

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514721

高压天然气管道声谐振检测方法研究*

李蓉雪, 杨理践, 刘斌, 廉正, 刘飞云

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要: 超声检测技术虽在管道完整性评估中具有高精度优势,但其对液体耦合剂的依赖性严重制约了在天然气管道环境中的应用。针对高压天然气管道中气-固界面声阻抗严重失配导致的超声波能量透射困难问题,提出了一种基于声谐振原理的高压气体耦合超声检测方法。通过结合 Redlich-Kwong 状态方程与超声波在多层介质中的传播理论,构建了高压环境下的超声谐振反射理论模型。该模型引入复波数以表征声衰减,系统揭示了压强对气体声学特性及谐振响应的影响机制,并推导了介质阻尼所致谐振频率偏移的解析表达式。通过仿真分析,量化了压强、传播距离、壁厚及谐振阶次对谐振频率的耦合影响;在此基础上,搭建高压实验平台,以氮气为等效介质完成实验验证。仿真与实验结果表明,当压强升至 1 MPa 时,气体声阻抗显著提高;当压强达到 3 MPa 后,接收到的谐振信号幅值增强约 69 dB,并可稳定激发多阶谐振模式。在此条件下,对 6.2~8.2 mm 厚度钢板的测厚误差 <0.15 mm,且在 40~100 mm 传播距离范围内谐振信号波动幅值 <1 V,表明了该方法对提离距离变化具有良好的适应性。研究验证了声谐振在高压天然气管道壁厚检测中的准确性与可靠性,突破了传统脉冲反射法在高压气体环境中的精度瓶颈,为输气管道无损检测提供了新的理论基础与实验支撑。

关键词: 高压天然气;管道检测;声谐振;传播距离

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Study of the acoustic resonance testing method for the high-pressure natural gas pipelines

Li Rongxue, Yang Lijian, Liu Bin, Lian Zheng, Liu Feiyun

(College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Although the ultrasonic testing technology provides the high-precision advantages in pipeline integrity assessment, its dependence on the liquid coupling severely limits the application in the natural gas pipeline environments. To address the challenge of ultrasonic energy transmission difficulties caused by the severe acoustic impedance mismatch at the gas-solid interface of high-pressure natural gas pipelines, this study proposes a high-pressure gas-coupled ultrasonic testing method based on the acoustic resonance principle. By integrating the Redlich-Kwong equation of state with ultrasonic wave propagation theory in multilayer media, a theoretical model for the ultrasonic resonant reflection under the high-pressure conditions was established. The model incorporates a complex wavenumber to characterize the acoustic attenuation and systematically reveal the influence mechanism of pressure on gas acoustic properties as well as resonant response, and the analytical expression for the resonant frequency shift caused by medium damping is also derived. Then the coupling effects of pressure, propagation distance, wall thickness, and resonant order on the resonant frequency were quantified with the simulation analysis. Furthermore a high-pressure experimental platform was established, and the experimental validation was performed using nitrogen as an equivalent medium. Simulation and experimental results demonstrate that the gas acoustic impedance significantly improves when the pressure increases to 1 MPa. Specifically the amplitude of the received resonant signal is enhanced by approximately 69 dB while consistently exciting multi-order resonant modes when the pressure reaches 3 MPa. Under such conditions, the thickness measurement error of steel plates ranging from 6.2 to 8.2 mm remains below 0.15 mm, whose resonant signal fluctuation amplitudes are smaller than 1 V within the 40~100 mm propagation distance range, demonstrating the good adaptability to variations in lift-off distance. The study verifies

收稿日期: 2025-11-25 Received Date: 2025-11-25

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62531017)、国家自然科学基金面上项目(62371315)资助

the accuracy and reliability of acoustic resonance for the wall-thickness measurement of high-pressure natural gas pipelines, thereby overcoming the precision limitations of conventional pulse-echo method in the high-pressure gas environments and providing a new theoretical foundation as well as experimental support for the nondestructive testing of transmission pipelines.

Keywords: High-pressure natural gas; pipeline inspection; acoustic response; propagation distance

0 引言

油气管道是能源输送的关键基础设施,其运行安全直接关系到国家能源保障、生态安全与社会公共利益^[1-2]。长期运行中,管道受腐蚀、冲刷等作用易出现壁厚减薄与各类缺陷,若未能及时发现和处理,可能引发泄漏甚至爆炸等严重事故^[3-4]。因此,开发适用于在役管道的高效无损检测技术具有重要意义。

超声检测技术因其适用广、精度高等优点,已成为管道内检测的重要手段之一^[5-6]。然而,传统接触式超声检测(ultrasonic testing, UT)需借助液体耦合剂,难以用于输气管道等气态环境^[7-8]。电磁超声虽无需耦合剂,但其性能受材料特性、表面状态和提离距离影响显著,实际应用中常存在信号不稳、信噪比低等问题,限制了其推广^[9-10]。近年来,空气耦合超声检测(air-coupled ultrasonic testing, ACUT)因非接触、无需耦合剂等优势,在无损检测领域取得了显著进展^[11-13]。吕瑞宏等^[14]结合集成经验模态分解、小波阈值去噪与极端梯度提升算法,实现了空耦超管道防腐层缺陷识别;刘远等^[15]利用结合 ACUT 与导波技术,完成了复合材料板分层损伤的定位与成像;Wandowski 等^[16]研究了斜入射条件下 ACUT 系统在玻璃纤维增强塑料中的传播特性与模态激发。Haugwitz 等^[17]开发了基于板波激励的单侧空气耦合超声方法,用于评估金属-塑料粘接结构老化状态。尽管上述研究取得一定进展,ACUT 技术仍面临共性难题:空气与固体材料间声阻抗差异显著。例如,空气声阻抗约为 $442 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,而钢材高达约 $46.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,导致声波从空气垂直入射钢材时的能量透射率不足水中的千分之一;此外,空气中声衰减随传播距离和频率增加而上升,使得 ACUT 系统灵敏度较传统 UT 下降约 80 dB,构成其在金属管道中应用的主要障碍^[18-20]。

实际输气管道内的天然气通常处于高压状态,这一工况为改善气-固超声耦合提供了新的物理途径。21 世纪初,Schramm 等^[21]在 6.9 MPa 氮气环境中采用高动态范围系统成功观测到钢板的多次反射回波,初步验证了高压气体耦合超声的可行性。随后,Shuttleworth 等^[22]在高压氮气中对比了脉冲回波和一发一收两种检测模式,发现压强升至 1.38 MPa 时可获得反射信号,但脉冲回波的波型畸变严重,信噪比偏低,而一发一收模式能在一定程度上提升信号质量;Karpash 等^[23]则对高压天然

