第 50 卷 第 1 期：313-321 高电压技术 Vol.50, No.1: 313-321
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230208

基于非线性超声的电缆硅橡胶界面压力检测方法

方春华[1]，孙奥琪[1]，游海鑫[1]，夏　荣[2]，王昱力[2]，胡　涛[1]
（1. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002；2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074）

摘　要：电缆附件与本体之间的界面压力对电缆长期稳定运行起决定性作用。针对压力传感器测量法会损坏界面绝缘特性的问题，提出一种基于非线性超声的电缆硅橡胶界面压力无损检测方法。首先对超声波在硅橡胶-交联聚乙烯界面的传播特性进行分析，得到非线性系数与界面压力的关系。然后基于脉冲反射法搭建非线性超声试验平台，以平板硅橡胶和交联聚乙烯为研究对象，对其界面压力进行非线性超声检测。理论与试验结果均表明，随界面压力增大，界面一次回波幅值减小，回波时间减小，非线性系数增加。该结果表明非线性超声可以有效评价电缆硅橡胶复合界面压力状态，为后续电缆附件曲面结构的界面压力检测提供有力支撑。
关键词：电缆；硅橡胶；非线性超声；界面压力；非线性系数

Interface Pressure Detection Method of Cable Silicone Rubber Based on Nonlinear Ultrasonic

FANG Chunhua[1], SUN Aoqi[1], YOU Haixin[1], XIA Rong[2], WANG Yuli[2], HU Tao[1]
(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The interface pressure between a cable and its accessories plays a decisive role in the long-term stable operation of the cable. The pressure sensor measurement method can damage the interface insulation characteristics, thus a non-destructive testing method based on ultrasonic non-linear effects was proposed. Firstly, the propagation characteristics of ultrasonic waves at the silicone rubber-cross-linked polyethylene interface were analyzed. The relationship between the non-linear coefficient and the interfacial pressure was obtained. Then a non-linear ultrasonic test platform was built based on the pulse reflection method. Moreover, the interface pressure of flat silicone rubber and cross-linked polyethylene was examined by non-linear ultrasonic testing. Both theoretical and experimental results show that, as the interface pressure increases, the interface primary echo amplitude decreases, the echo time decreases, and the non-linear coefficient increases. The results show that non-linear ultrasound can effectively evaluate the interfacial pressure state of cable silicone rubber composite, which can provide strong support for the subsequent interfacial pressure detection of the curved structure of cable accessories.
Key words: cable; silicone rubber; non-linear ultrasound; interfacial pressure; non-linear coefficient

0　引言

随着国内城市化进程推动持续深化，城市电网中电缆设备规模不断攀升。据统计，除外力破坏外，70%的电缆故障由电缆附件故障引起[1]。电缆附件与本体间的硅橡胶-交联聚乙烯(cross-linked polyethylene，XLPE)复合界面因电场应力集中，发生局部放电导致绝缘击穿，使电缆附件成为电缆线路故障高发部位[2]。研究表明电缆附件与本体间的界面压力分布在 0.10~0.25 MPa 之间可以保证电缆线路的稳定运行[3]。

目前电缆附件与本体界面压力的主要检测方法为传感器法和有限元分析法[2,4]。内置传感器法是在电缆附件与本体之间预置压力传感器，传感器检测界面压力变化并将结果输出[5-7]。由于此法不仅对压力传感器的大小规格要求较高，而且会破坏电缆附件与本体之间的绝缘特性，不适用于 10 kV 以上电压等级的电缆附件界面压力测量。外置光纤曲率传感器法是基于电缆附件外曲率–径向位移–内界面压力关系模型标定光纤传感器，沿附件外径切向将其贴敷在附件外层进行测量曲率进而获得界面压力值[8-9]。但此法目前的研究对象仅为 10 kV 电缆附件且传感器测量的重复性和稳定性还处于实验室优化

基金资助项目：电网环境保护国家重点实验室开放基金(GYW51202201415)。
Project supported by Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection(GYW51202201415).

阶段。有限元分析法是利用仿真软件建立电缆接头三维模型分析过盈量、温度等因素对界面压力的影响[10-11]。有限元分析虽然方法简单但仿真参数与实际电缆存在误差，仿真结果需要和试验结果进行对比验证。综上所述，电缆附件界面压力现有检测方法均存在各自的局限性，因此电缆运检领域亟需引入一种新方法来检测电缆附件界面压力。

近年来，非线性超声技术越来越多地被应用到应力检测中，根据应力类型分为残余应力[12]、拉伸应力[13]、粘接力[14]、内力[15]和接触界面应力[16]等。1989 年，Severin 等人通过试验验证了超声波经过固体接触界面会产生非线性效应，具体表现为二次谐波或高次谐波的产生，且二次谐波的产生与压力有关[17]。Kim 等人研究发现超声波通过固体接触界面产生的二次谐波随界面压力先增大后减小，在特定的压力值下达到最大值[16]。焦敬品等人基于透射法利用线性超声和非线性超声这 2 种方法对金属接触界面压力进行检测，结果表明超声非线性系数随界面压力增大而减小[18]，而且在小压力变化范围内，非线性特征参数(非线性系数)比线性超声特征参数(一阶刚度系数)对界面压力的变化更敏感[19]。雷正伟等人利用非线性超声技术定量测量金属基复合材料的非金属层应力，结果表明利用二次谐波的非线性系数可以实现应力测量，且非线性系数随拉压力增大先增大后减小[20]。

针对电缆附件界面压力现有测量方法所存在的局限性，本文提出了一种基于非线性超声的电缆附件界面压力无损检测方法。首先对超声波在硅橡胶-XLPE 界面的传播机理进行仿真分析，得到非线性系数与界面压力之间的关系，然后将电缆附件与本体的曲面结构简化为平面结构，以硅橡胶、XLPE 为研究对象，基于超声脉冲反射法搭建非线性超声试验平台，对其界面压力进行非线性超声检测，得到不同压力下的超声响应变化规律，进而对其界面接触状态进行评价。

