

文章编号:1673-5005(2021)02-0134-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.016

超声临界折射纵波测量应力的温度影响

李玉坤¹, 于文广², 李玉星¹, 张 玉¹, 陶建中³, 程 磊³

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心, 北京 100020; 3. 国家管网集团西部管道有限责任公司, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 超声临界折射纵波(LCR波)法是无损检测工作状态下结构应力的有效方法。超声LCR波法是敏感测量方法,温度直接影响超声波的传播速度,也会引起超声换能器的尺寸变化。根据超声波测量应力的基础理论—声弹性理论,分析声弹性系数和零应力下飞行时间与温度的定量关系,得到超声波测量应力的温度补偿公式,通过试验测量不同温度下超声LCR波飞行时间。结果表明:温度对超声LCR波测量应力的影响归结于温度对超声LCR波传播声程的影响,温度越高超声LCR波传播的有效声程越长;设计的一发两收超声换能器可有效地消除声楔块和耦合剂的影响,将温度的影响程度降低至10%,可显著提高测量精度和稳定性;试验测量与理论计算得到的飞行时间与温度关系有着良好的一致性,充分验证了补偿公式的准确性。

关键词: 临界折射纵波; 应力; 温度; 飞行时间; 超声换能器

中图分类号: U 178 **文献标志码:** A

引用格式: 李玉坤, 于文广, 李玉星, 等. 超声临界折射纵波测量应力的温度影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 134-140.

LI Yukun, YU Wenguang, LI Yuxing, et al. Effect of temperature on measurement of stress by ultrasonic critical refractive longitudinal wave[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 134-140.

Effect of temperature on measurement of stress by ultrasonic critical refractive longitudinal wave

LI Yukun¹, YU Wenguang², LI Yuxing¹, ZHANG Yu¹, TAO Jianzhong³, CHENG Lei³

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Oil and Gas Pipeline Control Center of PipeChina Company Limited, Beijing 100020, China;
3. Western Branch of PipeChina Company Limited, Urumqi 830000, China)

Abstract: The ultrasonic critical refraction longitudinal wave (LCR wave) method is an effective method for nondestructive testing of structural stress. The ultrasonic LCR wave method is a sensitive measurement method, i. e. the temperature directly affects the propagation speed of the ultrasonic wave, and it also causes the size change of the ultrasonic transducer. According to the basic theory of ultrasonic stress measurement, i. e. the theory of acoustoelasticity, the quantitative relationship between the acoustoelastic coefficient, flight time and temperature under zero stress was analyzed, and the temperature compensation formula for ultrasonic stress measurement was obtained. The flight time of ultrasonic LCR wave at different temperatures was measured by experiments. The result shows that the effect of temperature on the stress measurement of ultrasonic LCR wave is attributed to the influence of temperature on the sound range of ultrasonic LCR wave propagation. The higher the temperature is, the longer the effective sound range of ultrasonic LCR wave propagation is. The designed ultrasonic transducer with one transmitter and two receivers can effectively eliminate the influence of acoustic wedge and coupling agent, reduce the influence of temperature to 10%, and significantly improve the measurement accuracy and stability. The relationships be-

收稿日期:2020-06-22
基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2017D-5007-0605)
第一作者: 李玉坤(1973-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为管道与储罐结构强度和安全。E-mail: mliyk@qq.com。
通信作者: 于文广(1993-), 男, 硕士, 研究方向为油气储运系统安全。E-mail: yuwg421@foxmail.com。

tween flight time and temperature obtained by experimental measurement and theoretical calculation are in good agreement, and this fact fully verifies the accuracy of the compensation formula.

