

文章编号:1671-6833(2024)04-0140-07

基于超声导波的高温管道壁厚监测技术优化

周俊岑, 甘芳吉, 王思宇, 钟 涛, 杨随先

(四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610041)

摘 要: 超声导波技术因可将超声换能器与高温环境隔离而常被用于高温管道的壁厚监测系统, 但高温下常规耦合技术失效问题和信号信噪比低的问题影响了测量系统的可靠性和测量精度。设计用于传导超声信号的导波杆, 基于声学匹配原理优化干耦合技术, 解决高温环境下常规耦合技术的失效问题。提出自适应激励方式和测量数据的乘幂算法以提高高温下测量系统的自适应性和信号信噪比。采用智能分段声速方法对声速进行修正, 使高温超声导波测厚系统的测量精度达到 ± 0.03 mm。实验结果表明: 在 500 °C 的长期热源环境下, 超声波换能器端的温度最高不超过 56 °C, 验证了测量系统在高温环境下的可靠性。

关键词: 超声导波技术; 高温管道; 壁厚测量; 声速修正; 长期监测可靠性

中图分类号: TP23

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.04.006

石化行业中的高温运输管道, 如大型锅炉系统内的管道工作温度在 350~530 °C, 在进行厚度监测时, 传统超声检测所用的耦合剂在高温下容易挥发, 导致耦合效果变差, 不利于超声波信号的传输。而且超声换能器长期工作在高温环境下, 换能器会去极化而失效, 因此不适用于高温环境的长期监测。导波技术将导波杆作为隔热器件, 延长热源与换能器间的热传导距离, 以解决换能器长期在高温下工作中出现的去极化问题。导波技术在超声测厚中的应用始于 20 世纪 70 年代。Kim 等^[1]使用导波杆作为辅助工具对一炼油厂的蒸汽转换炉进行了声发射检测。Cegla 等^[2]制造了一种高温超声测量系统, 采用导波杆将传感器和压电元件隔离在高温测量区外, 但由于没有对高温下的声速进行深入研究, 得到的测量精度并不高。Bhadwal 等^[3]研究了在压电超声换能器干耦合界面填充退火处理的银箔的可行性。王刚等^[4]通过对不同频率 SH₀ 波信号纯度的分析, 得到信号较好的频率范围, 并验证了超声导波对高温管道壁厚测量结果的可靠性。Liao 等^[5]在室温至 350 °C 范围内研究了超声导波在干耦合下的高温检测特性, 但并未对更高温度下的信号传输情

况进行探究。白雪皎等^[6]研究了被测管道厚度、材料、噪声水平以及温度对壁厚测量结果的影响, 提出双探头测厚适用于小壁厚测量, 而单探头则更适合测量厚度较大的管道。

本文在已有研究基础上对基于超声导波的高温管道壁厚监测技术进行了优化。改进高温环境的干耦合方式, 提出适用于不同工作温度的超声波激励方式, 并对测量数据采用乘幂算法处理以提高系统在高温下的自适应性和信号信噪比, 采用分段声速修正以提高不同温度范围内的测量精度, 解决了高温下监测管道厚度时传感器耦合失效以及信号信噪比较差的问题。

1 测量原理及传感器结构

1.1 测量原理

系统工作原理如图 1 所示。电路发出激励信号使超声换能器产生超声波, 随导波杆传递到被测件, 分别在被测件上、下表面发生反射, 形成一次、二次回波。根据两次回波到达接收端换能器的时间差求得被测件厚度。系统所使用的压电换能器谐振频率^[7]为 2.5 MHz。

收稿日期: 2024-01-07; 修订日期: 2024-02-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021CDZG-15-SCU); 四川省科技支撑计划项目(2021JDRC0090); 四川大学研究生培养教育创新改革项目(GSALK2021017)

通信作者: 杨随先(1965—), 男, 四川泸州人, 四川大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事电磁无损检测技术、机构学与空间机构、机器人机构、产品设计理论与创新设计方法研究, E-mail: yangsx@163.com。

引用本文: 周俊岑, 甘芳吉, 王思宇, 等. 基于超声导波的高温管道壁厚监测技术优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 140-146. (ZHOU J C, GAN F J, WANG S Y, et al. Optimization of wall thickness monitoring technology for high temperature pipelines based on ultrasonic guided waves[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 140-146.)

