



智能计算机与应用
Intelligent Computer and Applications
ISSN 2095-2163, CN 23-1573/TN

《智能计算机与应用》网络首发论文

题目: 基于电磁超声的天然气管道沉降应力检测方法研究
作者: 魏星, 浦哲, 吕贵阳, 徐吉超
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.25061203
收稿日期: 2025-06-12
网络首发日期: 2025-07-03
引用格式: 魏星, 浦哲, 吕贵阳, 徐吉超. 基于电磁超声的天然气管道沉降应力检测方法研究[J/OL]. 智能计算机与应用.
<https://doi.org/10.20169/j.issn.2095-2163.25061203>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.25061203

基于电磁超声的天然气管道沉降应力检测方法研究

魏星¹, 浦哲², 吕贵阳³, 徐吉超⁴

(1 上海天然气管网有限公司, 上海 200120; 2 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062; 3 戈昱科技(上海)有限公司, 上海 201613; 4 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620.)

摘要: 天然气场站的非均匀下沉将造成管道的应力集中现象, 过大的应力集中导致管道变形屈服, 甚至发生灾难性事故。本文采用电磁超声双折射法, 即利用电磁超声探头在管道中产生两束偏振方向互相垂直的超声横波, 并标定管道用钢材料的声弹性系数, 进而准确测量管道的实际应力值。结果表明, 天然气沉降管道存在应力集中现象, 且位置 1 水平直管段的应力值最大达到 275MPa, 接近屈服强度的 70%。而非沉降管道中没有明显的应力集中区域, 且周向应力分布相对均匀, 均小于 210MPa。本文实验结果表明了电磁超声双折射法在天然气管道沉降应力检测中的可行性, 为管道应力检测提供了一种准确的无损检测方法。

关键词: 天然气管道; 沉降; 电磁超声; 双折射法; 应力检测

中图分类号: TP274.53; TP216 **文献标志码:** A

Research on stress detection method of natural gas pipeline with settlement based on electromagnetic ultrasonic

WEI Xing¹, PU Zhe², LYU Guiyang³, XU Jichao⁴

(1 Shanghai Natural Gas Pipeline Network Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2 Shanghai Institute of Special Equipment Supervision and Inspection Technology, Shanghai 200062, China; 3 Geyu Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201613, China; 4 School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China.)

Abstract: The non-uniform subsidence of natural gas station will cause stress concentration of pipeline. Excessive stress concentration will lead to deformation and yield of pipeline, and even catastrophic accidents. In this paper, the double refraction method based on electromagnetic ultrasonic is used. The electromagnetic ultrasonic transducer is used to generate two ultrasonic shear waves with perpendicular polarization direction in the pipeline, then the actual value of stress is accurately measured. The results show that there is a stress concentration phenomenon in the natural gas pipeline with settlement, and the stress value of the horizontal straight section at position 1 reaches the maximum of 275 MPa, which is close to 70% of the yield strength. However, there is no obviously stress concentration area in the non-settlement pipeline, and the circumferential stress distribution is relatively uniform, which is less than 210 MPa. The experimental results in this paper show the feasibility of the birefringence method based on electromagnetic ultrasonic for stress detection of natural gas pipeline with settlement, and provide an accurate non-destructive testing method for stress detection in the pipeline.

Keywords: Natural gas pipeline; settlement; electromagnetic ultrasonic; double refraction method; stress detection.

0 引言

基金项目: 上海市科技中小企业创业创新项目 (220H140200)。

作者简介: 魏星(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 天然气管网输配及智能运维。

通信作者: 徐吉超(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 超声检测成像与结构健康监测。Email: jcxu@sues.edu.cn

收稿日期: 2025-06-12

由于我国能源分布不均，加上城市快速发展引起能源需求急剧增长，促使我国管道运输行业迅速发展，运输规模不断提高^[1]。天然气场站作为管网系统里的关键枢纽节点，其结构完整性对整个输气系统的可靠运行起着决定性作用。然而，天然气场站管线分布错综复杂，管线输送压力大且压力梯度大^[2]，且我国很多管线敷设在承载能力较低的软土地基上，极易形成地面的非均匀沉降^[3]，而场地的非均匀下沉将造成管线的应力集中现象^[4]，过大的应力集中将会造成管线以及附属设备变形屈服或者断裂，导致生产停产、设备损坏、介质泄漏，甚至发生爆炸造成灾难性事故。因此，检测天然气场站管道沉降应力，并分析其应力水平对天然气管道安全运行是至关重要的^[5]。

