doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.05

基于超声导波的变温管道壁厚监测方法

潘树华[1]，伍剑波[1*]，夏慧[1]，王哲[2]，黄刚华[3]，龚煜轩[1]

（1.四川大学 机械工程学院，四川 成都 610065；
2.合肥通用机械研究院有限公司 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心，安徽 合肥 230031；
3.中国石油西南油气田公司 天然气研究院，四川 成都 610200）

摘　要：针对石化高温管道运行中因温度波动导致超声壁厚测量精度下降的问题，提出一种基于超声导波信号反演温度并对壁厚进行补偿的测量方法。建立二维稳态传热模型，解析波导条温度场分布，构建超声飞行时间预测模型，表征管道温度和波导中超声飞行时间的定量关系，实现高温管道温度的实时测量，在此基础上对超声导波测厚数据进行补偿，提升管道壁厚监测准确性。搭建超声导波测量平台并开展实验，结果表明：在15～500 ℃条件下，该方法可以实现对管道温度变化的精确测量，补偿后的壁厚测量误差为±0.1 mm。该方法突破了现有导波测厚装置在变温环境中的应用瓶颈，为石化装置安全运行提供了技术支撑。

关键词：超声导波；变温管道；壁厚测量；温度补偿

中图分类号：TE8；TQ055.8；O426.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-5795（2025）04-0066-08

Monitoring method for wall thickness of variable-temperature pipelines based on ultrasonic guided waves

PAN Shuhua[1], WU Jianbo[1*], XIA Hui[1], WANG Zhe[2], HUANG Ganghua[3], GONG Yuxuan[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. National Safety Engineering Technology Research Center for Pressure Vessels and Pipeline, Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China; 3. Research Institute of Natural Gas Technology, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610200, China)

Abstract: Aiming at the problem of the decline in the accuracy of ultrasonic wall thickness measurement caused by temperature fluctuations during the operation of high-temperature petrochemical pipelines, a measurement method based on the inversion of temperature and the compensation of wall thickness by ultrasonic guided wave signals is proposed. A two-dimensional steady-state heat transfer model was established, the temperature field distribution of the waveguide strip was analyzed, an ultrasonic flight time prediction model was constructed, the quantitative relationship between the pipe temperature and the ultrasonic flight time in the waveguide was characterized, and the real-time measurement of the temperature of high-temperature pipes was achieved. On this basis, the ultrasonic guided wave thickness measurement data was compensated to improve the accuracy of pipe wall thickness monitoring. An ultrasonic guided wave measurement platform was built and experiments were performed. The results show that within the range of 15 ~ 500 ℃, this method can achieve precise measurement of the temperature change of the pipeline, and the measurement error of the wall thickness

收稿日期：2025-04-25；**修回日期：**2025-05-20

基金项目：国家自然科学基金项目(52205563)

引用格式：潘树华，伍剑波，夏慧，等. 基于超声导波的变温管道壁厚监测方法[J]. 计测技术，2025，45(4)：66-73.

Citation：PAN S H, WU J B, XIA H, et al. Monitoring method for wall thickness of variable-temperature pipelines based on ultrasonic guided waves[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 66-73.

after compensation is ± 0.1 mm. This method breaks through the application bottleneck of the existing guided wave thickness measurement devices in variable-temperature environments, providing technical support for the safe operation of petrochemical plants.

Key words: ultrasonic guided wave; variable temperature pipeline; wall thickness measurement; temperature compensation

0　引言

管道运输作为主要运输方式之一，具有良好的经济性、安全性和环保性等特点，尤其适合流向固定、运量巨大的流体货物长距离运输，被广泛应用于石油化工、能源等行业。在石油化工领域中，许多管道运输的介质具有高温、高压以及化学性质活跃的特性，管道易出现腐蚀和泄漏。对高温管道的壁厚进行监测是保证设备和工厂安全运行的重要措施[1-2]。

