

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413060

# 基于高纯石墨杆的纵向模态超声导波测温方法研究\*

王婉儿<sup>1</sup>, 郑相锋<sup>2</sup>, 张新梦<sup>1</sup>, 高翔<sup>3</sup>, 刘秀成<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124; 2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司 北京 100070;  
3. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124)

**摘要:**针对密闭空间内的高温场温度测量需求,提出一种基于高纯石墨杆的纵向模态超声导波测温方法。利用考虑温度影响的频散方程,分析了温度影响导波波速的主要因素,优选了适用于温度测量的激励频率和模式。通过建立温度非均匀分布波导杆中导波信号渡越时间随温度变化规律的预测模型,计算得到石墨杆中的准确的回波渡越时间。开展1000℃范围内导波测温实验,验证了预测模型的正确性。实验结果表明:激励频率为30 kHz的L(0,1)模式导波测温的准确度达到了10℃以内,且多次实验重复性较好。本文的研究证明了超声导波方法的高温测量能力,为高温场温度测量提供了一种可行的解决方案。

**关键词:** 超声导波; 温度测量; 石墨杆; 纵向模态

中图分类号: TH811 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

## Research on temperature measurement method based on longitudinal mode ultrasonic guided waves using high-purity graphite rods

Wang Wan'er<sup>1</sup>, Zheng Xiangfeng<sup>2</sup>, Zhang Xinmeng<sup>1</sup>, Gao Xiang<sup>3</sup>, Liu Xiucheng<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd, Beijing 100070, China;

3. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To meet the temperature measurement requirements in a confined high-temperature environment, a longitudinal mode ultrasonic guided wave temperature measurement method based on a high-purity graphite rod is proposed. By considering the temperature-dependent dispersion equation, the main factors affecting the wave velocity due to temperature are analyzed, and suitable excitation frequency and modes for temperature measurement are selected. A prediction model for the variation in the guided wave signal transit time with temperature in a waveguide rod with non-uniform temperature distribution is established, allowing for the calculation of accurate echo transit times in the graphite rod. Temperature measurement experiments using guided waves within the range of 1000℃ were conducted to verify the model's accuracy. The experimental results demonstrate that the temperature measurement accuracy of L(0,1) mode guided waves with an excitation frequency of 30 kHz is within 10℃, with good repeatability across multiple trials. The research in this paper proves the high-temperature measurement capability of ultrasonic guided wave, providing a feasible solution for temperature measurement in extrem high-temperature environments.

**Keywords:** ultrasonic guided waves; temperature measurement; graphite rod; longitudinal mode

## 0 引言

工业领域中,密闭空间内的高温场温度分布测量有着广泛的需求<sup>[1]</sup>,例如:作为炼钢电弧炉核心部件的石墨

电极工作时局部温度最高可达2000℃<sup>[2]</sup>。当石墨电极进行高温煅烧时,需要及时对炉中温度进行检测,避免因温度异常变化导致的能源损耗。目前工业上常用的测温方法以热电偶和辐射温度计为主<sup>[3]</sup>,热电偶具有灵敏度高、精确度高的优点,但在高温环境下,热电偶面临材料

易氧化问题和漂移影响,难以进行长期使用,辐射温度计在测量范围、数据处理和数字显示方面有了显著改进,但是由于受到烟气、雾气等因素的影响,要实现精确测量仍然十分困难。

超声导波测温因其具有可以实现非接触测量和测温范围宽等优点,被广泛应用于工业中的高温场温度测量<sup>[4-6]</sup>。其原理是:对于固定长度的波导结构,超声导波波速与介质温度相关,通过测量导波的渡越时间可间接测量介质及其所处环境的温度<sup>[7]</sup>。在超声导波测温领域,国内外已开展了大量的研究。Periyannan 等<sup>[8]</sup>以碳化硅材质的金属丝作为波导材料,利用弯曲波导同时实现熔炉内多个高度位置的温度测量,工作温度可达1 100℃。Wong 等<sup>[9]</sup>实现了一种基于不锈钢波导条测温范围在200℃的超声测温方法,测温精度为(±0.1%)。Liang 等<sup>[10]</sup>设计制作了一种使用蓝宝石作为波导的超声温度传感器,并搭建了一套高功率半导体激光器加热系统,可工作在1 500℃~2 600℃温度范围内,传感器动态响应时间约2.7 s。刘良明等<sup>[11]</sup>提出了一种基于超声导波纵向模态的温度测量技术,采用螺旋弹簧状波导结构,通过拉伸或压缩螺旋波导来改变螺距以应对特殊高温环境的温度测量。上述文献研究验证了超声导波进行温度测量的可行性,但波导杆中的温度难以实现均匀分布控制,导致理论预测的导波波速随温度变化曲线和实测结果存在较大误差。

超声导波测温时,压电超声换能器直接接触高温环境将面临失效的问题,波导杆能将压电传感部分与高温环境有效隔开,提高了导波温度测量的稳定性。波导杆的声学性能以及固定方式都是影响发射检测的关键因素<sup>[12-13]</sup>,理想高温导波测量的波导杆应该满足声阻抗小、超声可以长距离传播、导热性能好的条件。现阶段,耐高温的金属材料熔点能高达3 000℃,但在高温环境下难熔金属材料易发生热膨胀和变形,且易被氧化,影响声波的传输<sup>[14]</sup>。在非金属材料中,石墨材料具有熔点高(3 650℃)、结构较稳定、热膨胀系数小、抗热震性良好及导电导热性良好等特性<sup>[15]</sup>,在高温传感器制作方面有着独特的优越性。因此本文使用高纯石墨作为传感器的波导结构。

本文选取石墨杆作为声波的传播介质,用导波的声速变化测量导杆末端的温度,充分利用了石墨杆在1 000℃范围内声速杨氏模量对温度变化的敏感性。建立指数温度传播模型,避免使用单一参考声速,提高测量准确性。建立实验并验证结果的有效性。

