材料与器件领域的发展, 诸多新型传感器被应用于管道结构健康监测。光纤传感是目前较为成熟的管道监测技术, 基于光学散射原理对管道温度、应变等参数进行测量, 德国、意大利均使用分布式光纤传感系统对长距离输运管道进行监测<sup>[4-5]</sup>。但光纤传感器成本较高, 而且需要复杂的数据读出方法<sup>[6]</sup>。近年来, 开发了基于磁电和摩擦电的管道结构健康监测传感器, 基于机电转换对流体机械能进行采集, 实现了管道泄漏监测和腐蚀防护<sup>[7]</sup>。但是这类传感器结构复杂, 易受到电磁干

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2012100); 国家自然科学基金资助项目(52172134, U19A2087, 52102150)

收稿日期: 2022-03-17; 修订日期: 2022-05-25

通信作者: 袁晰, 副教授, 博士; 电话: 0731-88877196; E-mail: xiyuan@csu.edu.cn

张斗, 教授, 博士; 电话: 0731-88877196; E-mail: dzhang@csu.edu.cn

扰<sup>[8]</sup>。压电材料与功能器件具有成本低、结构简单、兼具传感和驱动能力等优势<sup>[9]</sup>，在管道结构实时健康监测领域有着巨大的应用优势。

压电换能器主要通过导波技术和能量采集技术对管道进行健康监测。压电换能器产生的超声导波在结构中传播，在材料特性不连续或损伤处发生反射、散射，导致能量损失<sup>[10-12]</sup>。通过比较透射率、功率密度等参数，可以获取管道结构的健康状况<sup>[13-15]</sup>。压电材料还可以通过感知流体与管道结构之间相互作用产生的振动来对管道进行监测<sup>[16]</sup>。管道结构发生损伤时会改变压力波的特征，压电换能器通过识别振动信号来获取管道结构健康状况<sup>[17]</sup>。压电陶瓷换能器常用于管道结构监测，但压电陶瓷硬度高、灵活性差，无法与结构共形，在实际使用中需要设计与曲面结构的接口<sup>[18-19]</sup>。压电聚合物、生物压电材料具有良好的柔性，但其压电系数低、信号微弱、环境耐受能力差，难以应用于复杂工况下的管道状态监测<sup>[20-21]</sup>。此外，基于振动的损伤监测只能在损伤发展到一定程度时才能检测到，而对于损伤初期引起的结构特征变化不敏感<sup>[22]</sup>。

压电陶瓷还可以和主体结构的电阻抗进行耦合，由此发展出了基于压电阻抗的结构健康监测技术。PEAIRS等<sup>[23]</sup>应用阻抗法监测天然气管道损伤，实现了损伤初期法兰件螺栓松动的检测。NA<sup>[24]</sup>应用锆钛酸铅贴片对管道壁厚进行监测，通过阻抗变化获得了管道壁损伤的状态信息。压电阻抗技术在识别管道损伤初期发生的螺栓松动、局部模量变化等具备明显的优势，而且成本低、环境适应性强，在实际工程中有着很好的应用前景<sup>[26]</sup>。锆钛酸铅陶

瓷压电系数高、传感响应带宽大，是目前阻抗监测技术中主要应用的压电材料。然而，与压电陶瓷换能器存在的问题类似，锆钛酸铅压电陶瓷无法与结构共形，灵活性差<sup>[27]</sup>。柔性压电纤维复合材料是将压电陶瓷做成纤维，与环氧树脂复合，用叉指状电极封装，在保持压电阻抗特性的同时，还具备良好的柔性，可以与管道曲面结构共形贴合，直接感知管道结构的应变、模量变化<sup>[28-29]</sup>。本文作者基于压电阻抗技术，探索了压电纤维复合材料在管道健康监测领域的应用，制备了压电纤维复合材料，对其微观形貌、力学性能、弯曲阻抗性能进行了表征，研究了复合材料厚度对电阻抗特性的影响，开展了基于压电纤维复合材料的结构载荷监测实验。采用相关系数偏差(CCD)和均方根偏差(RMSD)方法对阻抗特征变化进行量化，并进一步对管道螺栓松动监测进行了系统研究，为压电纤维复合材料在复杂曲面结构的结构健康监测应用提供研究基础。

## 1 实验

### 1.1 压电纤维复合材料制备及性能表征方法

制备压电陶瓷相的原料为PZT-5A压电陶瓷粉(深圳亿诺赛欧有限公司)，分子式为 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ，压电常数 $d_{33}$ 为500 pC/N，介电常数为3200；聚合物相使用Araldite2020环氧树脂(美国Huntsman公司)，通过A、B组分混合获得，混合质量比为10:3。如图1(a)所示，通过黏稠塑性加工工艺制备陶瓷纤维，采用环氧树脂进行复合获得压电纤维复合物。将压电纤维复合物放于两片沉积有叉指电极

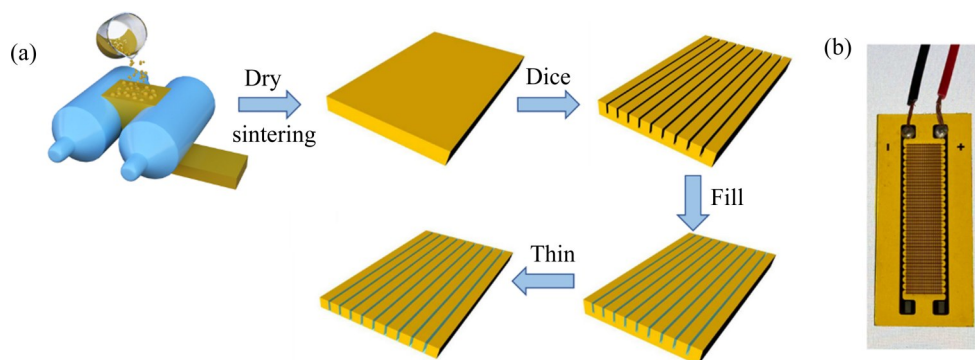


图1 压电纤维复合材料制备工艺

Fig 1 Fabrication of piezoelectric fiber composites: (a) Viscous plastic process; (b) Real picture of piezoelectric fiber composites

的聚酰亚胺薄膜之间,热压封装得到压电纤维复合材料,实物图如图1(b)所示。对压电纤维复合材料施加直流电压进行极化,极化电压2.0 kV,室温下在硅油中极化20 min。