气中超声能量损失进行了理论建模,指出当天然气压力高于 3 MPa 时,气体衰减引起的能量损失可忽略不计。这些研究共同表明,利用高压气体作为耦合介质进行超声检测是可行的,但它们均局限于传统的脉冲反射法,对时域回波幅值或时间的精确提取依赖较高,由于气-固界面的声阻抗失配和气体中的高衰减,导致该方法在实际应用中仍面临检测精度提升困难。此外,高压条件下气体密度、声速等关键物理参数的变化规律尚未完全明确,且气体行为显著偏离理想气体假设^[24],这对建立准确的超声检测模型和进一步提高检测精度带来挑战。因此,如何在高压环境下实现高精度的厚度检测,仍是该领域亟待突破的关键问题。

为此,本文基于高压天然气管道环境,提出一种超声谐振检测方法。通过理论分析、数值模拟与实验验证相结合,综合的分析了气体物理特性对超声波传播的影响规律,得出了高压条件下谐振频率与被测壁厚的关系及影响因素,评估高压环境对声能反射效率与检测灵敏度的提升作用,为该技术在高压天然气管道检测的工程应用提供理论支持与方法参考。

1 高压气体管道谐振法检测模型建立

1.1 天然气管道内声谐振检测理论模型

超管道内检测(in-line inspection, ILI)系统通常由电子舱与探头舱两部分构成,两者通过万向节连接。电子舱负责系统供电、里程记录与定位等功能;探头舱集成多个超声探头阵列,在检测过程中同步激发并接收与管道结构特征相关的超声波信号。当超声纵波由天然气介质入射至管壁内表面时,在天然气-管壁界面处发生反射与透射。透射进入管壁的超声波在管壁内部传播,并在管壁-外界空气界面处再次发生反射与透射,形成多次反射和谐振现象,因此建立如图 1 所示的传播模型。

图 1 中 a 为探头的提离距离, d 为管壁厚度, I 为入射波幅值, R 代表反射波幅值, T 为透射波幅值。下标 1~3 表示所在介质。声波在界面上的反射与透射行为主要由介质的声阻抗 $Z = \rho c$ 决定,其中, ρ 为密度, c 为声速。

根据声学多层介质理论,考虑位移与应力连续条件,探头处接收到的总反射系数 A_{R1} 可表示^[25]为:

$$A_{R1} = \frac{R_1}{I_1} = \frac{r_{23} \exp(2jk_2d) + r_{12}}{r_{12}r_{23} \exp(2jk_2d) + 1} \exp(2jk_1a) \quad (1)$$

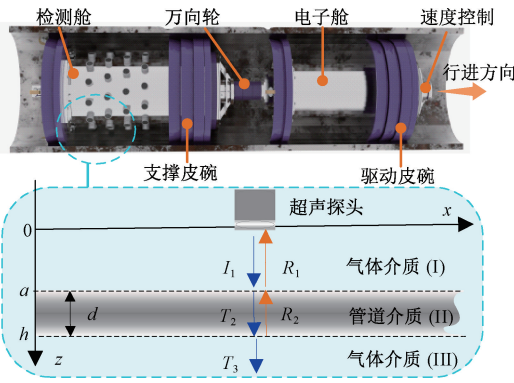


图 1 管道超声 ILLI 系统结构与声波传播模型示意图

Fig. 1 Diagram of the pipeline ultrasonic ILLI tool structure and the acoustic wave propagation model

其中, $r_{12} = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$, $r_{23} = (Z_3 - Z_2) / (Z_2 + Z_3)$, k 为波数。

超声探头能够接收的反射波主要包括两种情况: 1) 入射波在界面 I-II 直接反射的回波; 2) 透射进入管壁后, 在界面 II-III 与 III-II 之间经历一次或多次反射后返回的声波。直接反射波未与管壁结构发生有效相互作用, 不包含壁厚信息, 故在分析中通常予以忽略。因此, 有效反射系数 \tilde{A}_{R1} 可表示为:

$$\tilde{A}_{R1} = \frac{r_{23}(1 - r_{12}^2) \exp(2jk_2d)}{r_{12}r_{23} \exp(2jk_2d) + 1} \exp(2jk_1a) \quad (2)$$

在实际检测时, 传播衰减是无法忽略的因素, 其影响可通过复波数表示为:

$$k_n = \frac{2\pi f}{c_n} + \alpha_n j \quad (3)$$

其中, f 为频率, α_n 为衰减系数, 将式(3)代入到式(2)中可得有效反射系数的幅度谱 $|R(f)|$ 为:

$$|R(f)| = \left[\frac{r_{23}^2(1 - r_{12}^2)^2 \exp(-4\alpha_2 d) \exp(-4\alpha_1 a)}{1 + 2r_{12}r_{23} \exp(-2\alpha_2 d) \cos(4\pi f d / c_2) + r_{12}^2 r_{23}^2 \exp(-4\alpha_2 d)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

可以看出, 当各介质的衰减系数与频率无关时, 有效反射系数在式(5)所示条件出现极值, 即发生谐振。

$$f_n = \frac{nc_2}{2d} \quad (5)$$

其中, f_n 为谐振频率, n 为谐振阶次, $n = 1, 2, 3, \dots \in \mathbb{Z}^+$ 。谐振频率 f_n 仅与管壁厚度 d 以及管壁中声速 c_2 相关, 因此可通过提取频谱中极值点所对应的谐振频率, 得出被测位置的管壁厚度。

1.2 阻尼对谐振频率的影响分析

实际系统中, 声衰减会引起谐振频率相对于理想值 f_n 的微小偏移 $\Delta f = f_{res} - f_n$, 其中 f_{res} 为实际幅度谱的峰

值频率。为评估该偏移对厚度测量精度的影响, 对阻尼来源及其影响进行定量分析。

气体介质的声波衰减系数确定为不同因素引起的吸收系数之和, 如式(6)^[26]所示。

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \chi \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right] \quad (6)$$

其中, η 为粘度系数, χ 为热传导系数, C_V 为定容热容比, C_P 为定压热容比。

管壁材料中, 声衰减主要由晶粒散射、热弹性效应、磁弹性效应与位错迁移引起, 在超声频段常可近似表示^[27]为:

$$\alpha(f) = 8f/c \times 10^{-3} \quad (7)$$

由式(6)和(7)可知, 气体与管材的衰减系数均与频率相关。为定量分析衰减引起的频率偏移量, 对式(4)的幅度谱取模平方得到幅度平方函数 $S(f) = |R(f)|^2$, 谐振频率 f_{res} 对应 $S(f)$ 的极大值点, 即满足 $dS/df = 0$ 。

设 $N(f) = \exp[-2\alpha_2(f)d]$, $\theta(f) = 4\pi f d / c_2$, 则可写为:

$$S(f) = \frac{r_{23}^2(1 - r_{12}^2)^2 \exp[-4\alpha_1(f)a] N(f)^2}{1 + 2r_{12}r_{23}N(f) \cos[\theta(f)] + r_{12}^2 r_{23}^2 N(f)^2} \quad (8)$$