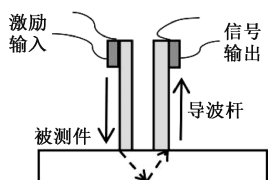


图 1 基于超声导波的高温管道测厚系统原理图

Figure 1 Schematic diagram of high temperature pipe thickness measurement system based on ultrasonic guided wave

1.2 传感器结构

所设计的导波杆外形尺寸如图 2 所示,其厚度为 1.5 mm。

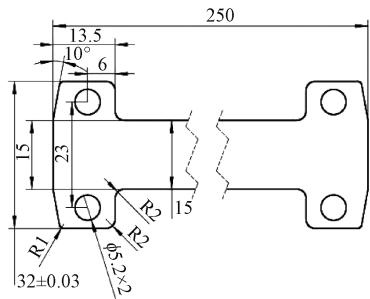


图 2 导波杆外形尺寸 (mm)

Figure 2 Waveguide rod external dimension (mm)

压电换能器必须稳定地固定在导波杆上端且应与导波杆接触良好,以尽可能减少在超声波传递过程中的能量损耗,使用超声耦合剂将换能器粘贴在导波杆侧面的顶部,并使其振动方向与导波杆宽度方向平行,如图3所示。

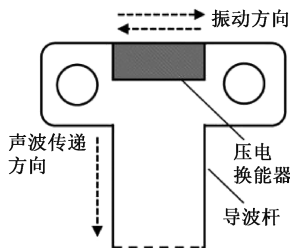


图 3 导波杆粘贴方式示意图

Figure 3 Adhesion method of waveguide rod

1.3 高温干耦合方式

导波杆应与被测件紧密接触,以消除空气介质。否则形成的空气层会反射声波,造成较大能量损耗。采用适用于高温工作环境的干耦合的方式^[5],通过紧固螺栓将导波杆末端紧压在被测件上,并在导波杆与被测件接触面上放置一薄铜垫片^[8]。铜片较软,能更好地与被测件表面贴合,提高高温下耦合的可靠性。当铜皮厚度 d 与超声波波长 λ 满足 $d = n\lambda/2$ (n 为整数) 时,超声波会在铜皮临界面发生全透射,不会影响测量信号的强

度。为保证得到清晰的回波信号,需要的夹紧力为 $500 \sim 2\,000\text{ N}^{[2]}$ 。

交替拧紧两边螺母使夹具两端均匀受力,给换能器施加 100 V 激励信号,当可以看到两次清晰的回波且一次回波幅值在 60 mV 左右时,可认为耦合良好。干耦合夹持方式正视图如图 4 所示。

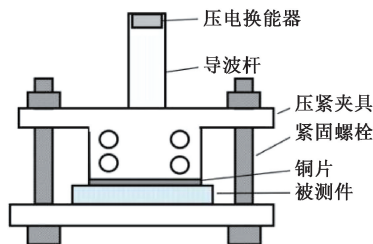


图 4 干耦合夹持方式

Figure 4 Dry coupling clamping mode

2 导波杆隔热仿真模拟及实验

常规超声换能器工作温度范围一般在 $-20 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所设计的导波杆应保证在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度下其末端温度在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。选择 304 不锈钢为导波杆材料。使用 COMSOL 进行热仿真分析。在建立仿真模型时, 给导波杆外部施加空气场模拟实际工作的外部环境, 在导波杆一端设置 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度载荷, 对该模型进行瞬态热传导分析, 可得导波杆上温度分布。对导波杆进行散热效果测试实验, 加热导波杆, 使用温度传感器测量实时温度。实验示意图如图 5 所示。将距导波杆底端分别为 10、20、30、60、90、120、150、200、250 mm 处的位置作为测量点; 对导波杆一端加热至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 持续 120 min, 测量导波杆不同测量点的温度, 与仿真结果对比, 如图 6 所示。