目前，应力测量方法主要分为有损和无损^[6]两大类。超声波法^[7]是一种常见的无损检测方法，其检测速度快、成本低，操作简单，且超声波穿透能力强，可用于材料内部应力的检测，因此受到研究者广泛关注。超声波法检测应力的理论基础是声弹性理论^[8]，即超声波传播速度与材料内部所受应力存在一定关联，由此可测量出超声波传播路径上的平均应力值。由于超声横波在受应力作用或各向异性材料中会产生声双折射现象^[9]，超声双折射法在工业生产中具有广阔的应用前景。周小明等^[10]利用超声横波直探头，验证了超声双折射法在轮辋应力测量中的可行性。靳聪等^[11]同样利用横波探头，研究了当横波偏振方向与应力方向垂直时，所受应力与横波波速的变化关系。上述研究中都采用压电换能器实现超声横波的激发与接收，但换能器耦合条件常常会造成不可避免的测量误差，影响超声检测应力的精度^[12]。因此，工业领域中亟需一种新型的非接触式传感器。Kumar 等^[13]开发了一种单线圈可同时激励两束垂直偏振横波的电磁超声换能器，刘恒^[14]利用电磁超声换能器激励超声横波，研究了基于电磁超声的管道残余应力检测系统。因此，本文采用电磁超声双横波折射法，通过标定天然气管道用钢材料的声弹性系数，对地面沉降产生的管道应力进行无损检测，对于保障管道安全运行具有重要意义。

1 声弹性双折射法应力检测基础

在自由状态下，如果声各向同性的金属材料内部没有应力作用，超声波的传播速度与传播方向无关，且超声横波的传播速度与横波偏振方向无关^[15]。当超声横波在受到应力的材料中传播时，由于材料呈现出声各向异性^[16]，横波会分裂为两个偏振方向相互垂直的快横波与慢横波，其传播速度与主应力方向相关，这种现象就称为声弹性双折射。当声波的传播方向垂直于应力方向时，材料中超声声速与应力的关系为^[17]：

$$\rho v_{1T}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right) \quad (1)$$

$$\rho v_{2T}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right) \quad (2)$$

式中 v_{1T} 、 v_{2T} 分别表示传播方向垂直于应力方向，偏振方向平行、垂直于应力方向的横波波速； λ 、 μ 和 m 、 n 分别为材料的二阶弹性系数和三阶弹性系数； σ 为材料所受应力， ρ 为材料密度。

将式（1）与（2）作差可得：

$$\rho(v_{1T} - v_{2T})(v_{1T} + v_{2T}) = \sigma(1 + \frac{n}{4\mu}) \quad (3)$$

由于横波波速的变化很小，当材料处于零应力状态时，存在如下近似关系：

$$v_{1T} = v_{2T} = v_0 = \sqrt{\mu / \rho} \quad (4)$$

其中 v_0 为零应力状态下的横波波速，将公式 (4) 代入到公式 (3)，可得：

$$\frac{(v_{1T} - v_{2T})}{(v_{1T} + v_{2T}) / 2} = \frac{\sigma}{2\mu} (1 + \frac{n}{4\mu}) \quad (5)$$

式中 $K = \frac{1}{2\mu} (1 + \frac{n}{4\mu})$ 为声弹性系数^[18]，只与材料有关。在实际测量中，测量设备无法直接获

取横波波速，只能直接测量声时，因此用 $2d = vt$ 代入公式 (5) 中，获得测量设备实际使用的计算公式：

$$\frac{(t_{1T} - t_{2T})}{(t_{1T} + t_{2T}) / 2} = -\frac{\sigma}{2\mu} (1 + \frac{n}{4\mu}) \quad (6)$$

其中，令双折射率 $B = \frac{(t_{1T} - t_{2T})}{(t_{1T} + t_{2T}) / 2}$ ， t_{1T} 为偏振方向平行于应力方向的横波声时， t_{2T} 为偏振