采用TECAN MIRA扫描电镜对压电纤维复合材料微观结构进行表征。采用CMT5504万能拉伸试验机对压电纤维复合材料进行力学性能测试。采用自制的弯曲载荷加载装置对压电纤维复合材料进行加载,如图2所示,通过减小两端距离的方式对压电纤维复合材料进行弯曲,并使用keysight公司的E4990A精密阻抗分析仪进行电学阻抗性能测试。

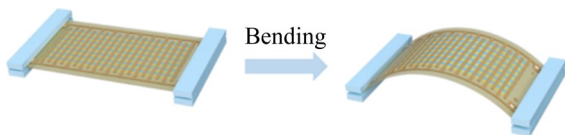


图2 压电纤维复合材料弯曲加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bending load of piezoelectric fiber composites

## 1.2 压电纤维复合材料结构健康监测实验方案

### 1.2.1 结构载荷监测实验

实验示意图如图3(a)所示,使用Loctite 495黏接剂将压电纤维复合材料样品粘结在不锈钢板(长6cm、宽3cm、厚度0.5mm)上,并装载在自制的拉力载荷施加装置上,选用的压电纤维复合材料厚度为200  $\mu\text{m}$ 、体积分数72.07%,具备最高的柔性

和阻抗峰水平。通过载荷施加装置对不锈钢板施加100~600 N的水平载荷,利用安捷伦E4990A对不同拉力载荷下的压电纤维复合材料电阻抗特性进行测试,采样频率为20~200 kHz。与平面拉力载荷监测实验类似,将压电纤维复合材料粘贴在不锈钢管(长16 cm、外径15 mm、壁厚0.5 mm)端部,通过自制的压力载荷施加装置对管道施加压力。对管道结构施加0~200 N的压力载荷,并进行压电纤维复合材料的电阻抗特性测试,采样频率为20~200 kHz。

### 1.2.2 螺栓松动监测实验

将压电纤维复合材料样品粘贴在管道螺栓件上,实验示意图如图3(b)所示。将螺栓悬挂在空中进行测试,采用安捷伦E4990A阻抗测试仪获得压电纤维复合材料在螺栓拧紧和松动状态下的电阻抗特性,并对不同松动情况下的电阻抗性能进行扫频测试。

## 1.3 阻抗敏感特征提取方法

通过压电界面阻抗技术监测工程结构健康状态时,工程结构的损伤或是局部应力应变的变化通常体现在压电纤维复合材料阻抗敏感特征的变化上。为了量化这些阻抗敏感特征的变化,主要采用相关系数偏差(Correlation coefficient deviation, CCD)和均方根偏差(Root-mean-square deviation, RMSD)方法对阻抗敏感特征进行提取。这两种阻抗特征提取

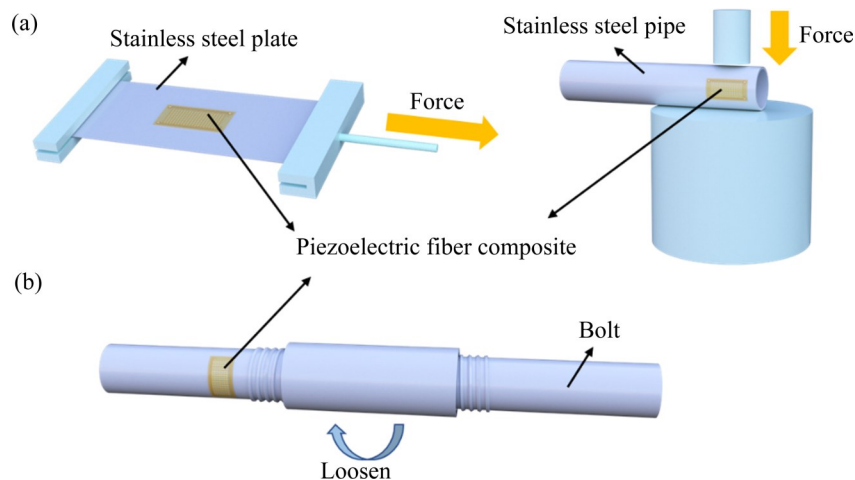


图3 结构健康监测实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structural health monitoring experiment: (a) Structural load monitoring experiment; (b) Bolt loosen monitoring experiment

方法以不同的方法对阻抗特征进行了量化, CCD方法主要对阻抗峰频率的偏移进行量化, RMSD方法能够同时对阻抗峰频率偏移和幅值偏移进行量化<sup>[26]</sup>。根据结构受到损伤时阻抗敏感特征的变化情况来选择不同的量化方法, 当阻抗伴随峰少、阻抗峰频率偏移明显时选用CCD方法, 减小阻抗幅值变化带来的影响, 提高传感信号的线性度; 在阻抗伴随峰多、阻抗峰频率偏移不明显时采用RMSD方法, 从而对敏感频段阻抗幅值变化进行量化分析。

相关系数偏差( $R_C$ )的计算方法如下所示:

$$R_C = 1 - \frac{1}{\sigma_Z \sigma_Z^*}$$

$$E\{[\text{Re}(Z(\omega_i)) - \text{Re}(\bar{Z})][\text{Re}(Z^*(\omega_i)) - \text{Re}(\bar{Z}^*)]\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_Z$ 和 $\sigma_Z^*$ 为对应阻抗实部的标准差;  $E$ 为期望操作;  $Z(\omega_i)$ 为对应频率下的阻抗响应值;  $\text{Re}(Z(\omega_i))$ 为对应频率下阻抗值的实部;  $\bar{Z}$ 为阻抗响应的平均值;  $\text{Re}(\bar{Z})$ 为电阻抗 $\bar{Z}$ 的实部。

均方根偏差( $R_M$ )可以通过以下的计算方法得到:

$$R_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [Z(\omega_i)]^2}} \quad (2)$$

式中:  $N$ 为选取的阻抗特征频率段采样点数。

在理想情况下, 当工程结构发生损伤或是局部应力应变发生变化时,  $R_M$ 或是 $R_C$ 数值大于0。但在实际情况下, 由于环境、测试等因素的影响, 无损状态下的工程结构的阻抗特征也会发生一定的变化, 导致 $R_M$ 或是 $R_C$ 值大于0。为了对工程结构的损伤情况做出可靠的判断, 需要设定一个损伤阈值(Upper control limit,  $U_1$ )进行判断, 损伤阈值( $U_1$ )可