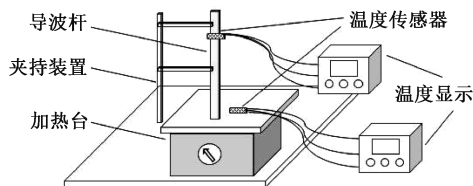


图 5 导波杆隔热效果测试示意图

Figure 5 Schematic diagram of heat insulation effect test of waveguide rod

由图 6 可知,实验结果与仿真结果大致相同,温度分布规律基本一致。加热过程中靠近加热炉一端温度变化速率更快,远离加热炉一端温度变化速率较慢。导波杆末端温度在 45 ℃ 左右,处于压电换能器工作温度范围内。实验证明,250 mm 长的导波杆可以实现本文所要求的隔热效果。

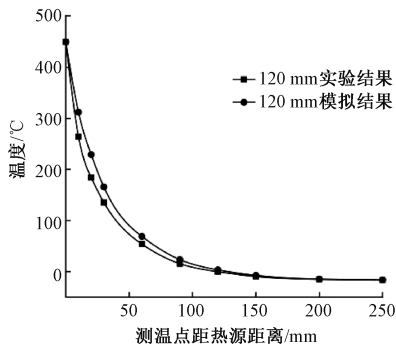


图 6 500 °C 仿真与实验结果对比

Figure 6 Comparison of simulation and experimental results at 500 °C

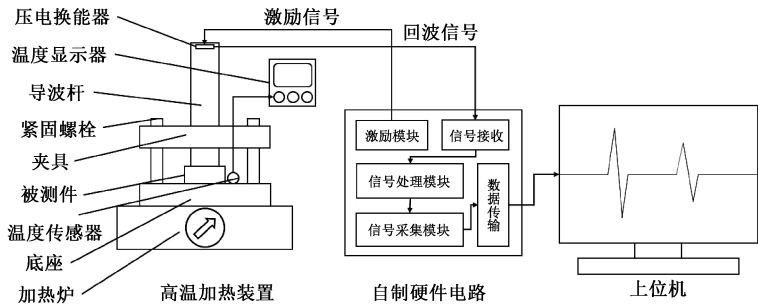


图 7 高温测厚实验示意图

Figure 7 Schematic diagram of high temperature thickness measurement experiment

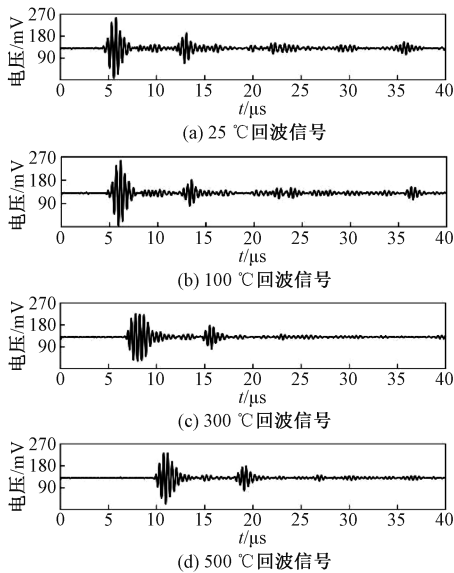


图 8 不同温度下采集到的回波信号

Figure 8 Echo signals collected at different temperatures

4 高温管道壁厚测量关键技术

4.1 超声波数据处理方法

为提高系统的测量精度,对测量数据采取插值算法以从软件层面提高采样频率。设计使用三倍频对数据进行处理,即在 2 个采样点间插入 2 个数据点。选择两次牛顿插值:

$$N_2(x) = f(x_0) + (x - x_0)f[x_0, x_1] +$$

3 高温壁厚测量实验

高温实验被测件是一个材料为碳钢的弧形块,其常温下厚度用千分尺测得为 11.852 mm。高温测厚实验示意图如图 7 所示。图 8 为将被测件从 25 °C 加热至 500 °C 过程中每隔 25 °C 进行一次测量得到的部分回波数据折线图。