超声波测厚是管道壁厚测量中应用最广泛的无损检测技术。然而，目前常用的超声波换能器的耐高温能力有限，无法承受超过250 ℃的高温，这一限制导致高温管道的检测只能在工厂停工期间进行，显著增加了测量成本。近年来，高温超声测厚技术快速发展，CEGLA F B等人[3-4]提出了基于波导的高温超声测厚系统，通过特殊的波导杆结构，将换能器和高温环境隔离，实现了500 ℃环境下的平板厚度监测。王刚等人[5]对超声导波激励信号的频率参数进行了优化，并验证了超声导波高温管道测厚的可行性。上述研究对于推动高温超声测厚技术发展具有积极意义，但未针对温度变化引起的超声声速变化进行实时校正。为准确得到高温环境下的管道壁厚数据，需要进行实时温度监测，并对超声声速进行实时校正，以提升管道壁厚测量的准确性。

目前，超声壁厚测量系统一般基于热电偶进行实时温度监测，实现不同温度条件下的超声声速校正。然而，高温环境下热电偶易发生氧化并引发温漂问题，难以长时间稳定运行。超声导波测温技术基于波导信号进行温度计算，与热电偶测温技术相比，具有稳定性高、适合长期监测的优势[6-7]。国内外科研工作者针对超声导波测温技术进行了大量研究，WONG T Y等人[8]将不锈钢波导作为介质，在波导底端制造矩形缺陷形成测温区域，实现了25 ~ 200 ℃条件下的温度测量。张明[9]在镍铬合金丝的末端设计多个90°弯头，形成多个超声回波，从而实现了分布式温度测量。然而，上述方法需要将测温设备置于被测物体中，无法应用于固体管道温度测量；同时，上述研究将波导的温度分布视为均匀分布，导致测量得到的温度值存在较大误差。

为解决上述问题，本文提出基于超声导波的变温管道壁厚监测方法。通过二维稳态传热方程，对波导的温度场分布进行解析；构建超声飞行时间预测模型，表征管道温度和超声飞行时间的定量关系，降低波导温度分布不均匀对温度测量精度的影响；设计并搭建超声导波实验系统，模拟管道在工作、停工以及环境温度影响等情况下可能遇到的各种温度状态，开展15 ~ 500 ℃条件下的管道测量实验，验证基于超声导波的变温管道壁厚监测方法的应用效果。

1　超声导波测量原理

图1为超声导波测厚原理图，左侧激励探头激励产生水平剪切波，沿左侧波导条传递至管道表面，一部分超声波沿管道表面传递至右侧波导条，再经右侧波导条传递至接收探头；另一部分超声波折射进入管道内部，经过管道内表面反射后再折射出管道，经过右侧波导条传递至接收探头。图2展示了超声导波测厚装置的典型回波信号。导波回波信号中包含两类声时信息——首个回波飞行时间 T_{TOF}（Time of Flight，TOF）和回波时间差 ΔT_{TOF}。在进行超声导波测厚时，首次接收到的回波并没有经过管道内部，而是经管道外表面直接进入右侧波导并被接收探头捕捉。由于波导的长度是固定的，首次回波信号的 T_{TOF} 与波导上的温度分布密切相关。超声波在固体中的传播速度主要受到固体材料密度和弹性模量的影响，当温度发生变化时，这2个参数也会相应变化，进而影响超