方向垂直于应力方向的横波声时。由此得到双横波折射法的应力计算公式：

$$B = -K\sigma \quad (7)$$

由此可知，双折射法的应力测量值与试件厚度无关，只与试件材料有关^[19]。只要预先标定与材料有关的声弹性系数，就可在试件厚度未知的情况下准确测量实际应力值。

2 实验测量与结果分析

2.1 电磁超声应力检测标定

本文选用 Innerspec 公司生产的电磁超声应力检测仪 CODA 进行应力检测，该检测仪具有便捷、快速、精确检测等特点，且不需要添加水、油等耦合剂，避免了耦合层厚度变化带来的测量误差，也不需要预先处理试样表面，便可产生较为纯净的超声纵波或横波。该设备采用双折射法，即通过电磁超声探头在试样中产生两束偏振方向互相垂直(如沿 x 、 y 方向)的超声横波，如图 1 所示。激励的超声横波在试样中传播，并从底面反射后由同一个电磁超声探头接收，超声信号输入到软件中进行数据处理。由于试样内部存在应力，两个横波的传播速度存在差异。通过信号处理获取这两个横波的传播时间差，并结合式(7)得到实际应力值。

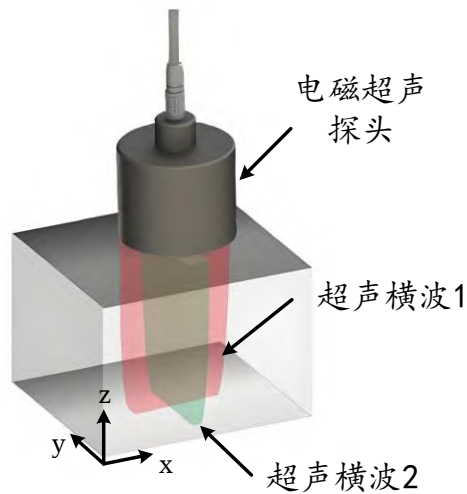


图 1 基于电磁超声的双横波应力检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of double shear wave stress detection based on electromagnetic ultrasonic

为了准确测量天然气管道的实际应力值，需要预先标定与材料有关的声弹性系数。L415M 钢是一种广泛应用于石油天然气输送管道的管线钢，屈服强度为 415MPa。从常用天然气管道中截取骨头状试块，其中受力横截面长宽分别为 50mm 和 15.6mm。首先对试块进行去应力退火处理^[20]，近似得到应力为零的试块。首先将试块缓慢加热到 550 摄氏度，并在最高温保存一段时间，保温时间为 2 个小时，确保最大程度地消除残余应力。然后缓慢冷却，冷却时采用炉冷，让钢材在炉内自然冷却以防产生残余应力。

接着对零应力试块进行声弹性系数标定^[21]。将电磁超声探头稳固在上述零应力试块的标定区域内，并进行拉伸试验，如图 2 所示。拉伸过程中，从试块的零应力状态开始，每隔 40MPa 进行测量，当应力值达到 400MPa 时停止拉伸。其中需要记录检测仪器的双折射率和声时差，以及拉伸机显示的应力值。重复拉伸 5 次，每次测量 10 个应力值，每个应力值记录 5 个数据并求取平均值，从而得到拉伸应力值与双折射率的变化关系，其中一次测量结果如图 3 所示。对实测数据点进行线性拟合，得到直线斜率即为声弹性系数 K。其中拟合直线的斜率为 0.174，截距-1.88 为正常测量的误差浮动，衡量拟合效果的 R 平方值为 0.9923。当 R 平方值为 1 时表示实测数据点与拟合直线完全重合，此时拟合度值为 99.23%，表明得出的拟合直线比较精确，由此标定声弹性系数 $K=-0.174$ 。