1 有限元仿真

1.1 接触声学非线性原理

接触声学非线性是导致超声波在传播过程中产生谐波的机制之一，其主要来源于 2 种材料的界面或接触面的应力-应变非线性。施加压力时，接触界面发生大强度碰撞和变形，从而产生弹性和塑性形变。因此，界面压力-位移关系变成非线性[16]，可以表示为：

$$p(h)=p_0-K_1(h-h_0)+K_2(h-h_0)^2 \tag{1}$$

$$K_1=Cp^m \tag{2}$$

$$K_2=\frac{1}{2}mC^2p^{2m-1} \tag{3}$$

式中：p 和 h 分别为压强和界面间隙位移；p_0 为静态接触压强，h_0 为 p_0 处的初始间隙，即 $p_0=p(h_0)$；K_1 和 K_2 分别为线性和非线性界面刚度；C 和 m 是和界面粗糙度有关的常数。

超声纵波在接触界面为一维传播时，反射波 U_R 表达式[21]为：

$$U_R=-\frac{K_2A_0^2}{K_1(1+4K_1^2/(\rho c\omega)^2)}-\frac{A_0\sin(\omega t+\delta_1)}{\sqrt{1+4K_1^2/(\rho c\omega)^2}}+\frac{K_2A_0^2\sin(2\omega t-2\delta_1+\delta_2)}{\rho c\omega(1+4K_1^2/(\rho c\omega)^2))\sqrt{1+K_1^2/(\rho c\omega)^2}} \tag{4}$$

式中：A_0 为入射波位移振幅；c 为纵波波速；ρ 为材料密度；ω 为入射波频率；$\delta_1=\arctan(\frac{\rho c\omega}{2K_1})$；$\delta_2=\arctan(\frac{K_1}{\rho c\omega})$。

反射波中的基波幅值 A_1 与二次谐波幅值 A_2 的表达式分别为：

$$A_1=\frac{A_0}{\sqrt{1+4K_1^2/(\rho c\omega)^2}} \tag{5}$$

$$A_2=\frac{K_2A_0A_1}{\rho c\omega\sqrt{1+4K_1^2/(\rho c\omega)^2}\sqrt{1+K_1^2/(\rho c\omega)^2}} \tag{6}$$

基于反射波中二次谐波幅值与基波幅值平方的比值，得到超声反射波的相对非线性系数 β 为：

$$\beta=\frac{A_2}{A_1^2}=\frac{K_2}{\rho c\omega\sqrt{1+K_1^2/(\rho c\omega)^2}} \tag{7}$$

由式(7)可知，非线性系数与界面的二阶刚度呈正比，而接触界面刚度随界面压力变化而变化，因此可用非线性系数来表征界面压力大小。

1.2 模型建立

考虑实际接触时界面两侧物体表面的粗糙度会影响实际接触面积，基于白光干涉试验测量硅橡胶表面粗糙度，其表面微观形貌如图 1 所示。在 x 方向上选择一条直线测量其表面平均粗糙度为 0.801 μm，波峰最大值为 5 μm，波峰之间的距离为 20 μm。硅橡胶表面利用一系列间隔为 0.02 mm、半径为 0.005 mm 的半圆来表征其界面粗糙度[22]。而 XLPE 表面粗糙度比硅橡胶小的多，可视作一个光

滑平面。硅橡胶和 XLPE 材料参数设置如表 1 所示。仿真模型硅橡胶的尺寸(长×宽)为 6 mm×15 mm，XLPE 的尺寸为 6 mm×8 mm。

硅橡胶-XLPE 界面压力的非线性超声检测涉及声场和应力场的耦合，本文在固体力学(弹性波)模块下采用顺序耦合的方式进行声场和应力场的耦合。首先在硅橡胶-XLPE 界面设置接触对，然后在硅橡胶上表面添加向下的压力载荷使硅橡胶-XLPE 界面形成接触应力，最后在 XLPE 下表面添加固定约束边界条件进行稳态计算，将稳态计算得到变形几何模型作为声场计算的初始几何模型。在进行硅橡胶-XLPE 界面压力分析时，在硅橡胶上表面添加位移载荷模拟超声波激励源。在进行 XLPE-硅橡胶界面压力分析时，在 XLPE 下表面添加位移载荷模拟超声波激励源。激励源信号中心频率为 2.25 MHz[23]。模型两侧设置低反射边界，以减少对接收信号的干扰。信号接收点设置在距离激励源 0.1 mm 处。仿真模型网格最大尺寸按照波长的 1/8 划分，时间步长为 0.05 μs，仿真总时长为 45 μs。

图 2 为硅橡胶-XLPE 界面压强为 0 MPa 和 0.2 MPa 时的超声波位移云图。由于硅橡胶-XLPE 界面未接触部分为硅橡胶-空气界面，且硅橡胶与空气之间的声阻抗差较大，而硅橡胶与 XLPE 之间的声阻抗差较小，故超声波在到达硅橡胶-空气界面时，几乎全部的声波被反射，到达硅橡胶–XLPE 界面时，部分声波被反射，部分声波被透射。图 3 为 XLPE-硅橡胶界面压强为 0 MPa 和 0.2 MPa 时的超声波位移云图。同理超声波经 XLPE-硅橡胶界面，大部分声波被反射。