设 $S(f)$ 的分母为 $D(f)$, 对 $S(f)$ 取对数求导, 则有:

$$-4a \frac{d\alpha_1}{df} - 4d \frac{d\alpha_2}{df} - \frac{1}{D} \cdot \frac{dD}{df} = 0 \quad (9)$$

因此, 实际谐振频率 f_{res} 为式(9)的解, 将式(9)中各项关于 f 的关系函数在理想谐振频率 f_n 处, 作 $\Delta f = f_{res} - f_n$ 的泰勒展开, 忽略 Δf^2 及以上的高阶小量, 偏移量可近似为:

$$\Delta f_n \approx \frac{c_2 [1 + r_{12}r_{23} \exp(-0.008n)]}{8\pi^2 d r_{12}r_{23} \exp(-0.008n)} \cdot \left[\frac{c_2^2 a \zeta (1 + r_{12}r_{23} \exp(-0.008n))}{d^2} + 0.008n \right] \quad (10)$$

其中, ζ 为式(6)中气体衰减系数与频率关系的常数系数, 仅与气体物理性质相关。

1.3 高压天然气特性分析

天然气是由多种碳氢化合物及非烃组分组成的复杂混合物, 其中甲烷是其主要成分, 体积分数通常超过 90%。为简化计算模型, 将天然气近似视为单一组分的纯甲烷气体。在高压环境下, 理想气体状态方程已无法准确描述气体的物性行为。因此采用更适用于高压真实气体描述的 Redlich-Kwong 状态方程进行天然气物理特性建模^[28-29], 即:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{\sqrt{T} V_m (V_m + b)} \quad (11)$$

其中, P 为气体压强; R 为气体常数; T 为温度; V_m 为气体的摩尔体积; a 和 b 为修正参数, 分别反应分子间引

力和体积,可通过气体的临界温度 T_c 与临界压力 P_c 求得,如式(12)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{0.4275R^2T_c^{5/2}}{P_c} \\ b = \frac{0.08664RT_c}{P_c} \end{cases} \quad (12)$$

将式(13)中的气体密度 ρ 与摩尔质量 M 及摩尔体

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{-ab^3\rho^4 + M^2(3ab + RT^{3/2}b^2)\rho^2 + 2M^3(bRT^{3/2} - a)\rho + RT^{3/2}M^4}{\sqrt{TM}(M^2 - b^2\rho^2)^2} \quad (15)$$

超声波在气体中的传播速度遵循式(16)中的热力学关系为:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_S} \quad (16)$$

其中, S 表示等熵过程。利用等熵过程 $dS=0$ 利及热力学基本方程,可将其转化为含等温导数与比热容比的

$$c = \left[\gamma \cdot \frac{-ab^3\rho^4 + M^2(3ab + RT^{3/2}b^2)\rho^2 + 2M^3(bRT^{3/2} - a)\rho + RT^{3/2}M^4}{\sqrt{TM}(M^2 - b^2\rho^2)^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

2 数值仿真分析

2.1 高压天然气物理特性仿真分析

为探究高压环境下气体特性对超声传播的影响,进行数值仿真研究。将式(12)代入式(14)和(18)中可以

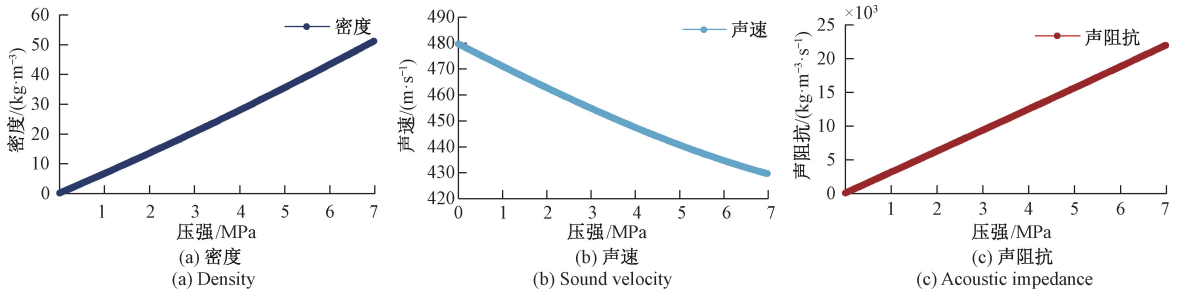


图2 不同压强下天然气介质物理特性变化曲线

Fig. 2 Varied physical properties of natural gas as a function of pressures

由图2可知,随着压强的升高,气体密度显著增大,声速略有下降,但由于密度增长占主导,声阻抗整体呈上升趋势。这表明高压环境下天然气与管壁界面的声阻抗差异减小,有利于超声波能量透射进入管壁。不同压强下天然气介质中超声衰减系数随频率的变化关系,如图3所示。

图3表明在任一给定压强下,超声衰减系数均随频率升高而显著增大,呈现出典型的正相关特性;而在相同频率下,随着气体压强的提升,衰减系数整体逐渐降低,

积 V_m 的关系代入式(11)可得气体密度和压强之间的关系为:

$$\rho = \frac{M}{V_m} \quad (13)$$

$$P = \frac{ab\rho^3 + (bRT^{1.5} - a)M\rho^2 + RT^{1.5}M^2\rho}{\sqrt{TM}(M^2 - b^2\rho^2)} \quad (14)$$

进一步求偏导可得:

形式,如式(17)所示。

$$c = \sqrt{\gamma \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T} \quad (17)$$

其中, $\gamma = C_p/C_v$ 为比热容比。将式(15)代入式(17)可以得到气体声速的最终计算公式为:

得到气体密度、声速及声阻抗随压强的变化规律,如图2所示。其中参数取值^[30]为: $M = 16.0425 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, $T = 298.15 \text{ K}$, $T_c = 191.05 \text{ K}$, $P_c = 4.6407 \text{ MPa}$, $C_p = 2.7458 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, $C_v = 1.8442 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, $\eta = 1.26706 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\chi = 0.0416 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

且衰减-频率曲线的斜率也随之减小。这表明高压环境对超声传播,特别是对高频成分的衰减具有明显的抑制作用,有利于增强信号的传播能力与检测信噪比。

2.2 阻尼对谐振频率影响的仿真分析

为量化评估实际工况下阻尼对谐振频率的影响,本节基于式(10)对高压天然气管道谐振频率偏移量进行仿真分析。目前,在役高压天然气管道的壁厚范围约为4~30 mm,钢制管道的纵波声速 $c = 5900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度 $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,管道外环境设为常温常压空气,声速为

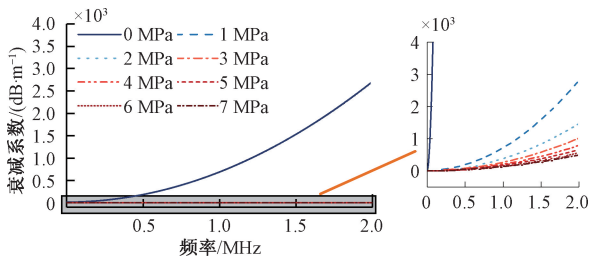


图 3 不同压强下天然气超声衰减系数随频率的变化曲线
Fig. 3 Ultrasonic attenuation coefficient of natural gas under various pressures varies with the frequency