由图 8 可以看出,随着温度升高,上表面回波到达时间滞后,上下表面回波到达的时间间隔变大,这表明随着温度升高,横波声速减小。

$$(x - x_0)(x - x_1)f[x_0, x_1, x_2]。 (1)$$

对所测得的波形数据进行处理。去除信号中直流分量使信号更具有零均值特性,系统采集到的离散信号序列 $x[n]$, 其长度为 4 000, 去直流分量公式为

$$x_{dc} = x - \mu(x)。 (2)$$

式中: x_{dc} 为去除直流分量之后的信号; $\mu(x)$ 为信号平均值。

由图 9(a) 可以看出,原始信号波形尖峰处有较为明显的失真,对去除直流分量后的信号 x_{dc} 使用牛顿插值,在每 2 个原始数据点之间插入 2 个点,插值后的波形如图 9(b) 所示,其中局部放大如图 9(c)、9(d) 所示。插值后与原始信号相比,波包 A 与波包 B 处尖峰值更明显。

由图 8 可知,随着温度升高,回波信号幅值逐渐降低。采用乘幂处理提高高温下测量信号的信噪比:把去除直流分量的信号负半周翻转至正半周,将各采样点数值二次幂后缩至 1/10。结果如图 10 所示。其包络线由希尔伯特变换得到^[9-10]。对比图 9(a) 和图 10 可看到信号信噪比显著提高,信噪比为

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}。 (3)$$

式中: P_s 为信号功率; P_n 为噪声功率。

将信噪比换算成电压表示,即

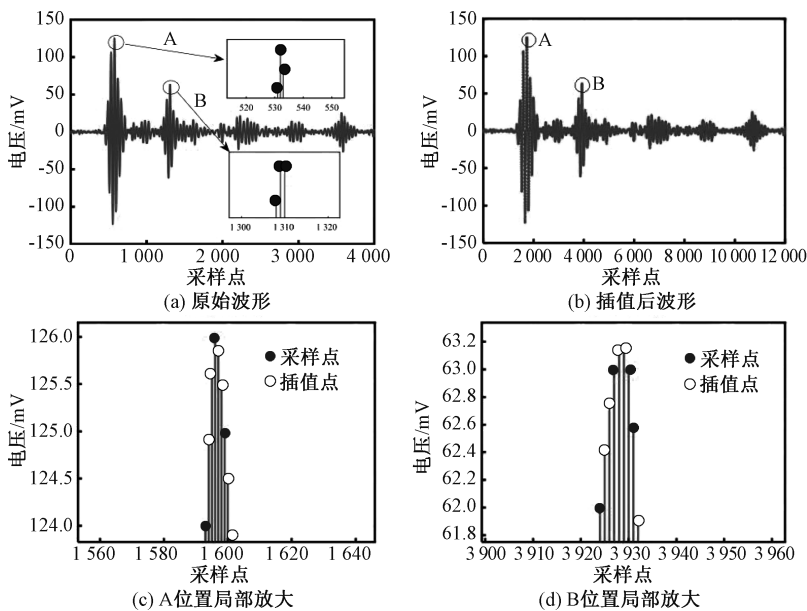


图 9 插值倍频

Figure 9 Interpolation frequency doubling

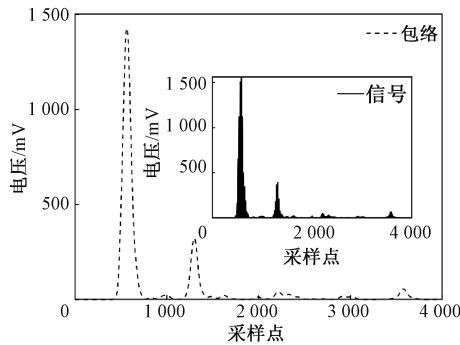


图 10 乘幂处理后的信号及其包络线

Figure 10 Power processing signal and its envelope

$$SNR = 20 \lg \frac{V_s}{V_n} \quad (4)$$

式中： V_s 、 V_n 分别为信号和噪声的有效电压值。

对 V_s 、 V_n 分别进行 m 次乘幂处理,此时信号的信噪比为

$$SNR_m = 20 \lg \frac{V_s^m}{V_n^m} = m \times SNR \quad (5)$$

可知经过乘幂处理的信号信噪比为原始数据信噪比的 m 倍。对图 9(a) 信号进行二次幂处理得到图 10,计算得到原始信号 $SNR_1 = 7.8 \text{ dB}$,乘幂后信号的信噪比 $SNR_2 = 15.5 \text{ dB}$,乘幂处理后的信号信噪比是原始信号信噪比的两倍。