以通过以下计算方法得到:

$$U_1 = \mu + 3\sigma \quad (3)$$

式中:  $\mu$ 为无损状态下阻抗特征的均值;  $\sigma$ 为标准差, 由 $3\sigma$ 得到的损伤判断阈值具有99.7%的置信度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压电纤维复合材料的微观形貌

压电纤维复合材料的微观形貌如图4所示。图4(a)的结果表明, 作为功能相的压电陶瓷纤维排列整齐, 在热压封装过程中并未产生裂纹。图中白色区域为PZT陶瓷纤维, 黑色区域为环氧树脂, 压电相体积分数为72.07%。从图4(b)中可以看出, 叉指电极对齐情况良好, 在样品极化时可以提供均匀的极化电场, 减小不工作的非活跃区。图4(c)所示为封装电极层和复合材料层之间的界面。从图4中可以看出, 黏接层的厚度为2.9  $\mu\text{m}$ 左右, 在极化时分担更小的电压, 不会影响样品的极化性能, 同时具备良好的结合力。压电纤维复合材料的微观形貌结果表明制备工艺参数合适, 可以保证压电纤维复合材料具备良好的物理性能和电学性能。

### 2.2 压电纤维复合材料的力学性能

图5所示为压电纤维复合材料的力-位移曲线。使用万能力学试验机对压电纤维复合材料进行力学实验, 沿压电纤维方向进行抗拉试验, 测试其抗拉强度。由压电陶瓷纤维和聚合物复合制备的压电纤维复合材料在抗拉试验中呈现了塑性断裂的特性。通过沿纤维长度方向的最大拉伸载荷与压电纤维复

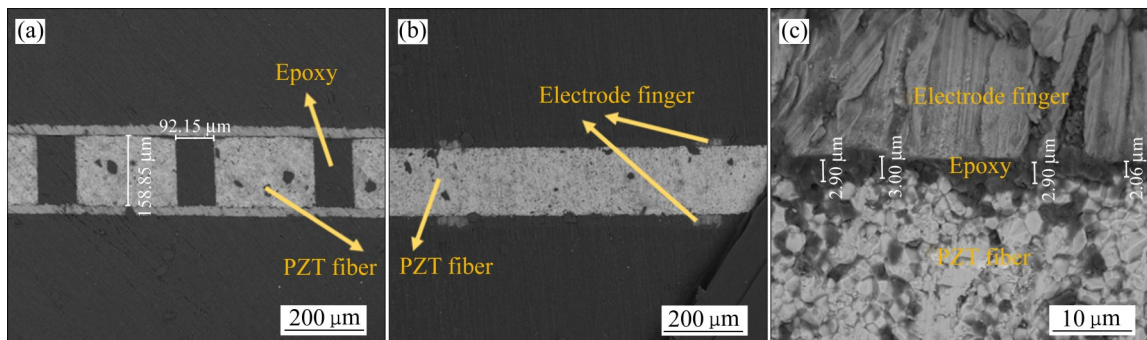


图4 压电纤维复合材料的微观结构

Fig. 4 Microstructures of piezoelectric fiber composites: (a) Transverse cross-sectional surface images; (b) Longitudinal cross-sectional surface images; (c) Interface between electrode finger and PZT fiber

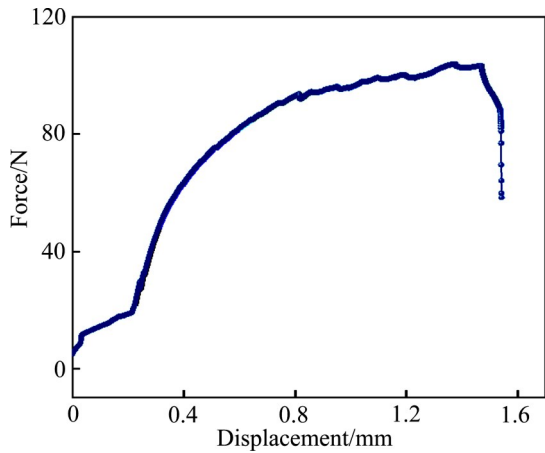


图5 压电纤维复合材料的力-位移曲线  
**Fig. 5** Force - displacement curve of piezoelectric fiber composite

合材料的截面积比值得到抗拉强度值。在室温下, 压电纤维复合材料的最大拉伸载荷为 103.3 N, 计算得到抗拉强度为 49.2 MPa, 证明其具备良好的力学性能。

2.3 厚度对压电纤维复合材料阻抗性能的影响

图 6 所示为不同厚度压电纤维复合材料的电阻抗实部频谱。由图 6 可看出, 随着压电纤维复合材料厚度的增大, 阻抗峰显著衰减。压电纤维复合材料的阻抗峰由压电谐振导致的阻抗相位角变化产生, 压电相的压电性能越高, 在谐振时的相位角差值越大, 产生的阻抗峰幅值越大。压电纤维复合材料的极化电极和工作电极均为叉指电极, 如图 7 所示, 在相同极化电压下, 复合材料的厚度越大, 有

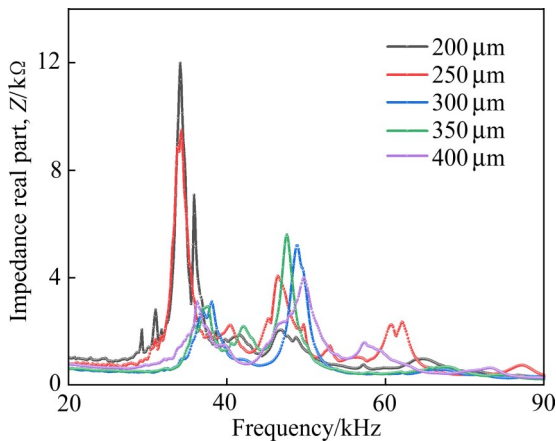


图6 不同厚度下压电纤维复合材料的电阻抗实部曲线  
**Fig. 6** Electrical impedance real part curves of piezoelectric fiber composites with different thickness