$340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 密度为 $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。空气中的声波衰减系数^[31]为: $\alpha(f) = 1.5895f^2/c \times 10^{-10} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。天然气介质在高压下的声学参数由图 2 和 3 给出。仿真计算中, 设传播距离 $a = 40 \text{ mm}$, 不同压强下、不同壁厚的一阶谐振频率偏移量 $|\Delta f|$ 结果如图 4 所示。

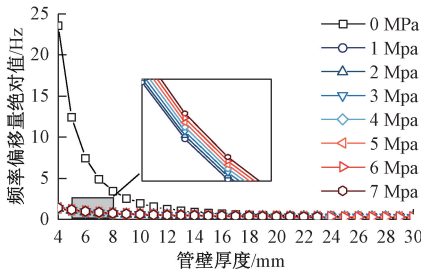


图 4 不同压强、不同壁厚下谐振频率偏移量 $|\Delta f|$
Fig. 4 Resonance frequency offset $|\Delta f|$ under different pressures and wall thicknesses

由图 4 可知, 在不同壁厚与压强条件下, 频率偏移量均 $< 20 \text{ Hz}$, 尤其在高压状态下 ($\geq 1 \text{ MPa}$) 时均 $< 1.5 \text{ Hz}$, 虽然随着压强的增加 $|\Delta f|$ 会略有增加, 但增加量 $< 10^{-3} \text{ Hz}$, 而实际谐振频率通常在数百 kHz 量级, 该偏移量远低于频率识别精度。

进一步地, 固定壁厚 $d = 5.9 \text{ mm}$, 谐振阶次 $n = 1$, 计算不同压强下传播距离对频率偏移量的影响, 结果如图 5 所示。

图 5 表明, 常压状态, 随着传播距离的增加, 频率偏移量增大, 但在超声检测常用提高距离范围内 ($20 \sim 80 \text{ mm}$) 传播引起的偏移量均 $< 16 \text{ Hz}$, 而在高压环境下, 压强和传播距离的变化对谐振频率偏移量几乎无影响, 均在 1 Hz 以内。

随后, 在传播距离 $a = 40 \text{ mm}$ 条件下, 对不同谐振阶次的频率偏移进行仿真, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 高频谐振阶次会导致 $|\Delta f|$ 增大, 在常压下增量明显, 而在高压下, 增量较弱, 高压情况下所有偏移量均 $< 10 \text{ Hz}$, 同时, 压强升高对阶次的频率偏移没有影响。

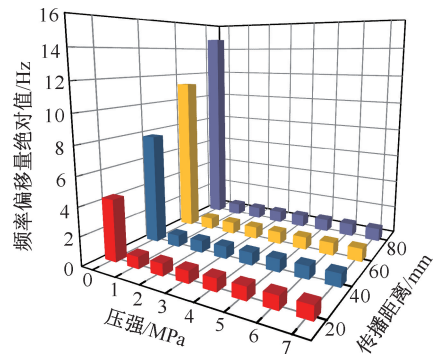


图 5 不同压强、不同传播距离下的谐振频率偏移量 $|\Delta f|$
Fig. 5 Resonance frequency offset $|\Delta f|$ under different pressures and propagation distances

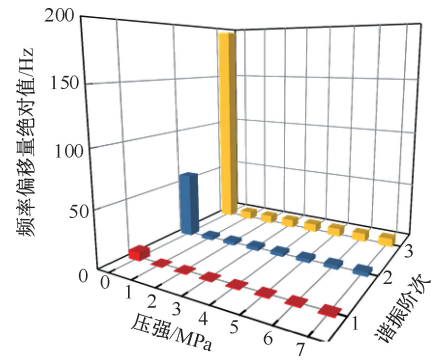


图 6 不同压强、不同谐振阶次下的谐振频率偏移量 $|\Delta f|$
Fig. 6 Resonance frequency offset $|\Delta f|$ under different pressures and resonance orders

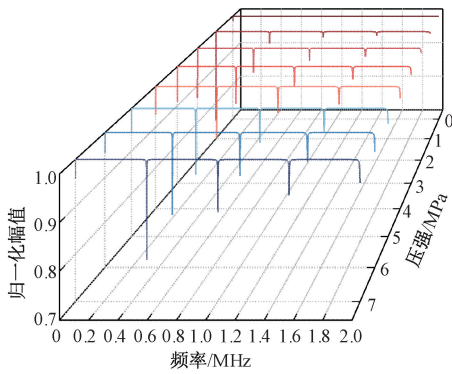
上述仿真结果表明, 在高压天然气管道壁厚范围内, 由介质阻尼引起的谐振频率偏移量在 Hz 级。而超声检测系统频率大多在 MHz 级, 频率分辨率远高于该偏移量, 因此阻尼不影响基于谐振频率的厚度计算精度。该结论从理论上支持了高压气体耦合谐振检测方法的可靠性。

2.3 谐振检测特性仿真分析

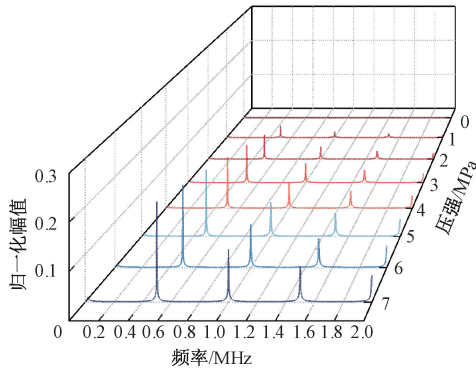
尽管高压环境有助于抑制谐振频率偏移并降低衰减系数, 超声波在气体介质中的能量传播情况仍与传播距离密切相关, 直接影响检测信号质量、缺陷识别精度与系统稳定性。因此需要综合权衡压强与传播距离对声波传播特性及谐振频率的耦合影响。

设传播距离 $a = 0 \text{ mm}$, $d = 5.9 \text{ mm}$, 分析不同压强下反射系数幅度谱与频率的关系, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 在任意压强条件下, 当激励频率等于管壁谐振频率时, 总反射系数出现极小值, 有效反射系数则达到极大值。衰减的存在并不影响谐振频率与管壁之间的响应关系, 但随着谐振阶次升高, 有效反射系数幅值逐渐降低。高压环境下的低衰减特性有助于增强透射能



(a) 不同压强下总反射系数幅度谱随频率的变化
(a) Total reflection coefficient amplitude spectrum as a function of frequency at various pressures



(b) 不同压强下有效反射系数幅度谱随频率的变化
(b) Effective reflection coefficient amplitude spectrum as a function of frequency at various pressures