图 2 利用 MTS 拉伸机标定声弹性系数

Fig.2 Using MTS stretcher to calibrate the acoustoelastic coefficient

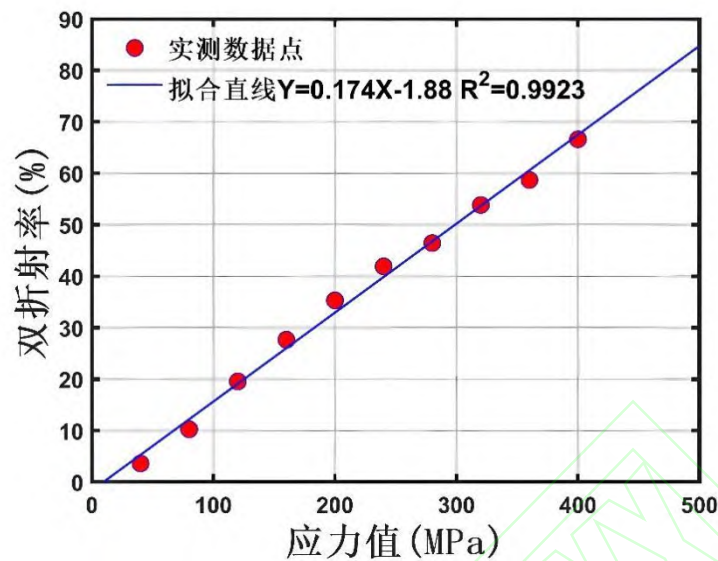
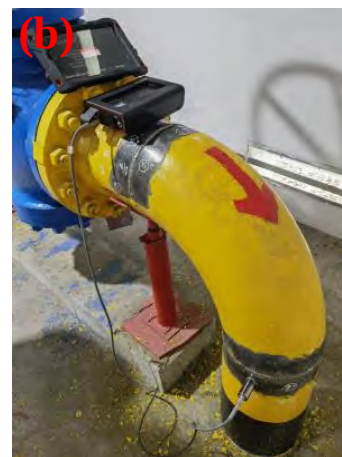


图 3 天然气管道用钢 L415 的声弹性系数标定结果

Fig. 3 Calibration results of acoustic elastic coefficient of L415 steel for natural gas pipeline

2.2 现场测试结果分析

本文针对某天然气阀室的沉降管道进行现场检测，利用标定实验测量得到的声弹性系数 K ，并结合式(7)计算出天然气管道每个测试点位的实际应力值。使用电磁超声应力检测仪对天然气阀室的管道应力进行分点位检测。如图 4 所示，将天然气管道分为检测位置 1 与 2，每个位置又分为水平直管段和垂直直管段，在各直管段上设置 8 个测量点位，角度编号为检测人员面对弯管正脊背按“米”字型顺时针排列。其中位置 1 的水平直管段点位表示左视图，位置 2 的水平直管段点位表示右视图，而垂直直管段点位为从下往上的视图(如图 5 中虚线所示)。将直管段定义为以焊缝为边界、与弯管焊接的部分，如图 5 所示。在直管段上的测量点位放置电磁超声探头便可进行应力检测，其每个点位都去除外管壁的油漆，以消除油漆厚度产生的测量误差。为了进一步对比分析沉降管道的应力分布，对不同阀室、相同位置的非沉降管道进行相同点位的应力检测。



(a)检测区域 (b)测量点位

图 4 某阀室的天然气管道: 电磁超声

Fig. 4 Natural gas pipeline in a valve chamber: electromagnetic ultrasonic

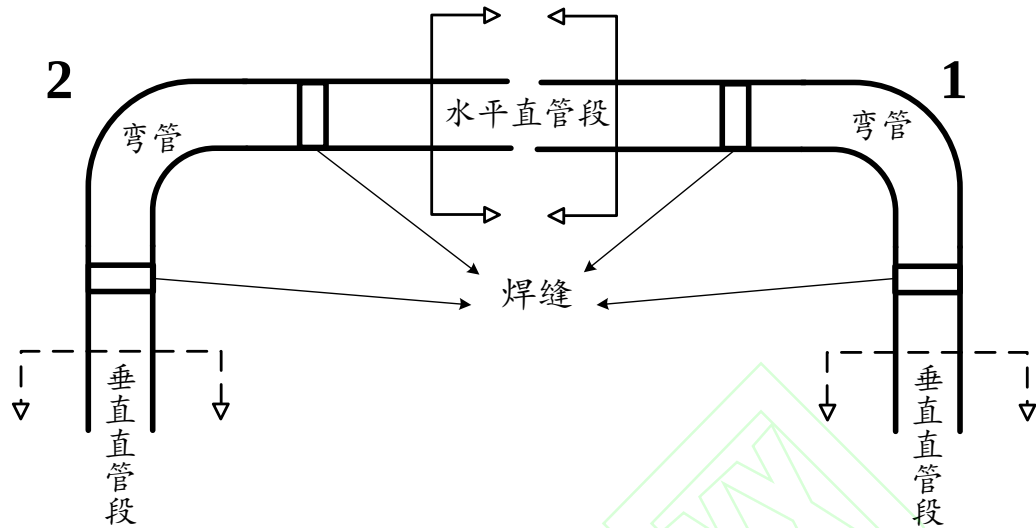


图 5 天然气管道测量位置 2 和 1 示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gas pipeline measurement position 2 and 1