Keywords: critical refractive longitudinal wave; stress; temperature; flight time; ultrasonic transducer

工程结构工作应力的无损检测对保障工程结构的安全具有重要意义^[1]。工程结构内部应力较大带来诸多不利影响^[2-3],包括翘曲变形^[4]、应力腐蚀开裂^[5]、过早疲劳破坏^[6],在工程结构的服役阶段必须高度重视工作应力的测量。超声波法是当前无损检测工程结构工作应力的有效方法。ROSSINI 等^[7]认为超声波法具有高分辨率、高渗透力和对人体无伤害的特点,是工作应力无损检测发展方向上最有前途的技术之一。超声波法测量应力基于声弹性理论,通过超声波传播速度的改变量计算被测工程结构的应力^[8]。超声波法测量应力具有无损、快速、可适用范围广等特点,但也有着影响因素多的缺点,其中温度、耦合状态、被测点的粗糙度等因素直接影响了超声波法测量应力的精度和现场可应用性^[7]。Fraga 等^[9]研究指出在众多影响超声波测量应力因素中,温度影响程度最显著。Salama 等^[10-11]、Chern 等^[12]、Heyman 等^[13]及 Kobori 等^[14]测量了超声波波速随温度的变化量,定义了热-声系数,明确了该系数随应力变化规律。Weaver 等^[15]研究指出超声波传播速度的温度依赖性表现为超声信号的扩散或压缩。Nikitina 等^[16]利用超声波法测量管道双轴应力,发现超声纵波和横波速度对温度依赖性之间的差异,给出温度影响程度。贾大伟等进一步得到超声波波速与温度变化呈线性关系^[17]。Lobkis 等^[18]指出温度和应力对超声波传播的影响差异可以使两种效应分离,为温度对超声波测量应力的修正提出理论支持。Dhawan^[19]利用导热系数和高阶弹性常数,用梅森理论(Mason theoretical)方法确定了单晶 GaAs-NW 的超声衰减和热弛豫时间随直径和表面粗糙度函数。目前已有较多超声应力测量温度依赖性的研究成果,但缺乏超声应力测量的温度依赖性的机制解释,多采用试验数据拟合温度影响公式,缺少理论与试验的相互验证,影响了工程推广应用。笔者从超声 LCR 波在被测结构中传播规律入手,研究超声 LCR 波测量应力公式中声弹性系数和零应力下飞行时间与温度的关系,分析温度影响超声 LCR 波测量应力的机制,推导超声 LCR 波测量应力的温度补偿公式。设计可消除声楔块和耦合剂影响的一发两收超声换能器,开展

不同温度下 LCR 波零应力飞行时间测量试验。

1 理 论

1.1 声弹性理论

如图 1 所示,超声 LCR 波是一种在材料内部特定深度传播且平行于材料表面的纵波。EGLE 和 BRAY^[20-23]已经通过试验证明:相比于其他形态的超声波,超声 LCR 波对应力有更高的敏感性。第一临界角可表示为

$$\theta_{\text{LCR}} = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right). \quad (1)$$

式中, v_1 和 v_2 分别为波在介质 1 和介质 2 中的传播速度, m/s; θ_{LCR} 、 θ_s 和 θ_l 分别为第一临界角、折射波剪切角和纵波折射角, (°)。

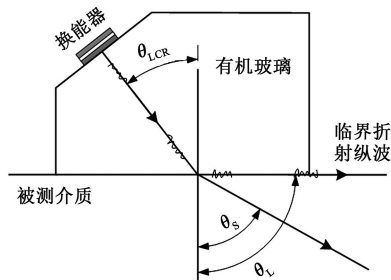


图 1 临界折射纵波生成示意图

Fig. 1 Generation of critical refraction longitudinal wave

在材料弹性限度内,基于应力与声飞行时间成线性关系,用超声 LCR 波法测量应力;当超声 LCR 波沿着应力方向传播,传播速度与应力关系^[20]为

$$\rho_0 v_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3k_0} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]. \quad (2)$$

式中, v_{11} 为平行于加载方向的波传播速度, m/s; ρ_0 为材料零应力下的初始密度, kg/m³; λ, μ 为二阶弹性模量, Pa; l, m, n 为三阶弹性模量, Pa; σ_{11} 为平行于加载方向上应力, Pa; k_0 为材料的体积弹性模量, Pa。