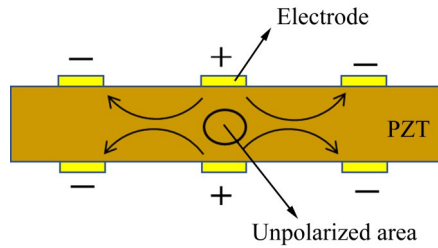


图7 叉指电极的极化情况  
**Fig. 7** Polarization condition of interdigital electrode

效极化区域面积越小, 这导致了复合材料压电性能的降低, 所以阻抗峰随着厚度的增大而降低。此外, 载荷束缚也会导致阻抗峰强度的降低, 压电纤维复合材料通过热压工艺进行封装, 复合材料的厚度越大, 在热压封装之后受到的载荷束缚越高, 所以当材料厚度大于 250 μm 时, 阻抗峰强度显著降低, 下降程度达到 50%。此外, 复合材料厚度的增大也会导致柔性下降, PZT 陶瓷纤维更容易在弯曲时发生断裂破碎等现象。因此, 减小复合材料厚度有利于获得更高的阻抗峰强度和更好的柔性。

2.4 压电纤维复合材料在弯曲受迫下的电阻抗性能

压电纤维复合材料克服了传统 PZT 压电陶瓷脆性的缺点, 在一定程度的弯曲载荷下不会失效, 仍然可以保持较为优秀的压电特性。图 8 所示为压电纤维复合材料在弯曲载荷下的阻抗特性曲线, 选取了在 45~65 kHz 频段出现的特征阻抗响应作为研究对象。从图 8(b)中可以看出, 开始进行弯曲加载时, 阻抗实部峰向中部偏移, 偏移幅度最大, 随着弯曲载荷的增大, 阻抗峰向高频逐渐偏移, 阻抗幅值减小。这是由于通过两端向内推进的方法对压电纤维复合材料施加弯曲载荷, 弯曲载荷并不随着推进距离的减小均匀变化。在压电纤维复合材料样品中间的拱形形成后, 随着两端距离的减小, 产生的弯曲载荷逐渐减小, 所以阻抗峰的偏移程度逐渐减小。在两端距离减小到 30 mm 时, 压电纤维复合材料样品仍然可以保持良好的电学性能, 阻抗特征峰可以被清晰的识别出来。弯曲载荷卸载之后, 压电纤维复合材料的阻抗特征峰可以回到载荷施加之前的水平。压电纤维复合材料的弯曲阻抗实验结果表

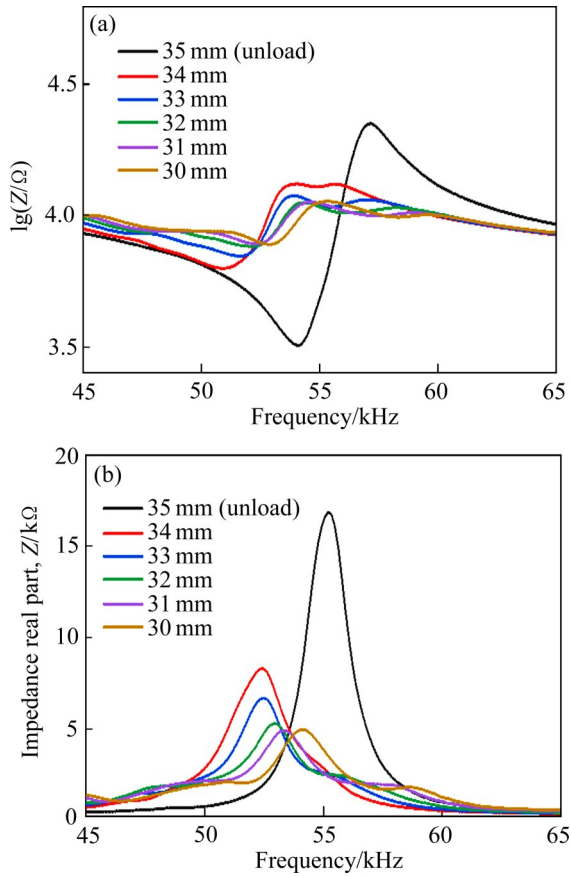


图8 压电纤维复合材料在弯曲受迫下的电阻抗曲线  
Fig. 8 Electrical impedance curves of piezoelectric fiber composites under forced bending: (a) Electrical impedance curves; (b) Impedance real part curves

明, 压电纤维复合材料可以在弯曲情况下保持特有的电学阻抗特性。

## 2.5 压电纤维复合材料的结构载荷监测实验

### 2.5.1 平面拉伸载荷监测实验

图9(a)所示为压电纤维复合材料在不同拉力载荷情况下的阻抗曲线, 选取50~60 kHz作为特征频率段。随着载荷力的增大, 阻抗响应频率逐渐向高频偏移。图9(b)所示为不同拉力载荷下的阻抗实部曲线, 阻抗峰幅值变化很小, 应力情况主要体现在阻抗峰频率偏移上, 故选择相关系数偏差作为量化方法。选择0 N作为无损情况, 并建立损伤阈值, 计算得到的无损状态下 $R_c$ 值为0.003,  $U_1$ 为0.008。当 $R_c$ 值超过0.008时, 认为不锈钢板的局部应力发生变化。图9(c)显示了压电纤维复合材料在50~60 kHz频段下的 $R_c$ 指数, 在不同载荷下的 $R_c$ 指数均高于 $U_1$ , 可以作为局部应力变化的量化指标。在

100 N拉力载荷下, 压电纤维复合材料的 $R_c$ 指数达到了0.07, 可以有效体现施加的载荷情况。而且 $R_c$ 指数和外加载荷的相关性很强,  $R_c$ 指数的线性度很高。平面拉伸载荷的监测实验结果表明, 压电纤维复合材料良好适用于监测不锈钢板内的局部应力状态变化, 并且从 $R_c$ 指数中可以看出阻抗峰的偏移程度和施加载荷的相关性很强。