1.3 界面非线性系数与压力关系

图 4 为不同压力下硅橡胶-XLPE 界面、XLPE-硅橡胶界面一次回波时域图。随着压力增大，界面一次回波幅值略微减小，回波时间提前。图 4(a)较图 4(b)幅值变化大，是由于硅橡胶模型尺寸更大，超声波传播时间更长。由于超声波在硅橡胶中的衰减比 XLPE 小[24]，故图 4(a)中的反射波幅值大于图 4(b)中的值。将不同压力值下的界面回波曲线进行傅里叶变换得到频谱，并将激励源频谱和界面一次回波频谱对比，如图 5 所示。超声波经过界面反射后基波幅值减小，且产生二次谐波，说明超声波与界面的非线性特征相互作用产生非线性效应。基于界面反射波频谱提取在基频和倍频附近出现的峰值分别作为基波幅值和二次谐波幅值[25]，然后根据式

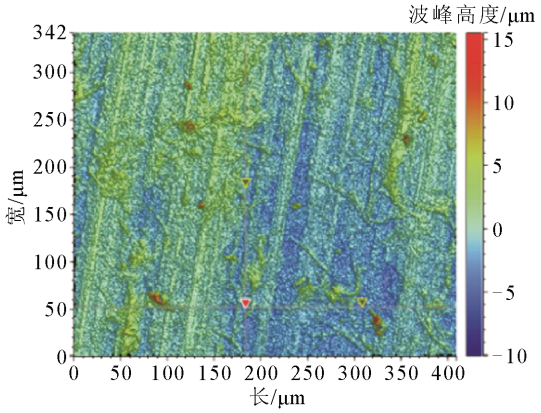


图 1 硅橡胶表面微观形貌

Fig.1 Silicone rubber surface micromorphology

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/MPa	泊松比
硅橡胶	1050	4.5	0.488
XLPE	930	130	0.320

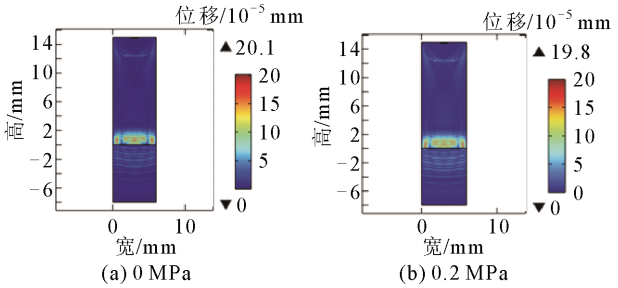


图 2 硅橡胶-XLPE 界面超声波位移云图(21 μs)

Fig.2 Ultrasonic displacement cloud charts of silicone rubber-XLPE interface(21 μs)

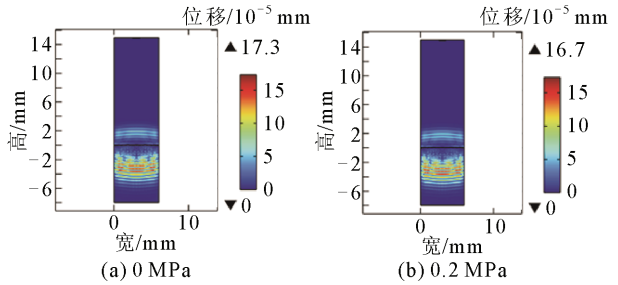


图 3 XLPE-硅橡胶界面超声波位移云图(9 μs)

Fig.3 Ultrasonic displacement cloud charts of XLPE-silicone rubber interface(9 μs)

(9)计算界面相对非线性系数与压力关系，如图 6 所示。随界面压力增大，非线性系数增大。对比图 6(a)和图 6(b)，非线性系数的差异可能是由于硅橡胶和 XLPE 表面粗糙程度的不同引起的。

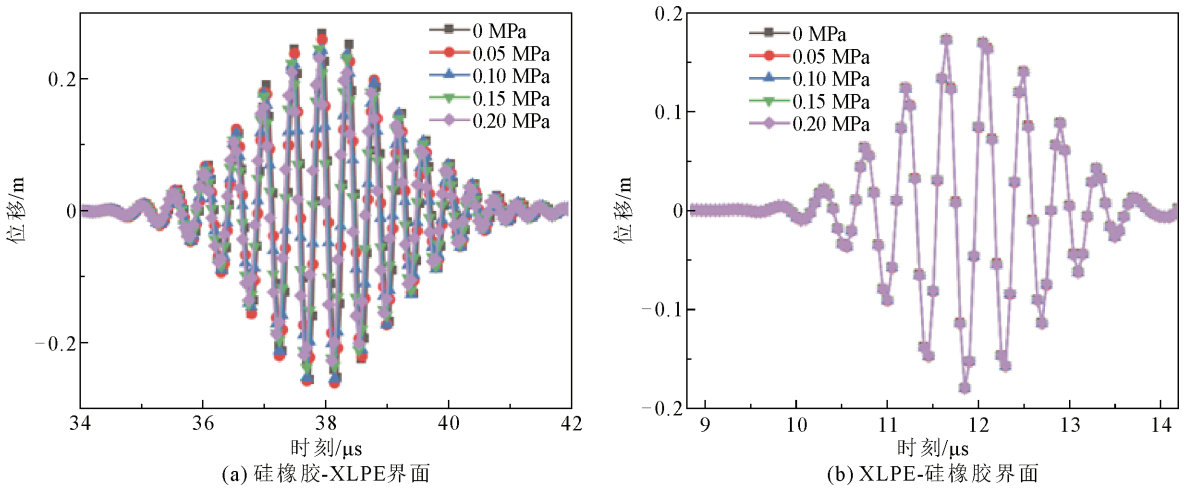


图 4 界面反射波时域波形

Fig.4 Time domain waveforms of reflected waves at the interface

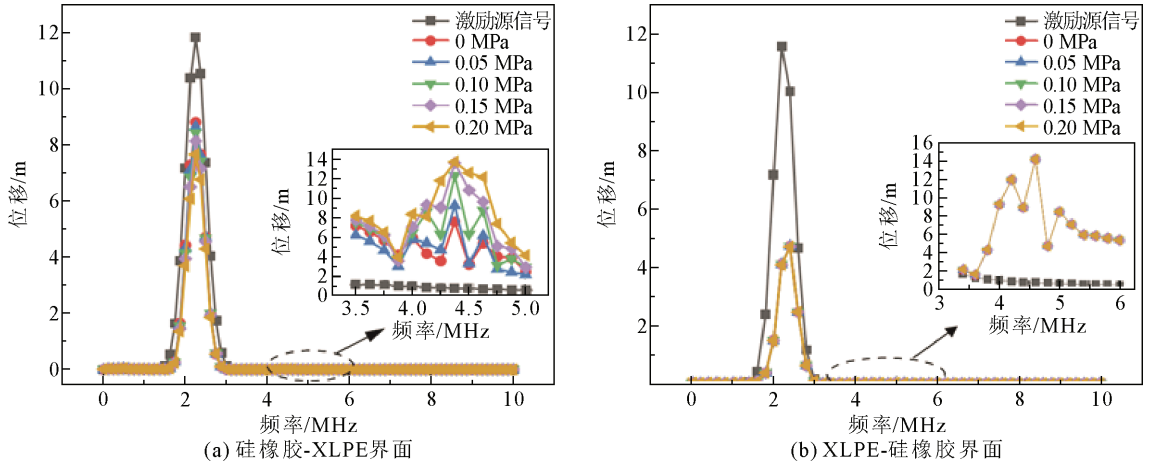


图 5 界面反射波频谱

Fig.5 Spectrogram of reflected waves at the interface

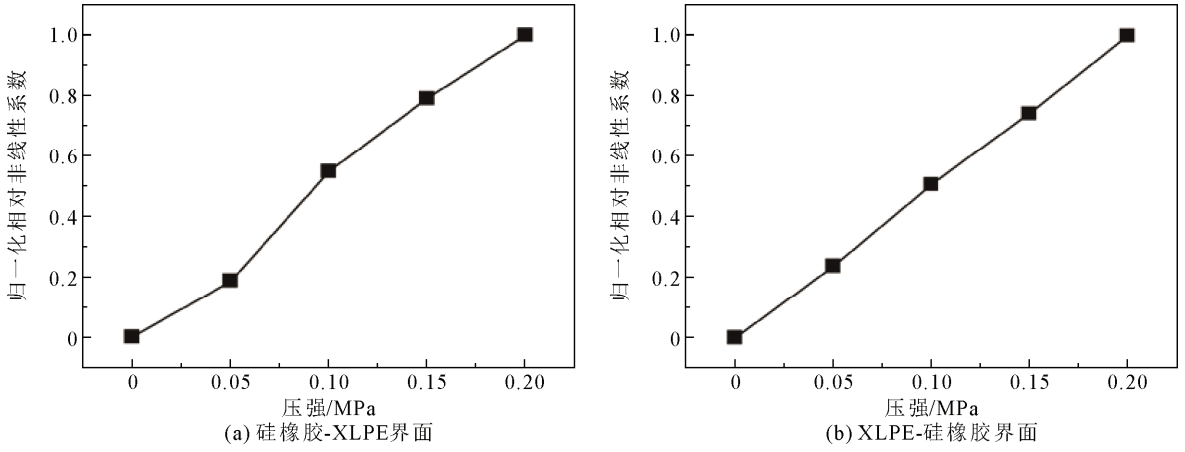


图 6 界面非线性系数与压力关系波形图

Fig.6 Waveforms of interfacial nonlinear coefficients as a function of pressure

2 试验样品与系统

2.1 试验样品

基于某公司生产的 110 kV 预制式电缆中间接头实际结构，将圆柱形实物简化为平板试样。试验样品由电缆附件制造厂家采用标准生产设备与原材料制备而成，其中样品所使用的硅橡胶材料和 XLPE 绝缘材料的加工工艺与 110 kV 预制式电缆中间接头相同。

硅橡胶的尺寸为长 100 mm×宽 100 mm×高 15 mm，XLPE 的尺寸为长 100 mm×宽 100 mm×高 8 mm。

2.2 试验系统与方法

如图 7 所示，试验系统由 RAM-5000 SNAP 非线性高能超声测试系统主机、50 Ω 阻抗匹配器、双工器、低通滤波器组、带通滤波器组、信号选择器、示波器、计算机、超声换能器、液压装置和压力传感器组成。

由系统主机激发的信号源经低通滤波器组后其中的高频信号被滤除，以确保界面反射波中的谐波信号与输入信号无关。包含所有频率成分的一次回波信号经双工器直接传回系统主机接收端口 1，谐波信号经带通滤波器组传回系统主机接收端口 2。

硅橡胶属于高声衰减材料，对同一频率的超声波而言，纵波比横波的衰减小且穿透能力强，因此选择超声纵波进行试验。为更多地接收界面反射波中的谐波分量，本试验选择奥林巴斯公司的纵波超声换能器，其中心频率为 2.25 MHz，换能器的频带宽度满足试验需求。

本试验通过计算机软件设定系统产生 2.25 MHz、8 个周波数的汉宁窗调制信号。在超声换能器与被测样品表面均匀涂抹甘油来减小超声波的能量衰减和因耦合剂引入的非线性。

因超声换能器与式样表面的耦合情况、试验设备等因素会影响试验测量结果，故需验证试验系统的可靠性。无外界压力时，硅橡胶-XLPE 界面压强值为 0.002 MPa，保持压力传感器数值不变，逐渐增大系统的激励电压，得到不同激励电压下的基波幅值的平方 A_1^2 和谐波幅值 A_2 的关系，如图 8 所示。拟合曲线计算式 $A_2=1.22\times10^{-3}A_1^2+1.8005\times10^{-3}$，相关系数 $R^2=0.993$。可知当激励电压增大时，A_2 与 A_1^2 有较好的线性关系，试验系统稳定性较高。