本文利用高熔点高纯石墨杆激励纵向模态超声导波,构建测温实验系统。分析了温度影响导波波速的因素,建立了温度非均匀分布波导杆中导波信号渡越时间随温度变化规律的预测模型。通过该预测模型,计算得到石墨杆中的准确的回波渡越时间。开展1 000℃范围内导波测温实验,验证了预测模型的正确性。本文的研

究为高温场温度测量提供了一种可行的解决方案。

## 1 测温原理

### 1.1 考虑温度的频散方程

对于半径为  $r$  的各向同性长直弹性圆杆,沿其轴向传播的纵向模态超声导波的频散方程(Pochhammer 方程)<sup>[16]</sup>表达式为:

$$\frac{2p}{r}(q^2 + k^2)J_1(pr)J_1(qr) - (q^2 - k^2)^2J_0(pr)J_1(qr) - 4k^2pqJ_0(qr)J_1(pr) = 0 \quad (1)$$

式中: $J_0$ 和 $J_1$ 分别代表0阶和1阶的第1类Bessel函数; $k$ 为波数;参量 $p$ 和 $q$ 的表达式为:

$$p = \sqrt{\omega^2/c_L^2 - k^2}, q = \sqrt{\omega^2/c_T^2 - k^2} \quad (2)$$

其中,纵波波速 $c_L$ 和横波波速 $c_T$ 可以利用材料的密度 $\rho$ 、杨氏模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ 进行计算:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3)$$

式(2)的解描述了圆杆中轴向波数 $k$ 和频率 $\omega$ 的关系(即频散关系)。可以看出,决定圆杆中纵向模态超声导波频散特性的主要参数包括:圆杆半径 $r$ 、材料密度 $\rho$ 、杨氏模量 $E$ 、泊松比 $\nu$ 。

研究表明,对于石墨材料而言温度升高会使石墨的多孔结构和石墨微晶的热膨胀系数发生改变,导致材料的杨氏模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ 发生变化<sup>[17]</sup>。此外,由材料热胀冷缩效应可知,不同温度 $T$ 时圆杆长度 $L$ 与体积 $V$ 存在微小差异,温度变化会间接影响材料密度 $\rho$ 。综合来看,温度变化通过影响石墨杆的多项特征参数( $r, \rho, E, \nu$ ),进而导致纵向模态超声导波的频散曲线发生变化。

通过给定特征参数( $r, \rho, E, \nu$ )和温度 $T$ 的关系式,即可将温度引入石墨杆的频散方程。由于温度会同时影响各特征参数,加之石墨材料中各项特征参数( $r, \rho, E, \nu$ )和温度 $T$ 的准确关系难以同步准确测定。目前尚不能准确得到含温度的频散方程,以定量预测温度对纵向模态超声导波频散曲线的影响规律。

这里参考部分实验测试数据和相关研究结论,采用单因素分析法,计算各特征参数在一定范围内变化时石墨杆(半径 $r=10$  mm)的频散曲线<sup>[18]</sup>。计算时考虑的温度范围为0~1 000℃,室温20℃时高纯石墨材料的 $\rho=1 870 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $E=8.5 \text{ GPa}$ 、 $\nu=0.2$ 。文献[19]实验测得了0~1 000℃范围内石墨材料的杨氏模量 $E$ ,结果如图1所示。由此拟合得到 $E$ 和 $T$ 的关系式为:

$$E = \alpha T^2 + \beta T + \gamma \quad (4)$$

式中: $\alpha=1.202\times 10^{-6} \text{ GPa}\cdot\text{C}^{-2}$ 、 $\beta=-1.226\times 10^{-4} \text{ GPa}\cdot\text{C}^{-1}$ 、 $\gamma=8.61 \text{ GPa}$ 。

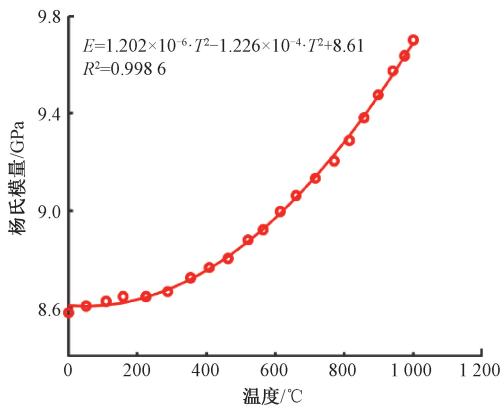
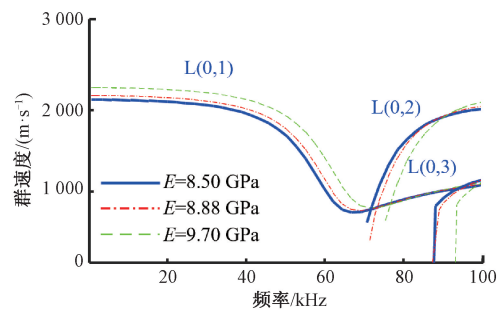
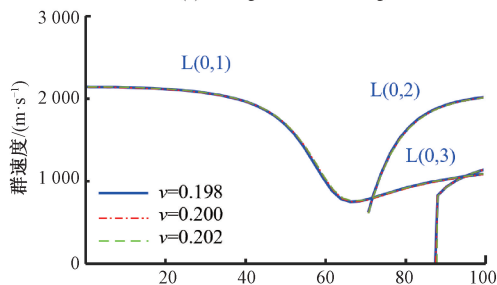


图 1 石墨材料杨氏模量随温度的变化曲线<sup>[19]</sup>  
Fig.1 Variation curve of Young's modulus of graphite material with temperature<sup>[19]</sup>

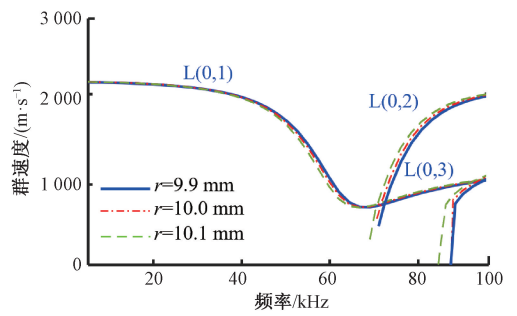
与室温条件下相比,1 000℃时石墨材料的杨氏模量增长了约 9.27%。石墨材料的热膨胀系数极小(约为  $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),相关研究表明温度变化对石墨杆半径  $r$  及体积  $V$ (或密度  $\rho$ ) 的影响非常微弱<sup>[20]</sup>。温度从 0℃ 上升到 1 000℃ 时,石墨材料的特征参数  $r$ 、 $\rho$  和  $\nu$  的取值相比室温时将发生一定比例的轻微波动,假定它们的变化范围均为  $\pm 1\%$ ,由此计算得到的频散曲线簇如图 2 所示。可以看出杨氏模量在不同温度下的变化值比密度、半径和泊松比更大,也就是说杨氏模量是影响石墨杆群速度值变化的主导因素,即温度主要通过改变石墨材料的杨氏模量而影响石墨杆的频散曲线。



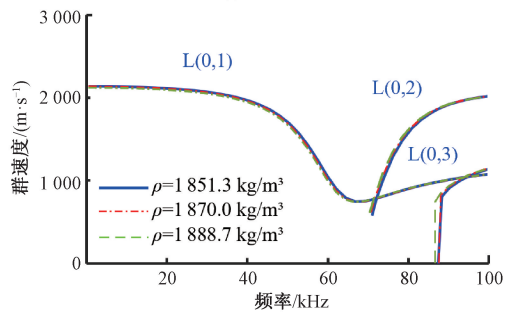
(a) 杨氏模量变化  
(a) Young's modulus change



(b) 泊松比变化  
(b) Poisson's ratio change



(c) 半径变化  
(c) Radius change



(d) 密度变化  
(d) Density change

图 2 石墨杆特征参数变化时的群速度频散曲线  
Fig.2 Group velocity dispersion curve when the characteristic parameters of graphite rod change

### 1.2 影响参数分析

同一种模式的频散在不同的频率下,频散特性也存在很大的差别。为避免多模式混叠,本文主要利用  $L(0,1)$  模态进行后续试验测试,选择在低于  $L(0,2)$  模态截止频率范围(0~60 kHz)内讨论特征参数对频散曲线的影响。实验中通过测量  $L(0,1)$  模态的群速度值  $V_g$  间接表征石墨杆的温度。因此,利用图 2 所示结果重点分析温度  $T$  对  $L(0,1)$  模态群速度  $V_g$  的影响。

以室温  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  条件下的频散曲线为基准,计算频率为 30 kHz 时各特征参数取值不同时频散曲线的偏移量,以群速度值  $V_g$  的相对变化量  $\delta$  进行表示。温度从 0℃ 上升到 1 000℃ 过程中,各特征参数取值变化引起的  $L(0,1)$  模态群速度相对变化率  $\delta$  的范围见图 3 所示。可以看出,杨氏模量  $E$  是影响石墨杆群速度值变化的主导因素,也即温度主要通过改变石墨材料的杨氏模量而影响  $L(0,1)$  模态的频散曲线。

假定特征参数  $r$ 、 $\rho$ 、 $\nu$  不随温度变化而始终保持为室温条件的数值,将式(4)和石墨杆的频散方程相关联,计算得到不同频率时群速度和温度的关系曲线如图 4(a) 所示。为避免激励产生多模式导波,激励频率应选择低于  $L(0,2)$  模态截止频率(约 70 kHz)范围内。随着温度从室温(20℃)逐步提高到 1 000℃,  $L(0,1)$  模态的群速度呈现单调增加趋势。以群速度的相对增长率作为指标评价,计

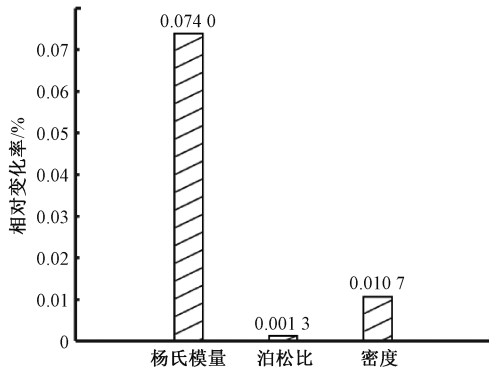
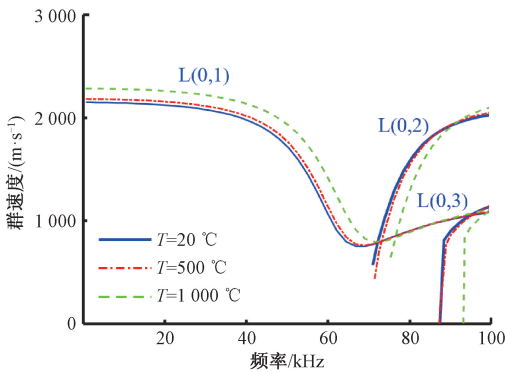


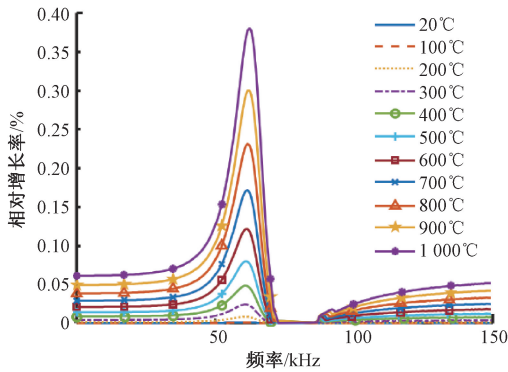
图3 石墨杆特征参数对导波波速的影响

Fig. 3 Influence of graphite rod characteristic parameters on guided wave velocity



(a) 不同温度下的群速度频散曲线

(a) Group velocity dispersion curves at different temperatures



(b) 不同频率群速度对温度的灵敏性分析

(b) Sensitivity analysis of velocity to temperature in different frequency groups

图4 温度对不同频率群速度值的影响

Fig. 4 The influence of temperature on group velocity values of different frequencies

算L(0,1)模态群速度对温度变化的敏感性,分析结果见图4(b)。可以看出,在50~70 kHz范围内敏感性较高,但此时L(0,1)模态频散较为严重,不利于实验信号分析和波速准确提取。综合考虑高敏感性和低频散特性,最终选择在30 kHz附近激励L(0,1)模态用于温度测量。

## 2 温度非均匀分布杆中导波渡越时间的预测模型

上述理论模型将石墨杆视为温度均匀的波导结构,而实验中波导结构中的温度分布并不均匀。目前开展的标定实验中都没有考虑这一问题,而只提供了实验测试曲线,尚无法和理论预测结果进行严格对比。本文尝试建立适于非均匀温度分布波导杆中导波群速度(或渡越时间)的计算模型,以使实验和理论预测结果相符合。具体思路为:将石墨杆沿长度方向细分为 $N$ 等份,分别计算导波在每个微段的传播时间再进行线性相加,即可理论预测得到超声导波在温度非均匀分布石墨杆中的渡越时间。具体步骤如下:

1) 各微段的平均温度值 $T_i$ 。石墨杆长计为 $L$ ,各微段长 $l=L/N$ 。这里假定温度分布在杆中服从指数衰减规律。以导波激励点为起始零点,第 $i$ ( $i=1,2,3,\dots,N$ )个微段的 $x$ 轴坐标 $x_i=il$ ,平均温度 $T_i$ 计算式为:

$$T_i = T_0 \cdot e^{-a_1 \cdot x_i} + T'_0 \cdot e^{-a_2 \cdot x_i} \quad (5)$$

式中: $T_0$ 为实验开始时杆上的温度; $T'_0$ 、 $a_1$ 和 $a_2$ 为待定系数,需依据实测温度分布数据进行拟合确定。

2) 导波传播速度和温度的关系。依据理论计算结果(图5)可知:L(0,1)模态导波传播速度与温度的关系近似服从二次函数关系式。因此,第 $i$ 个微段内导波传播速度 $v_i$ 为:

$$v_i = a \cdot T^2 + b \cdot T + c \quad (6)$$

式中:系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 频率随分析的频率而变化,对于给定的导波频率,可利用理论计算数据进行拟合确定。由图5可以看出,在30 kHz时,相应的系数值为: $a=1.487 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-2}$ ,  $b=1.052 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ,  $c=2075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

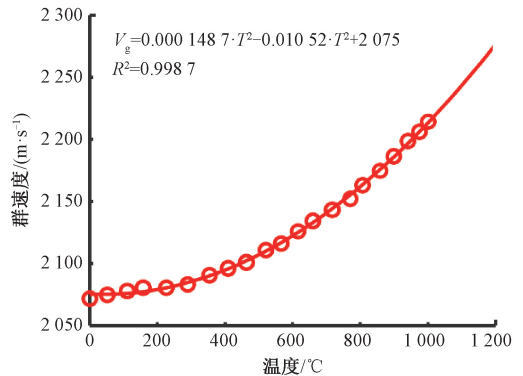


图5 群速度随温度的变化曲线

Fig. 5 Variation of group velocity with temperature

3) 导波在石墨杆中的渡越时间。第 $i$ 个微段内导波的传播时间为 $t_i = l/v_i$ ,则导波在杆中总的渡越时间

$t_{total}$  为:

$$t_{total} = \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N \frac{l}{v_i} = \sum_{i=1}^N \frac{l}{a \cdot T^2 + b \cdot T + c} = \frac{\sum_{i=1}^N l}{a \cdot (T_0 \cdot e^{-a_1 \cdot x_i} + T'_0 \cdot e^{-a_2 \cdot x_i})^2 + b \cdot (T_0 \cdot e^{-a_1 \cdot x_i} + T'_0 \cdot e^{-a_2 \cdot x_i}) + c} \quad (7)$$

为避免换能器距离高温区较近导致换能器无法工作,并使超声波在波导杆中传播形成超声导波,波导杆应在声波可测量的范围内尽可能长,以保证换能器可以正常工作。选择长 1 m、半径 10 mm 的高纯石墨杆(纯度高

于 99.9%)作为波导杆。将厚度为 5 mm 半径为 10 mm 的厚度振动型压电圆片通过环氧树脂固化至波导杆的上端面,用于纵向模态超声导波的激励和接收。波导杆垂直放置于 ALC-24 型煨后焦空气反应性测定仪的高温加热装置,如图 6 所示。波导杆下端约 200 mm 完全置于高温炉的玻璃套管内,距离波导杆下端约 170 mm 处加工了深约 5 mm、宽约 1 mm 的局部周向刻槽,作为波速测量的特征反射源。在图 6 标记的不同位置共布置了 11 个 K-20-1000-G 型热电偶,用于准确测定波导杆不同高度位置的表面温度。