4.2 声速分段补偿技术

由于固体中超声波声速受温度影响,实验中计算被测件厚度测量值时,根据实际温度对声速进行了修正。对于横波,声速为^[11]

$$u = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \sigma)\rho}} \quad (6)$$

式中： E 为固体材料的杨氏弹性模量； ρ 为材料密度； σ 为泊松比。

线膨胀系数在 $-100 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时与温度基本无关,固体材料杨氏弹性模量与温度近似满足^[12-13]：

$$E = E_0 \left(1 - m\alpha_0 T + \frac{1}{2} m^2 \alpha_0^2 T^2 \right) \quad (7)$$

式中： E_0 为绝对零度时的弹性模量； α_0 为绝对零度时的线膨胀系数； m 为弹性模量的温度系数与线膨胀系数之比,一般取 24.66。根据国家标准,20 $^\circ\text{C}$ 时碳钢弹性模量 $E = 20.000 \times 10^{10} \text{ Pa}$,可计算得到 $T=0$ 时 $E_0 = 21.878 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。

碳钢在不同温度下的线膨胀系数为

$$\alpha = \alpha_0 (1 + bT) = \alpha_0 + kT \quad (8)$$

式中： b 为相对变化比例常数； α_0 取值为 $(8.3477 \sim 10.7870) \times 10^{-6}$ ； k 取值为 $3.6763 \times 10^{-9} \sim 1.4509 \times 10^{-8}$ 。取碳钢线膨胀系数为

$$\alpha = 10^{-5} + 7 \times 10^{-9} T \quad (9)$$

固体材料密度与温度的关系可表示为

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{(1 + \alpha T)^3} \quad (10)$$

式中： ρ_0 为固体材料绝对零度时的密度；常温下实验被测件材料密度 $\rho_T = 7.72 \text{ kg/m}^3$ 。

取泊松比 $\sigma = 0.24$,物体中横波声速与温度的关系可表示为

$$u_s = \sqrt{\frac{E_0(1 + kT^2 + \alpha_0 T)^3}{2(1 + \sigma)\rho_0} \left(1 - m\alpha_0 T + \frac{1}{2} m^2 \alpha_0^2 T^2 \right)} \quad (11)$$

通过式(11)可得 25 ~ 300 ℃ 声速。对于超过 300 ℃ 的声速,由于温度对线膨胀系数影响较大,进而影响材料的弹性模量,故对该温度范围内的声速采用 10 mm 标准量块进行修正,在 300~500 ℃ 的等温度间距测量不同温度下对应的声速,并考虑被测件在高温下热膨胀的影响:

$$h_T = h_0(1 + \alpha \Delta T)。$$

式中: h_T 为考虑材料热膨胀效应后的实际厚度,mm; h_0 为被测件常温下厚度,mm; ΔT 为温度变化量,K。

表 1 单发单收模式实验结果

Table 1 Experimental results of single issue and single receive mode								
温度/℃	P_1	P_2	Δl	$\Delta t/\mu s$	$v/(mm \cdot \mu s^{-1})$	h/mm	h_T/mm	$\Delta h/mm$
25	1 731	3 927	732.0	7.320	3.235	11.838 2	11.852 0	-0.013 8
100	1 843	4 069	742.0	7.420	3.196	11.858 3	11.863 2	-0.004 9
150	1 968	4 210	747.3	7.473	3.170	11.843 7	11.871 2	-0.027 5
200	2 197	4 462	755.0	7.550	3.142	11.862 1	11.879 6	-0.017 5
250	2 255	4 541	762.0	7.620	3.114	11.864 5	11.888 4	-0.023 9
300	2 411	4 717	768.7	7.687	3.097	11.904 8	11.897 7	0.007 1
350	2 567	4 893	775.3	7.753	3.073	11.911 5	11.907 3	0.004 2
400	2 784	5 131	782.3	7.823	3.046	11.912 6	11.917 4	-0.004 8
450	2 979	5 361	794.0	7.940	3.006	11.935 2	11.927 9	0.007 3
500	3 284	5 720	812.0	8.120	2.941	11.940 1	11.938 8	0.001 3

由表 1 可知,单发单收的测厚方式精度较高,各温度下被测件厚度测量值的误差均在±0.03 mm。实验中被测件加热到 500 ℃ 时,导波杆末端温度经测量仅为 53 ℃,表明所设计的检测探头不仅能在 500 ℃ 的高温下对管道壁厚进行测量,且测量结果准确。

4.3 高温环境自适应激励方法分析

高温下超声波衰减程度增大,回波信号的幅值会受到影响。为尽可能保证高温下信号信噪比接近于常温信噪比,需要根据温度对激励周期数进行调整。单周期激励时温度下回波信号如图 11 所示。由图 11 可知,随着温度升高,两次回波信号幅值均有下降,不利于回波信号峰值位置的检测。通过激励周期数可调电路对激励信号周期数进行调整,以适应不同温度下的测量环境。在 100、500 ℃ 的温度下分别采用 1~4 周期激励,得到对应的波形如图 12 所示。由图 12 可知,随着温度升高,双周期激励的二次回波信号衰减明显;三周期激励信噪比较高;在四周期激励下,虽然信噪比更高,但由于回波包络更宽而导致误判峰值信号使测量结果误差较大。因此,随着温度升高,系统分别使用不同周期数的激励模式,既保证了测量精度又提高了回波信号的信噪比,增强了系统可靠性。

对声速测量结果进行多项式拟合,最终得到拟合曲线为

$$v = -3.77 \times 10^{-10} T^5 + 1.236 \times 10^{-6} T^4 - 1.632 \times 10^{-3} T^3 + 1.082 T^2 - 359.899 T + 51\,223.096。$$

(13)

式中: T 为温度,K; v 为声速,m/s。

通过分段声速修正得到所有实验温度下的厚度测量结果,如表 1 所示。其中, P_1 、 P_2 分别为 2 次回波波峰点所在位置; Δl 为两次回波波峰间间隔点数; Δt 为对应的时间间隔; v 为对应温度下声速; h 为厚度测量值; Δh 为绝对误差。

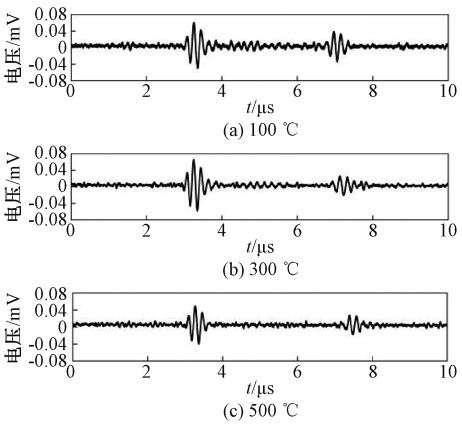


图 11 单周期激励各温度回波信号

Figure 11 Single-cycle excitation of the echo signal at each temperature

5 高温长期可靠性验证实验

将被测件转移至密闭高温炉持续加热 72 小时,保持温度在 450~500 ℃,每天 9 时、15 时、21 时各测量一次当前温度下的厚度,得到表 2 的数据。其中温度 1 为被测件温度,温度 2 为导波杆顶端温度。

由表 2 可以看出,在 72 h 的持续监测下,测得的管道壁厚误差均在±0.03 mm,相较于文献[2,4]所设计的误差为 0.08~0.10 mm 的测厚系统,精度