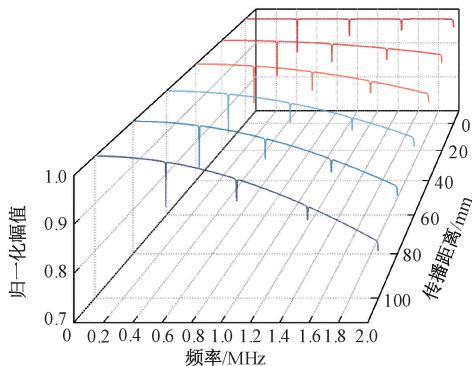
图7 不同压强下反射系数幅度谱随频率的变化曲线

Fig. 7 Variation of reflection coefficients amplitude spectrum with frequency under different pressures

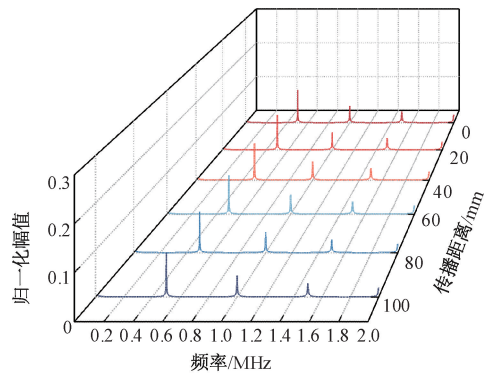
量,减少界面反射引起的能量损失。以1 MPa为例,相较于常压条件,其接收到的信号幅值在一阶谐振频率处增强约59.9 dB。

之后固定压强为3 MPa,分析不同传播距离对反射系数幅度谱的影响,结果如图8所示。

由图8(a)可知,当传播距离 $a \neq 0$ 时,反射系数频谱曲线的整体幅值随距离增加呈抛物线型下降,距离越大,



(a) 不同传播距离下总反射系数幅度谱随频率的变化
(a) Total reflection coefficient amplitude spectrum versus frequency at various propagation distances



(b) 不同传播距离下有效反射系数幅度谱随频率的变化
(b) Effective reflection coefficient amplitude spectrum versus frequency at various propagation distances

图8 不同传播距离下反射系数幅度谱随频率的变化曲线

Fig. 8 Reflection coefficients amplitude spectrum varied with frequency for different propagation distances

曲线幅值衰减越快。这是由声波在气体介质中传播时存在的固有扩散与吸收衰减所引起的。图8(b)所示的有效反射系数的变化表明尽管绝对幅值有所下降,但谐振频率点的位置在不同传播距离下基本稳定。这意味着传播距离的变化主要影响回波信号的强度,而对用于谐振频率识别的影响较小。该结论证明了所提出的谐振检测方法对提高距离的设置具有良好的鲁棒性。

3 实验验证

3.1 实验系统平台

为验证本文所建立的高压气体环境中超声传播模型的正确性与管壁厚度谐振检测方法的有效性,搭建了高压气体超声检测实验平台,实验系统整体结构如图9所示。

图9(a)为谐振法检测系统的组成部分。该系统通过LabVIEW软件平台生成宽频激励信号,经由高压放大器转换为高压信号以驱动超声探头。接收端采用增益为60 dB的前置放大器对微弱回波信号进行放大,并通过示波器完成信号的实时采集与存储。图9(b)为高压实验环境,该压力容器可充入多种气体介质,承压上限为7 MPa。容器通过专用高压接插头实现内外电气连接,顶部配置压力表用于实时监测试验气压。出于安全考量,本研究选用氮气作为测试介质,以模拟实际高压天然气环境。容器内部固定有标准钢板试件与超声探头,探头线缆经高压接口引出后连接至外部双工器,从而构成完整的超声检测系统。实验中采用中心频率0.43 MHz、直径为28 mm的气体耦合超声探头。实验中采用宽频激励信号,激励频段范围为100 kHz~1 MHz。

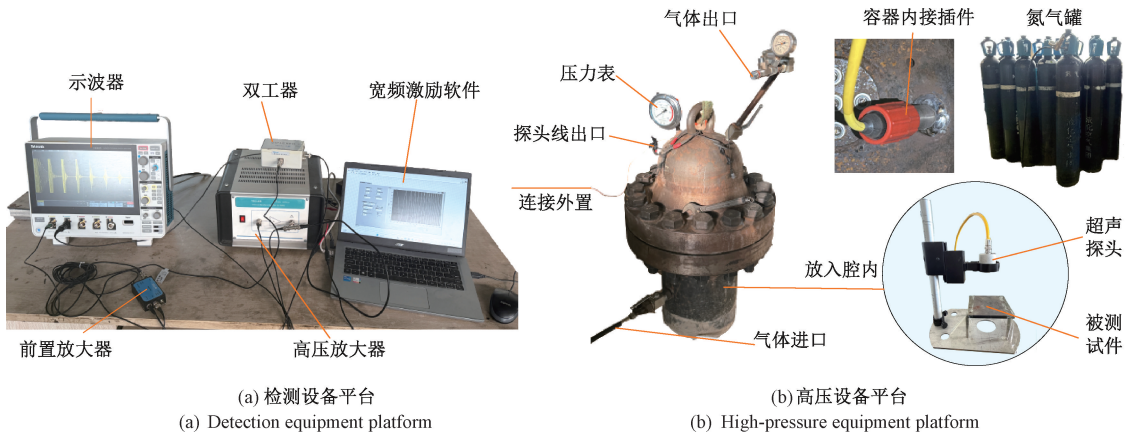


图 9 高压实验平台

Fig. 9 High-pressure gas experimental platform

实验所得谐振频率根据式 (19) 计算厚度,以量化检测精度。

$$\bar{d} = \frac{\sum_{n=1}^m d_n}{m} = \left(\frac{\sum_{n=1}^m \frac{nc}{2f_n}}{m} \right) / m \quad (19)$$

其中, \bar{d} 表示最终厚度, f 表示谐振频率, d 表示计算出的厚度, n 表示阶数, m 表示总共提取到的谐振次数, c 为板的声速。

3.2 结果分析

1) 实验介质声学特性分析与等效性论证

为阐明采用氮气作为实验介质的依据,基于建立的气体状态方程与声学模型,对比了高压下目标介质(以甲烷为主)与实验介质(氮气)的关键声学参数,从而论证氮气模拟高压天然气环境的可行性与合理性。模型计算温度设定为 $T = 298.15 \text{ K}$,其余热力学参数引自文献[30],声衰减系数按探头中心频率 0.43 MHz 计算。相关计算结果汇总计算结果如表 1 所示。

表 1 高压下甲烷与氮气声学参数的理论计算值对比

Table 1 Comparison of theoretical acoustic parameters between methane and nitrogen under the high pressure

压强/ MPa	气体 介质	声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	声阻抗 $\times 10^3$ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)	声衰减系数/ ($\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	氮气	352.83	11.340	4.002	0.248
	甲烷	470.98	6.597	3.107	0.128
3	氮气	355.53	34.220	12.167	0.081
	甲烷	454.74	20.500	9.325	0.046
5	氮气	359.27	57.230	20.562	0.049
	甲烷	440.57	35.380	15.588	0.029
7	氮气	362.13	80.220	29.049	0.034
	甲烷	429.38	51.140	21.959	0.022