材料的体积弹性模量可表示为

$$k_0 = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \lambda + \frac{2}{3}\mu. \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量, Pa; ν 为泊松比。

对于处于零应力状态下的被测材料,式(1)可表示为

$$\rho_0 v_0^2 = \lambda + 2\mu. \quad (4)$$

式中, v_0 为超声 LCR 波在零应力试件内的飞行速度, m/s。

将式(4)代入式(2), 消去密度, 得

$$\frac{\lambda + 2\mu}{v_0^2} v_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3k_0} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]. \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)中, 得

$$\frac{v_{11}^2}{v_0^2} = 1 + \frac{\sigma_{11}}{(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]. \quad (6)$$

化简得

$$v_{11}^2 = v_0^2 (1 + K_L \sigma_{11}). \quad (7)$$

K_L 定义为临界折射纵波的声弹性系数, 其表达式为

$$K_L = \frac{1}{(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]. \quad (8)$$

对式(7)取微分, 得

$$2v_{11} dv_{11} = v_0^2 K_L d\sigma. \quad (9)$$

超声 LCR 波传播速度变化很小, 近似取 $v_{11} = v_0$, 式(9)可化简为

$$d\sigma = \frac{2}{K_L v_0} dv_{11}. \quad (10)$$

将速度和路程的关系 $dv_{11} = -\frac{L}{t_0^2} dt$ 代入式(10)

积分得

$$\Delta\sigma = \frac{-2}{K_L t_0} \Delta t = \frac{-2}{K_L t_0} (t - t_0). \quad (11)$$

式中, t 和 t_0 分别为有应力和零应力介质中超声 LCR 波飞行时间, s。

由式(11)可知, 超声 LCR 波的声弹性系数 K_L 和超声 LCR 波在零应力试件中的飞行时间 t_0 对测量应力变化量 $\Delta\sigma$ 有直接影响, 而温度变化直接影响着这两个量的数值, 得到这两个量在不同温度下的数值是保证超声波测量应力准确性的关键。因此探讨温度对超声波法测量应力的影响机制, 应进一步探究温度对 K_L 和 t_0 的影响规律。

1.2 温度影响机制

1.2.1 温度对超声 LCR 波声弹性系数 K_L 的影响

临界折射纵波声弹性系数 K_L 由二阶和三阶弹性模量表示, 对其进行推导简化。根据弹性力学可

知, 材料的二阶和三阶弹性系数可表示为

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \\ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \\ l = \lambda + 2\mu, \\ m = \lambda. \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入 K_L 中, 进行连续推导得

$$K_L = \frac{5-2\nu}{E} + \frac{2}{E(1-\nu)}. \quad (13)$$

超声 LCR 波的声弹性系数 K_L 是材料弹性模量 E 和泊松比 ν 的函数, 声弹性系数 K_L 随弹性模量 E 增大而减小, 随泊松比 ν 增大而增大。常温范围内 ($-10 \sim 40^\circ\text{C}$), 金属材料的弹性模量和泊松比受温度影响极小, 基本保持不变^[24]。因此在常温范围内, 超声 LCR 波的声弹性系数 K_L 可以视作常数, 不受温度影响。

1.2.2 温度对零应力下 LCR 波飞行时间影响

零应力 (free-stress) 条件下超声 LCR 波在试件中飞行时间 t_0 同样受温度影响, t_{0T} 记为某温度下超声 LCR 波在零应力试件的飞行时间。 t_{0T} 可通过变温试验条件下超声 LCR 波在零应力试件中的波速 $v_{0,T}$ 和在超声波传播声程 L_{0T} 表达。

将式(4)中各阶弹性系数用弹性模量和泊松比表达得

$$v_{0T}^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_T}. \quad (14)$$

式中, ρ_T 为任意温度下密度, kg/m^3 ; v_{0T} 为任意温度零应力状态下超声波波速, m/s; L_{0T} 为超声波传播距离, m。

ρ_T 用体积膨胀系数和给定温度下的密度 ρ_0 表示为

$$\rho_T = \rho_0 \frac{1}{1 + \alpha_v \Delta T}. \quad (15)$$

式中, α_v 为体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; ΔT 为温度变化量, $^\circ\text{C}$ 。