声波在固体中的传播速度。因此，通过测量超声在波导中的传播时间，可以间接地推导出波导及其所处环境的温度。

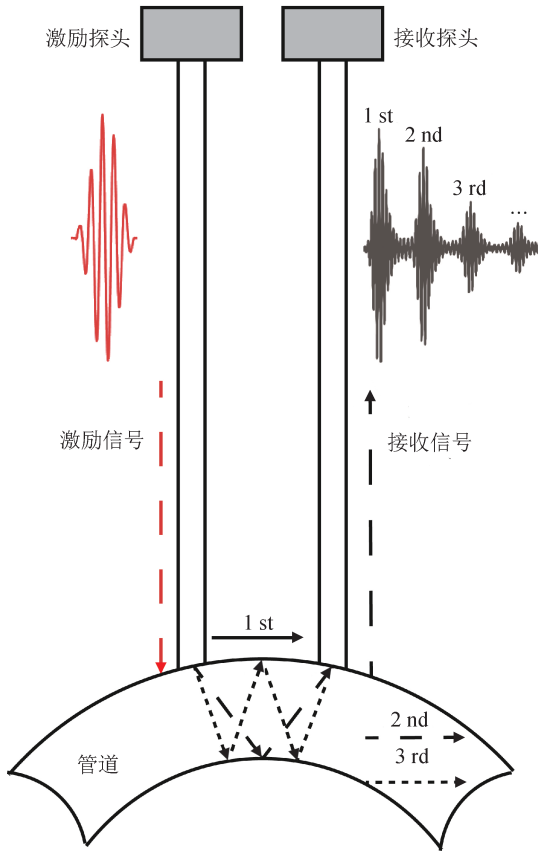


图 1 超声导波管道测厚原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic guided wave pipe thickness measurement

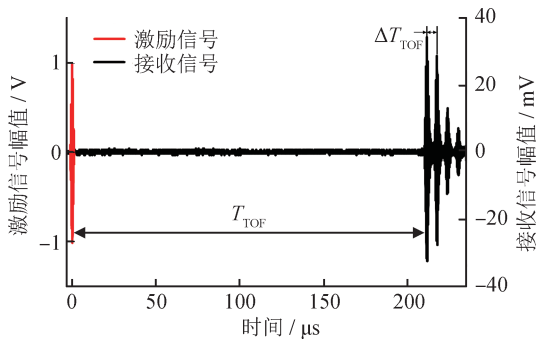


图 2 常温 15 ℃下超声导波激励和接收信号

Fig.2 Ultrasonic guided wave excitation and reception signals at normal temperature of 15 ℃

当超声波从一种介质传播至另一种介质时，由于 2 种介质之间的声阻抗存在差异，超声波会在交界面上发生反射、折射和透射现象。对于具有均匀厚度的物体，反射超声回波的传播总距离为物体厚度的 2 倍。通过测量超声回波到达时间以及在物体内的超声波传播速度，可以计算出物体的厚度[10]，公式为

$$h = \frac{v_{SH0} \cdot \Delta T_{TOF}}{2} \tag{1}$$

式中：h 为被测管道厚度；v_{SH0} 为被测件中的水平剪切波(Shear Wave 0, SH0)声速，计算公式为

$$v_{SH0} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \tag{2}$$

式中：E 为被测材料弹性模量，ρ 为材料密度，σ 为被测材料泊松比。

根据式(1)可知：被测物体中的声速是影响测厚值的关键因素。根据式(2)可知：固体内声速受弹性模量和密度等参数的影响。高温管道输送不同温度介质的过程中，如果测厚系统未能及时对温度变化引起的声速波动进行补偿，将会导致高温管道壁厚测量值产生显著误差。

2 超声飞行时间预测模型

波导的温度分布呈现非线性特征[11-12]，为基于超声飞行时间对管道温度进行测量，本文通过二维稳态传热方程，构建不同管道温度下的波导超声波飞行时间预测模型，建立管道温度与首次回波信号 T_{TOF} 之间的映射。

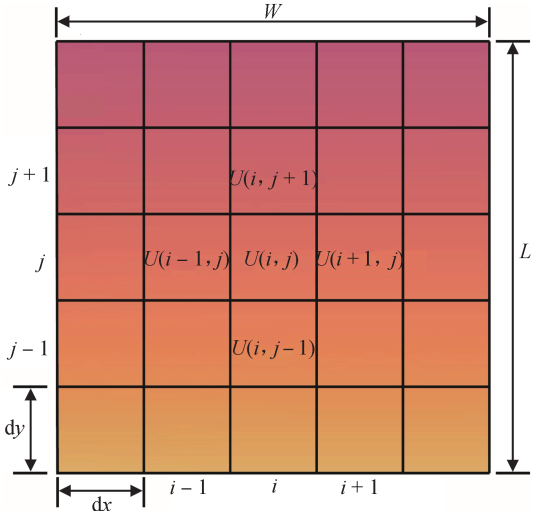


图 3 二维热传导有限差分模型

Fig.3 Two-dimensional finite difference model of heat conduction

假设室温下波导与恒定高温源接触，周围为空气，通过二维传热方程[13-14]，建立二维有限差分模型求解热传导问题，绘制超声沿波导传播路径的温度分布图。二维热传导有限差分模型如图3所示，其中，W为波导条的宽度，L为波导条的长度，U为波导条温度关于W和L的函数。考虑2个表面的面外热通量和面外辐射以及沿长度方向的热传导，二维无内热源热传导方程描述为