通过表 1 的理论计算表明,高压下氮气与甲烷的声学行为遵循相同规律:声阻抗显著增大,衰减系数显著降低,共同构成了改善声耦合的物理基础。尽管甲烷声阻抗略低,但与钢板的阻抗失配程度已比常压气体改善两个数量级以上,与氮气的差值处于同一量级。同时,甲烷在 7 MPa 下的声衰减系数更低,更利于信号传播与稳定检测。因此,基于氮气实验验证的高压谐振检测方法,在甲烷环境中应能实现同等性能。

2) 不同压强下气体超声检测实验结果

为探究气体压强对超声谐振检测效果的影响,在 $0 \sim 7 \text{ MPa}$ 范围,对不同压强下厚度为 7.1 mm 的钢板进行了检测。实验中探头提离距离固定为 40 mm 。钢板中纵波声速为 $5921 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不同压强下的超声回波信号如图 10 所示。

图 10(a) 中,在常压 (0 MPa) 条件下,传播时间 $t = 230 \mu\text{s}$ 处得到钢板上表面的第 1 次回波。随着压强升高,一次回波的到达时间未发生显著偏移,这与传播距离恒定时气体声速随压强变化较小的理论预期相符。为精确提取壁厚信息,避免表面回波、激励信号长度及换能器余震的干扰,截取第 3~4 次上表面回波之间的尾波信号(时窗 $800 \sim 900 \mu\text{s}$) 进行快速傅里叶变换,得到其频域响应如图 10(b) 所示。

图 10(b) 所示的频域结果表明,随着压强的增高,一阶谐振频率的幅值显著增强;当压强升至 3 MPa 及以上时,除一阶谐振频率 f_1 外,系统能稳定识别出二阶乃至三阶谐振频率,可为后续厚度计算提供更高的检测精度。利用式 (19) 所示的谐振频率与厚度关系,对各阶谐振频率进行厚度计算并取平均值,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,当压强达到 3 MPa 后,厚度检测误差均 $< 0.15 \text{ mm}$,显示出较高的识别精度与良好的重复性。

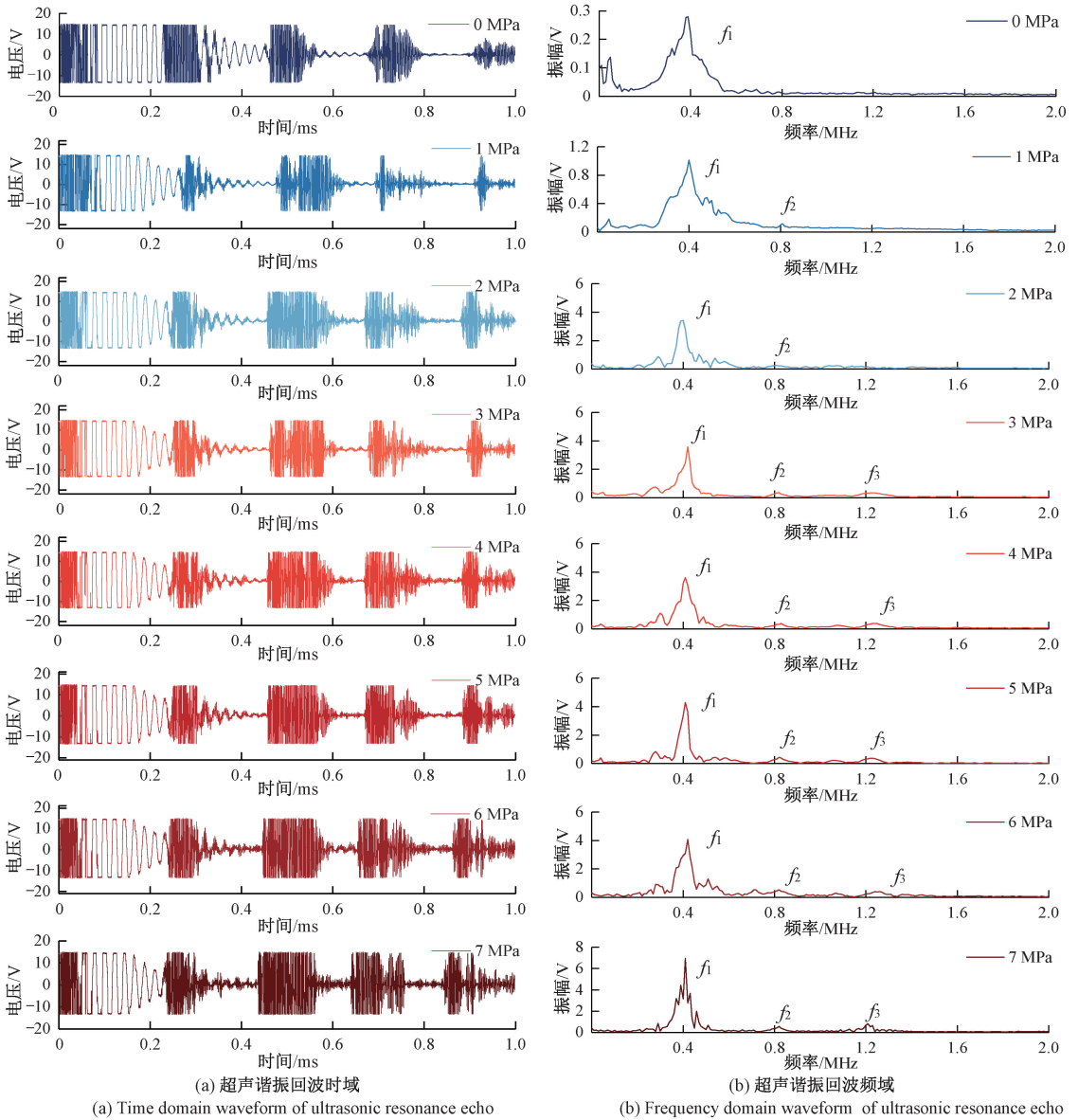


图 10 不同压强下 7.1 mm 厚钢板超声谐振回波

Fig. 10 Ultrasonic resonance echo of 7.1 mm thick steel plate under different pressures

表 2 不同压强下 7.1 mm 厚钢板谐振频率及厚度计算结果
Table 2 Resonant frequency and thickness calculation results of 7.1 mm thick steel plate under different pressures

压强/MPa	f_1 /kHz	f_2 /kHz	f_3 /kHz	计算厚度/mm
0	400	-	-	7.40
1	400	810	-	7.36
2	400	810	-	7.36
3	420	820	1 230	7.16
4	400	830	1 240	7.23
5	410	830	1 240	7.17
6	410	820	1 240	7.20
7	410	820	1 230	7.22