故任意温度零应力状态下的超声波波速可表达为

$$v_{0T} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1 + \alpha_v \Delta T}{\rho_0}}. \quad (16)$$

联立式(14)与式(15)得任意温度下零应力状态超声波飞行时间为

$$t_{0T} = \frac{L_{0T}}{\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1 + \alpha_v \Delta T}{\rho_0}}}. \quad (17)$$

由式(17)可知,任意温度下超声 LCR 波在零应力试件的飞行时间 t_{0T} 与参数 L_{0T} 、 E 、 ν 、 α_V 、 ΔT 、 ρ_0 有关。在常温范围 ($-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 内, E 、 ν 、 α_V 、 ρ_0 变化十分微小,视作常数。因此 t_{0T} 对温度的依赖性归于 L_{0T} 对温度的依赖性和温度变化量 ΔT 。在材料热胀冷缩效应下,温度影响超声换能器的尺寸,有效声程 L_{0T} 将发生变化。

1.2.3 超声 LCR 波测量应力温度补偿公式

超声 LCR 波的声弹性系数 K_L 和超声 LCR 波在零应力试件中的飞行时间 t_0 对测量应力变化量 $\Delta\sigma$ 有直接影响。声弹性系数 K_L 是材料弹性模量 E 和泊松比 ν 的函数。常温范围内 ($-10 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), 金属材料的弹性模量和泊松比受温度影响极小,基本保持不变。因此在常温范围内,超声 LCR 波的声弹性系数 K_L 可以视作常数,不受温度影响。超声波测量应力温度补偿公式为

$$\begin{cases} \Delta\sigma = \frac{-2}{K_L t_0} (t - t_0), \\ K_L = \frac{5-2\nu}{E} + \frac{2}{E(1-\nu)}, \\ t_{0T} = \frac{L_{0T}}{\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1+\alpha_V \Delta T}{\rho_0}}}. \end{cases} \quad (18)$$

2 不同温度下零应力 LCR 波飞行时间测量试验

2.1 超声 LCR 波应力测量试验平台

如图 2 所示,超声 LCR 波应力测量试验平台包

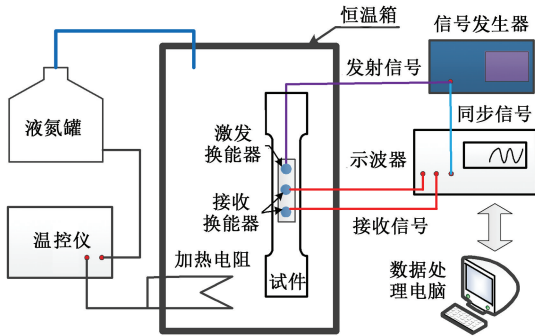


图 2 超声 LCR 波应力测量试验平台

Fig. 2 Experimental platform for stress measurement of ultrasonic LCR wave

含超声测量系统和控温系统。超声测量系统包含数据处理电脑、超声波信号发生器(奥利巴斯 5072PR)、数字示波器(GWINSTEK GOS-2204A)、超声换能器(一发两收)、A36 钢试件。控温系统包含控温器、电

阻丝加热器、液氮瓶及管路、恒温箱。控温系统的温度调节范围为 $-50 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

超声测量系统工作原理为信号发生器激发高压脉冲信号,其中一束作为发射信号传送到超声发射换能器,另外一束作为同步信号传送到数字示波器;超声发射换能器将接收到的高压脉冲信号转换为超声波信号(5 MHz),超声波信号在被测介质中传播,超声接收换能器接收超声波信号,将超声波信号转换为电压信号;接收信号与同步信号都传递给数字示波器,数字示波器将采集的信号传递给电脑;电脑对超声接收信号和同步信号进行对比处理,得到超声波在介质中飞行时间。

如图 3 所示,本试验所用试件均从同一块 A36 钢板中切割得到。试件加工完成后进行退火处理(加热到 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h , 然后再随炉冷却),以消除初始应力。为了去除氧化物和减少孔隙度,试验前用质量分数为 5% 的稀盐酸对试件进行化学表面处理。

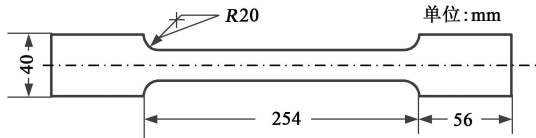


图 3 试件

Fig. 3 Specimen

如图 4 所示,为解决超声换能器声楔块和耦合剂对准确测量超声 LCR 波飞行时间的影响,采用一发两收超声换能器。

2.2 一发两收超声换能器温度影响

为消除超声换能器声楔块和耦合剂对测量超声 LCR 波飞行时间的影响,设计制作了专用的一发两收超声换能器。超声 LCR 波的传播过程:发射换能器—声楔块—耦合剂—A36 钢—耦合剂—声楔块—接收换能器。接收换能器 1 和接收换能器 2 所测的超声 LCR 波飞行时间为

$$\begin{cases} t_1 = t_{lg} + t_c + t_{L1} + t_c + t_{lg}, \\ t_2 = t_{lg} + t_c + t_{L1} + t_{L2} + t_c + t_{lg}. \end{cases} \quad (19)$$

式中, t_1 和 t_2 分别为接收换能器 1 和接收换能器 2 测量超声波飞行时间, s ; t_c 为超声波在耦合剂中的飞行时间(假设耦合剂均匀分布), s ; t_{lg} 为超声波在声楔块中传播 L_g 路程的时间, s ; t_{L1} 和 t_{L2} 分别为超声 LCR 波在 A36 钢中传播 L_1 路程和 L_2 路程的时间, s 。

t_2 和 t_1 的差值为

$$t_2 - t_1 = (t_{lg} + t_c + t_{L1} + t_{L2} + t_c + t_{lg}) - (t_{lg} + t_c + t_{L1} + t_c + t_{lg}) = t_{L2} \quad (20)$$

t_2 与 t_1 的差值为超声 LCR 波在 A36 钢中传播

L_2 路程的时间。一发一收超声换能器所测超声波飞行时间为超声波在声楔块、耦合剂、A36 钢中飞行时间总和。采用一发两收超声换能器,两个接收换能器所测时间差值为超声波在 A36 钢中传播 L_2 路

程的时间。由此可知,采用一发两收超声换能器,可有效去除声楔块和耦合剂的影响,准确得到超声波在 A36 钢中的飞行时间。

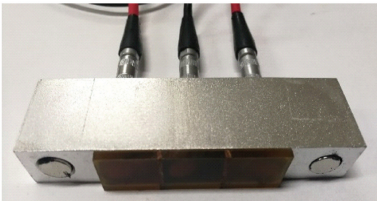
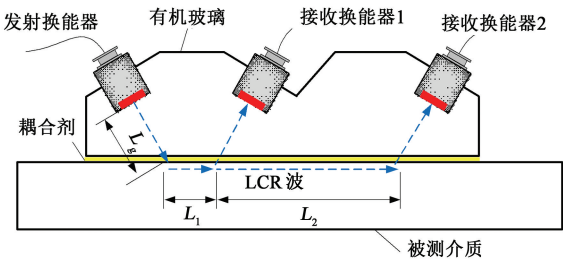


图 4 一发两收超声换能器示意图和实物图

Fig. 4 Schematic and physical diagrams of one-send and two-receiver ultrasonic transducer

对于一发两收超声换能器,温度影响主要有:①温度变化对超声 LCR 波在 A36 钢中传播速度的影响;②温度变化对传播声程 L_2 的影响(超声换能器热胀冷缩)。在式(18)中, L_2 代替 L_0 。