$$\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

式中：c_{p}为材料的比热容，T为温度，t为热传导时间，k为导热系数，x、y为空间坐标变量。

由于高温管道的温度场通常处于稳态，本文主要求解稳态条件下的波导温度场分布，即$\partial T/(\partial t)=0$，可以得到二维稳态的热传导方程

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)=0 \tag{4}$$

应用二维有限差分格式将式(4)转换为离散形式，如式(5)、式(6)所示，通过相邻的节点计算$U(i,\ j)$稳态下的温度。

$$\frac{U(i+1,j)-2U(i,j)+U(i-1,j)}{\mathrm{d}x^2}+\frac{U(i,j+1)-2U(i,j)+U(i,j-1)}{\mathrm{d}y^2}=0 \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}y^2U(i+1,j)+\mathrm{d}y^2U(i-1,j)}{2(\mathrm{d}x^2+\mathrm{d}y^2)}+\frac{\mathrm{d}x^2U(i,j+1)+\mathrm{d}x^2U(i,j-1)}{2(\mathrm{d}x^2+\mathrm{d}y^2)}=U(i,j) \tag{6}$$

为计算出每个单元的超声飞行时间，需要确定超声传播速度和温度的函数关系$v(T)$，通过$v(T)$得到不同单元的超声波速度。$v(T)$通常可以表示为线性函数，如式(7)所示。图4展示了不同温度下不锈钢中的SH0声速。

$$v(T)=\mathrm{m}T(x)+\mathrm{n} \tag{7}$$

式中：m和n为常数，由标定得到。

在波导2个温度边界值均已知的情况下，计算获得温度分布，然后推导得到沿该温度分布路径传播的超声波飞行时间预测模型，即

$$T_{\mathrm{TOF}}=\Delta x\left[\left(\frac{1}{v_1}+\frac{1}{v_M}\right)+2\sum_{i=2}^{M-1}\frac{1}{v_i}\right] \tag{8}$$

式中：Δx为波导条长度方向$M-1$等分后最小单元长度，v_1为波导条底端SH0声速，v_M为波导条顶端SH0声速，v_i为沿波导长度方向分布的SH0声速。

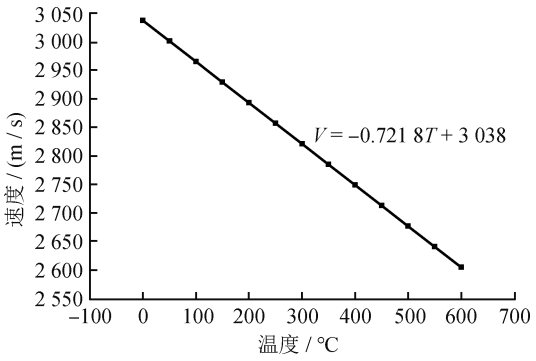


图4　不同温度下不锈钢中的SH0声速

Fig.4　Sound velocity of SH0 in stainless steel at different temperatures

为研究管道温度对超声飞行时间的影响，在COMSOL仿真软件中建立波导条三维模型，模拟金属薄板的稳态传热，波导条材料为不锈钢316L，长度为320 mm，宽度为18 mm，厚度为1.2 mm。波导条的传热系数设置为10 W/(m²·K)，辐射率为0.5。仿真中通过调控波导条底端的温度模拟不同的管道温度。为模拟实际工作环境，设置3组环境温度(15、20、25 ℃)进行参数化扫描，获取3组不同管道温度所对应的波导顶端温度。不同管道温度下模型预测的超声飞行时间如图5所示，可以看出模型预测的超声飞行时间f与管道温度之间呈现线性关系，即

$$f(T)=\mathrm{p}_1T+\mathrm{p}_2 \tag{9}$$

式中：p_1和p_2为常数，由标定得到。

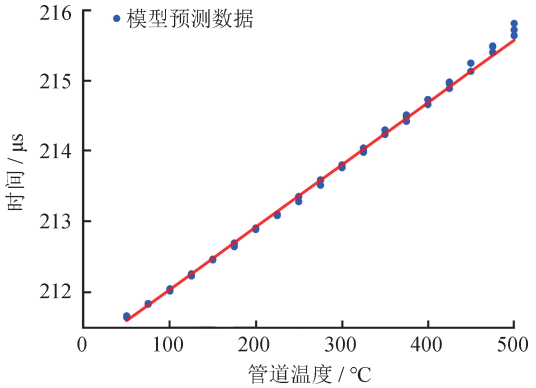
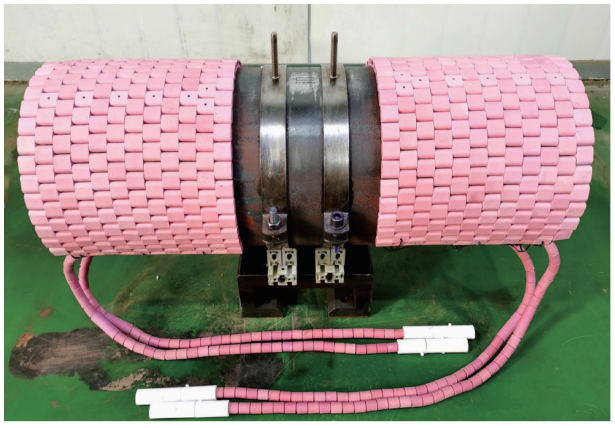


图5　不同管道温度下模型预测的超声飞行时间

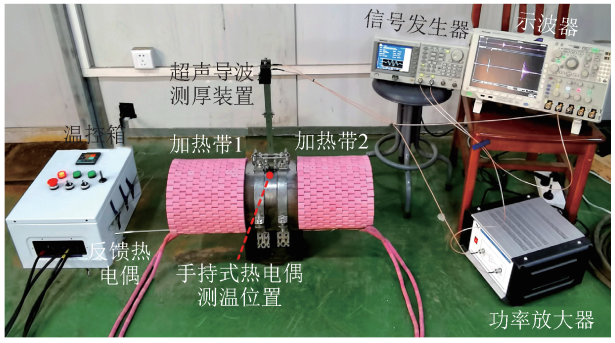
Fig.5　Ultrasonic flight time predicted by the model under different pipeline temperatures

3 变温管道超声导波测量实验

为进一步验证预测模型的有效性，开展变温管道超声导波测量实验。包裹履带式陶瓷加热器的管道如图 6(a)所示，管道长为 600 mm，外径约为 220 mm，标称厚度为 10 mm。实验前，在室温条件下通过 OLYMPUS 型手持测厚仪测量得到管道厚度为 10. 3 mm。为了使超声波换能器远离高温环境且超声导波信号能够非频散地传播，选取不锈钢 316L 材料制造的波导条，其长度为 320 mm，宽度为 18 mm，厚度为 1. 2 mm，激励探头和接收探头均为直径 18 mm 的横波直探头，并通过夹具固定在波导条顶端，超声探头和波导条之间采用环氧树脂作为耦合剂。波导条和管道之间采用干耦合的方式，通过特制夹具使波导条和被测管道外表面紧密接触。为了模拟现实中的高温管道工作环境，实验过程中使用履带式陶瓷加热器包裹在管道外围对管道进行加热，加热温度由温控箱通过反馈热电偶实时控制。此外，为了避免热量大量流失，确保管道能够稳定加热，在陶瓷加热器的外表面包裹一层保温棉。



(a) 包裹履带式陶瓷加热器的管道
(a) Pipeline wrapped with crawler-type ceramic heater



(b) 超声导波测厚系统
(b) Ultrasonic guided wave thickness measurement system

图 6 超声导波高温测厚实验平台

Fig.6 Ultrasonic guided wave high-temperature thickness measurement experimental platform

图 6(b)为超声导波测厚系统。函数发生器产生超声导波激励信号，激励信号由功率放大器放大后，输出至横波探头产生 SH0，通过示波器采集回波信号。为避免激励信号中出现的高频分量对其他导波模式产生不必要的激励并提高信号的抗干扰能力，使用信号发生器产生经过汉宁窗调制的 n 周期正弦波信号 $V(t)$ 作为导波激励信号，激励信号的数学表达式为

$$\begin{cases} V(t)=\sin(2\pi f_0 t)\cdot\left(1-\dfrac{\cos(2\pi f_0 t)}{n}\right), 0<x\leqslant\dfrac{2n\pi}{\omega_0} \\ V(t)=0, x>\dfrac{2n\pi}{\omega_0} \end{cases} \tag{10}$$

式中：f_0 激励信号频率，n 为激励信号周期，ω_0 为激励信号角频率。

实际情况下，高温管道最高工作温度一般为 350 ~ 500 ℃。实验中，设置陶瓷加热带的温度从 50 ℃开始，以 25 ℃的梯度增加至 500 ℃，在每次陶瓷加热带升温至设定值时，等待温度稳定 5 min，使用手持热电偶对管道温度进行测量，以确保管道达到相应温度。当管道的温度达到测量点要求时，重复进行 3 次回波信号采集。此外记录下 15 ℃时的超声导波回波信号作为常温下的原始信号。图 7 展示了采集到的不同管道温度下的超声导波回波信号，可以看出：随着温度的不断上升，首个回波信号到达的时间也在不断增加，即接收

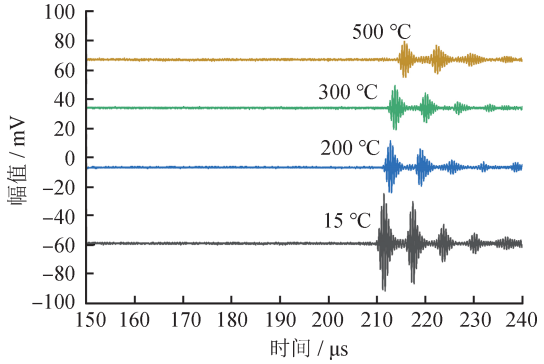


图 7 不同温度下的超声导波回波信号

Fig.7 Ultrasonic guided wave echo signals at different temperatures

首个回波信号的T_{TOF}与被测管道表面温度之间呈现出明确的正相关关系。

4　实验结果分析

4.1　超声导波测温结果分析

为了提高实验数据的精度，对回波波形进行处理，采用自适应算法计算超声飞行时间[15-16]。使用热电偶测量的管道温度作为标定温度来对超声导波测温能力进行评价，图8为3次重复标定实验采集到的不同管道温度下首个回波的T_{TOF}。

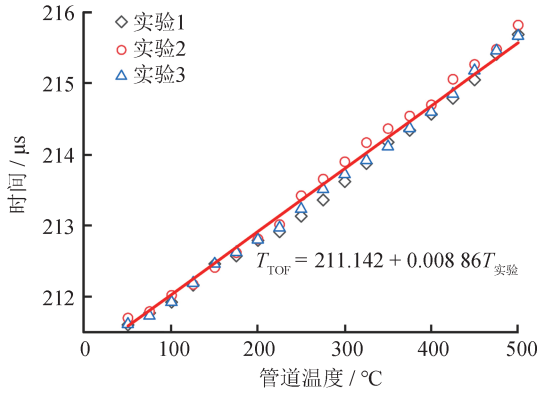


图8　不同管道温度下首个回波的T_{TOF}

Fig.8　T_{TOF} of the first echo at different pipe temperatures

对3次重复标定实验所测得的管道温度$T_{实验}$与T_{TOF}数据进行最小二乘法线性拟合，得到

$$T_{TOF} = p_{1实验} T_{实验} + p_{2实验} \tag{11}$$

式中：$p_{1实验}$和$p_{2实验}$为系数。拟合相关参数如表1所示，其中，R^2为决定系数。经过计算与分析得到：$p_{1实验}$ = 0.008 86，$p_{2实验}$ = 211.142。

表1　拟合相关参数

Tab.1　Fitting-related parameters

残差平方和	R^2	调整后的R^2	截距标准误差
0.035 36	0.998 59	0.998 51	0.023 40

将采集到的T_{TOF}数据代入式(11)，计算不同T_{TOF}对应的管道温度。不同温度下的超声导波测温数据如表2所示，可以看出：测量温度和标定温度差值稳定在±15 ℃范围内，部分温度差值偏大，这可能是理论数值计算中的热扩散和实验环境中的热扩散存在一定差距造成的。测量温度和标定温度的最大相对误差为13.3%，平均相对误差为5.1%。

表2　不同温度下的超声导波测温数据

Tab.2　Ultrasonic guided wave temperature measurement data at different temperatures

序号	T_{TOF} / μs	标定温度 / ℃	测量温度 / ℃	温度差值 / ℃	误差 / %
1	211.30	15	17	+2	13.3
2	211.61	50	52	+2	4.0
3	211.92	100	88	−12	12.0
4	212.46	150	148	−2	1.3
5	212.80	200	187	−13	6.5
6	213.23	250	235	−15	6.0
7	213.72	300	290	−10	3.3
8	214.11	350	335	−15	4.2
9	214.60	400	390	−10	2.5
10	215.18	450	455	+5	1.1
11	215.67	500	510	+10	2.0

4.2　超声导波测厚结果分析

通过拟合关系，获得不同T_{TOF}对应的管道温度，进而进行声速校正，对测厚数据进行补偿。不同温度下的超声导波测厚数据如表3所示，其中，$\Delta T_{TOF实验}$为超声导波测量实验中采集的第2个回波和第3个回波之间的时间差。

表3　不同温度下的超声导波测厚数据

Tab.3　Ultrasonic guided wave thickness measurement data at different temperatures

序号	校正声速 /(m / s)	ΔT_{TOF} / μs	实际厚度 / mm	补偿前 / mm	补偿后 / mm	误差 / mm
1	3 247	6.34	10.30	10.30	10.29	−0.01
2	3 225	6.40	10.30	10.39	10.32	+0.02
3	3 202	6.43	10.30	10.45	10.29	−0.01
4	3 163	6.50	10.30	10.56	10.28	−0.02
5	3 138	6.53	10.30	10.61	10.25	−0.05
6	3 107	6.63	10.30	10.77	10.30	0.00
7	3 072	6.68	10.30	10.86	10.26	−0.04
8	3 043	6.74	10.30	10.95	10.26	−0.04
9	3 008	6.83	10.30	11.09	10.27	−0.03
10	2 966	6.89	10.30	11.19	10.22	−0.08
11	2 931	7.04	10.30	11.36	10.24	−0.06

根据表3可以看出：在未进行补偿的条件下，厚度测量误差较大；经过补偿后，厚度测量误差不超过±0.1 mm。综合分析实验结果可知：本文提出的补偿方法能够有效提高变温管道壁厚测量的准确性。

5 结论

提出了一种基于超声导波的变温管道壁厚监测方法，利用超声导波回波信号多声时信息特点，提取管道温度信息，获取管道材料的校正声速，进而实现对变温管道壁厚测量值的补偿。开展了15～500 ℃条件下的变温管道测量实验，检验该方法的应用效果，结果表明：超声导波装置能够实现温度实时监测，并对壁厚测量值进行有效补偿，补偿后的壁厚测量误差不超过±0.1 mm。基于超声导波的变温管道壁厚监测方法具有可靠性高、易操作的优点，对于推动管道无损测量技术发展具有积极意义，为保障石油化工设备安全运行提供了有力支撑。

参考文献

[1] 宋积文，张亮，金曦. 油气管道在线腐蚀监测技术的研究现状及发展趋势[J]. 当代化工研究，2022(20)：152-154.
SONG J W，ZHANG L，JIN X. Research status and development trend of on-line corrosion monitoring technology for oil and gas pipelines[J]. Modern Chemical Research，2022，(20)：152-154.（in Chinese）

[2] 王珅，王仕强，伍剑波，等. 基于柔性阵列压电传感的页岩气管道壁厚监测[J]. 无损检测，2022，44(12)：48-53.
WANG S，WANG S Q，WU J B，et al. Wall thickness monitoring of shale gas pipelines based on flexible array piezoelectric sensing[J]. Nondestructive Testing，2022，44(12)：48-53.（in Chinese）

[3] CEGLA F B. Energy concentration at the center of large aspect ratio rectangular waveguides at high frequencies [J]. Journal of the Acoustical Society of America，2008，123(6)：4218-4226.

[4] CEGLA F B，CAWLEY P，ALLIN J. 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.

[5] 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 wall thickness monitoring of high-temperature pipelines based on horizontal shear ultrasonic guided waves[J]. Nondestructive Testing，2019，41(9)：1-6，15.（in Chinese）

[6] ZHANG Y，CEGLA F，CORCORAN J. Ultrasonic monitoring of pipe wall interior surface temperature[J]. Struct Health Monitoring，2021，20(5)：2476-2492.

[7] LIU S，LIU S，REN T. Ultrasonic tomography-based temperature distribution measurement method[J]. Measurement，2016，94：671-679.

[8] WONG T Y，TANG Y，ZOU F，et al. An ultra-high accuracy temperature measurement method using acoustic waveguide[J]. IEEE Sensors Journal，2021，21(3)：2618-2626.

[9] 张明. 分布式超声导波测温技术研究及系统实现[D]. 太原：中北大学，2023.
ZHANG M. Research and system implementation of distributed ultrasonic guided wave temperature sensing technology[D]. Taiyuan：North University of China，2023.（in Chinese）

[10] 罗茜. 基于超声导波的高温管道壁厚腐蚀检测技术研究[D]. 北京：中国石油大学(北京)，2022.
LUO X. Research on wall thickness corrosion detection technology for high-temperature pipelines based on ultrasonic guided waves[D]. Beijing：China University of Petroleum (Beijing)，2022.（in Chinese）

[11] 胡玮宸，张学聪，董磊，等. 高温热端部件表面温度测量的系统设计[J]. 计测技术，2022，42(6)：53-59.
HU W C，ZHANG X C，DONG L，et al. System design for surface temperature measurement of high-temperature hot-end components[J]. Metrology & Measurement Technology，2022，42(6)：53-59.（in Chinese）

[12] 张锐，石友安，魏东，等. 超声固体测温中波速与温度的相关性试验[J]. 无损检测，2021，43(7)：1-4，12.
ZHANG R，SHI Y A，WEI D，et al. Experimental study on the correlation between wave velocity and temperature

in ultrasonic solid temperature measurement[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(7): 1-4, 12. (in Chinese)

[13] 赵俭, 常蕾. 基于声学法测温的声波飞渡时间研究[J]. 计测技术, 2013, 33(6): 31-34.
ZHAO J, CHANG L. Study on acoustic wave flight time based on acoustic temperature measurement[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(6): 31-34. (in Chinese)

[14] 石友安, 魏东, 曾磊, 等. 超声固体测温中的二维温度场重建算法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(5): 518-530.
SHI Y A, WEI D, ZENG L, et al. Research on two-dimensional temperature field reconstruction algorithm in ultrasonic solid temperature measurement[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(5): 518-530. (in Chinese)

[15] 朱义德, 杨瑞峰, 郭晨霞, 等. 自具补偿互相关超声测距系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 85-88, 121.
ZHU Y D, YANG R F, GUO C X, et al. Design of self-compensated cross-correlation ultrasonic ranging system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(4): 85-88, 121. (in Chinese)

[16] 王志伟, 高斌, 肖湘. 输油管道自校正超声波在线监测系统[J]. 无损检测, 2021, 43(1): 34-38.
WANG Z W, GAO B, XIAO X. Self-calibrating ultrasonic on-line monitoring system for oil transportation pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(1): 34-38. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)

第一作者: 潘树华(2000—), 男, 主要研究方向为超声导波无损检测。

通信作者: 伍剑波(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 四川大学机械工程系主任, 四川省大飞机机头工程技术研究中心副主任。面向航空航天、深海装备、高铁与石油行业, 主要从事智能感知与检测原理、方法、技术与装备研究。目前以第一作者或通讯作者发表SCI论文40余篇, 出版学术著作1部, 主持国家自然科学基金重大研究计划、面上项目、四川重点研发等项目30余项, 授权PCT3项, 中国发明专利15项, 获得省部级以上奖励4项。