在沉降管道阀室中选取位置 1 水平直管段的 270 度测量点位, 分别获取两个偏振方向互相垂直的超声横波信号, 如图 6 所示。在外管壁激励超声横波, 进入管道内部并传播至内管壁产生反射, 再传播至外管壁被电磁超声探头接收, 如此反复形成多个反射信号, 而每个反射信号之间反映出超声横波的传播时间, 分别如图 6(a)和 6(b)的局部放大图所示。对每个反射信号之间的传播时间求取平均值, 作为最终的横波传播时间, 代入式(6)便可计算出双折射率值。其中电磁超声探头的采样点为 6250, 采样频率为 100MHz。

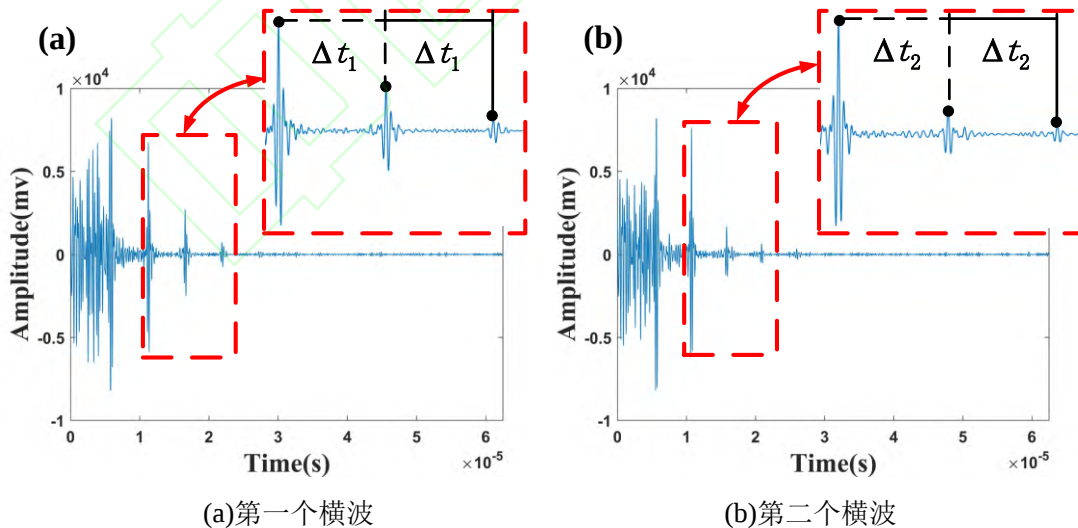


图 6 电磁超声探头接收超声信号

Fig. 6 Electromagnetic ultrasonic transducer receives ultrasonic signal

将计算出的双折射率值代入式(7), 并结合标定的声弹性系数, 从而准确计算出实际应力值, 位置 1 和 2 的应力测量值分别如表 1 与表 2 所示。在沉降管道和非沉降管道中, 位置 1 中水平直管段 270 度点位的应力值达到 275.91MPa, 为所有测量点位的最高值, 接近

于材料屈服强度的 70%，应列为重点关注的检测位置。而该点位附近的应力值都相对较小，表明由于管道沉降产生了应力集中现象。由于有些点位无法测量或无信号，因此表中这些点位没有测出对应的应力值，可能是由于内管壁局部腐蚀引起的。

表 1 天然气管道位置 1 的应力测量值

Table 1 Stress measurement value of position 1 on the natural gas pipeline

位置	水平直管段(σ /MPa)		垂直直管段(σ /MPa)	
	沉降管道	非沉降管道	沉降管道	非沉降管道
0	-	146.01	-	115.59
45	147.27	133.39	144.82	124.10
90	147.66	143.44	265.80	113.32
135	-	131.45	175.93	113.36
180	-	-	-	121.68
225	-	193.51	132.87	142.51
270	275.91	-	-	123.07
315	147.78	205.16	123.12	109.59

表 2 天然气管道位置 2 的应力测量值

Table 2 Stress measurement value of position 2 on the natural gas pipeline

位置	水平直管段(σ /MPa)		垂直直管段(σ /MPa)	
	沉降管道	非沉降管道	沉降管道	非沉降管道
0	136.13	169.28	-	159.39
45	132.90	148.81	234.01	133.47
90	151.79	150.43	171.82	-
135	-	147.21	138.06	156.10
180	-	-	142.51	158.44
225	-	150.10	135.19	176.72
270	137.63	171.90	131.96	139.92
315	141.96	184.28	122.06	118.75

进一步将实测应力值沿管道周向分布，如图 7 和 8 所示。结果表明，对于沉降管道，位置 1 的水平直管段和垂直直管段均存在应力集中现象，在管道周向内侧的应力值最大，均达到 270MPa 左右。根据现场观测，该位置方向也是沉降最明显的地方。而位置 2 只有垂直直管段存在应力集中现象，应力值达到 234.01MPa，其他测量点位都小于 180MPa。根据现场观测，相比于位置 2，位置 1 的沉降量更大。对于非沉降管道，位置 1 和 2 的所有测量点位的应力值均小于 210MPa，且周向分布相对均匀，没有明显的应力集中区域，表明非沉降管道没有产生的附加应力。

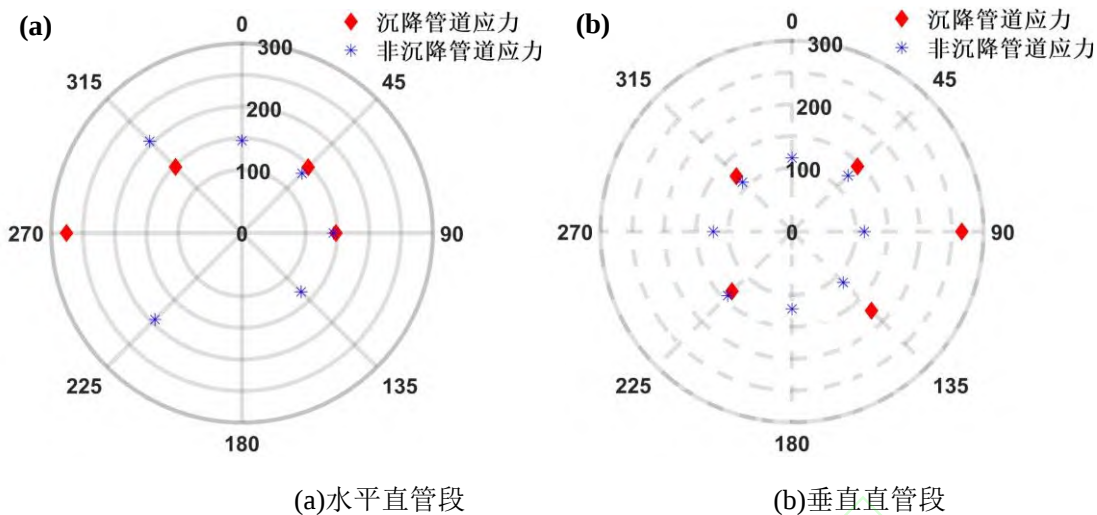


图 7 天然气管道位置 1 的周向应力分布

Fig. 7 Circumferential stress distribution of position 1 on the natural gas pipeline

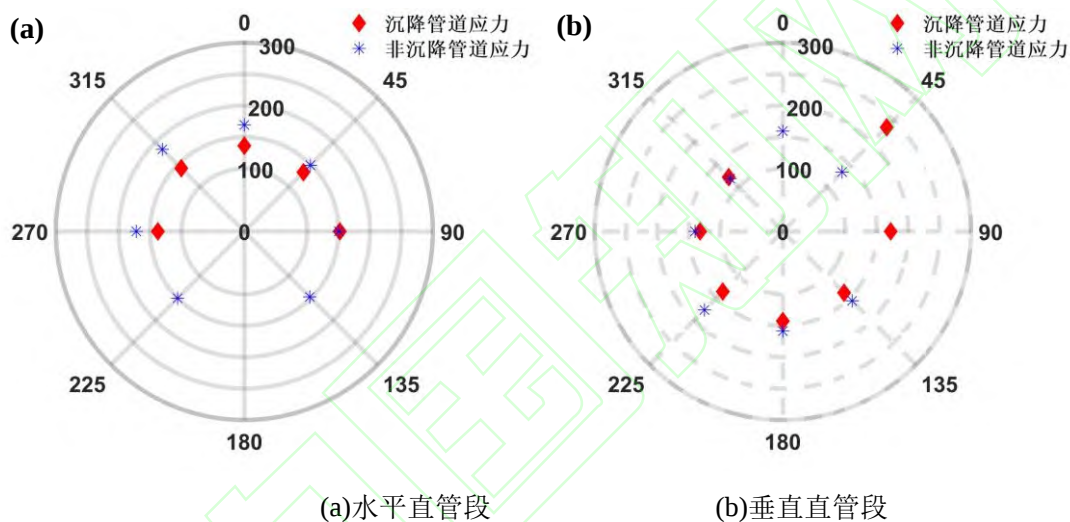


图 8 天然气管道位置 2 的周向应力分布

Fig. 8 Circumferential stress distribution of position 2 on the natural gas pipeline

3 结束语

本文采用电磁超声双折射法检测天然气管道沉降应力。利用电磁超声探头在管道中激励两束偏振方向互相垂直的超声横波，并标定管道用钢材料的声弹性系数，进而准确测量天然气管道沉降产生的实际应力值。结果表明，天然气沉降管道存在应力集中现象，其中水平直管段 270 度测量点位的应力值最大，达到 275MPa。而非沉降管道没有明显的应力集中区域，且周向应力分布相对均匀，均小于 210MPa。以上实验结果表明了电磁超声双折射法在管道沉降应力检测中的可行性，为管道沉降应力检测提供了一种新的无损检测手段，对于准确预测管道沉降量具有重要意义。

参考文献：

- [1] 段天宇, 徐博, 张愉. “十四五”中国天然气管网发展趋势分析[J]. 世界石油工业, 2020, 27(03): 5-12.

- [2] 张洪伟, 李建军, 崔潇文. 天然气长距离输送压力管线阀门的故障与维护探析[J]. 化工管理, 2025, (06): 127-129.
- [3] 刘庆, 谢荣勃, 鱼东溟, 等. 地基非均匀沉降下天然气管道应力分析[J]. 石化技术, 2024, 31(01): 172-177.
- [4] 顾军. 综述地面沉降对埋地燃气管道的影响研究[J]. 上海煤气, 2012(03): 39-42.
- [5] 周建新, 吴轩, 郭再富. 美国管道事故对我国油气管道安全的启示[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(S1): 73-78.
- [6] 柴万昊, 杨弘道, 朱康, 等. 基于YOLOv5的轻量化管道漏磁信号检测[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(01): 211-217.
- [7] SONG Wentao, XU Chunguang, PAN Qinxue, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 365-371.
- [8] 李进, 薛润东, 赵仁勇, 等. 基于声弹效应的芳纶增强环氧复合材料残余应力检测技术研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(09): 2519-2527.
- [9] CLARK A V, MIGNOGNA R B. A comparison of two theories of acoustoelasticity[J]. Ultrasonics, 1983, 21(5): 217-225.
- [10] 周小明, 彭朝勇, 高晓蓉, 等. 车轮轮辋应力超声波测量法的研究[J]. 信息技术, 2012, 36(08): 112-115.
- [11] 靳聪, 卢超, 史亦韦, 等. 超声偏振横波与铝合金棒材内部应力的关系研究[J]. 航空材料学报, 2015, 35(01): 71-76.
- [12] 董辰骏, 朱雨虹, 郑阳, 等. 时频域处理提升电磁超声横波双折射应力检测精度的研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(12): 142-151.
- [13] KUMAR B, DHIMAN N, PIYUSH, et al. Electromagnetic Acoustic Transducer and Method for Residual Stress Detection in Conducting Materials[J]. MAPAN, 2024, 39(4): 845-850.
- [14] 刘恒. 基于电磁超声的管道残余应力检测系统设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [15] 王禹迪, 杨述, 梁梓煜. 基于超声横波法的混凝土内部缺陷检测及验证[J]. 珠江水运, 2024, (23): 94-96.
- [16] LIU Zaiwei, LIN Bin, LIANG Xiaohu, et al. Investigation of acoustoelastic surface acoustic waves in prestressed media[J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 571.
- [17] WANG Yingzhu, LI Zuohua, ZHU Xupeng, et al. Plane stress measurement on the cross-section of steel components using ultrasonic shear waves[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 191: 110185.
- [18] 王英瞩. 基于横波折射效应的钢构件内部空间绝对应力检测方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [19] 魏勤, 董师润, 徐秉汉, 等. 超声双折射法测试铝合金的内部应力[J]. 应用声学, 2008, (05): 401-406.
- [20] 全国热处理标准化技术委员会(SAC/TC 75). 钢件的正火与退火: GB/T 16923-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56). 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法: GB/T 32073-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.