

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514156

基于弱磁法的管道氢致损伤力磁耦合特性研究*

武梓涵, 廉 正, 刘 斌, 杨理践

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:长输油气管道局部氢致损伤的失效过程涉及材料力学行为、磁性响应与氢扩散的耦合效应,难以通过常规无损检测技术进行有效识别,对能源运输系统的安全构成严重威胁。其中管道弱磁内检测技术因对铁磁性材料早期损伤的本征敏感性与在线检测等独特优势,在氢致损伤的检测与评估中展现出巨大的应用潜力。因此基于此技术,结合第一性原理,提出了一种面向管体局部氢致损伤与磁信号响应关系的多尺度交叉分析方法,并引入 $Q_{average}$ 多分量磁特征融合响应参数对多物理场作用条件下氢致损伤失效行为及危害程度进行有效表征。研究结果表明:在漏磁检测中饱和磁化使材料磁畴高度有序排列,氢富集高压应力集中区难以对整体漏磁通产生显著扰动,因此未出现明显磁响应特征,相比之下弱磁信号特征分量变化较磁记忆检测平均提升 1 倍,在氢致损伤检测中展现出良好的适用性与有效性。与此同时,随着管体内压和外部励磁强度升高,氢富集区应力集中与磁畴重构行为加剧,具体表现为 $Q_{average}$ 响应曲线随管体内压升高呈非线性上升, Q235 和 Q345 钢平均响应增长率分别为 137 和 195 $A \cdot m^{-1}/MPa$; 随励磁强度增加近似呈线性上升, Q235 和 Q345 钢平均响应增长率分别为 61.24 和 69.06 $A \cdot m^{-1}/A$ 。

关键词: 氢致损伤; 管道弱磁内检测技术; 第一性原理; 应力集中; 磁信号特征

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 on magneto-mechanical coupling characteristics of hydrogen-induced damage in pipelines based on weak magnetic method

Wu Zihan, Lian Zheng, Liu Bin, Yang Lijian

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

Abstract: The failure process of localized hydrogen-induced damage (HID) in long-distance oil and gas pipelines involves the coupled effects of material mechanical behavior, magnetic response, and hydrogen diffusion, which makes early detection challenging with conventional non-destructive testing (NDT) techniques, posing a significant threat to the safety of energy transport systems. Weak magnetic in-line inspection (WMII) technology, due to its intrinsic sensitivity to early-stage damage in ferromagnetic materials and its capability for online monitoring, exhibits great application potential in the detection and evaluation of HID. Based on this technology and combined with first principles, a multiscale cross-analysis method is proposed to explore the relationship between localized HID and magnetic signal response in pipelines. Furthermore, a $Q_{average}$ multi-component magnetic feature fusion parameter is introduced to effectively characterize the failure behavior and hazard level of HID under multi-physical field conditions. The results reveal that under magnetic flux leakage (MFL) testing, the saturation magnetization aligns the magnetic domains in a highly ordered state, rendering it difficult for hydrogen-induced high-pressure stress concentration zones to cause significant perturbations in the overall leakage flux. Consequently, no distinct magnetic response features are observed. In contrast, the characteristic components of the weak magnetic signal exhibit an average increase of approximately doubling compared with the metal magnetic memory method, demonstrating superior applicability and effectiveness for the detection of early-stage HID. In addition, with increasing internal pipeline pressure and external excitation intensity, the stress concentration and magnetic domain reconstruction behavior in hydrogen-enriched zones intensify. Specifically, the $Q_{average}$ response curve shows a nonlinear increase with rising internal pressure, with average response growth rates of 137

收稿日期: 2025-06-13 Received Date: 2025-06-13

* 基金项目: 沈阳市科技计划(社会治理科技专项)(23-407-3-36)项目资助

and $195 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{MPa}$ for Q235 and Q345 steels, respectively. With increasing excitation intensity, the response increases approximately linearly, and the corresponding rates are $61.24 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$ for Q235 and $69.06 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$ for Q345 steels.