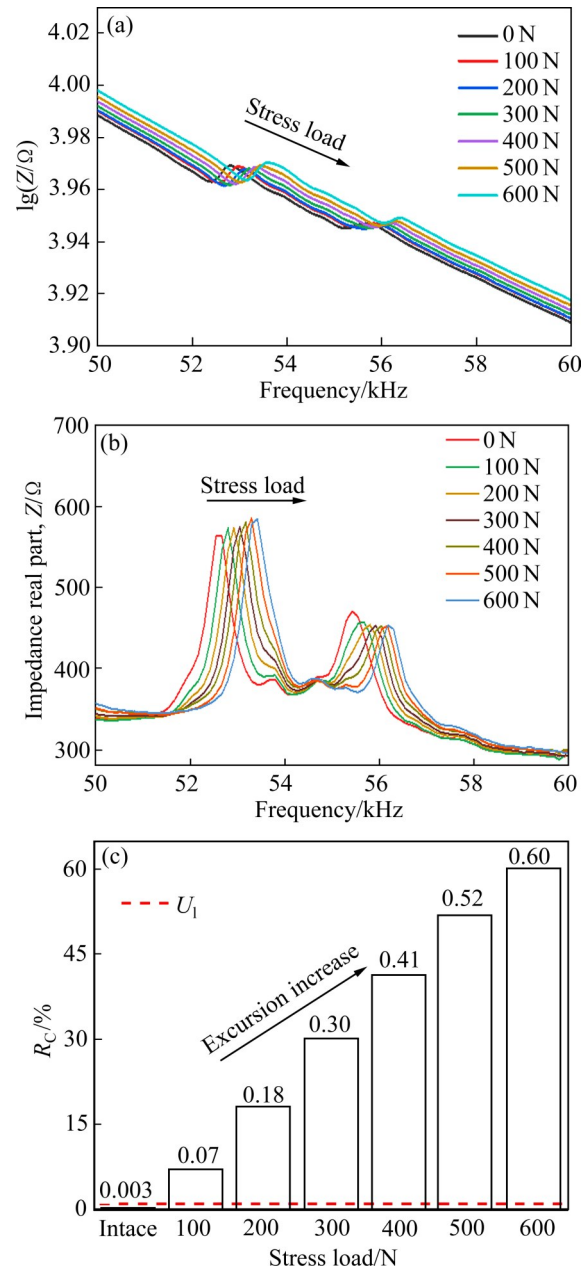


图9 不同平面拉力载荷下的压电纤维复合材料阻抗特征曲线

Fig. 9 Impedance characteristic curves of piezoelectric fiber composites under different plane tensile loads: (a) Electrical impedance curves; (b) Impedance real part curves; (c)  $R_c$  index

## 2.5.2 管道受压载荷监测实验

图10(a)所示为压电纤维复合材料在不同压力载荷作用下的阻抗曲线, 选取了出现阻抗特性响应的85~97 kHz作为特征频率段。由于压电纤维复合材料在测试时, 本身处于弯曲受迫状态, 阻抗响应呈现了不规律的情况, 阻抗响应变弱, 但仍然可以进行清晰的阻抗特征辨识。从图10(b)中可以看出,

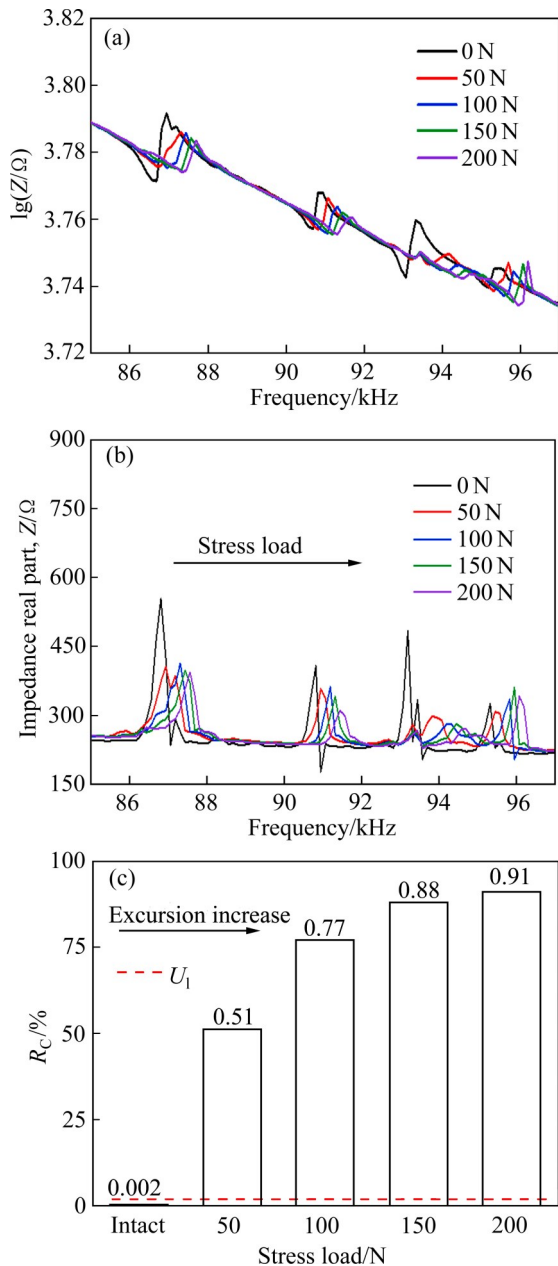


图10 不同压力载荷下的压电纤维复合材料阻抗特征曲线

Fig. 10 Impedance characteristic curves of piezoelectric fiber composites under different stress loads: (a) Electrical impedance curves; (b) Impedance real part curves; (c)  $R_C$  index

随着载荷的增大, 阻抗峰频率逐渐向高频偏移, 阻抗峰幅值减小, 采用  $R_C$  作为阻抗特征量化指数。如图10(c)所示, 选择无压力载荷状态作为无损状态, 得到的损伤阈值  $U_1$  为0.005, 无损状态下的  $R_C$  指数为0.001。随着载荷的增大,  $R_C$  指数增大的幅度变缓, 这是由于管道结构是垂直受压, 压力需要通过曲面传导到压电纤维复合材料的粘贴区域, 随着载荷的增大, 黏贴区域与受压区域之间的管道结构发生了一定的变形, 导致传导力的减小。当压力载荷为50 N时, 压电纤维复合材料的  $R_C$  指数达到了0.51, 显著高于  $U_1$ , 说明压电纤维复合材料对管道结构应力状态变化很敏感, 可以对管道结构载荷情况进行监测。

## 2.6 管道螺栓松动监测实验

### 2.6.1 不同频段对阻抗特征指数的影响

图11所示为压电纤维复合材料在不同特征频率段下的阻抗实部曲线, 测试了在拧紧状态和松动状态下的阻抗实部曲线。由于压电纤维复合材料黏贴在螺栓曲面上, 处于弯曲受迫状态, 阻抗响应水平降低, 但仍然可以对阻抗特征进行清晰的识别。在40~140 kHz频段内, 压电纤维复合材料均具备良好的阻抗特征响应, 在40~60 kHz频段内的阻抗峰数量最多。当螺栓处于松动状态时, 阻抗峰不仅幅值水平提高, 阻抗峰频率还会向低频进行偏移。

采用  $R_M$  指数对不同频率段的阻抗特征进行提取, 将拧紧状态作为无损状态, 对各个频率段进行损伤阈值  $U_1$  的构建。图12所示为不同频率段下的  $R_M$  指数情况及  $U_1$ 。在20~40 kHz频段下, 由于阻抗特征的缺失, 无损状态与松动状态下  $R_M$  指数很接近, 而且松动状态下的  $R_M$  指数虽然高于无损状态, 但低于  $U_1$ , 并不能作为松动发生的可靠判据。其他频段下的  $R_M$  指数均显著高于  $U_1$ , 可以作为松动状态的判断依据。  $U_1$  可以在一定程度上对无损状态下阻抗曲线稳定性进行显示, 100~120 kHz在有效频段中的  $U_1$  最低。

$R_M$  指数综合考虑了阻抗峰的频率和幅值偏移, 由于60~80 kHz频段下存在更明显的阻抗峰频率偏移, 虽然40~60 kHz频段阻抗响应水平更高, 但60~80 kHz频段的  $R_M$  指数较40~60 kHz频段更大。由于在高频情况下, 阻抗的特征响应水平减小, 阻

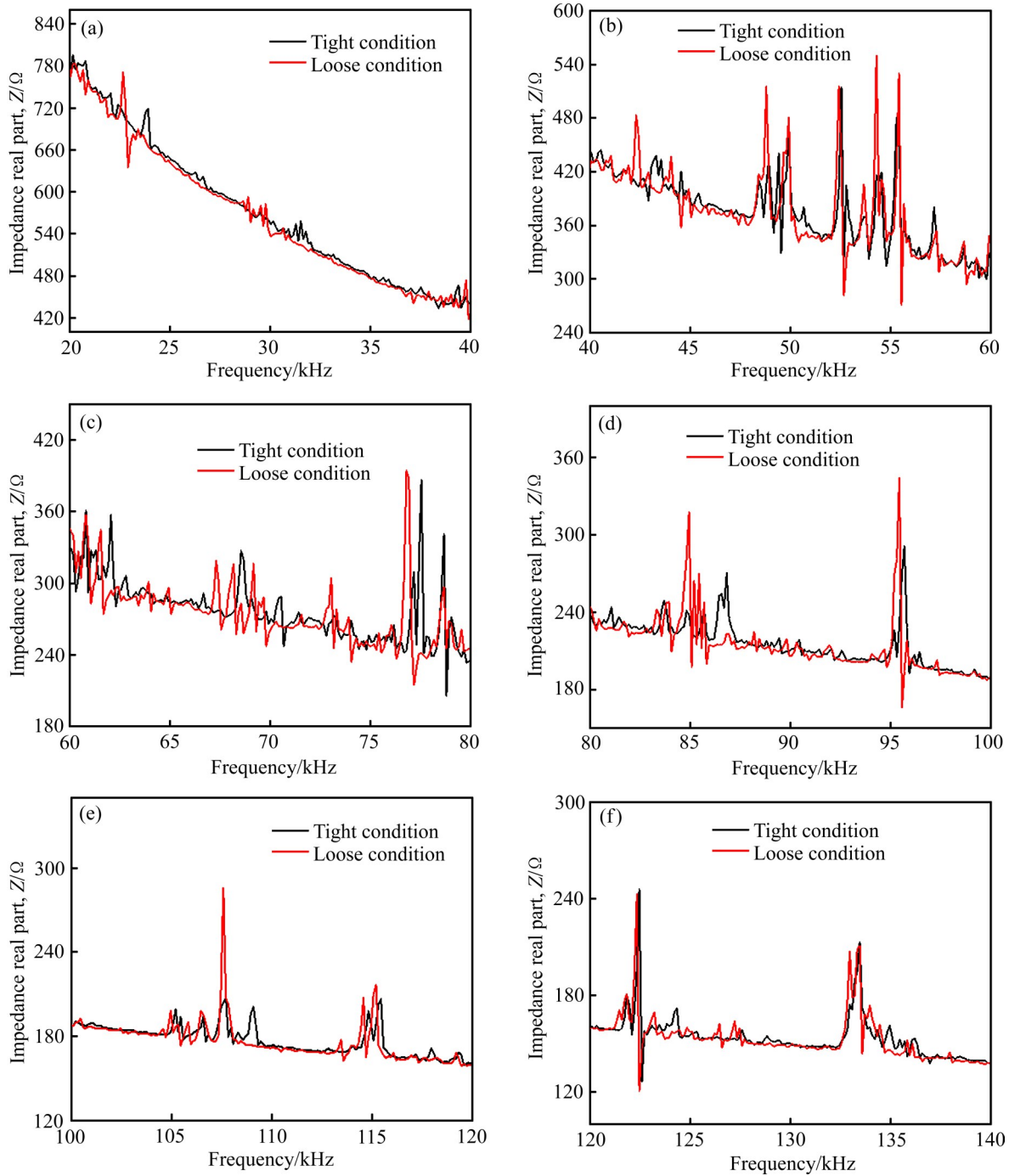


图 11 不同特征频率段下的压电纤维复合材料阻抗实部曲线

Fig 11 Real impedance curves of piezoelectric fiber composites at different eigenfrequency bands: (a) 20–40 kHz; (b) 40–60 kHz; (c) 60–80 kHz; (d) 80–100 kHz; (e) 100–120 kHz; (f) 120–140 kHz

抗峰数量减少,  $R_M$  指数在高频时出现减小的现象。

### 2.6.2 螺栓松动程度对阻抗特征指数的影响

图 13(a)所示为松动程度为 50% 和完全松动情况下的阻抗实部曲线, 选取了 80~100 kHz 作为阻抗特征频段。当螺栓发生松动时, 阻抗峰频率向低频偏移, 阻抗幅值增大。采用 RMSD 方法进行阻