3 试验结果及分析

本文采用上述试验装置与试验方法对硅橡胶-XLPE 界面的接触压力进行非线性超声检测。每组试验在相同的耦合条件下每个压力点测量 5 次取平均值。

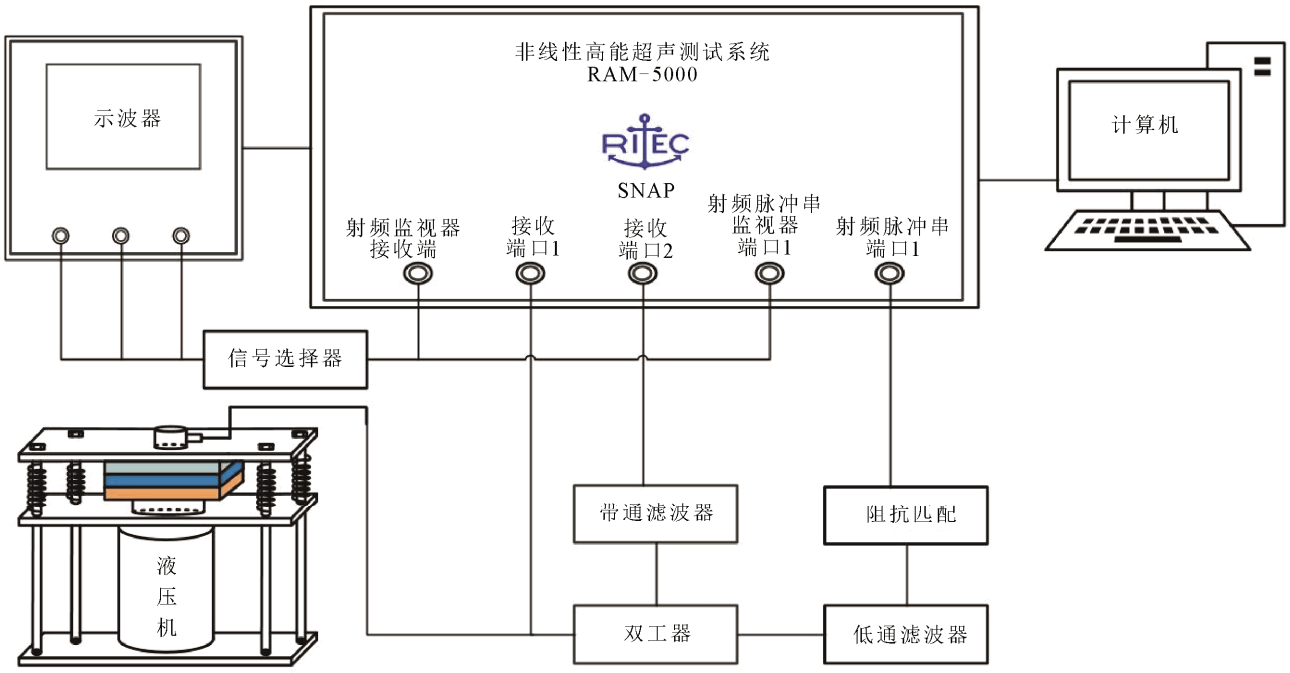


图 7 非线性超声试验系统

Fig.7 Non-linear ultrasonic test system

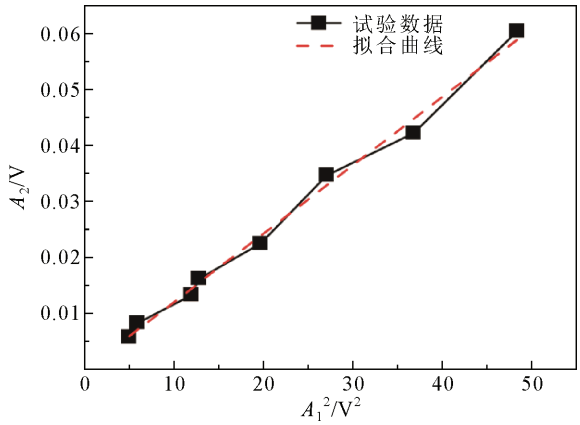


图 8 二次谐波幅值 A_2 与 A_1^2 的关系

Fig.8 Relationship between the second harmonic amplitude A_2 and A_1^2

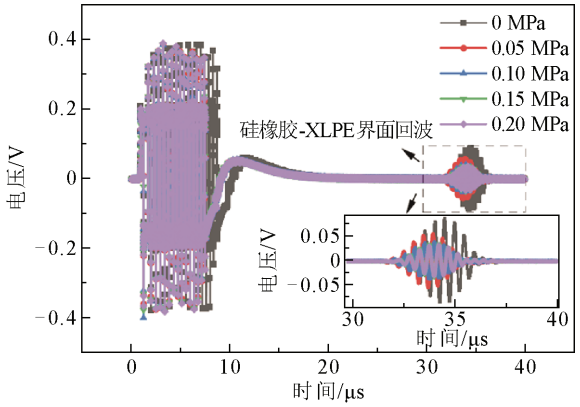


图 9 硅橡胶-XLPE 界面反射波

Fig.9 Wave reflection at the silicone rubber-XLPE interface

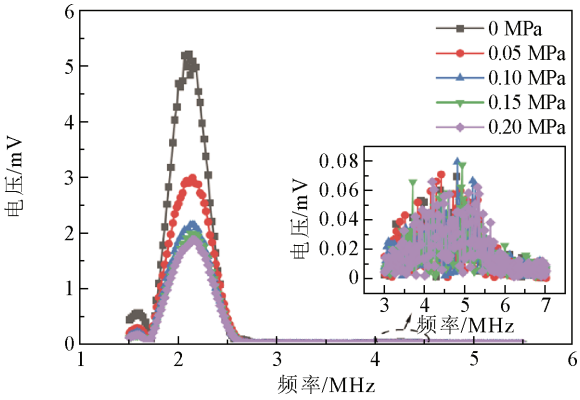


图 10 硅橡胶-XLPE 界面反射波频谱

Fig.10 Reflected wave spectrum at the silicone rubber-XLPE interface

3.1 硅橡胶-XLPE 界面

基于时间、声速和传播距离的关系进行图 9 中界面反射波波形验证，计算式为：

$$2h = v(t_2 - t_1) \tag{8}$$

式中：h 为硅橡胶式样厚度；v 为超声波在硅橡胶中传播的声速；t_1=0.732 μs 为前沿信号时间；t_2=31.448 μs 为反射信号接收时间。经计算可以确定图 9 中位于 30~40 μs 间的时域信号是硅橡胶界面的一次回波信号。

如图 9 所示，随着界面接触压力增大，一次回波信号幅值逐渐减小，加压使界面实际接触面积增大，超声波透射增强，反射减弱。且随着压力增大，界面一次回波时间略微提前，硅橡胶内部存在应力，超声波在其内部的传播速度变快。

对图 9 中一次回波信号进行傅里叶变换得到如图 10 所示频谱。随着界面压力增大，基波幅值整体呈下降趋势。并且在 0~0.10 MPa 范围内，基波幅值下降较快，由于弹性材料的半导电硅橡胶在较小压力作用下，表面的微凸体发生较大形变，界面实际接触面积增加较快，透射增强速度变快，反射减弱，速度也随之变快。在 0.10~0.20 MPa 间，基波幅值下降的幅度较之前减弱，由于压力已经极大程度改变了界面接触状态，若想使界面接触面积增加更多，需要考虑其他因素。

基于图 10 所示频谱提取基波幅值和二次谐波幅值进行计算，得到归一化相对非线性系数随压力变化关系如图 11 所示。随界面压力增大，相对非线性系数先增大后趋于稳定。且相比于 0.10~0.20 MPa 范围的非线性系数变化速度，0~0.10 MPa 范围内，非线性系数上升速度更快。在此压力范围内的基波幅值变化速度快，基波幅值变化主导非线性系数的变化。

3.2 XLPE-硅橡胶界面

由于本文所研究的接触界面由 2 种不同的材料构成，为探究材料是否对试验结果有影响，本文将超声换能器放置于 XLPE 表面再次进行试验。经式(8)验证，图 12 中波形为 XLPE 界面一次回波。

如图 12 所示，随着压力的增大，一次回波信号幅值逐渐减小。在压力的作用下，界面间的实际接触面积增大，透射波增强，反射波减弱。并且界面一次回波时间随压力增大而略微减小，这是由于压应力使超声波在材料内部传播速度增大。

如图 13 所示，4~5 MHz 区间的幅值明显高于两侧的值，说明超声波与界面的非线性特征相互作用产生了谐波，且因 XLPE 的声衰减较小，故谐波信号较稳定。随着界面压力增大，基波幅值逐渐减小，反射波能量减弱。而谐波幅值变化不明显，是