说明高压气体环境有助于增强谐振频率幅值、提高厚度计算精度。

3) 不同传播距离下钢板厚度检测实验结果

为评估传播距离对谐振检测稳定性的影响,在 3 MPa 压强下,分别对 40、60、80 及 100 mm 这 4 种提离距离下的 7.1 mm 钢板进行检测,所得频谱如图 11 所示。

图 11 表明回波谐振信号幅值并未随传播距离增大呈现单调衰减规律,其波动范围 < 1 V。这表明在高压情况下,传播距离并非影响信号强度的主导因素。同时,尽管幅值存在波动,各提离条件下所识别出一阶谐振频率始终稳定在 400~420 kHz,进一步证明谐振频率作为厚度特征参量对传播距离变化具有良好的鲁棒

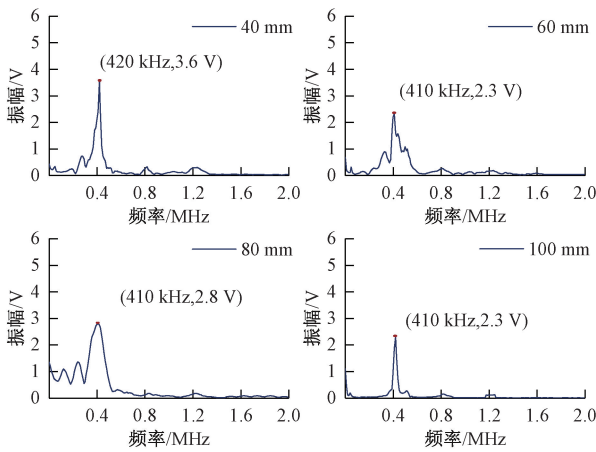


图 11 不同脱离下 7.1 mm 厚钢板频谱

Fig. 11 Spectrum of 7.1 mm thick steel plate under different lift off conditions

性,为实际检测中探头安装位置的设定提供了较大灵活性。

4) 不同厚度钢板检测实验结果

为进一步验证方法对不同壁厚的适用性,在 3 MPa 压强下,对 6.2、7.1 和 8.2 mm 这 3 种厚度的钢板进行了谐振检测实验,试件参数如表 3 所示,所获得的谐振频谱如图 12 所示。

表 3 被测钢板的参数

Table 3 Parameters of tested steel plate

板厚/mm	一阶谐振频率/kHz
6.2	478
7.1	417
8.2	361

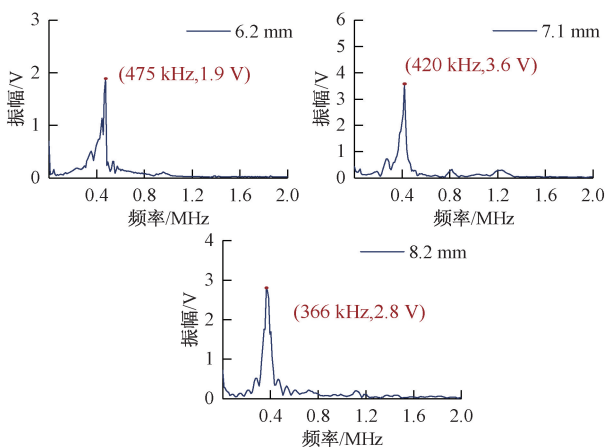


图 12 不同厚度钢板的谐振频谱

Fig. 12 Resonance spectra of steel plates with different thicknesses

图 12 表明 7.1 mm 厚度钢板的谐振响应幅值最高,这主要是因为 f_1 与探头中心频率最为接近,形成了最佳的声振耦合状态。相比之下,高阶谐振频率的响应幅值普遍较低,这与探头有限的工作带宽及频率响应特性有关。基于图 12 中提取的各阶次谐振频率,计算钢板厚度,结果如表 4 所示。

表 4 不同厚度钢板在 3 MPa 压强下谐振频率及厚度计算结果

Table 4 Resonance frequency and thickness calculation results of steel plates with different thicknesses under 3 MPa pressure

实际厚度/mm	f_1 /kHz	f_2 /kHz	f_3 /kHz	计算厚度/mm
6.2	475	950	-	6.23
7.1	420	820	1 230	7.16
8.2	366	720	1 080	8.18

实验结果表明,该方法对不同厚度钢板的检测误差均 < 0.1 mm,具有较高的测量精度与良好的通用性,能够满足实际管道壁厚检测的需求。

4 结 论

高压气体虽可通过增加声阻抗来提高气-固耦合效率,但传统脉冲反射法因其对时域波形幅值与到达时间的精度高度依赖,在高压环境中的检测精度仍面临瓶颈。为此,本文提出一种基于声谐振机理的高压气体耦合超声检测方法,通过建立谐振理论模型阐明压强对气体声学参数的定量影响,结合仿真与实验分析高压对谐振响应的的影响机制,并系统评估该方法的检测精度与鲁棒性。主要结论为:

1) 高压气体可显著增强气/固界面的声能传输效率,且增强效果与压强呈正相关。实验结果表明,当压强从常压提升至 3 MPa,一阶谐振频率处的信号幅值呈现持续增强趋势,增幅可达 12 倍,且能够稳定激发二阶、三阶谐振模态,使 7.1 mm 钢板的厚度检测误差从常压下的 0.3 mm 降低至 0.15 mm 以内。

2) 理论分析并验证了介质阻尼对谐振频率的影响可忽略不计。高压气体与钢材衰减的复合阻尼作用下,谐振频率偏移量 $|\Delta f|$ 远低于超声检测系统的频率分辨率。保证了谐振频率作为厚度特征量的稳定性和可靠性。

3) 谐振频率对传播距离的变化表现出良好的稳定性。在 3 MPa 压强条件下,传播距离在 40~100 mm 范围变化时,一阶谐振频率的识别误差 < 14 kHz,对 6.2~8.2 mm 不同厚度钢板的检测误差均 < 0.1 mm。

本研究系统验证了高压气体耦合谐振方法在管道壁厚检测中的有效性,突破了传统脉冲反射法的精度局限,为天然气管道无损检测提供了一种新的技术途径,对推动该技术在高压环境中的应用具有参考价值。