抗敏感特征的提取, 应用拧紧状态作为无损状态构建了损伤阈值  $U_i$ 。如图 13(b)所示, 在拧紧状态时  $R_M$  为 0.36,  $U_i$  为 0.63, 显著低于松动状态下的  $R_M$ 。当松动程度为 50% 时,  $R_M$  为 7.98; 而完全松动时,  $R_M$  达到 11.40, 说明  $R_M$  对螺栓松动监测的灵敏度很高。

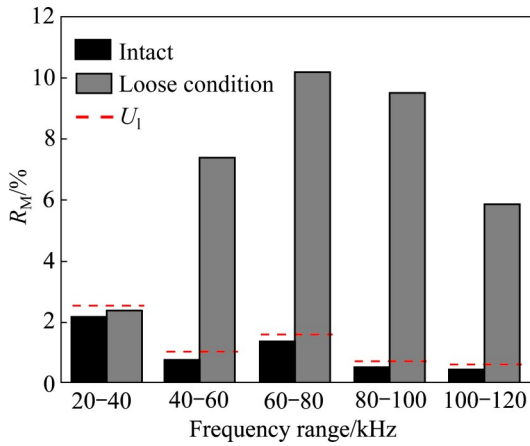


图 12 不同特征频率下压电纤维复合材料的  $R_M$  指数  
 Fig 12  $R_M$  exponents of piezoelectric fiber composites at different eigenfrequencies

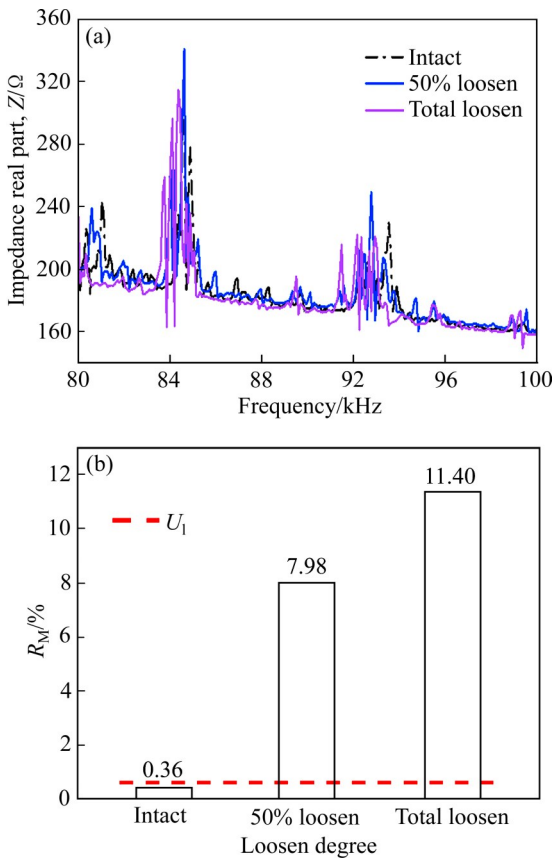


图 13 不同松动程度下压电纤维复合材料的特征阻抗  
 Fig 13 Characteristic impedance of piezoelectric fiber composites under different loosening degrees: (a) Impedance real part curves; (b)  $R_M$  index

### 3 结论

1) 本文制备了不同厚度的压电纤维复合材料, 结果表明 PZT 纤维排列整齐, 各相之间界面结合性

良好, 复合材料的抗拉强度可达 49.2 MPa。

2) 当压电纤维厚度增大时, 压电纤维复合材料的非极化区域增大, 同时阻抗峰水平显著下降; 当压电纤维的厚度大于 250  $\mu\text{m}$  时, 相位角差值下降了 50%; 且更小的厚度有利于获得更高的柔性。

3) 压电纤维复合材料与曲面结构贴合后, 受到弯曲载荷时, 其阻抗响应峰频率偏移, 阻抗幅值显著降低, 其阻抗敏感特征在受到弯曲载荷时仍然可以进行清晰辨识。

4) 在结构负载监测实验中, 压电纤维复合材料阻抗特征偏离程度随着负载力的增大而增大, 并通过  $R_C$  指数进行量化。  $R_C$  指数与水平负载之间线性度高, 拉力载荷每增大 100 N,  $R_C$  指数提高 0.1。在曲面结构监测中复合材料处于弯曲受迫状态,  $R_C$  指数与垂直载荷之间呈现非线性关系, 在 50 N 压力载荷下  $R_C$  指数达到了 0.51 ( $U_1=0.005$ ), 可灵敏识别曲面结构的应力情况。

5) 在管道螺栓件的松动监测实验中, 采用  $R_M$  指数提取阻抗敏感特征, 螺栓松动时  $R_M$  指数在 40~120 kHz 频段内均显著高于  $U_1$ ; 压电纤维复合材料对螺栓件松动时的扭矩损失监测灵敏度高,  $R_M$  指数在螺栓松动 50% 时达到 7.96 ( $U_1=0.63$ )。

### REFERENCES

- [1] ZHU J, REN L, HO S C, et al. Gas pipeline leakage detection based on PZT sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(2): 025022.
- [2] HU Z, TARIQ S, ZAYED T. A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 161: 107994.
- [3] SHARMA V B, SINGH K, GUPTA R, et al. Review of structural health monitoring techniques in pipeline and wind turbine industries[J]. Applied System Innovation, 2021, 4(3): 59.
- [4] INAUDI D, GLISIC B. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(1): 011701.
- [5] INAUDI D, GLISIC B. Distributed fiber-optic sensing for long-range monitoring of pipelines[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. British Columbia, Canada: International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2007: 1-8.