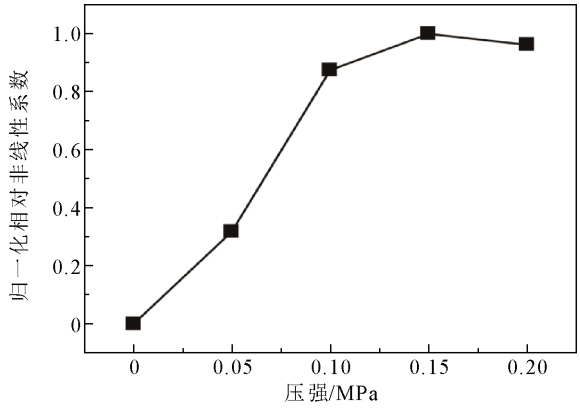


图 11 硅橡胶-XLPE 界面非线性系数与压强关系

Fig.11 Nonlinear coefficient of silicone rubber-XLPE interface versus pressure

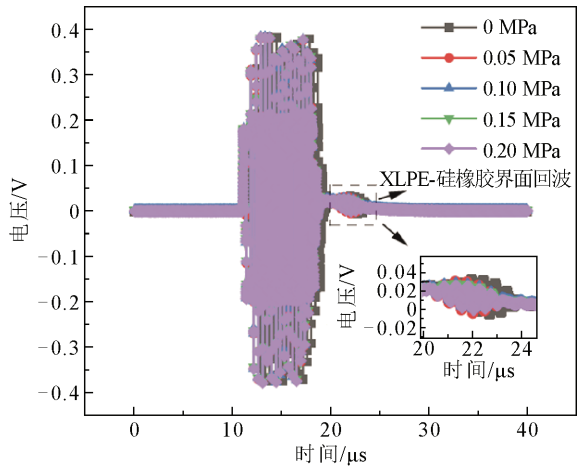


图 12 XLPE-硅橡胶界面反射波

Fig.12 Reflected waves at the XLPE-silicone rubber interface

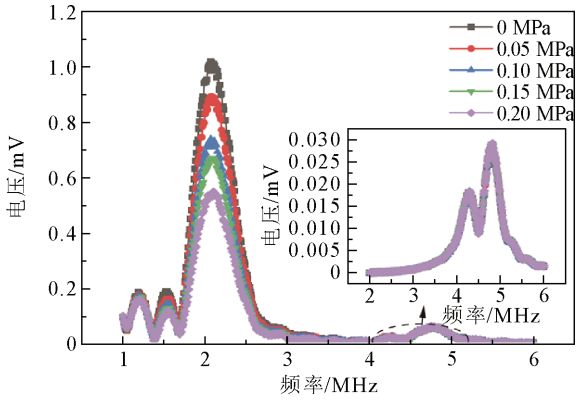


图 13 XLPE-硅橡胶界面反射波频谱

Fig.13 Reflected wave spectrum at the XLPE-silicone rubber interface

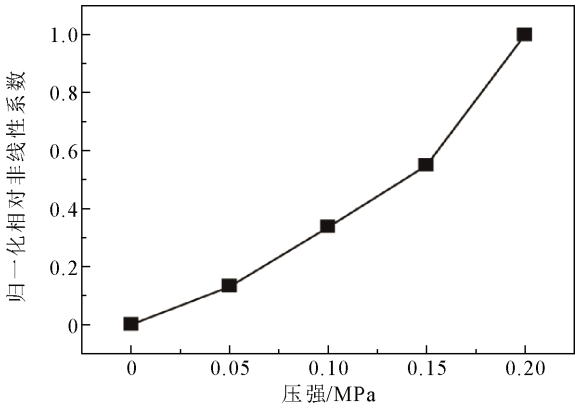


图 14 XLPE-硅橡胶界面非线性系数与压强关系

Fig.14 Nonlinear coefficient of XLPE - silicone rubber interface versus pressure

由于谐波幅值变化量级太小，不易直接观察。

界面非线性系数随压力变化关系如图 14 所示。随着界面压力增大，相对非线性系数整体呈增加趋势，由于 $\beta=A_2/A_1^2$，基波幅值变化主要影响相对非线性系数变化。并且在等压力变化时，相对非线性系数增大得越来越快，由于界面微观结构在压力作用下，其接触状态变化越来越大。

3.3 界面非线性系数对比

将界面非线性系数的理论值与试验值对比，如图 15 所示。随压力增大，理论值和试验值变化趋势整体相同却又存在差异。这种差异一方面可能是由于硅橡胶-XLPE 界面实际接触状态更复杂，而非线性超声对界面微观接触状态较敏感；另一方面可能是由于实验材料由于制造和加工过程的影响，材料性质存在一定的不均匀性，最终导致非线性系数的

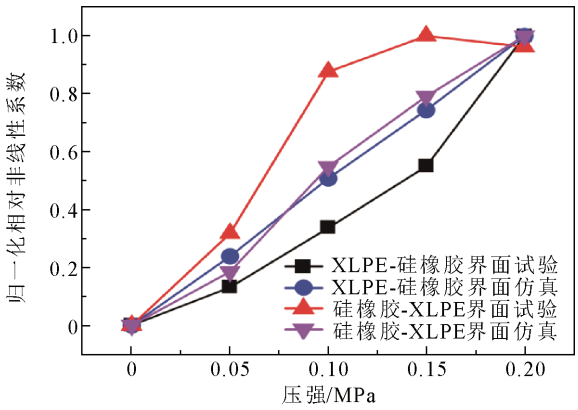


图 15 理论与试验界面非线性系数对比

Fig.15 Comparison of theoretical and experimental interface non-linearity coefficients

理论值和实验值之间存在差异。

然而超声波分别从硅橡胶表面和 XLPE 表面入

射到二者接触界面，所得界面非线性系数随压力变化规律亦有略微不同。这是由于硅橡胶在压力作用下，0.15 MPa 后界面非线性系数有减小迹象，而 XLPE 界面在试验压力范围内呈增长趋势，且变化速度越来越快。由于弹性材料的硅橡胶表面微凸体在压力作用下发生变形，使界面接触面积达到阈值所需压力值比 XLPE 小，故先开始减小。

4 结论

本文通过仿真和试验对硅橡胶-XLPE 界面压力进行非线性超声检测，结果表明：

1）随压力增大，界面时域一次回波幅值减小，回波时间减小，界面相对非线性系数增大。

2）对于由 2 种不同材料构成的接触界面，超声波分别从两侧垂直入射至界面，非线性超声检测结果有略微区别，但整体变化趋势大致相同。

3）利用相对非线性系数可以实现对平板硅橡胶界面压力状态的有效评价，为实际电缆附件与本体界面压力检测提供一种新思路。

参考文献 References

[1] 刘 昌，惠宝军，傅明利，等. 机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J]. 高电压技术，2018，44(2)：518-526.
LIU Chang, HUI Baojun, FU Mingli, et al. Influence of mechanical stress on the operation reliability of silicone rubber high voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 518-526.

[2] 崔江静，余 栋，王 霞，等. 电缆本体与附件界面压力测量方法的研究进展[J]. 绝缘材料，2018，51(3)：1-6.
CUI Jiangjing, YU Dong, WANG Xia, et al. Research progress of measuring method for interface pressure between cable and accessory[J]. Insulating Materials, 2018, 51(3): 1-6.

[3] 王 霞，余 栋，段胜杰，等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术，2018，44(8)：2710-2716.
WANG Xia, YU Dong, DUAN Shengjie, et al. Dealing with some key design problems in HV cable accessory[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2710-2716.

[4] 王子康，周 凯，朱光亚，等. 冷热循环对电缆附件界面压力及带材材料特性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2198-2207.
WANG Zikang, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Effect of thermal cycling on the interface pressure of cable accessories and their strips' material properties[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2198-2207.

[5] DANG C. Effects of aging on dielectric interfaces of cable accessories[C]//Proceedings of the Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington, USA: IEEE, 1998: 554-557.

[6] 贾志东，张雨津，范伟男，等. 10 kV XLPE 电缆冷缩中间接头界面压力计算分析[J]. 高电压技术，2017，43(2)：661-665.
JIA Zhidong, ZHANG Yujin, FAN Weinan, et al. Analysis of the interface pressure of cold shrinkable joint of 10 kV XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 661-665.