温度变化时,声楔块热胀冷缩,引起声楔块覆盖的被测工件中的声程 L_2 变化,从而引发有效声程的变化。因此当温度变化 ΔT 时,声程 L_T 为

$$L_T = L_2 (1 + \alpha_1 \Delta T). \tag{21}$$

式中, α_1 为声楔块的热膨胀系数。

温度升高使得声程增大,引起声时差增大,即对应力测量结果产生误差。

任意温度下零应力状态超声波飞行时间为

$$t_{0T} = \frac{L_2 (1 + \alpha_1 \Delta T)}{\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1 + \alpha_v \Delta T}{\rho_0}}}. \tag{22}$$

2.3 变温试验测量温度对 LCR 波飞行时间影响

如图 5 所示,利用搭建的超声 LCR 波应力测量

温系统调节恒温箱内温度,温度范围为 $-4.2 \sim 28.2$ $^{\circ}\text{C}$ 。每调节一次温度,待恒温箱内温度稳定后,利用超声测量系统保存两个接收换能器接收到的超声波信息。试验结束后对数据进行分析处理。

试验中采用一发两收超声换能器,图 4 是换能器的照片,其中 $L_2 = 15$ mm,超声频率为 5 MHz,换能器和被测介质的倾斜角为 28° 。

3 试验结果与讨论

3.1 试验结果

利用超声 LCR 波应力测量试验平台开展变温试验,温度范围为 $-5 \sim 30$ $^{\circ}\text{C}$ 。测量超声 LCR 波在 A36 钢试件中的飞行时间。对超声波数据进行处理,提取接收换能器 1 和接收换能器 2 的超声波信号,计算得到超声 LCR 波在 A36 钢中 L_2 声程下的飞行时间 Δt 。根据测量数据,作出超声波飞行时间随温度变化的曲线,见图 6。



图 5 零应力变温试验装置

试验平台开展试验,将一发两收超声换能器和 A36 钢试件放置于恒温箱中,耦合剂采用硅油。利用控

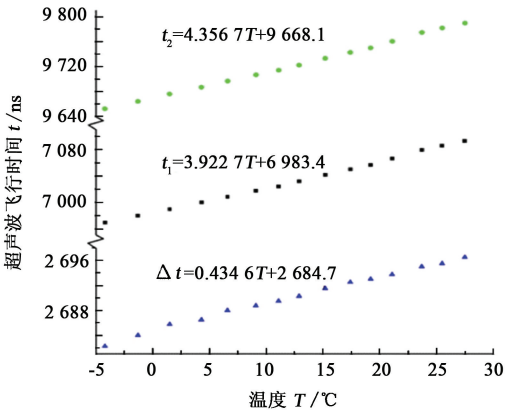


图 6 超声波飞行时间随温度变化曲线

Fig. 6 Change curve of ultrasonic flight time with temperature

如图 6 所示,接收换能器 1 测量的超声波飞行

时间 t_1 与温度 T 呈线性关系, t_1 随温度 T 升高而线性增加, 拟合公式为 $t_1 = 3.922T + 6983.4$ 。说明温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声波飞行时间 t_1 将增加 3.922 ns 。 t_2 与温度 T 同样呈线性关系, t_2 随温度 T 升高而线性增加, 拟合公式为 $t_2 = 4.3567T + 9668.1$ 。说明温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, t_2 将增加 4.3567 ns 。 Δt 与温度 T 也呈线性关系, Δt 随 T 升高而线性增加, 拟合公式为 $\Delta t = 0.4346T + 2684.7$ 。说明温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声波飞行时间 Δt 将增加 0.4346 ns 。

3.2 讨论

为分析超声波飞行时间的温度依赖性, 定义超声波各参数受温度影响程度为温度系数 Z , 将 t_1 、 t_2 和 Δt 传播速度 v 的温度系数整理, 得到 $Z_{t_1} = 3.922\text{ ns}/^{\circ}\text{C}$, $Z_{t_2} = 4.3567\text{ ns}/^{\circ}\text{C}$, $Z_{\Delta t} = 0.4346\text{ ns}/^{\circ}\text{C}$ 。