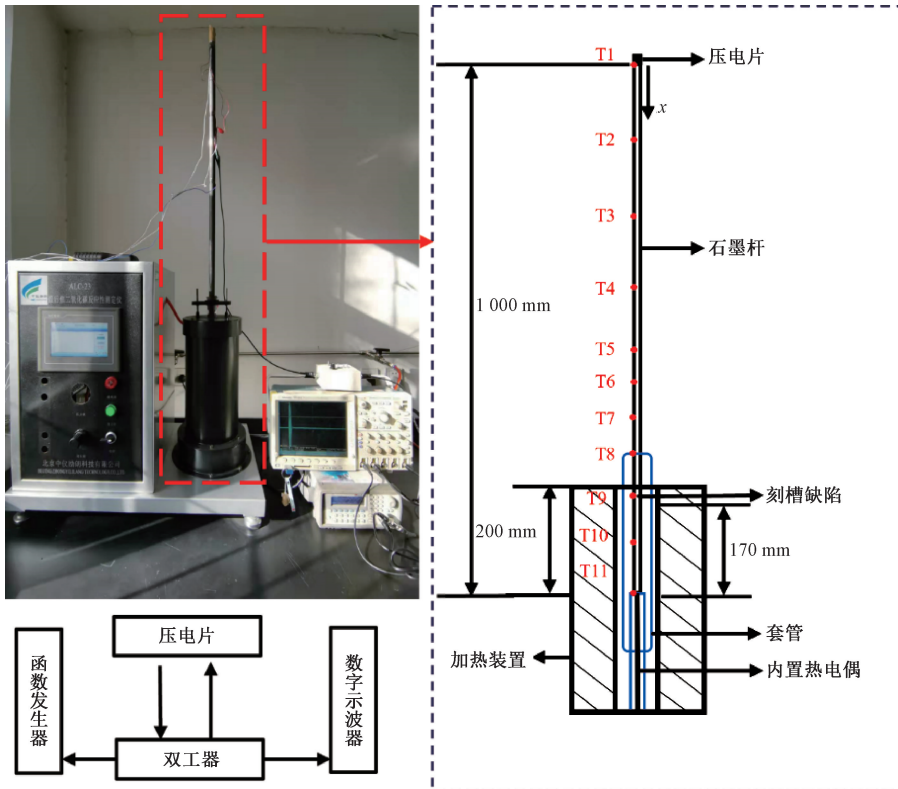


图 6 超声导波测温实验装置

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental device for ultrasonic guided wave temperature measurement

超声导波检测装置包括:安捷伦 33220A 型函数发生器、双工器和 Tektronix DPO 4054 数字示波器。函数发生器输出中心频率为 30 kHz、幅值为 10 V 的 5 周期汉宁窗调制正弦波,直接驱动压电圆片在波导杆中激励产生纵向模态超声导波。超声导波沿波导杆传播时,先后在刻槽与下端产生反射,折返回到波导杆上端面被压电圆片接收。数字示波器以 50 Ms·S<sup>-1</sup> 的采样率对压电圆片接收的导波信号进行采集和存储。

设置高温炉内温度从常温 20℃ 逐步上升到约 900℃,以高温炉自带仪表测温数据为指示,每升温约

30℃ 进行 5 次重复性导波检测。在石墨杆不同高度位置布置的 11 个热电偶传感器测得的实际温度值记录如图 7 所示。从加热炉向外石墨杆中的温度呈现指数衰减规律,这和热扩散过程是吻合的。

导波检测时对信号进行 512 次平均后再采集以抑制随机噪声,每组数据共重复进行 5 次导波信号采集。将接收的导波信号进行希尔伯特滤波处理,图 8 给出了不同温度条件下测得的典型导波信号波形。随着温度升高,刻槽和下端面的反射回波到达时间均呈现单调降低趋势,表明超声导波传播速度对波导杆的温度变化较为敏感。

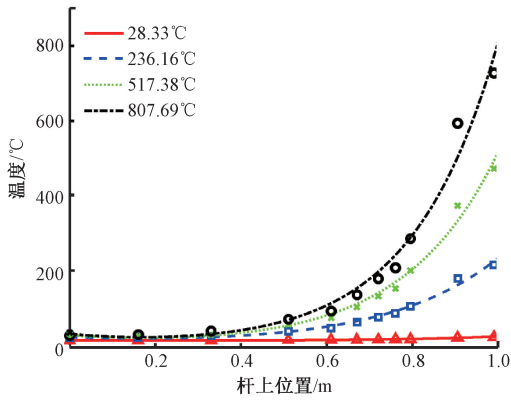
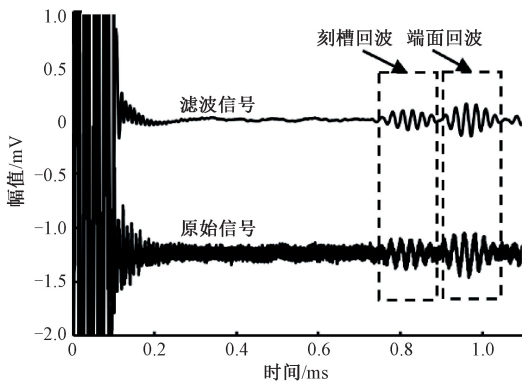
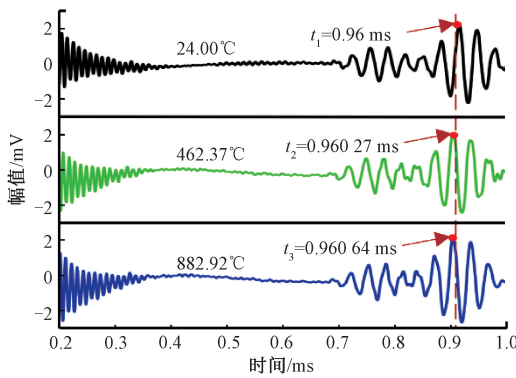


图7 不同时刻杆上温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on the rod at different times