[7] 陈 杰，胡丽斌，刘 洋，等. 基于压电传感的电缆接头界面压力测量研究[J]. 压电与声光，2021，43(1)：125-129.
CHEN Jie, HU Libin, LIU Yang, et al. Study on interface pressure measurement of cable connector based on piezoelectric sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(1): 125-129.

[8] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 双光纤温度补偿法测量高温下电缆与附件界面压力的方法[J]. 高电压技术，2023，49(7) ：3072-3081.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. Double-optical-fibre temperature compensation method used for interface pressure measurement between cable and accessory at high temperature[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3072-3081.

[9] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 外置光纤光栅传感器测量电缆附件界面压力的方法研究[J]. 高电压技术，2022，48(1)：38-46.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. External fiber grating sensor used for measurement of interface pressure between cable and accessory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 38-46.

[10] 张东升，韩永胜，刘红欣，等. 高压电缆接头界面压力测试研究[J]. 高电压技术，2007，33(1)：173-176.
ZHANG Dongsheng, HAN Yongsheng, LIU Hongxin, et al. Determination of the pressure distribution at the XLPE cable-rubber interface in a self-pressurized joint[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 173-176.

[11] 马永其，郑 平，韩 轩，等. 安装运行中电缆终端绝缘界面压力的测试分析[J]. 高电压技术，2011，37(2)：347-353.
MA Yongqi, ZHENG Ping, HAN Xuan, et al. Measurement and analysis of insulated interfacial pressure of cable termination in installation & operation[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 347-353.

[12] 杨雨龙，吴运新，龚 海，等. 2219 铝合金残余应力非线性超声表面波检测实验研究[J]. 热加工工艺，2020，49(16)：45-49.
YANG Yulong, WU Yunxin, GONG Hai, et al. Experimental study on non-linear ultrasonic surface wave detection of residual stress of 2219 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 45-49.

[13] 阎红娟，徐春广，肖定国，等. 金属材料拉伸应力非线性超声特性研究[J]. 机械工程学报，2016，52(6)：22-29.
YAN Hongjuan, XU Chunguang, XIAO Dingguo, et al. Research on nonlinear ultrasonic properties of tension stress in metal materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 22-29.

[14] 陈建军，姜文华，水永安. 各向同性固体界面非线性反射的实验研究[J]. 声学学报，1999，24(2)：137-142.
CHEN Jianjun, JIANG Wenhua, SHUI Yongan. Experimental studies of nonlinear reflection on isotropic solid interface[J]. Acta Acustica, 1999, 24(2): 137-142.

[15] 张晨晨. 基于非线性超声理论的销轴内力监测研究[D]. 大连：大连理工大学，2021.
ZHANG Chenchen. Research on monitoring the internal force of pins based on nonlinear ultrasonic theory[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2021.

[16] KIM Y, CHOI S, JHANG K Y, et al. Experimental verification of contact acoustic nonlinearity at rough contact interfaces[J]. Materials, 2021, 14(11): 2988.

[17] SEVERIN F M. Experimental observation of acoustic demodulation in reflection from a solid-solid interface[J]. Soviet Physics-Acoustics, 1989, 35(4): 447-448.

[18] 焦敬品，曾宪超，张 强，等. 基于微观模型分析的承压粗糙界面接触状态超声评价方法[J]. 机械工程学报，2011，47(17)：78-83.
JIAO Jingpin, ZENG Xianchao, ZHANG Qiang, et al. Micromechanical model of rough surface for evaluation of acoustic properties of pressure interfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,

47(17): 78-83.

[19] 焦敬品，曾宪超，刘文华，等. 承压界面接触特性超声检测[J]. 北京工业大学学报，2012，38(6)：807-812.
JIAO Jingpin, ZENG Xianchao, LIU Wenhua, et al. Ultrasonic testing on contact state of pressure interfaces[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(6): 807-812.

[20] 雷正伟，刘　福，米　东，等. 非线性超声理论在金属基复合材料结构应力检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器，2009(3)：87-88，91.
LEI Zhengwei, LIU Fu, MI Dong, et al. Application of nonlinear ultrasonic in stress testing of MMCS[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(3): 87-88, 91.

[21] BIWA S, NAKAJIMA S, OHNO N. On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness[J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 71(4): 508-515.

[22] WANG S, YAO X F, YANG H, et al. Measurement and evaluation on contact stress at the rubber contact interface[J]. Measurement, 2019, 146: 856-867.

[23] 王若丞，康洪玮，贺云逸，等. 电缆接头硅橡胶材料内部缺陷的超声检测研究[J]. 绝缘材料，2021，54(4)：102-108.
WANG Ruocheng, KANG Hongwei, HE Yunyi, et al. Research on ultrasonic testing of internal defects in silicone rubber materials for cable joints[J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 102-108.

[24] 倪　辉，吴旭涛，余海博，等. 10 kV 交联聚乙烯电缆中超声波传播规律[J]. 应用声学，2020，39(4)：589-597.
NI Hui, WU Xutao, YU Haibo, et al. The propagation characteristics of ultrasonic wave on 10 kV XLPE cable[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(4): 589-597.

[25] 冯　伟，万楚豪，刘　斌，等. 7075 铝合金疲劳损伤的多点快速非线性超声检测[J]. 机械工程学报，2018，54(10)：23-28.
FENG Wei, WAN Chuhao, LIU Bin, et al. Multi-point rapid nonlinear ultrasonic inspection on fatigue damage of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 23-28.



方春华(通信作者)
1980—，男，博士，副教授
主要从事高电压试验技术、绝缘子检测和电力设备状态检测研究
E-mail: fang107531@163.com

FANG Chunhua
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-02-20　修回日期　2023-06-15　　编辑　曾文君