

基于超声测温的多区节螺旋型波导特性研究

刘良明¹ 王 高¹ 梁海坚² 魏艳龙³ 杨国权³

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 太原工业学院 太原 030051;

3. 太原师范大学 太原 030051)

摘 要: 温度测试对于军工、冶金、化工等行业的安全快速发展有着重要的意义,特别是高温环境下的温度测量,超声测温相对于其他测温方法有着测温范围广、响应时间快、测量精度高等优点;如今大多数用于超声温度测试的传感器多为直波导杆,为了应对一些特殊环境(如核反应燃料棒、管道以及一些需要较小传感器的环境等),设计了一种异型的螺旋状分布式波导传感器,可以根据环境的区域大小拉伸、折叠或改变半径调节传感器的尺寸,还可以根据需要加工多个反射缺口,用于同一环境的多点测量。通过实验以及 COMSOL 仿真拟合钨铼合金(tungsten-rhenium alloy 25, WRe25)的温度曲线,验证其测试温度上限可以达到 1 600 ℃。结果表明,测试精度较高,螺旋状波导杆满足高温测试的应用需求,同时为缩小传感器的测试环境以及提高测试精度提供参考。

关键词: 超声温度传感;钨铼合金;螺旋状;COMSOL 仿真

中图分类号: TB551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Study on the characteristics of multi-zone truncated spiral waveguide based on ultrasonic temperature measurement

Liu Liangming¹ Wang Gao¹ Liang Haijian² Wei Yanlong³ Yang Guoquan³

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030051, China; 3. Taiyuan Normal University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Temperature test for the safe and rapid development of military, metallurgy, chemical industry and other industries is of great significance, especially temperature measurement in high temperature environment, ultrasonic temperature measurement compared with other temperature measurement methods has the advantages of wide temperature measurement range, fast response time, high measurement accuracy; Nowadays, most of the sensors used for ultrasonic temperature testing are mostly straight waveguide rods, in order to cope with some special environments (such as nuclear reaction fuel rods, pipelines and some environments that require smaller sensors, etc.), a special-shaped spiral distributed waveguide sensor is designed, which can stretch, fold or change the size of the sensor according to the size of the environment area, and can also process multiple reflection notches as needed for multi-point measurement in the same environment. Through experiments and COMSOL simulation to fit the temperature curve of WRe25, it is verified that the upper temperature limit of the test temperature can reach 1 600 ℃. The conclusion shows that the test accuracy is high, and the spiral waveguide rod meets the application requirements of high temperature test, and provides a reference for reducing the test environment of the sensor and improving the test accuracy.

Keywords: ultrasonic temperature sensing; tungsten-rhenium alloy; spiral; COMSOL simulation

0 引 言

超声测温属于现在较为新型的一种测温手段,对于一些极端测试环境优点明显,相比于传统的热电偶、热

电阻测温,有着测温范围广、可辨识性高、响应时间快、稳定性高等优点,近些年来超声测温发展迅速,异型波导杆逐渐进入人们的研究范围,开始用于超声温度测试,本文用于超声测温的螺旋状波导可以根据环境的

实际情况对传感器进行拉伸和折叠,变化灵活,对于一些发动机、核电站等高温恶劣环境测试有着极好的作用^[1]。

当前国内外对于异型超声波导温的研究较少,王凯^[2]采用多区节波导研究,Jia等^[3]提出波导条块高温测试系统进行研究,就目前而言对与异型波导杆缺乏探索。Periyannan等^[4-5]和Raja等^[6]通过对镍铬合金波导杆添加弯曲、直角、多区节等方法构造异型波导杆,通过实验验证了其猜想的可行性,温度可以达到1 200℃,精确度可以达到3%~5%。对于现有的方法存在精度有待提高、实验想法单一、更高的温度缺乏验证等问题,所以需要在此基础上进行改进。

本文以钨铼合金(WRe25)为研究对象,通过Solid-Works绘制模型,探索了使用螺旋以及多个“缺口”作为超声波导放置的反射节,经过COMSOL模拟^[7]高温环境仿真,研究螺旋型波导杆的各种特性,对以后超声测温传感器的发展以及制备提供了参考。

1 测温原理

超声波在同一种介质传播时,声速与温度成反比。当超声波在物体中传播遇到障碍时就会发生反射,产生一定的回波信号,通过人为在细长杆中制造障碍,就可以较容易监测到固定信息的回波信号^[8]。本文将耐高温的钨铼合金制成螺旋状的波导结构,置于高温环境中,测量超声波从人为障碍面到细长杆端面之间时间差,得到温度一声速的关系。

群速度跟相速度是超声波导研究中的重要物理量^[9],如图1所示,其中虚线为单个波群,实线为由多个不同的正弦波叠加而成的多个波群,外层的正弦波包络速度称为群速度,包络中正弦波的速度称为相速度,超声波以群速度的方向以及大小传播,这两个速度会准确反应超声的传播特性,遇到障碍得到的回波会更容易探测,对于仿真和实验的数据采集有重要意义。

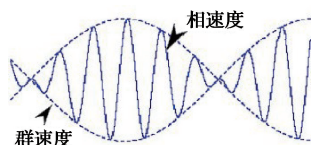


图1 群速度与相速度的关系

细长杆中纵波声速跟温度的关系可以表示为:

$$C_L = \sqrt{\frac{E(T)}{\rho(T)}} \quad (1)$$

式中: C_L 为声速; $E(T)$ 为弹性模量; $\rho(T)$ 为固体介质密度, T 为环境温度。材料的弹性模量跟密度决定了材料中超声速度与温度的变化关系^[10]。

直波导杆示意图如图2所示,通过时差与声速的关系如下:

$$\Delta(T) = \frac{2l}{v(T)} \quad (2)$$

式中: l 为区节的长度; $v(T)$ 为声速。对介质进行标定,建立出声速和温度之间的关系,拟合曲线,即可实现温度测量^[11]。



图2 直杆波导传感器示意图

2 超声温度传感器结构设计

以往的超声波导传感器多为直杆,采用多区节就会增加环境的容量,本文采用类似弹簧型的螺旋状多区节波导模型进行温度的测量,该结构允许缺陷在彼此纵向非常接近的位置(通过减小螺距)或在相对稀疏的间距(通过增加螺距)进行测量,还可适当调节缺陷在杆上的位置,大大提高了实验环境和方式的灵活性,多个缺口沿螺旋的波导杆被分离,这样可以避免来自每个缺口的信号重叠,也可以大大提高测试精度。

波的色散与信号的脉宽有重要的关系^[12],无色散或极小色散会让信号脉宽保持相对不变,减小误差影响,从而提高时间间隔 ΔT 测量的可靠性。为了减少由于螺旋波导曲率造成的色散效应,弹簧波导的平均线圈直径必须要大于探头发射声波的波长,螺旋波导的平均直径满足式(3)^[13]。

$$D > 2\lambda \quad (3)$$

式中: D 为螺旋平均直径; λ 为波长。该仿真选取螺旋直径为 3.3λ 。

对于金属波导而言,超声导波频率越低,敏感元长度需设计地越长;超声波导的频率越高,导波衰减速率也越快^[14],所以综合考虑,再根据钨铼合金的频散曲线可得实验要选用较低频率的超声探头进行实验,选取250 kHz。

螺旋杆超声测温系统如图3所示,主要包含超声测温仪、超声换能器和波导传感器3个部分。超声换能器可以进行声—电信号的相互转换,超声发射采集系统可以激发和接收电信号,经过信号处理系统处理在超声测温仪中显示并储存^[15]。

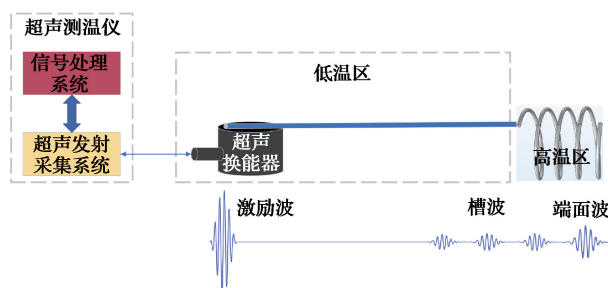


图3 螺旋超声测温系统

3 COMSOL 声—热仿真分析

3.1 仿真环境配置

COMSOL 是一款功能强大的仿真软件^[16],实验仿真结构如图 4 所示,为了尽可能的模拟实验环境以及传感器的状态,使用 SolidWorks 绘制波导杆(图 4),将波导杆的螺旋直径设置为直径 28 mm,杆的直径设置为 1.6 mm,一个周期设置一个凹槽,一共设置 3 个宽度为 1.0 mm,深度为 0.8 mm 的槽,即构成了 3 个测温敏感区节。

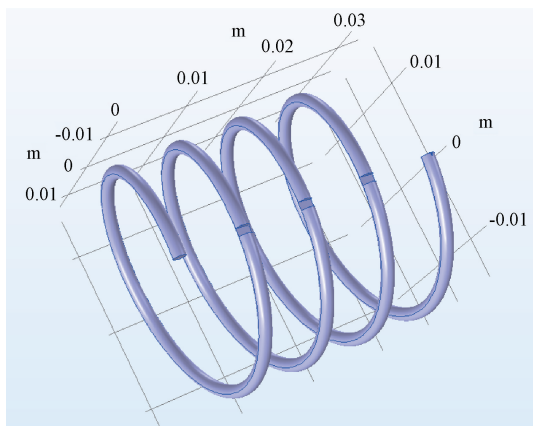


图 4 敏感元件结构示意图

COMSOL 声—热学仿真中每一个温度点的相关物理参数没有储存,需要手动添加,通过查阅相关物理特性资料,以及以往的波导直杆实验数据积累,将相关的参数与温度建立对应,表 1 所示为钨铈合金的部分物理参数数据^[17-21]。

表 1 物理特性参数

杨氏模量/GPa	$E = -0.163T + 445.03$
泊松比	0.22
密度/(kg·m ⁻³)	$\rho = \frac{\rho_0}{1 + 2\alpha T}$
导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\lambda = 48.36 - \frac{9\,169.86}{1 + e^{\frac{T - 1\,883.62}{304.62}}}$
声速/(m·s ⁻¹)	$c = 1\,600.43 + \frac{2\,738.63}{1 + e^{\frac{T - 3\,450.9}{1\,138.4}}}$
热膨胀系数/K ⁻¹	$\alpha = (0.000\,461 \times T + 5.63) \times 10^{-6}$

对比实验,选择 COMSOL 中的固体传热以及压力声学进行模拟,由于高温环境改变了材料的物理特性没有改变材料的化学特性,还需要添加固体力学进行多物理场耦合,在压力声学模块添加压力选项,波导丝的底端边界添加指定位移信号施加变化的压力(图 5)模拟超声的振动传播方式,沿波导杆传播。

对于仿真需要添加一个容易探测且效果明显的声波

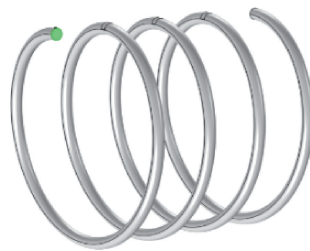


图 5 超声导波的激励和接收界面

信号,所以选择添加一个大周期的导波信号,只有一个最大值的波峰。

添加压力激励信号为纵向模态导波,其函数形式如下:

$$S(t) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{a}\right) \cdot \sin(2\pi ft), \quad t < aT \quad (4)$$

式中: f 为信号中心频率; T 为信号激励周期。当激励周期数设为 4、中心频率设为 250 kHz,得到的激励信号波形如图 6 所示。

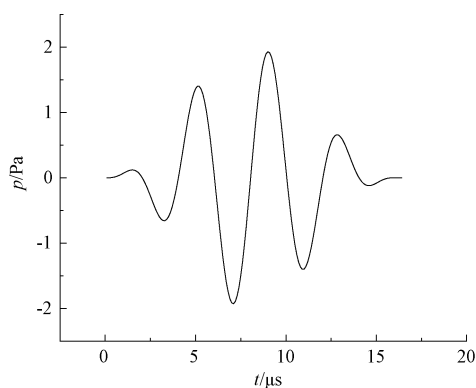


图 6 激励信号波形

3.2 仿真结果及处理分析

仿真采取每 100 °C 记录一次数据^[10],仿真结束后,可以非常直观地观察到超声导波在钨铈杆中的传播过程,图 7 所示是仿真计算得到的超声导波能量在螺旋的钨铈杆中的传播过程示意图。从图 7 可以观察到,超声导波在遇到凹槽及端面后的反射与透射过程,每遇到一个凹槽就会反射回一小部分波,在初始端点探知这部分能量,转化为波形信号,这就是超声测温获得声速及时间间隔的原理。



图 7 超声能量分布

选取钨铈杆模型上靠近激励端的点添加探针探测,查看超声导波的位移随时间的变化曲线(图 8),然后观察超声导波在钨铈杆内凹槽及端面处的反射信号的特性,可以

明显看到超声导波在凹槽及端面处超声反射信号波形的幅值及宽度。通过计算接收到3个凹槽以及结束端面的三段回波信号的时间差 t ,就可计算出超声导波的传播速度 $v(T)$ 。

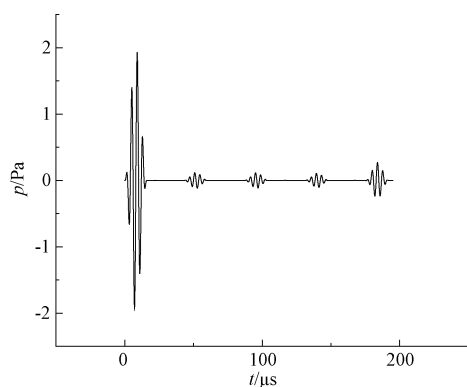


图8 总声压仿真波形

通过图8可以清楚地看出回波的波峰,利用互相关算法^[10]选取端面波与回波计算出对应温度点下的时差及声速,算得的3个仿真节点数据如表2所示,声速—温度曲线如图9所示。

表2 仿真处理数据

温度/℃	第1节点声速/(m·s ⁻¹)	第2节点声速/(m·s ⁻¹)	第3节点声速/(m·s ⁻¹)
100	4 186.930 7	4 176.296 3	4 190.344 8
400	4 155.184 3	4 144.705 9	4 148.292 7
700	4 103.301	4 093.075 1	4 096.867 5
1 000	4 042.679 4	4 032.744 6	4 046.666 7
1 300	3 974.117 6	3 964.507	3 968.785
1 600	3 880	3 880	3 884.576 7

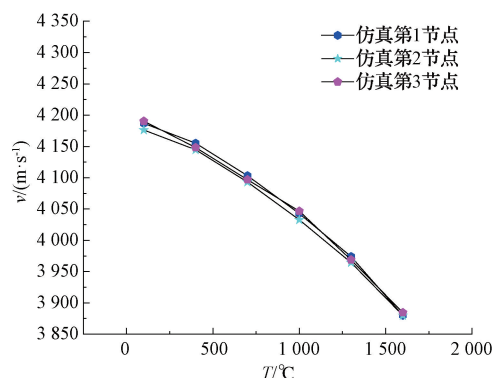


图9 声速—温度曲线

再使用 Origin 进行多项式拟合可得曲线:

$$v(T) = (-7.5113 \times 10^{-5})T^2 - 0.07597T + 4195.6 \quad (5)$$

式中: T 为环境的温度; $v(T)$ 为超声波的声速。

由图9及式(5)可知,仿真软件中钨铼合金内部超声波声速随温度呈二次线性变化。

4 实验与结果分析

仿真的结果表明对于螺旋形的波导杆理论上是可以测量声速的变化进而推导当时环境中温度,然后需要在实验中进一步验证螺旋杆在现实高温环境下声速与温度的关系。实验中需要制作与仿真中相同参数的传感器,选用实验室标准高温标定炉进行实验,用于在高温试验炉中进行多级温度测量实验工作的超声螺旋温度传感器如图10所示。

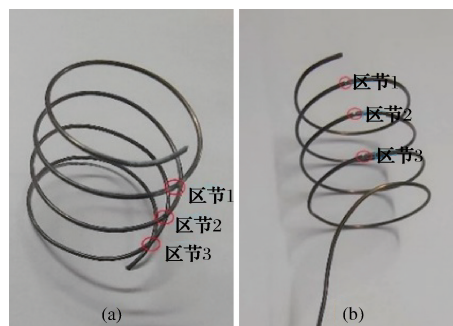


图10 传感器

表3所示为实验制作传感器的相关参数。

表3 传感器结构参数

材料	长度	截面半径	凹槽深度	平均螺旋直径	螺距
WRe25	80 cm	1.6 mm	0.8 mm	28 mm	8 mm

使用250 kHz的压电式超声换能器作为超声激励源,将加工装配好的螺旋状超声测温传感器放入1600℃的高温标定炉中,传感器如同仿真一样设置3个凹槽,对0~1600℃区间内每间隔100℃进行示波器信号的采样。图11所示为实验现场图。通过调整凹槽之间的间距,在这种情况下,整个螺旋波导系统被定位在炉内的均匀温度区域。



图11 试验现场

实验过程中在均匀热区的螺旋波导上,使用内部的标准热电偶监测相应的温度,以做到相应的温度校准^[9]。

图12所示为示波器采集的超声信号波形,3次实验结果可以清晰地辨别3个节点波以及端点波的位置,与仿真结果基本一致。根据实验步骤对传感器进行标定实验。得到的数据经过MATLAB和Origin处理可以得到超声温度传感器的动态响应曲线如图13所示。

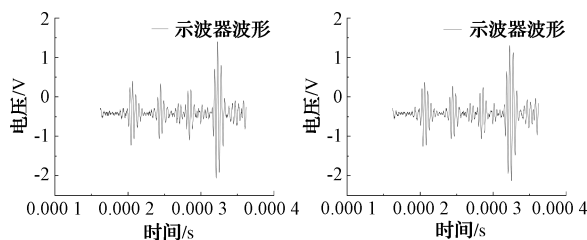


图12 示波器采集波形

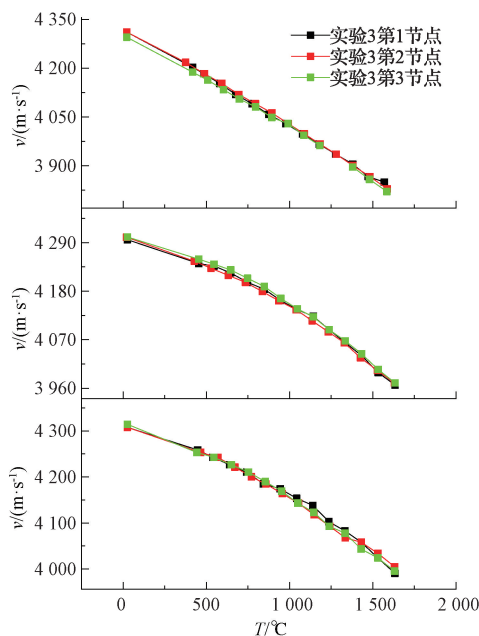


图13 标定曲线

使用 Origin 进行多项式拟合可得曲线:

$$v(T) = (-5.703 \times 10^{-5})T^2 - 0.1388T + 4307.4068 \quad (6)$$

式中: T 为环境的温度; $v(T)$ 为超声波的声速。

综上所述,当超声传感器放进恒温加热标定炉中时,随着温度的升高,声速下降的趋势慢慢变大,可拟合为二次函数,计算可得其标定误差为 0.23%,通过 3 次实验可以得到该传感器具有较好的可重复性,且误差较小,此超声传递过程需要经历一定的时间,由此可见温度是影响声速的重要原因之一。

5 模拟与实验结论对比分析

仿真与实验数据的平均值对比如图14所示,超声信号在螺旋形波导杆传播时,仿真输入数据的结果变化量跟实验结果的标定曲线基本相同,都是随着温度的升高声速

逐渐下降,但是由于 COMSOL 软件内部算法问题以及输入的相关物理参数拟合曲线的误差,将以前实验测得的声速值输入软件中以后,经过运算与实际实验结果相比出现 60~120 m/s 的下降,误差率在 1.4%~2.8%,但是曲线整体的走势变化较小。说明可以通过 COMSOL 仿真模拟出螺旋状超声传感器的声速-温度特性,再进行现实实验验证猜想。需要注意的是由于超声的衰减特性可能会限制波导杆的长度。

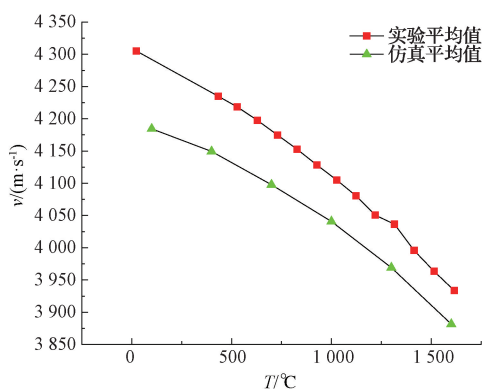


图14 仿真与实验数据

6 结论

本文提出一种新型的螺旋超声测温传感器,并进行验证研究,首先通过查询钨铼合金的相关研究以及实验数据的积累,获得声速、杨氏模量、热膨胀系数等数据,然后设计传感器仿真环境和传感器的结构,从而获得超声信号在螺旋型传感器的动态输出,最终计算出相应的声速-温度的关系。其次通过恒温标定加热炉对传感器进行标定,得到相应的声速-温度动态响应曲线。最后通过对比实验结果与仿真结果可知,传感器精度较高,螺旋状的波导杆可以用来进行测温。本文只使用了 3 个凹槽,增加传感器的数量也是可行的,但可能取决于材料及其传感器材料对超声波的衰减能力。对于传感器的实际使用可以选择频率较低的声波确保螺旋直径更小,也可以使用较小值的螺距,就可以更好地适应环境的变化,进行多区节不同温度的测量,对于航空发动机、核电站和一些变化的较小环境等的温度测试都有重要作用,为基于超声的异型波导测温的发展以及验证提供了一定的理论基础和测试方法。

参考文献

- [1] 魏艳龙,王高,王兴起,等. 钨铼合金超声导波方法的固体火箭发动机燃烧室温度测试[J]. 推进技术, 2018,39(8):1856-1862.
- [2] 王凯. 蓝宝石超声导波原理的温度分布传感器[J]. 国外电子测量技术, 2019,38(4):88-92.
- [3] JIA J, WANG Q, LIAO Z, et al. Design of waveguide bars for transmitting a pure shear horizon-

- tal wave to monitor high temperature components[J]. *Materials*, 2017, 10(9):1027-1040.
- [4] PERIYANNAN S, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Multiple temperature sensors embedded in an ultrasonic "spiral-like" waveguide[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(3): 035201.
- [5] PERIYANNAN S, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Ultrasonic bent waveguides approach for distributed temperature measurement[J]. *Ultrasonics*, 2017, 74: 211-220.
- [6] RAJA N, BALASUBRAMANIAM K, PERIYANNAN S. Ultrasonic waveguide-based multi-level temperature sensor for confined space measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(14): 5699-5706.
- [7] 王彦,金萍,赵慧,等. 基于 FBG 柔性传感器的形状重构[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(12): 83-91.
- [8] 王楠楠,师钰璋,王高,等. 蓝宝石光纤高温测量技术进展[J]. *计测技术*, 2018, 38(6): 61-68.
- [9] WEI Y, GAO Y, XIAO Z, et al. Ultrasonic Al_2O_3 ceramic thermometry in high-temperature oxidation environment[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1905.
- [10] 许琳,王高,吕国义,等. 超声测温技术在模拟航空发动机燃烧室温度测量中的应用[J]. *测试技术学报*, 2019, 33(2): 178-184.
- [11] 苗婉茹,杨录,梁海坚,等. 蓝宝石超声高温传感参数技术研究[J]. *中国测试*, 2022, 48(2): 118-123.
- [12] 王琳,王黎明,聂鹏飞,等. 非连续阻抗结构超声传播特性分析[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(10): 140-144.
- [13] PERIYANNAN S, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Torsional mode ultrasonic helical waveguide sensor for reconfigurable temperature measurement [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(6): 065116.
- [14] 苏世雄. 超声导波测温关键技术研究[实现[D]. 太原:中北大学, 2018.
- [15] 肖旭东,杨录,刘康驰,等. 基于钨铼合金的超声导波温度传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(1): 106-109.
- [16] 崔佳嘉,马宏忠,李楠,等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4): 48-55.
- [17] PERIYANNAN S, BALASUBRAMANIAM K. Temperature dependent E and G measurement of materials using ultrasonic guided waves[C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2014, 1581(1): 256-263.
- [18] DENG T, RAZUMOVSKIY V, ROMANER L, et al. Thermal expansion coefficient of WRe alloys from first principles[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(3): 035148.
- [19] 王峰,郑欣,李来平,等. 钨铼合金制备方法和高温力学性能的研究进展[J]. *中国钨业*, 2014, 29(2): 37-40.
- [20] PERIYANNAN S, BALASUBRAMANIAM K. Temperature gradients and material properties measurements using ultrasonic guided waves[C]. *European Conference on Non-Destructive Testing*, 2014: 6-10.
- [21] AKIYOSHI M, GARRISON L M, GERINGER J W, et al. Thermal diffusivity of irradiated tungsten and tungsten-rhenium alloys[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, 543: 152594.

作者简介

刘良明,硕士研究生,主要研究方向为超声测温系统。
E-mail: 2270910541@qq.com