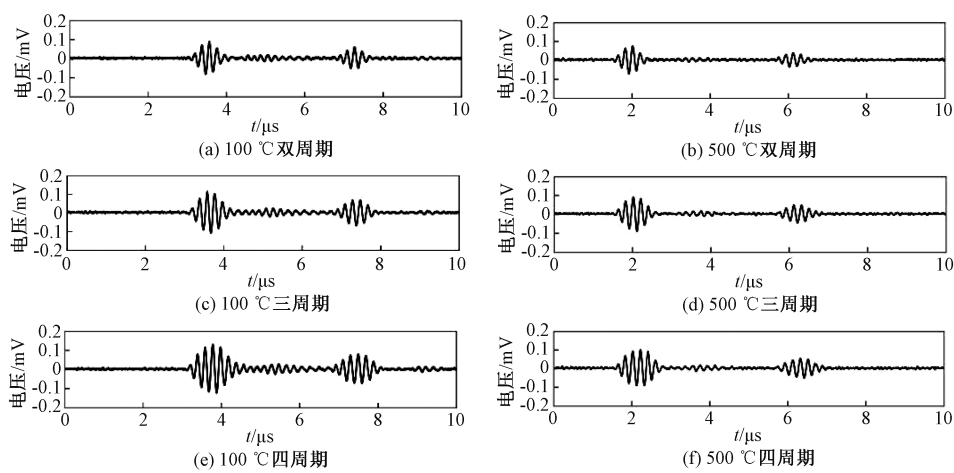


图 12 不同温度下激励周期数对回波信号的影响

Figure 12 Effect of the number of excitation cycles on the echo signal at different temperatures

表 2 高温 72 h 测厚数据

Table 2 Thickness measurement data at high temperature in 72 h

时间	温度 1/℃	温度 2/℃	时间/μs	$v/(mm \cdot \mu s^{-1})$	h/mm	h_r/mm	$\Delta h/mm$
第 1 天 9:00	497.1	49.4	8.09	2.946	11.916	11.938	-0.022
第 1 天 15:00	503.4	50.7	8.13	2.936	11.930	11.940	-0.010
第 1 天 21:00	498.3	52.7	8.12	2.944	11.952	11.938	0.014
第 2 天 9:00	478.5	45.1	8.02	2.974	11.925	11.934	-0.009
第 2 天 15:00	498.4	51.1	8.11	2.944	11.937	11.938	-0.001
第 2 天 21:00	507.1	54.8	8.13	2.934	11.925	11.940	-0.015
第 3 天 9:00	471.8	47.8	8.01	2.982	11.945	11.933	0.012
第 3 天 15:00	500.4	52.1	8.12	2.940	11.937	11.939	-0.002
第 3 天 21:00	507.7	55.1	8.15	2.936	11.965	11.940	0.025

明显提高。且在 72 h 的加热时间内,导波杆顶端温度最高不超过 56 ℃,并未超出压电换能器最高工作温度。实验证实系统具有在高温环境下对管道壁厚进行长期、准确监测的能力。

6 结论

本文针对高温超声导波技术中的干耦合方法和高温下测量信号信噪比以及测量精度进行了优化研究。利用导波杆隔离换能器与高温被测件,极大降低了换能器工作的环境温度。优化了干耦合技术,解决了高温下超声换能器与被测件耦合的可靠性问题。系统采用了激励周期数可调电路,以适应不同温度下的工作环境,实验结果显示,通过对激励方式的调节,不同温度下采集到的信号均能得到极高的信噪比。采取乘幂法处理回波信号,使高温下的信噪比可根据实际需求进行提高,避免数据采集过程中偶然出现的干扰信号对回波位置判定造成影响。通过声速分段修正法,提高了高温下的测量精度,同一被测件在不同热源温度下所测厚度误差均在±0.03 mm。系统目前已经能够在 500 ℃ 的环境下对管道壁厚进行

长期监测,且具有极高的稳定性及可靠性。

参考文献:

[1] KIM W S, LOTSBERG I. Fatigue test data for welded connections in ship-shaped structures[J]. Journal of Off-shore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(4): 359-365.

[2] CEGLA F B, CAWLEY P, ALLIN J, et al. High-temperature (>500 ℃) wall thickness monitoring using dry-coupled ultrasonic waveguide transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(1): 156-167.

[3] BHADWAL N, TORABI MILANI M, COYLE T, et al. Dry coupling of ultrasonic transducer components for high temperature applications[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5383.

[4] 王刚, 李法新. 基于水平剪切超声导波的高温管道壁厚在线监测[J]. 无损检测, 2019, 41(9): 1-6, 15. WANG G, LI F X. On-line monitoring of high temperature pipeline wall thickness based on the shear horizontal ultrasonic guided wave [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(9): 1-6, 15.

[5] LIAO Z Y, ZHANG X, LIU T Y, et al. Characteristics

of high-temperature equipment monitoring using dry-coupled ultrasonic waveguide transducers[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106236.

[6] 白雪皎, 祝海江. 高温管道超声波测厚方法影响因素仿真研究[J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(2): 55-60. BAI X J, ZHU H J. Simulation-based study on factors affecting ultrasonic thickness measurements of high temperature pipelines[J]. *Metrology Science and Technology*, 2022, 66(2): 55-60.

[7] 王翥, 刘春龙, 罗清华. 超声波传感器特性分析与测试方法的研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2020, 41(2): 13-18. WANG Z, LIU C L, LUO Q H. Research on ultrasonic sensors characteristics and testing method[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2020, 41(2): 13-18.

[8] 魏建新, 王椿镛. 横波测试技术的实验室研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(6): 630-635, 708. WEI J X, WANG C Y. Study of S-wave test and measurement technique in laboratory [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(6): 630-635, 708.

[9] 郭田雨, 严荣国, 方旭晨, 等. 基于希尔伯特变换和自适应阈值的 R 波检测算法[J]. *计算机与现代化*, 2022(2): 114-119. GUO T Y, YAN R G, FANG X C, et al. Detection of R wave based on Hilbert transform and adaptive threshold [J]. *Computer and Modernization*, 2022(2): 114-119.

[10] 沙云东, 陈兴武, 栾孝驰, 等. 基于小波包分解-峭度值指标-希尔伯特包络解调融合方法处理声发射信号的滚动轴承故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9315-9323. SHA Y D, CHEN X W, LUAN X C, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on acoustic emission signal analysis by WPD-KI-HED combination method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9315-9323.

[11] 虞雪芬, 叶凌伟, 夏立. 电磁超声检测中高温对横波声速的影响[J]. *轻工机械*, 2015, 33(4): 54-56. YU X F, YE L W, XIA L. Influence of high temperature on shear wave velocity of EMAT testing[J]. *Light Industry Machinery*, 2015, 33(4): 54-56.

[12] 刘彤, 刘敏珊. 金属材料弹性常数与温度关系的理论解析[J]. *机械工程材料*, 2014, 38(3): 85-89, 95. LIU T, LIU M S. Theoretical analysis of the relationship between elastic constants of metals and temperatures[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2014, 38(3): 85-89, 95.

[13] 徐志东, 范子亮. 金属材料的弹性模量随温度变化规律的唯象解释[J]. *西南交通大学学报*, 1993, 28(2): 87-92. XU Z D, FAN Z L. A phenomenological explanation of the variation of elastic modulus with temperature for metallic materials[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1993, 28(2): 87-92.

Optimization of Wall Thickness Monitoring Technology for High Temperature Pipelines
Based on Ultrasonic Guided Waves

ZHOU Juncen, GAN Fangji, WANG Siyu, ZHONG Tao, YANG Suixian

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Ultrasonic guided wave technology was often used for wall thickness monitoring system of high temperature pipelines because it could isolate the ultrasonic transducer from the high temperature environment. However, the failure of conventional coupling technology and the low signal-to-noise ratio of the signal at high temperature affected the reliability and measurement accuracy of the measurement system. A waveguide rod was designed to conduct ultrasonic signals. Based on the acoustic matching principle, the dry coupling technology was optimized to solve the failure problem of conventional coupling technology in high temperature environment. The adaptive excitation method and the power multiplication algorithm of measurement data were proposed to improve the adaptability and signal-to-noise ratio of the measurement system at high temperature. Intelligent segmentation of the speed of sound was used to correct the speed of sound, and the method made the measurement accuracy of the high-temperature ultrasonic guided wave thickness measurement system reach ± 0.03 mm. The experimental results showed that the temperature of the ultrasonic transducer end was not more than 56 °C at the maximum under the environment of a long term heat source of 500 °C, which verified the reliability of the measurement system in high temperature environments.

Keywords: ultrasonic guided wave technology; high temperature pipeline; wall thickness measurement; sound velocity correction; reliability of long-term monitoring