$Z_{t_1} < Z_{t_2}$, 有两个主要原因: 一是温度升高, 声楔块热膨胀, 接收换能器 2 比接收换能器 1 增加的声程更多, 因此 t_2 比 t_1 随温度增长的更显著; 二是超声波在 A36 钢中传播速度变慢, 超声 LCR 波传播 $L_1 + L_2$ 的路程比传播 L_1 路程时间增加更多。同时可以注意到, $Z_{\Delta t}$ 远小于 Z_{t_2} , 约为其 10%, 说明采用一发两收超声换能器可有效地消除声楔块和耦合剂的影响, 显著降低温度影响程度。

根据试验结果验证式 (17)。温度范围为 $-5 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, A36 钢弹性模量 E 和泊松比 ν 可视为常数。式 (17) 中各参数取值为: 弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{11}\text{ Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.26$, 初始密度 $\rho_0 = 7850\text{ kg/m}^3$, 体积膨胀系数 $\alpha_v = 3.6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 热膨胀系数 $\alpha_l = 1.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, 声程 $L_2 = 0.015\text{ m}$ 。

将 A36 钢各参数代入式 (17) 中, 温度变化量取 $-5 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 计算得到不同温度下超声 LCR 波在 A36 钢中飞行时间 t_{0T} 。图 7 为公式计算和试验测量曲线。由图 7 可知, 由式 (17) 计算得到的超声波

在 A36 钢中 L_2 声程下飞行时间 Δt 与温度 T 关系为 $\Delta t = 0.4346T + 2684.7$ 。

对比图 7 中两条曲线可知, 公式计算得到的曲线公式和试验测量曲线公式呈现出很好的一致性。试验和计算得到的温度系数 (关系曲线的斜率) 相差小于 0.1% 。试验结果充分验证了理论推导公式的精度。

4 结论

(1) 声弹性系数是弹性模量和泊松比的函数, 随弹性模量增大而减小, 随泊松比增大而增大; 在常温范围内 ($-5 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), 金属材料弹性模量和泊松比基本保持不变, 声弹性系数可以视作常数。在常温范围内, 零应力下飞行时间与声程 (传播距离) 成正比, 与温度变化量成反比。在材料热胀冷缩效应下, 温度影响超声换能器尺寸, 有效声程进而发生变化。

(2) 设计的一发两收超声换能器有效消除了声楔块和耦合剂的影响, 显著降低温度影响水平。一发两收超声换能器的两个接收换能器所测时间差值为超声 LCR 波单纯在 A36 钢中的飞行时间, 去除声楔块和耦合剂的影响, 准确得到超声波在 A36 钢中的飞行时间。设计的一发两收超声换能器对温度的依赖性仅为一发一收换能器的 10%。

(3) 推导了超声波测量应力的温度补偿公式。试验测量和理论计算得到的飞行时间与温度关系曲线表现出很好的一致性, 两种方法得到的温度系数 (关系曲线的斜率) 相差小于 0.1% 。试验结果充分验证了补偿公式的准确性。

参考文献:

[1] 刘宝, 冯巨龙, 李哲, 等. 基于任意应力合成的油井杆管侧向力测试仪[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 137-146.
LIU Bao, FENG Julong, LI Zhe, et al. Lateral force tester for oil well rod and pipe based on arbitrary stress synthesis[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3): 137-146.
[2] UNNIKRISHNAN R, IDURY K S, ISMAIL T, et al. Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments[J]. Materials Characterization, 2014, 93(6): 10-23.
[3] MARQUES M J, Effect of heat treatment on microstructure and residual stress fields of a weld multilayer austenitic steel clad[J]. Journal of Materials Processing Tech-