参考文献

- [1] 廉正, 刘斌, 刘桐, 等. 基于双磁场管道复合型缺陷应力信号提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 107-118.
LIAN ZH, LIU B, LIU T, et al. Research on the stress signal extraction method of pipeline composite defect based on dual magnetic field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 107-118.
- [2] 武梓涵, 廉正, 刘斌, 等. 基于弱磁法的管道氢致损伤力磁耦合特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 137-151.
WU Z H, LIAN ZH, LIU B, et al. Study on magneto-mechanical coupling characteristics of hydrogen-induced damage in pipelines based on weak magnetic method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 137-151.
- [3] 孙玉, 张薇, 唐成瑞, 等. 油气管道腐蚀因素与防腐措施进展[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(3): 115-118.
SUN Y, ZHANG W, TANG CH R, et al. Corrosion factors and anti-corrosion measures of oil and gas pipelines[J]. Total Corrosion Research, 2023, 37(3): 115-118.
- [4] 代希圣, 周涛, 薛超龙, 等. 采用超声导波的管道腐蚀损伤厚度成像方法[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(5): 900-906, 1059-1060.
DAI X SH, ZHOU T, XUE CH L, et al. A thickness imaging method for pipeline corrosion damage using ultrasonic guided waves [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(5): 900-906, 1059-1060.
- [5] 杨理践, 石萌, 耿浩. 长输油气管道内检测技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(5): 676-684.
YANG L J, SHI M, GENG H. Internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(5): 676-684.
- [6] ZANG X L, XU ZH D, LU H F, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 206: 105033.
- [7] 曾艳丽, 王天宇, 吴明泽, 等. 管道轴向裂纹内检测超声探头设计与仿真[J]. 仪表技术与传感器, 2025(6): 32-35.
ZENG Y L, WANG T Y, WU M Z, et al. Design and simulation of ultrasonic probe for detecting axial cracks in pipelines[J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(6): 32-35.
- [8] CAI L X, DIAO ZH Q, CHEN F, et al. Identification method of circumferential declination based on amplitude reduction of pipeline ultrasonic internal inspection signals[J]. Nondestructive Testing and Evaluation. 2025, 40(5): 2081-2097.
- [9] 刘轩, 吕炎, 边策, 等. 管道电磁超声传感器阵列检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 24-32.
LIU X, LYU Y, BIAN C, et al. Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 24-32.
- [10] YANG SH Y, ZHAO R X, DUAN ZH R, et al. A novel enhanced sensitive sensor for small-diameter pipe based on the PECT-EMAT hybrid testing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 226: 112350.
- [11] 王丙泉, 赵勃. 复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 100-108.
WANG B Q, ZHAO B. In-situ stress measurement method for composite plate based on air-coupled ultrasonic Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 100-108.
- [12] 涂馨予, 楼成淦, 金杭超, 等. 一种空气耦合超声换能器研制[J]. 压电与声光, 2023, 45(6): 892-897.
TU X Y, LOU CH G, JIN H CH, et al. Research and development of an air-coupled ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(6): 892-897.
- [13] LI R X, YANG L J, ZHANG J, et al. Improved singular spectrum decomposition method for resonance recognition of air-coupled ultrasonic signals in through-transmission steel plate detection [J]. Measurement Science and

- Technology, 2025, 36(1): 0161a9.
- [14] 吕瑞宏, 解海龙, 王晨丽, 等. 基于空耦超声管道防腐层裂纹识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 234-245.
LYU R H, XIE H L, WANG CH L, et al. Research on crack identification algorithm of anti-corrosion layer of air coupling ultrasonic pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 234-245.
- [15] 刘远, 彭炜亮, 卢超, 等. 航空复合材料板非接触空气耦合超声导波多损伤快速成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 103-115.
LIU Y, PENG W L, LU CH, et al. Multi-damage rapid imaging method of non-contact air-coupled ultrasonic guided wave for aircraft composite plates [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 103-115.
- [16] WANDOWSKI T, RADZIENSKI M, MINDYKOWSKI D, et al. Analysis of damage localisation results in GFRP panel for different configurations of air-coupled transducers[J]. Ultrasonics, 2023, 132: 106986.
- [17] HAUGWITZ C, SCHARDT A, HAHN-JOSE T, et al. Non-contact ultrasonic stress measurement using Lamb waves[J]. NDT & E International, 2025, 115: 103419.
- [18] ZHANG CH CH, ZHANG Y H, LIU D Z, et al. A novel two-level approach to defect detection in braided CFRP using air-coupled ultrasonic testing [J]. Ultrasonics, 2023, 128: 106884.
- [19] 孟翔震, 李再伟, 朱文发, 等. 基于空耦超声 Lamb 波的金属板状结构内部缺陷检测方法[J]. 应用声学, 2020, 39(2): 316-324.
MENG X ZH, LI Z W, ZHU W F, et al. Detection of internal defect in metal plate structures using air-coupled ultrasonic Lamb waves[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(2): 316-324.
- [20] 李骥, 李力, 邓勇刚, 等. 空气耦合超声换能器的频域声场研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 10-16.
LI J, LI L, DENG Y G, et al. Study on acoustic field of air-coupled ultrasonic transducer in frequency domain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 10-16.
- [21] SCHRAMM R E, FORTUNKO C M. High pressure gas coupled ultrasonic inspection for discontinuities [J]. Materials Evaluation, 2000, 58(4): 558-563.
- [22] SHUTTLEWORTH P, MAUPIN J, TEITSMA A. Gas coupled ultrasonic measurement of pipeline wall thickness[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 290-293.
- [23] KARPASH M O, KOTURBASH T T. Estimation of the losses of energy of acoustic vibrations in the course of ultrasonic testing in the atmosphere of natural gas [J]. Materials Science, 2012, 47(6): 856-863.
- [24] SHAN B CH, CHEN S Z, GUO ZH L, et al. Pore-scale study of non-ideal gas dynamics under tight confinement considering rarefaction, denseness and molecular interactions [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 90: 103916.
- [25] 周正干, 王俊, 李洋, 等. 多层黏接结构的阵列超声检测评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(12): 3207-3214.
ZHOU ZH G, WANG J, LI Y, et al. Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(12): 3207-3214.
- [26] BENNY G, HAYWARD G, CHAPMAN R. Beam profile measurements and simulations for ultrasonic transducers operating in air[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(4): 2089-2100.
- [27] WAAG G, HOFF L, NORLI P. Air-coupled ultrasonic through-transmission thickness measurements of steel plates[J]. Ultrasonics, 2015, 56: 332-339.
- [28] 林晓晖, 李刚, 杨文明, 等. 埋地大直径高压输气管道泄漏特性仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(8): 3400-3414.
LIN X H, LI G, YANG W M, et al. Simulation of buried natural gas pipeline leakage and diffusion process [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3400-3414.
- [29] SANCHEZ A, VILLALOS S. Geometric model of real gases described by the Redlich-Kwong-Soave equation of state [J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 372: 121167.
- [30] 黄建彬. 工业气体手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
HUANG J B. Industrial gas handbook [M]. Beijing:

Chemical Industry Press, 2002.

- [31] LI J, PIWAKOWSKI B. A time-domain model and experimental validation of the acoustic field radiated by air-coupled transducers [J]. *Ultrasonics*, 2018, 82: 114-129.

作者简介



李蓉雪 (通信作者), 2019 年于南京工程学院获得学士学位, 2022 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为管道超声检测技术及相关理论。

E-mail: lrx5497@163.com

Li Rongxue (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2019, her M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2022. She is

currently a Ph. D. degree student at Shenyang University of Technology. Her main research interests include pipeline ultrasonic testing technology and related theories.



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981 and his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of long-distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology