

城镇燃气管道应用磁声应力检测技术实践

吴 卿 郑 阳 谭继东

中国特种设备检测研究院

摘要:城镇燃气管道在长期运行过程中易受地质沉降、道路施工、自然灾害等因素影响,导致管道局部应力集中或畸变,影响管道疲劳寿命及抗裂纹和抗腐蚀能力。研究开发的磁声应力检测技术能够高效解决工程中设备表层、内部等多维度残余应力或载荷应力分布的表征问题,在地质沉降导致的城镇燃气管道应力集中筛查、暴雨漂管后管线移位导致的局部应力畸变普查与消除效果测评方面得到成功应用,为燃气管道安全运行和风险防控提供了有效手段。

关键词:磁声应力检测技术;磁巴克豪森噪声;无损检测;应力;超声应力检测技术

中图分类号:TH879

文献标识码:A

文章编号:2097-5260(2025)03-0049-09

DOI:10.26949/j.issn.2097-5260.2025.03.006

Application of magnetoacoustic stress measurement technology in urban gas pipeline management

WU Qing, ZHENG Yang, TAN Jidong

China Special Equipment Inspection & Research Institute

Abstract: Urban gas pipelines are vulnerable to geological subsidence, road construction, natural disasters, and other factors during long-term operation, leading to local stress concentration or distortion, which negatively impacts their fatigue life, crack resistance, and corrosion resistance. In this study, magnetoacoustic stress measurement technology was developed to efficiently characterize multi-dimensional residual or load stress distribution on the surface and within equipment. This technology has been successfully applied to identify stress concentrations caused by geological subsidence, assess local stress distortions from pipeline displacement after heavy rain, and evaluate elimination effects, providing an effective solution for ensuring the safe operation and risk management of gas pipelines.

Keywords: magnetoacoustic stress measurement technology, magnetic Barkhausen noise, nondestructive testing, stress, ultrasonic stress measurement technology

随着城市化进程的加速,城镇燃气管道作为能源输送的“生命线”,其运行的安全性直接关系到公共安全与地方经济发展。然而,受材料老化、环境腐蚀及外部施工干扰等因素影响,管道易产生应力集中,进而引发裂纹、泄漏甚至爆炸等事故。据统计,仅2019年国内(不含港澳台)燃气事故便达615起,造成重大人员伤亡与财产

损失。国务院办公厅于2022年发布的《城市燃气管道等老化更新改造实施方案》进一步凸显了管道安全检测的紧迫性,高效、精准的应力检测技术成为保障燃气管道安全运行的关键,已经受到各行业的高度关注。目前采用的传统小孔法等有损方法对设备有破坏性,工程应用有局限性;X射线衍射法虽然是目前工程中应用最广泛

收稿日期:2024-12-12

基金项目:中国特种设备检测研究院内部项目(2023青年08)。

作者简介:吴卿,1995年生,工程师,硕士,2019年毕业于中北大学机械工程学院机械工程专业,主要从事磁巴克豪森噪声、磁声应力、动态磁化无损检测传感器、仪器相关科研及现场应用、工程技术方法开发研究工作。地址:北京市顺义区顺兴路一号,邮编101300。电话:17835411881。Email:wuqingchina@163.com

的应力检测方法,但其也存在设备较为庞大,携带不便,检测效率低且对人体有害等问题^[1]。中国特种设备检测研究院在应力测量方面持续开展科研攻关,研发了磁巴克豪森噪声法、电磁超声横波双折射法、横纵波法等系列具有自主知识产权的检测技术及仪器设备,在燃气管道应力集中测评、压力容器热处理消除残余应力评价、钢结构应力监测等方面取得良好效果,以某城市燃气管网为研究对象,探讨磁声应力检测技术在城市燃气地质沉降导致管道局部应力集中测评、城市燃气管线暴雨漂管应力测评的实践应用,重点分析其在应力监测、缺陷定位及风险评估中的技术优势,旨在为城镇燃气管道的智能化安全运维提供理论与技术支撑。

1 磁声应力检测技术

1.1 磁巴克豪森噪声应力测量技术

铁磁性材料在外加交变磁场作用下,当磁场强度达到一定值时,畴壁会发生跳跃,在磁化状态下,材料的磁滞回线呈台阶抖动变化,该现象是德国物理学家巴克豪森(Barkhausen H.)在1919年首次发现的^[2]。

磁巴克豪森噪声信号是铁磁性材料在交变磁场作用下动态磁化的过程中,因磁畴的不连续跳转和磁畴壁的不可逆移动而产生的一种信号^[3]。铁磁性材料在外加磁场的作用下会发生磁化,每个磁畴都会沿着晶体自身的某个容易磁化的方向发生磁化,同时磁畴壁发生一定程度的位移,磁畴内部的磁矩方向发生转变。当外加磁场强度 H 连续不断地变化时,磁感应强度 B 会呈现出不连续的跳跃,即磁巴克豪森跳跃。对铁磁性材料而言,在交流磁化过程中,材料受到应力将改变其微观磁畴运动,引起材料磁特性变化。在存在应力情况下,材料磁特性参数发生改变,进而影响磁化过程中磁巴克豪森噪声能量的释放(图1)。对于大多数铁磁性材料磁巴克豪森噪声信号特征值均方根值(Root Mean Square, RMS),随着拉应力的增加而

增大,随着压应力的增加而减小(图2),基于此规律建立应力与磁巴克豪森噪声特征值(RMS)的关系曲线,通过此关系曲线可实现应力的测量评估(图3)。

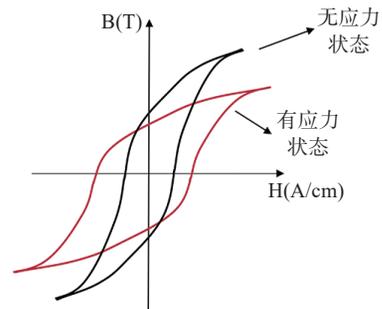


图1 应力对磁滞回线的影响

Fig. 1 Effect of stress on the hysteresis loop

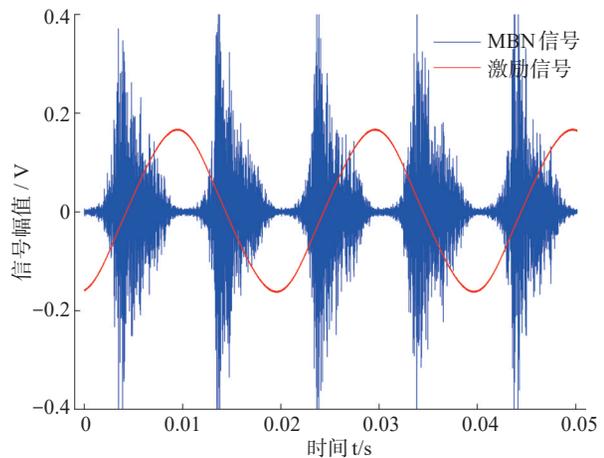


图2 磁巴克豪森噪声信号

Fig. 2 Magnetic Barkhausen noise signal

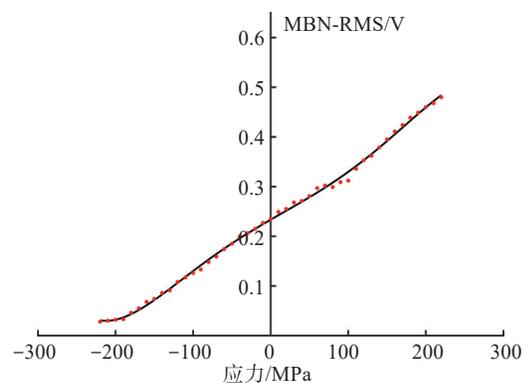


图3 磁巴克豪森噪声(RMS)-应力曲线

Fig. 3 Magnetic Barkhausen Noise (RMS)-stress curve

近年来,磁巴克豪森噪声检测技术作为一种快速、大面积、高精度的应力检测方法,可满足工

程中应力/残余应力的检测需求,大量研究表明,在单轴拉伸、压缩或弯曲加载时,磁巴克豪森噪声信号特征值与应力具有良好的线性对应关系。丁松等^[4]的研究中提到磁巴克豪森噪声信号的均方根值随外加拉伸应力的增大而增大,随外加压缩应力的减小而减小。Mierczak等^[5]和Kypris等^[6]的研究表明应力与磁巴克豪森噪声信号峰值振幅的倒数之间存在良好的线性关系。Samimi等^[7]在HY-80钢的单轴拉应力与磁巴克豪森噪声关系的研究中,发现不同应力状态(零应力、弹性阶段、塑性阶段)下,响应关系存在明显的差异,在弹性变形阶段, HY-80钢的磁巴克豪森噪声(Magnetic Barkhausen noise, MBN)能量与拉伸应力呈线性关系。Freddy等^[8]的研究表明试件表面不同的应力分布与MBN信号的不同分布呈现相同的规律。双轴应力对磁巴克豪森噪声的影响也得到了研究。Haušild等^[9]对奥氏体 AISI 301 不锈钢在双轴应力状态下的应变诱发马氏体相变的动力学行为与MBN信号建立映射关系进行表征。Vengrinovich等^[10]的主要结论有MBN相对于各向同性应变/应力张量的任何变化都不变的条件,后者仅受材料微观结构的影响。郑阳等^[11-13]研究结果表明磁各向异性的微观结构是导致磁巴克豪森噪声分布取向依赖的主要原因,而应力的存在会造成微观结构的各向异性,进而造成磁巴克豪森噪声分布的各向异性,分析研究了周向磁巴克豪森噪声分布的平面应力测量表征方法及三角度平面应力解调技术。

1.2 超声应力检测技术

超声波法是基于声弹效应,利用超声波在材料内部的传播特性进行应力测量,即有应力作用于被测构件使材料发生形变时,超声波的传播速度会发生变化,测量超声波的传播速度并与外加应力作用建立数学模型来测量材料表面的残余应力^[14]。通常情况下,材料所受的应力越大,超声波在其中的传播速度也会相应地发生变化。 γ 应力与超声波方向一致时,在拉伸应力作用下,超声波传播速度会减小;而在压缩应力作用下,传播速度则会增大。目前的超声波检测应力技术应用较多有超声临界折射纵波法、横波双折射法、横纵波法,不同超声技术方法测量深度及适用场景和需求不同(图4)。

①超声临界折射纵波应力测量法,基于声弹性效应测量材料近表面应力,测量深度可以达到5 mm以内,适用于大多数的金属材料,但受耦合剂影响较大。

②横波双折射应力测量方法,是一种体波应力测试方法,测试方向为垂直于声波传播方向的应力方向。在声弹性效应理论的基础上,由于声各向异性,当超声横波传播方向垂直于应力方向,偏振方向平行于应力方向时,拉伸应力会减小超声横波的传播速度,压缩应力会增大传播速度;当超声横波传播方向垂直于应力方向,偏振方向垂直于应力方向时,拉伸应力会增大超声横波的传播速度,压缩应力会减小传播速度,使用电磁声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)的检测探头探测横波双折射,其不受耦合剂影响。

③横纵波应力测量方法,

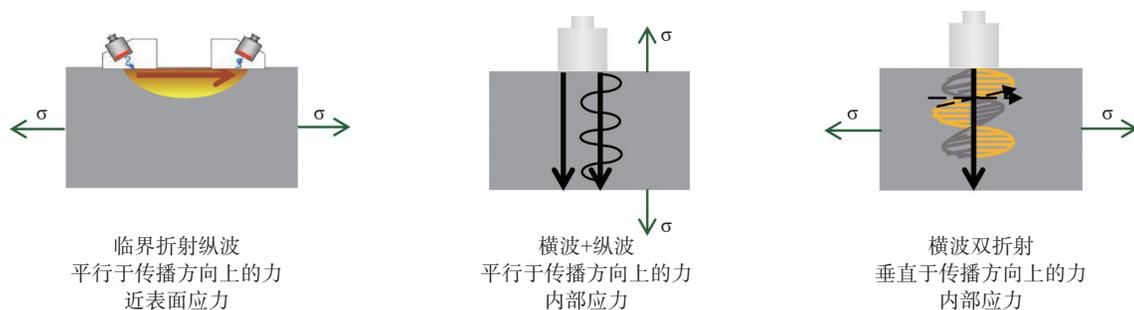


图4 典型超声应力检测技术原理

Fig. 4 Principle of typical ultrasonic stress measurement technology

适用于板材厚度方向、螺栓等较长结构的应力测量。由于许多现场工况中的板厚度尺寸和杆棒轴类构件的轴向尺寸、以及超声纵波或横波传播速度变化难以准确获得,因此,将残余应力纵波和横波检测方法进行结合,在未获知构件板厚或轴向尺寸的前提下,即可获得超声纵波和横波传播方向上的应力状态和数值。

超声波应力检测的优点是操作简单,设备便携,可以测量表面和内部不同深度的应力。大量学者在不同超声波形方面展开研究,临界折射纵波法的研究领域,Santos^[15]使用波测量了环氧树脂基碳纤维在复合材料中的应力;王伟等从理论上推导了正交各向异性材料中应力与超声飞行时间的关系,并使用6061铝合金和碳纤维增强塑料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)复合材料验证了波在复合材料应力检测中的准确性^[16]。郝艳捧等搭建了基于气体绝缘组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)绝缘子次表面应力测量系统,实验表明最大相对误差不超过13%;针对GIS绝缘子的次表面热应力分布检测,使用波声程差检测方法,提高了应力检测的准确性^[17-18]。刘宾等利用临界折射纵波(Critically refracted longitudinal wave, LCR)对激光熔覆层应力进行评价,结果表明各向异性微观结构和层界面会引起临界折射纵向信号波形的畸变,同时波形畸变较为明显,对应力评估的影响较大,需要重点关注^[19]。郭宗伟研究了机翼复合材料平面应力场,分析了超声各项异性传播特性,通过拉伸实验进行验证应力值误差为 ± 8.96 MPa,角度误差为 $\pm 6.87^\circ$ ^[20]。

随着电磁超声传感器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)技术的发展,为横波应力检测带来了新的活力。相比与传统的压电技术,EMAT不需要耦合剂,易激发各种偏振方向的横波。德国弗劳恩霍夫研究所(Fraunhofer IZFP)的SCHRAMM^[21-22]等开发了用于评估铁路车轮和铁轨中应力状态的EMAT传感器及自动测量系统,该系统测量沿着部件的径向和周向方向偏振的超声剪切波的声时差,可直接计算出作用在周向和

径向方向上的主应力差。但是横波波速受到织构的影响较大,钢中轧制织构对波速的影响是应力的10倍,在检测中必须将织构的影响进行分离^[23]。针对纯纵波法无法对在役螺栓等原长度未知的栓体轴向应力进行有效测量的问题,KIMN^[24]等学者提出利用超声横纵波结合的方法进行长度未知的螺栓轴向应力测量,为了避免由于超声换能器多次耦合造成误差,可利用模态转换,通过分析反射横波与纵波的传播路径建立了超声飞行时间与轴向应力关系的模型。DING X^[25]等人研究表明亦可使用EMAT激发横波并在待检件中同时产生反射横波与纵波,有效避免传统超声换能器由于接触耦合造成的误差。此外横纵波结合的方法在平面以及三维应力的测量方面也有较多应用。WANG Y Z^[26-27]等研究了钢构件的平面及三维应力测量,通过理论推导了各应力分量与超声飞行时间的关系,并使用超声横波和纵波相结合对各个应力进行测量,其中平面应力所需5个声弹性常数,三维应力所需10个声弹性常数,均利用实验进行标定,通过与应变仪所测数据的比对,证实此方法最大误差不超过20%。

1.3 磁声应力组合技术

应力是基础设施、工业装备建造和服役性能评价的重要内容,应力状态影响设备构件的可靠性,影响结构件疲劳寿命、抗裂纹和抗腐蚀能力。且影响贯穿机械结构全寿命周期。掌握应力的状态及分布有利于分析结构强度,是安全评价的基础,也为缺陷的早期预判提供数据支撑。但是,目前具体应用中面临对象复杂、需求多样等工程难题。例如,焊接接头关注的是焊后残余应力分布及整体消残效果;板壳类结构主要关注建造后及运行过程中外表面、横截面上载荷应力分布;杆绳类结构关注深度方向内部拉伸应力。应力的检测方法有很多,不同检测方法测量深度、空间范围、分辨率以及可实施工况、操作效率不同(图5),拉曼光谱法、纳米压痕法、X射线衍射等方法检测深度一般不超过100 μm ,空间分辨率小于1 mm,但是其对被测表面要求非常高,在工程现场中应用

局限性较大;同步辐射衍射法、中子衍射法探测深度能够覆盖 1 μm ~ 10 cm 范围,但设备庞大,不适用工程现场;磁检测方法(磁巴克豪森噪声检测)检测深度,对一般材料能探测到材料表面 1 mm 左右,具体由材料趋肤效应确定。空间分辨率最小达到 1 mm,被检材料表面要求相对较低,且重复性高,设备携带方便,适用于铁磁性材料表层应力测量;超声法检测深度通过激发不同超声波能够达到 1 m 的检测深度,其评估反应的是超声波传播路径上的平均应力。

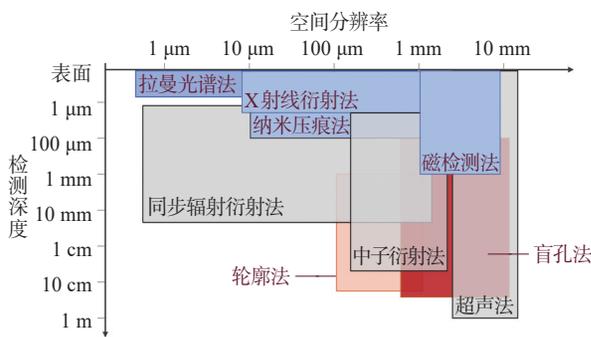


图5 常见应力检测方法对比

Fig. 5 Comparison of common stress measurement methods

在众多检测方法中,没有一种方法能够满足所有工程检测需求,因此,解决复杂、多样的工程检测问题,常需要将多种方法组合使用。组合使用需要考虑被检设备的材质、表征是哪个维度方向的应力状态、工程实际可操作性等方面。磁检测和超声具有设备便捷、现场检测速度快等优势,通过将磁与声方法组合起来,可实现表层、内部深度方向、内部切向等多维应力测量表征,覆盖铁磁性材料与非铁磁性材料(图6)。磁声应力检测技术各方法与X射线测量技术对比情况及典型适应场景见表1。

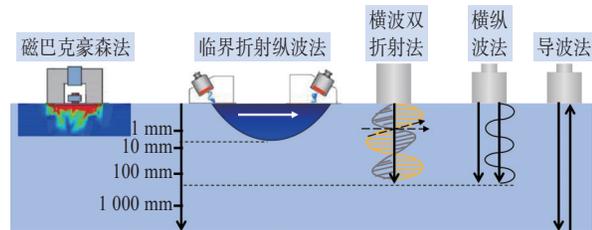


图6 磁声应力测量技术

Fig. 6 Magnetoacoustic stress measurement technology

表1 磁声应力检测技术与X射线应力测量技术对比

Table 1 Comparison between magnetoacoustic stress measurement technology and X-ray stress measurement technology

方法	使用场景	精度	检测深度	操作	优点	局限性
X射线衍射法	表面应力测量实验室及操作空间较大的现场	~20 MPa	<0.03 mm	复杂	技术成熟 测量准确	受现场空间限制 操作复杂 不适用强织构材料
磁巴克豪森法	表面应力测量适合现场快速测量	标定精度 ±10 MPa	<1 mm	便捷	便捷高效 不受空间限制 分辨率高	不适用于非铁磁性材料 受材料组织与磁特性影响大
超声法	临界折射纵波法	标定精度 ±10 MPa	1~5 mm	便捷	便捷高效	只适用于透声性好的材料
	横纵波	标定精度 ±10 MPa	>100 mm	便捷	不受空间限制	检测分辨率不高
	横波双折射法	标定精度 ±20 MPa	>100 mm	便捷	受材料织构影响小	操作中探头耦合影响大

2 应用实践

2.1 城市燃气地质沉降导致管道局部应力集中测评

新疆某埋地天然气管道材质为 X80, 规格 1 219 mm×18.4 mm, 设计运行压力 2.5 MPa, 在长

期服役过程中,管道周边土壤受外界环境等不可控因素影响发生地质沉降,考虑到管道和土体之间复杂的力学作用,管道极易发生局部弯曲、扭曲等导致应力集中的缺陷,为确保管道安全运行,针对可能产生应力集中的部位进行筛查。管道承受应力由管

道运行中的工作应力、管道自重和安装等外界因素引起的载荷应力、焊接残余应力几部分组成。

由于焊缝周围应力集中在现场普遍发生，且焊缝周围也是高风险的区域，因此现场检测点位分布在焊缝上下两侧，垂直于焊缝在靠近焊缝区域及远离焊缝的母材区对称各选取一点，周向间隔90°选择测定一条脊线，在一个焊缝位置选择0°、90°、180°、270°共4条垂直于焊缝的脊线(图7)。

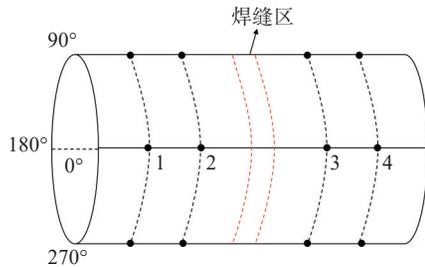
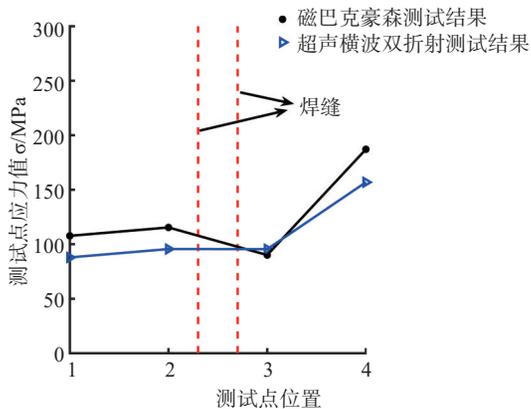
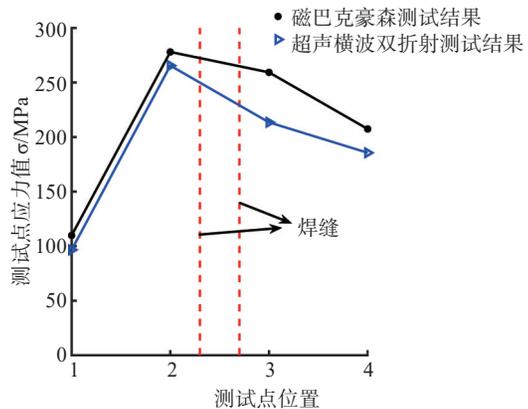


图7 测试位置选点示意图

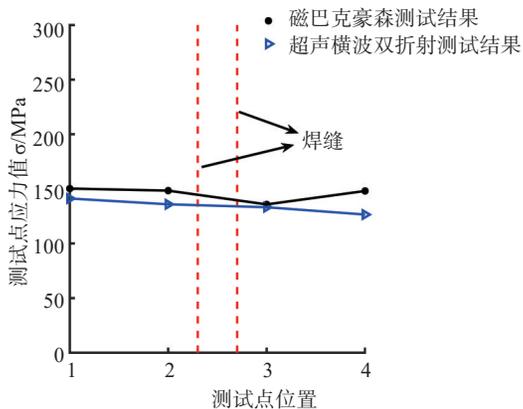
Fig. 7 Schematic diagram of testing points



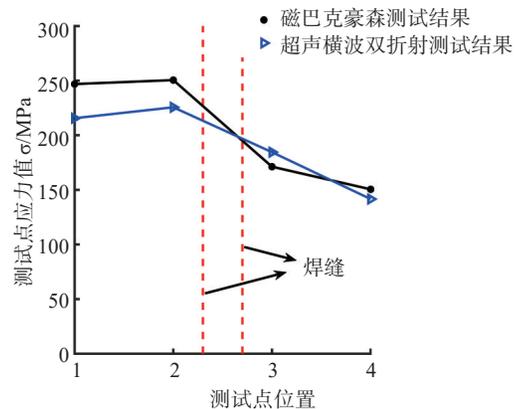
(a) 管道0°脊线各测试点应力测试结果



(b) 管道90°脊线各测试点应力测试结果



(c) 管道180°脊线各测试点应力测试结果



(d) 管道270°脊线各测试点应力测试结果

图8 燃气管道地质沉降应力集中测评结果

Fig. 8 Testing results of stress concentration in the gas pipeline caused by geological subsidence

为准确评估埋地燃气管道运行中的应力状态，测试使用了磁巴克豪森噪声法和电磁超声横波双折射法磁声组合技术进行应力测试，测试结果覆盖被测点表层和内部。磁巴克豪森噪声应力方法主要测试评估被测管道表层应力状态，通过超声横波双折射方法测试被测位置内部垂直于声波传播方向平均应力。

磁巴克豪森噪声方法和电磁超声横波双折射方法测试结果变化趋势一致，表面通过磁声应力组合检测技术能够准确反映被测位置表层及内部应力状态(图8)，在90°脊线位置磁巴克豪森方法和超声测试结果在测试点位2/3/4应力畸变增大，应力值由1点位100 MPa突变到250 MPa，270°脊线位置由3测试点170 MPa增大到240 MPa附近如图8(b)、(d)示，说明上述两处位置存在由地质沉降导致的应力集中，存在安全风险，应及时对测试位置地基进行加固修复，释放管线应力集中部

位应力水平,避免应力继续增大。同时定期对应力相对较大位置进行监控,如发现区域应力相对值继续增大,考虑停止使用或者用其他替代方案进行维护。上述测试结果为指导管线地基修复提供了数据支持,为保障城市燃气管道安全运行提供了新的检测评价手段。

2.2 城市燃气管线暴雨漂管应力测评

国内某城市燃气管道长 288 m,管道材质为

L245 无缝钢管,规格 508 mm×9.5 mm,采用管廊内架空铺设,沿线设置支墩作为支撑。管道设计压力 1.0 MPa,所使用的附件压力级制不小于 1.6 MPa。受连续暴雨影响,地下燃气管廊涌入大量雨水,引发燃气管道漂管,抢险人员将管廊内积水抽空并对全线进行检查,发现燃气管道多处支架移位或抬升,31 处支架中存在问题支架 9 处,其中移位 4 处、抬升 5 处(图 9)。

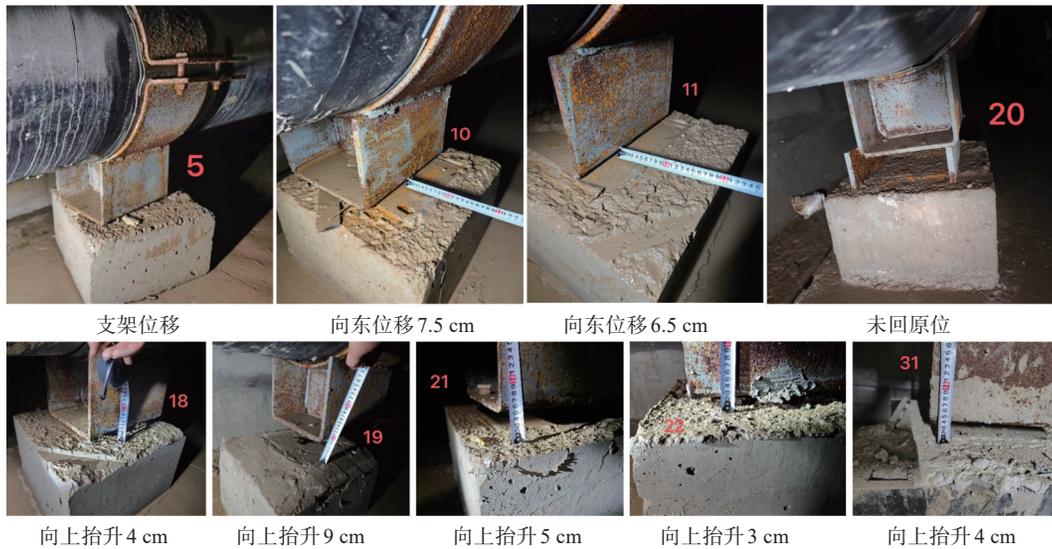


图 9 城市地下燃气管廊漂管现场

Fig. 9 Pipe floating site in urban underground gas pipe gallery

为快速排查管线移位后应力分布发生畸变的点位,以尽快消除由于移位造成的安全隐患,只需测评管道表面应力状态即可。采用特检院研发的磁声应力测量仪对管道风险点位进行应力分布测评,筛查应力集中部位,并对管道复位后同一点位进行应力分布检测,用于修复后管道应力消减测评。经评估,发生漂管的管道应力风险点位普遍在焊缝及其热影响区附近,测试过程主要选取焊缝附近环焊缝截面进行应力测试。对每处管道截面 0 点、3 点、6 点、9 点四个方位进行测量,具体选点位置(图 10)。

复位前截面轴向应力在 0 点钟和 6 点钟位置发生应力集中畸变增大,分别达到 97.2 MPa 和 119 MPa,复位后管线轴向应力分布均匀化,整体处于 20 MPa 附近。周向应力复位前最大应力 90 MPa 附近,复位后截面应力处于 -22 ~ 13.9 MPa

之间,漂管后测试截面应力轴向和周向应力处于高应力水平,发生应力畸变增大,复位修复后应力整体消减恢复较低应力状态,且分布均匀化,有效消除了局部应力畸变风险(图 11)。

本案例是国内燃气管线暴雨漂管后,应用磁声应力测评技术测评应力的首个工程项目,应用结果表明该技术有助于快速找到应力集中部位,准确测评复位消减应力工作效果。

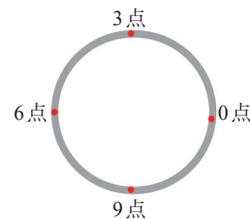


图 10 现场测点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of on-site measurement points

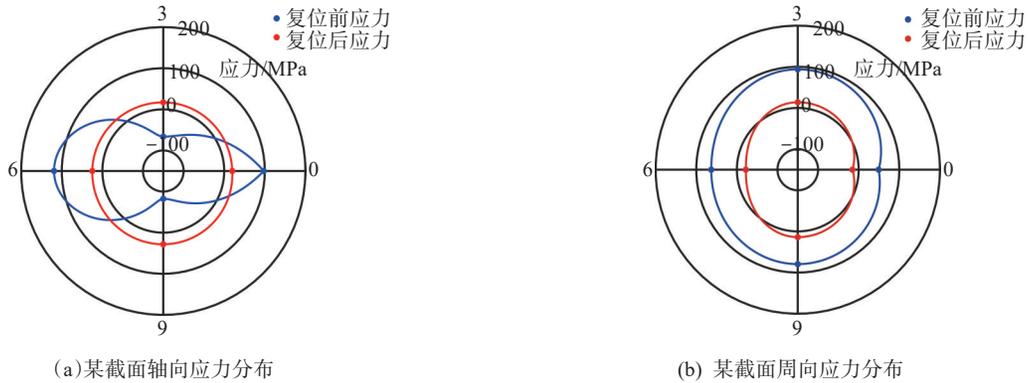


图 11 城市地下燃气管某截面修复前后应力测试结果

Fig. 11 Stress test results for a section of the urban underground gas pipe before and after repair

3 结语

磁声应力测量组合检测技术能够满足复杂及多样化的检测需求,在装备制造过程中可以精准控制关键零部件的残余应力,提升和保障制造质量和产品性能;在装备服役过程中,可用于监控装备整体应力状态及潜在失效风险,提前防范重大安全事故。在城镇燃气管道管理领域,磁声应力组合检测技术可用于筛查管道因地质沉降导致的应力集中,普查暴雨漂管后管线移位导致的局部应力畸变以及开展应力消除效果测评,可满足现场高效、便捷、无损、多维度精准测量的要求,为保障城镇燃气管道安全运行提供可靠的数据支持。

参考文献

- [1] 郑阳,沈功田,谭继东,等.磁巴克豪森应力检测仪研制[J].传感技术学报,2018,31(4):649-656.DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2018.04.027.
- [2] 祁欣,于石生,李波.巴克豪森效应在材料检测中的应用和展望[J].材料科学与工艺,1994(2):107-112.
- [3] 郑阳,沈功田,谭继东,等.U型磁轭励磁时磁巴克豪森噪声信号分布规律研究[J].机械工程学报,2018,54(24):1-6.DOI:10.3901/JME.2018.24.001.
- [4] DING S, TIAN G Y, MOORTHY V, et al. New feature extraction for applied stress detection on ferromagnetic material using magnetic Barkhausen noise[J]. Measurement, 2015, 73: 515-519. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.05.031.
- [5] MIERCZAK L, JILES D C, FANTONI G. A new method for evaluation of mechanical stress using the reciprocal amplitude of magnetic Barkhausen noise[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(2):459-465. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2091418.
- [6] KYPRIS O, NLEBEDIM I C, JILES D C. A new method for obtaining Stress-Depth calibration profiles for Non-Destructive evaluation using a Frequency-Dependent model of Barkhausen emissions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3893-3896. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2251328.
- [7] SAMIMI A A, KRAUSE T W, CLAPHAM L. Stress response of magnetic Barkhausen noise in submarine hull steel: a comparative study [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016, 35(2): 32. DOI: 10.1007/s10921-016-0348-6.
- [8] FRANCO GRIJALBA F A, PADOVESE L R. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic Barkhausen noise method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 446: 231-238. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.09.036.
- [9] HAUŠILD P, KOLAŘÍK K, KARLÍK M. Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement[J]. Materials & Design, 2013, 44: 548-554. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.058.
- [10] VENGRINOVICH V, VINTOV D, PRUDNIKOV A, et al. Magnetic Barkhausen effect in steel under biaxial strain/stress: influence on stress measurement[J]. Journal of Nondestructive

- Evaluation, 2019, 38(2):52. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7.
- [11] 郑阳,周进节,谭继东,等.三角度磁巴克豪森测量平面应力方法研究[J].振动、测试与诊断, 2022, 42(3): 417-426. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.03.001.
- [12] 吴卿.磁各向异性材料微磁多参数应力测量方法研究[D].太原:中北大学, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000470.
- [13] 郑阳,张鑫,周进节,等.周向磁巴克豪森噪声分布及平面应力测量[J].仪器仪表学报, 2021, 42(6): 75-87. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107554.
- [14] 曹海龙,王军强,牛关梅,等.超声波残余应力测试技术在工程实际中的应用[J].热加工工艺, 2020, 49(16): 24-27. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20193180.
- [15] SANTOS A A D, AMBIEL L B, GARCIA R H, et al. Stress analysis in carbon/epoxy composites using Lcr waves[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(27): 3425-3434. DOI: 10.1177/0021998313509866.
- [16] WANG W, ZHANG Y M, ZHOU Y F, et al. Plane stress measurement of orthotropic materials using critically refracted longitudinal waves [J]. Ultrasonics, 2019, 94: 430-437. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.015.
- [17] HAO Y P, ZHENG Y, HE W M, et al. A measurement method of ultrasonic critical refraction longitudinal wave for thermal stress in GIS basin-type insulators [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9. DOI: 10.1109/TIM.2021.3137547.
- [18] ZOU Z, HAO Y P, ZHENG Y, et al. Subsurface stress measurement in GIS epoxy composite by using LCR waves[J]. Energies, 2020, 13(14): 3725. DOI: 10.3390/en13143725.
- [19] LIU B, DONG S Y. Stress evaluation of laser cladding coating with critically refracted longitudinal wave based on cross correlation function[J]. Applied Acoustics, 2016, 101: 98-103. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.08.015.
- [20] 郭宗伟.机翼复合材料平面应力场的LCR波测量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022. DOI: 10.27061/d.cnki.gh-gdu.2022.004137.
- [21] SCHRAMM R E. Ultrasonic measurement of stress in railroad wheels [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(2): 1468-1472. DOI: 10.1063/1.1149607.
- [22] RABUNG M, AMIRI M, BECKER M, et al. Nondestructive characterization of residual stress using micromagnetic and ultrasonic techniques [M]//CASAVOLAC, BARILE C, MORAMARCO V, et al. New Challenges in Residual Stress Measurements and Evaluation. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90740.
- [23] AL-ZUHERIY A S J, ORTON S, WASHER G. Evaluation of total compressive stress in steel w-flange members using ultrasonic shear waves [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(6): 04020110. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001520.
- [24] KIM N, HONG M. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound [J]. NDT & E International, 2009, 42(3): 164-169. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.09.005.
- [25] DING X, WU X J, WANG Y G. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer [J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 914-920. DOI: 10.1016/j.ultras.2013.11.003.
- [26] WANG Y Z, ZHU X P, GONG Y X, et al. Combination of transverse and longitudinal ultrasonic waves for plane stress measurement of steel plates [J]. Applied Acoustics, 2022, 188: 108500. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108500.
- [27] WANG Y Z, LIU N X, GONG Y X, et al. Three-dimensional stress measurement for structural steel plates using ultrasonic T-waves and P-waves [J]. Measurement, 2022, 190: 110310. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110310.

(编辑:司维)