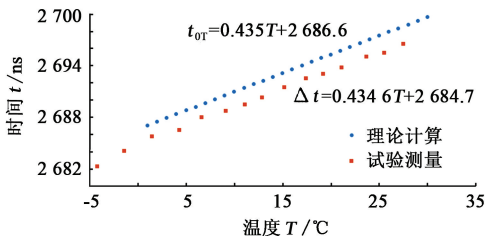


图 7 公式计算和试验测量曲线

Fig. 7 Formula calculation and experimental measurement curve

在 A36 钢中 L_2 声程下飞行时间 t_{0T} 与温度 T 关系为 $t_{0T} = 0.435T + 2686.6$; 通过试验测量得到的超声波

- nology, 2015,222(8):52-60.
- [4] LIU A F. Effect of residual stresses on crack growth from a hole[J]. Aiaa Journal, 2015,22(12):1784-1785.
- [5] ROY A K. Stress corrosion cracking of nuclear transmutation structural materials [J]. Materials Performance, 2004,43(9):52-56.
- [6] WALKER C A, WADDELL A J, JOHNSTON D J. Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1995,209(15):51-58.
- [7] ROSSINI N S. Methods of measuring residual stresses in components[J]. Materials & Design, 2012,35(11):572-588.
- [8] OKADA K. Acoustoelastic determination of stress in slightly orthotropic materials[J]. Experimental Mechanics, 1981,21(12):461-466.
- [9] FRAGA R S, SANTOS A, ANDRINO M H. Temperature effect on the measurement of stresses in pipelines using ultrasonic Lcr waves: ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition [C]. Boston: IMECE, 2008:361-367.
- [10] SALAMA K, LING C K. The effect of stress on the temperature dependence of ultrasonic velocity [J]. Journal of Applied Physics, 1980,51(3):1505.
- [11] SALAMA K, WANG J, BARBER G. The use of the temperature dependence of ultrasonic velocity to measure residual stress: proceedings of the Conference on New Procedures in Nondestructive Testing Springer-Verlag[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1983,551-558.
- [12] CHERN E J, HEYMAN J S, CANTRELL J H. Ultrasonic symposium-determination of material stress from the temperature dependence of the acoustic natural velocity [J]. Expert Review of Hematology, 1981,197(11):960-963.
- [13] HEYMAN J S, ALLISON S G, SALAMA K. Influence of carbon content on higher order ultrasonic properties of steel: proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium [C]. Hampton: IEEE, 1983:991-998.
- [14] KOBORI O, IWASHIMIZU Y. Effects of stress and temperature on ultrasonic velocity [J]. Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation, 1990,83(6):339-343.
- [15] WEAVER R, LOBKIS O. Temperature dependence of ultrasonic velocity using diffuse fields: implications for measurement of stress [J]. American Institute of Physics, 2001,557(6):1480-1486.
- [16] NIKITINA N E, KAMYSHEV A V, KAZACHEK S V. Ultrasonic testing of the stressed state of pipelines with consideration of the temperature factor [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012,48(5):272-276.
- [17] JIA D W. Investigation of stress and temperature effect on the longitudinal ultrasonic waves in polymers [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2014,25(1):20-29.
- [18] LOBKIS O, LARSEN C, RICHARD I. Separation of applied stress and temperature effects on ultrasonic guided wave phase [J]. AIP Conference Proceedings, 2015,1650(4):211-220.
- [19] DHAWAN P K. Effect of diameter and surface roughness on ultrasonic properties of GaAs nanowires [J]. Journal of Applied Physics, 2015,117(7):3-10.
- [20] EGLE D M, BRAY D E. Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998,60(3):741-744.
- [21] BRAY D E. Ultrasonic stress measurement using the critically refracted longitudinal (LCR) ultrasonic technique: US6424922[P]. 2002-05-11.
- [22] MALUR N S, ROBERT J B, BRAY D E. Relation of critically refracted longitudinal wave (LCR) velocity with graphite nodularity and matrix in ductile iron [J]. The Journal of CPRI, 2015,11(1):751-756.
- [23] LEON-SALAMANCA T, BRAY D E. Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (LCR) waves [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1996,7(4):169-184.
- [24] SU H H. Temperature-dependent modulus of metals based on lattice vibration theory [J]. Journal of Applied Mechanics, 2014,81(4):14-17.

(编辑 沈玉英)