(a) 滤波前后信号对比  
(a) Comparison of signals before and after filtering



(b) 不同温度下超声导波波形  
(b) Ultrasonic guided waveforms at different temperatures

图8 不同温度下超声导波波形变化

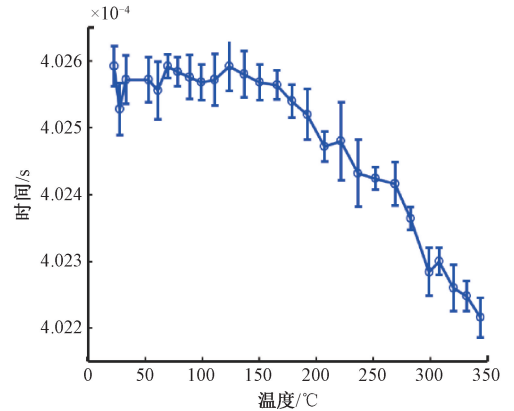
Fig. 8 Variation of ultrasonic guided waveform at different temperatures

### 3 分析与讨论

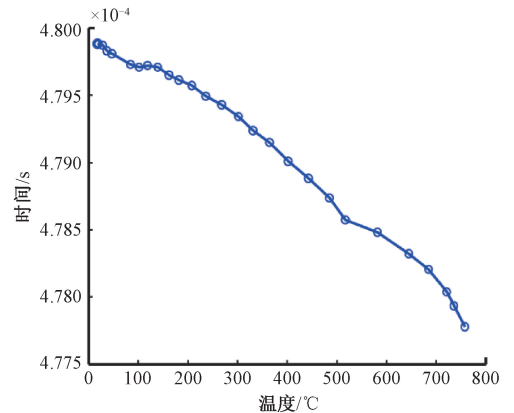
#### 3.1 模型对比

为提取不同温度条件下超声导波的传播速度,这里以室温条件下切槽和下端面反射回波的渡越时间为初始

基准,利用信号互相关算法计算温度变化时特征反射波的时延值<sup>[21-24]</sup>。不同温度时检测导波信号波形和基准信号的互相关曲线中,曲线峰值对应的时间坐标即代表温度变化引起的回波时延值变化。最终提取得到不同温度时刻槽和下端面回波的时延值结果(如图9所示),可以观察到:随着温度的提升,刻槽和下端面的反射回波时延值呈下降趋势,表明L(0,1)模态的传播速度对石墨导杆的温度变化较敏感。



(a) 刻槽时延值与温度变化关系  
(a) Relationship diagram between groove delay value and temperature



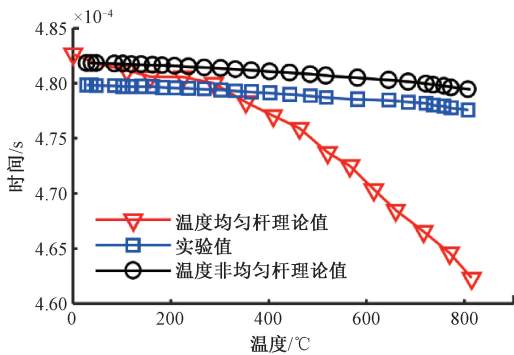
(b) 端面时延值与温度变化关系  
(b) Relationship between end face delay value and temperature change

图9 时延值与温度变化关系

Fig. 9 Diagram of relationship between time delay value and temperature change

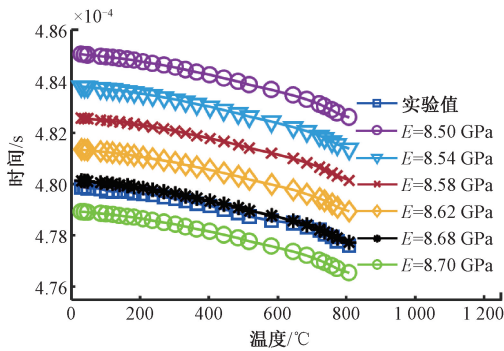
利用温度均匀分布理论模型计算得到不同温度条件下的L(0,1)模态频散曲线(图4(a)),提取30 kHz时导波群速度随温度的变化曲线,再结合导波在石墨杆中的实际传播距离,可将群速度换算导波时延值,由此得到导波时延值和温度的理论关系曲线如图10所示。

从图10(a)中的结果可以明显看出:以400~800°C温度范围内的结果为例,理论计算和实验测得的时延值下降率分别为 $3.649 \times 10^{-5} \text{ ms} \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $3.703 \times 10^{-6} \text{ ms} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。如



(a) 实验结果与理论计算结果

(a) Experimental results and theoretical calculation results



(b) 理论模型弹性模量取值对预测误差的影响

(b) The impact of the theoretical model's chosen elastic modulus values on prediction errors

图 10 时延值与温度关系

Fig. 10 Diagram of the relationship between delay value and temperature

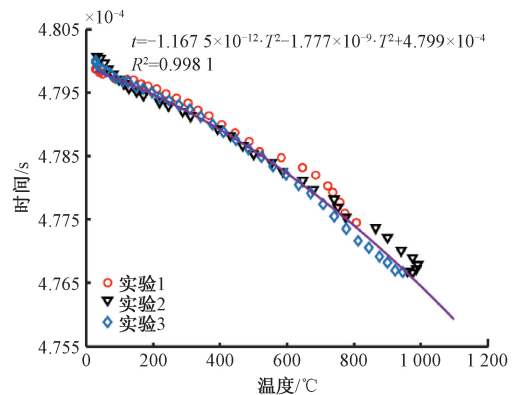
将实测时延值 ( $t = 0.4783 \text{ ms}$ ) 代入理论预测曲线, 则会造造成温度预测误差达到  $331.653^\circ\text{C}$ 。这是由于温度均匀分布理论模型计算时默认某一温度下石墨杆整杆温度一致即各部分的杨氏模量值相同, 因此温度均匀分布理论模型和实验测得的曲线虽然趋势相近, 但温度变化引起的时延值下降率存在较大差异。

相比而言, 利用温度非均匀分布模型计算得到的结果和实验规律较为吻合。在曲线起始位置存在一定的固有偏差, 这可能是理论计算中采用的弹性模量值和实际材料的数值存在一定偏差造成的。为此, 将石墨杆的弹性模量设置在  $8.5 \sim 8.7 \text{ GPa}$  之间, 预测弹性模量取值不同时特征导波信号时延值随温度的变化曲线。从图 10(b) 所示结果可以看出, 当弹性模量从  $8.5 \text{ GPa}$  增加至  $8.7 \text{ GPa}$  过程中, 理论模型计算和实验测试结果的误差逐渐下降。当理论计算中的弹性模量  $E = 8.68 \text{ GPa}$  时, 理论预测曲线和实测曲线的最大相对误差仅为  $1\%$ , 平均误差为  $0.5\%$ 。

### 3.2 测温能力分析

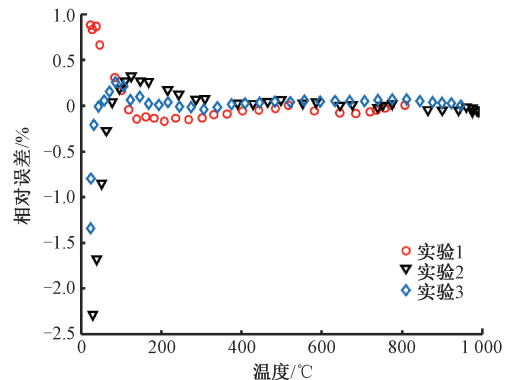
这里以编号 11 的热电偶测温数据作为待测温度值, 通过分析特征导波信号时延值随待测温度的标定曲线,

定量评价导波测温方法的能力。图 11(a) 给出了重复 3 次测得的标定实验数据, 变化规律服从抛物线方程。在  $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$  范围内, 每间隔  $10^\circ\text{C}$  进行一次导波检测, 从局部放大图中可看出测试数据和拟合曲线较符合, 表明导波测温准确度到达  $10^\circ\text{C}$  以内。利用 3 次标定实验测得的时延值均值和温度进行关系方程拟合, 再将 3 次实测数据代入关系方程, 估计标定关系方程进行温度预测时的误差, 结果如图 11(b) 所示。可以看出, 除常温下, 在其余温度下预测得到的温度误差较小, 且温度越高, 误差越小。且石墨作为波导材料在室温至  $1000^\circ\text{C}$  温度环境中特性稳定, 材料特性没有发生明显的变化, 因此以石墨波导杆为波导材料的测温系统适合此温度段测温使用。



(a) 3 次重复实验结果

(a) Results of three repeated experiments



(b) 温度预测与实测结果的相对误差

(b) Relative error between predicted and measured temperature results

图 11 重复实验结果

Fig. 11 Results of repeated experiments

## 4 结 论

1) 本文将温度对材料特性参数的影响引入到石墨杆的频散方程, 分析得到了温度影响导波波速的关键中间变量 (杨氏模量)。建立了超声测温实验系统, 选择中心频率为  $30 \text{ kHz}$  的传感器和纵向模态进行温度测量。

2) 实验中石墨杆中的温度从高温炉内向外呈现指数型下降规律。采用等温杆进行回波渡越时间预测,结果与实验规律存在较大误差。因此建立了温度非均匀分布波导杆中导波信号渡越时间随温度变化规律的预测模型,模型预测结果和实验规律较为符合。

3) 利用石墨杆中 L(0,1) 模态导波,可以在 1 000℃ 范围内实现测温,且导波测温准确度到达 10℃ 以内。在相同实验条件下进行多次重复性实验的结果表明该超声导波测温系统的稳定性和重复性较好。

## 参考文献

- [ 1 ] YAN D W, NEILD A S, DRINKWATER W B. Modelling and measurement of the nonlinear behaviour of kissing bonds in adhesive joints[J]. *NDT and E International*, 2012, 47(4):18-25.
- [ 2 ] 陆泓彬,朱红春,姜周华,等. 电弧炉智能炼钢的研究进展[J]. *中国冶金*, 2024,34(3):25-36.  
LU H B, ZHU H CH, JIANG ZH H, et al. Research progress of intelligent steelmaking in electric arc furnace[J]. *China Metallurgy*, 2024,34(3):25-36.
- [ 3 ] 潘冬,蒋朝辉,许川,等. 高炉铁水温度检测方法的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2023,44(12):280-296.  
PAN D, JIANG ZH H, XU CH, et al. Research progress of measurement methods of molten iron temperature in blast furnace[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023,44(12):280-296.
- [ 4 ] 郑相锋,郝晓军,谷建功,等. 非线性超声技术检测 P92 耐热钢蠕变试验研究[J]. *电力科技与环保*, 2022, 38(6):475-483.  
ZHENG X F, HAO X J, GU J G, et al. Study on creep test of P92 heat resistant steel by nonlinear ultrasonic technology[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2022,38(6):475-483.
- [ 5 ] 孔倩,姜根山,刘月超,等. 声学法炉内温度场与速度场协同测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4):249-258.  
KONG Q, JIANG G SH, LIU Y CH, et al. Study on simultaneous measurement of temperature and velocity field in furnace based on acoustic tomography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023,44(4):249-258.
- [ 6 ] 李保良,李明明,李海毅,等. 基于磁致伸缩扭转波温度传感器的设计与优化[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10):58-65.  
LI B L, LI M M, LI H Y, et al. Design and optimization of temperature sensor based on magnetostrictive torsional wave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022,43(10):58-65.
- [ 7 ] 王凯,王高,梁海坚,等. 基于铱铑合金的超声测温传感器设计[J]. *电子测量技术*, 2018,41(15):87-90.  
WANG K, WANG G, LIANG H J, et al. Design of ultrasonic temperature sensor based on iridium and rhodium alloy[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018,41(15):87-90.
- [ 8 ] PERIYANNAN S, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Ultrasonic bent waveguides approach for distributed temperature measurement[J]. *Ultrasonics*, 2017, 74:211-220.
- [ 9 ] WONG T Y, TANG Y, ZOU F X, et al. An ultra-high accuracy temperature measurement method using acoustic waveguide[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(3):2618-2626.
- [ 10 ] LIANG H J, YANG F B, YANG L, et al. Research and implementation of a 1 800℃ sapphire ultrasonic thermometer[J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(1):9710763.
- [ 11 ] 刘良明,王高,梁海坚,等. 基于超声测温的多区节螺旋型波导特性研究[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(3):131-136.  
LIU L M, WANG G, LIANG H J, et al. Study on the characteristics of multi-zone truncated spiral waveguide based on ultrasonic temperature measurement[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(3):131-136.
- [ 12 ] 杨理践,张晓丹,高松巍,等. 超声波在管道防腐层剥离内检测中的传播特性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018,32(1):9-18.  
YANG L J, ZHANG X D, GAO S W, et al. Research on propagation characteristics of ultrasonic waves in the detection of pipeline coating[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018,32(1):9-18.
- [ 13 ] 刘宇,杨录,张琦. Ni-Cr 合金超声导波温度传感器的设计[J]. *电子测量技术*, 2020,43(2):158-161.  
LIU Y, YANG L, ZHANG Q. Design of ultrasonic guided wave temperature sensor based on Ni-Cr alloy[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(2):158-161.
- [ 14 ] 蔡圳阳,沈鸿泰,刘赛男,等. 难熔金属合金及其高温抗氧化涂层研究现状与展望[J]. *中国有色金属学报*, 2020,30(9):1991-2010.  
CAI ZH Y, SHEN H T, LIU S N, et al. Study status and prospects of refractory metal alloys and high-temperature oxidation-resistant coatings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020,30(9):1991-2010.
- [ 15 ] 钟琦,谢刚,俞小花,等. 高纯石墨生产工艺技术的研究[J]. *炭素技术*, 2012,31(4):51-54.



- ZHONG Q, XIE G, YU X H, et al. Research on high purity graphite production technology[J]. Carbon Techniques, 2012, 31(4): 51-54.
- [16] 刘增华, 赵继辰, 吴斌, 等. 高阶纵向超声导波在钢绞线缺陷检测中的应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 214-220.
- LIU Z H, ZHAO J CH, WU B, et al. Application study on defect detection of steel strands by using high-order ultrasonic longitudinal guided waves [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 214-220.
- [17] 封伟强, 王伟, 孟松鹤, 等. 基于数字图像相关方法的石墨高温杨氏模量测试[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 18-24.
- FENG W Q, WANG W, MENG S H, et al. Measurement of high-temperature Young's modulus of graphite based on digital image correlation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 18-24.
- [18] 刘钊, 包亦望, 万德田. 超高温下石墨弹性极限的拐点及其孔隙率影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(4): 537-540.
- LIU ZH, BAO Y W, WAN D T. Inflection and its porosity effect on elastic limit of graphite at ultra-high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(4): 537-540.
- [19] LI M, HE J J. Effect of high temperature on ultrasonic velocity in graphite[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 116: 108368.
- [20] RATTANAWEERANON S, LIMSUWAN P, THONGPOOL V, et al. Influence of bulk graphite density on electrical conductivity[J]. Procedia Engineering, 2012, 32: 1100-1106.
- [21] TIWARI K A, RAISUTIS R, SAMAITIS V. Hybrid signal processing technique to improve the defect estimation in ultrasonic non-destructive testing of composite structures[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2858.
- [22] 仲崇庆, 杨录, 张艳花. 高精度超声回波渡越时间算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016(3): 108-110.
- ZHONG CH Q, YANG L, ZHANG Y H. Algorithm study on high-precision ultrasonic echo signals [J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(3): 108-110.
- [23] 陈磊, 王少红, 周福强, 等. 超声波测量离合器包箱温度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 76-82.
- CHEN L, WANG SH H, ZHOU F Q, et al. Research on ultrasonic measurement of temperature in clutch case[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 76-82.
- [24] 吴莉, 陈励军. 炉膛声学测温中声波飞渡时间测量的实验研究[J]. 声学技术, 2018, 37(3): 211-216.
- WU L, CHEN L J. Experimental research on 'time of flight' measurement in acoustic pyrometry for furnace[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(3): 211-216.

## 作者简介



王婉儿, 2022年于中国民航大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波检测技术。

E-mail: Waner@emails.bjut.edu.cn

**Wang Wan'er** received her B.Sc. degree in 2022 from Civil Aviation University of China. She is currently a master student at Beijing University of Technology. Her main research interests include ultrasonic guided waves testing technology.



郑相锋, 2003年于江苏科技大学获得学士学位, 2006年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为国家能源集团科学技术研究院有限公司正高级工程师, 主要从事电站设备性能检测和安全评估研究。

E-mail: 13331393205@163.com

**Zheng Xiangfeng** received his B.Sc. degree in 2003 from Jiangsu University of Science and Technology, M.Sc. degree in 2006 from Hefei University of Technology. He is currently a senior engineer at the National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd. His main research interests include performance testing and safety assessment of power station equipment.



高翔(通信作者), 2014年于昆明理工大学获得学士学位, 2019年于中国科学院大学获得博士学位, 现为北京工业大学副教授, 主要研究方向为超声无损检测、智能传感器与结构健康监测、超声传播与成像。

E-mail: gaoxiang@bjut.edu.cn

**Gao Xiang** (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2014 from Kunming University of Science and Technology, Ph.D. degree in 2019 from University of Chinese Academy of Sciences. He is currently an associate professor in Beijing University of Technology. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing, smart sensors and structural health monitoring, ultrasonic propagation and imaging.