- [6] JIA Z, WU W, REN L, et al. Pipeline abnormal classification based on support vector machine using FBG hoop strain sensor[J]. *Optik*, 2018, 170: 328–338.
- [7] ZHONG Y, GUO Y, WEI X, et al. Multi-cylinder-based hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator harvesting multiple fluid energy for self-powered pipeline leakage monitoring and anticorrosion protection[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106467.
- [8] KHAN F U, AHMAD S. Flow type electromagnetic based energy harvester for pipeline health monitoring system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 200: 112089.
- [9] 袁晰, 王晓宇, 王浩威, 等. 电压特性对压电纤维复合物驱动性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(2): 343–349.  
YUAN Xi, WANG Xiao-yu, WANG Hao-wei, et al. Effect of voltage characteristic to driving property of piezoelectric fiber composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(2): 343–349.
- [10] LI Z, JING L, WANG W, et al. The influence of pipeline thickness and radius on guided wave attenuation in water-filled steel pipelines: Theoretical analysis and experimental measurement[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(1): 361–371.
- [11] GENTILI G, KHOSRONEJAD M, BERNASCONI G, et al. Efficient modeling of multimode guided acoustic wave propagation in deformed pipelines by hierarchical model reduction[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2022, 173: 329–344.
- [12] 康永乐, 邱雷. 导波结构健康监测中损伤因子的研究和应用[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(6): 113–119.  
KANG Yong-le, QIU Lei. Research and application of damage indexes in guided wave based structural health monitoring[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(6): 113–119.
- [13] LIU C, LI Y, FANG L, et al. New leak-localization approaches for gas pipelines using acoustic waves[J]. *Measurement*, 2019, 134: 54–65.
- [14] LI Z, JING L, WANG W, et al. Guided acoustic wave interaction with flanged junctions in water-filled steel pipelines[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(5): 2824–2837.
- [15] 王送来, 吴万荣, 沈意平, 等. 基于压电纤维传感器 Lamb 波方向检测的裂纹识别方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(10): 2739–2748.  
WANG Song-lai, WU Wan-rong, SHEN Yi-ping, et al. Crack localization with directional piezoelectric fiber sensors based on Lamb wave[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(10): 2739–2748.
- [16] XIAO R, HU Q, LI J. Leak detection of gas pipelines using acoustic signals based on wavelet transform and support vector machine[J]. *Measurement*, 2019, 146: 479–489.
- [17] QUY T B, KIM J M. Crack detection and localization in a fluid pipeline based on acoustic emission signals[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107254.
- [18] YAZDEKHASTI S, PIRATLA K R, ATAMTURKTUR S, et al. Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(1): 46–55.
- [19] MEDEIROS K A R, DE OLIVEIRA F L A, BARBOSA C R H, et al. Optimization of flow rate measurement using piezoelectric accelerometers: Application in water industry[J]. *Measurement*, 2016, 91: 576–581.
- [20] OKOSUN F, CELIKIN M, PAKRASHI V. A numerical model for experimental designs of vibration-based leak detection and monitoring of water pipes using piezoelectric patches[J]. *Sensors-Basel*, 2020, 20(23): 6708.
- [21] OKOSUN F, GUERIN S, CELIKIN M, et al. Flexible amino acid-based energy harvesting for structural health monitoring of water pipes[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(5): 100434.
- [22] LI I, KUMAR A, BEARD S J, et al. State-of-the-art pipeline structural health monitoring systems[C]// *Proceeding of the 2012 IEEE Sensors*. Taipei: IEEE, 2012: 1–4.
- [23] PEAIRS D M, PARK G, INMAN D J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(2): 129–139.
- [24] NA W S. Possibility of detecting wall thickness loss using a PZT based structural health monitoring method for metal based pipeline facilities[J]. *NDT & E International*, 2017, 88: 42–50.
- [25] SHAO J, WANG T, YIN H, et al. Bolt looseness detection based on piezoelectric impedance frequency shift[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(10): 298.
- [26] HUYNH T C, DANG N L, KIM J T. Preload monitoring in bolted connection using piezoelectric-based smart interface[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(9): 2766.
- [27] DANG N L, PHAM Q Q, KIM J T. Piezoelectric-based hoop-type interface for impedance monitoring of local strand breakage in prestressed multi-strand anchorage[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(1): e2649.
- [28] 肖志达, 袁晰, 闫明洋, 等. 柔性压电纤维复合材料传感器的制备及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(2): 413–424.

- XIAO Zhi-da, YUAN Xi, YAN Ming-yang, et al. Fabrication and sensing applications of flexible piezoelectric fiber composites sensor[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(2): 413–424.
- [29] 沈杰, 宋佳畅, 周静, 等. 粘结层对压电纤维复合材料机电响应行为的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4118–4127.
- SHEN Jie, SONG Jia-chang, ZHOU Jing, et al. Effect of adhesive layer on electromechanical response behavior of macro fiber composites[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12): 4118–4127.

## Pipeline structural health monitoring application of piezoelectric fiber composite

WANG Lu<sup>1</sup>, LIU Sheng-wen<sup>1</sup>, XIE Wen-tao<sup>1</sup>, TANG Lin<sup>1</sup>, YUAN Xi<sup>2</sup>, ZHOU Ke-chao<sup>1</sup>, ZHANG Dou<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Institute of Powder Metallurgy,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Real-time structural health monitoring of pipeline is critical for engineering applications. Piezoelectric fiber composites can conform to the curved structure of pipes while maintaining the piezoelectric impedance characteristics, which attract much interest in the fields of pipeline structural health monitoring. In this work, piezoelectric fiber composites were manufactured, the effect of composites thickness on electrical impedance characteristics was studied, and the peak impedance decreased by 50% when the thickness was higher 250  $\mu\text{m}$ . Structure monitoring application verification was carried out based on the composites. The impedance sensitive features of piezoelectric fiber composites under structural damage condition were quantified by correlation coefficient deviation ( $R_C$ ) and root-mean-square deviation ( $R_M$ ), creating a upper control limit ( $U_1$ ) based on intact condition.  $R_C$  index reached 0.51 ( $U_1=0.005$ ) and  $R_M$  index reached 7.96 ( $U_1=0.63$ ) while pipe structure loaded 50 N and bolt loosened 50%, respectively. The results show that piezoelectric fiber composites are suitable for structural health monitoring of complex curved structures such as pipes due to sensitive response to changes of pipe structure stress condition and bolt loosening, and have broad application prospects.

**Key words:** piezoelectric fiber composites; flexibility; piezoelectric impedance; structural health monitoring

**Foundation item:** Project(2021YFB2012100) supported by the National Key Research and Development Program of China; Projects(52172134, U19A2087, 52102150) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2022-03-17; **Accepted date:** 2022-05-25

**Corresponding author:** YUAN Xi; Tel: +86-731-88877196; E-mail: xiyuan@csu.edu.cn

ZHANG Dou; Tel: +86-731-88877196; E-mail: dzhang@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)