Keywords: hydrogen-induced damage; weak magnetic in-line inspection technology for pipelines; first-principles; stress concentration; magnetic signal characteristic

0 引言

长输油气管道作为能源输送的主动脉,在保障国家能源安全中发挥着关键作用^[1-2]。随着氢能源作为零碳替代燃料的战略地位持续攀升,管道系统掺混输运已成为全球能源发展中的关键技术焦点^[3-4]。然而,氢能源的引入对管道的安全输送提出更高要求,尤其在含弱酸性电解质的高湿度油气田服役环境下,电化学腐蚀诱发的氢渗透现象表现显著^[5-7]。氢分子通过表面吸附-解离动力学转化为原子氢^[8],凭借其极小的原子半径(0.1 nm)及较高的扩散系数($D \approx 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)^[9],持续迁移进入金属晶格内部,诱发局部应力场畸变与晶体变形,进一步加剧此劣化过程,相较于宏观裂纹与腐蚀穿孔等表观缺陷^[10-15],氢致损伤因其具有亚表面随机萌生特性以及跨尺度裂纹扩展行为等特征^[16-18],对管道系统的结构完整性评估与服役维护构成更为严峻的挑战。

基于铁磁材料的磁机械效应与氢陷阱的电磁响应机制,近年来发展出多种先进的无损检测技术应用于氢致损伤评估^[19-20]。例如,声发射技术(acoustic emission, AE)通过捕获晶格滑移引发的弹性波特征,识别氢致裂纹的形核过程^[21-22];电磁超声(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)将洛伦兹力激发宽带超声波,结合回波飞行时间算法,可实现对氢鼓泡深度分布的探测^[23-24];涡流检测(eddy current testing, ECT)通过解析环形探头阻抗相位角偏移量,建立氢致损伤检测分析模型,实现亚毫米级的空间分辨率静态识别^[25-26]。然而,由于管道服役过程中常伴随高压、高速流动介质及强电磁干扰等恶劣工况环境^[27],AE技术对早期损伤信号低信噪比问题^[28]、EMAT技术对表面磁性和结构复杂区域适配性受限^[29],及ECT的趋肤效应限深等技术难题^[30],在长输油气管道持续运行条件下的氢致损伤检测仍存在一定局限性。在此检测背景下,管道弱磁内检测技术作为一种基于应力诱导磁畴重构原理的无损检测方法^[31-32],对纳特斯拉级微弱磁通变化的高灵敏度,无需耦合剂、支持在线检测特殊优势^[33-35],在复杂工况环境下对管体局部氢致损伤检测与评估中展现出的巨大应用潜力。

因此围绕铁磁性构件氢致损伤的形成机理,以弱磁内检测技术为背景支撑,基于力磁耦合理论,构建等效应力场与磁各向异性间的本构关系,提出一种面向长输管道氢致损伤与磁信号响应关系的多尺度交叉分析方法。

系统研究不同性能管材在内压及外部励磁环境等多物理场作用下对氢致损伤处磁信号特征的综合响应,并引入 Q_{average} 多分量磁特征融合响应参数以有效表征氢致损伤的危害程度,为实现长输油气管道对氢致损伤动态安全性检测与评估提供全新范式。

1 理论分析

管道弱磁内检测装置主要由动力节、测量节、计算机节和电池节4部分组成。内检测器依托输送介质作为行进动力,对磁信号进行采集分析,实现对长输油气管道缺陷的早期有效检测,具体如图1所示。

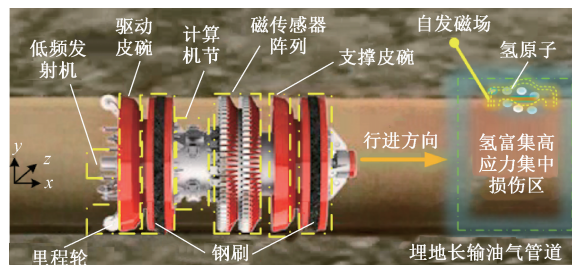


图1 管道弱磁内检测器工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of a pipeline weak magnetic in-line inspection device

其中碳基合金材料凭借优异的综合力学性能,能够承受长期服役状态下的高压循环载荷与复杂应力扰动,同时具备成熟的冶炼与热处理工艺体系,被视为长输管道制造中最理想的应用材料之一^[36],晶体结构示意图如图2所示。

管道合金材料中,铁元素含量通常超过95%,因此在铁基晶体中,强烈的交换相互作用促使自旋磁矩沿特定方向平行排列,形成宏观可观测的自发磁化现象。此外,铁磁性材料中还有一部分具有较高迁移率的巡游电子,赋予材料显著的铁磁性特征^[37]。巡游电子的总能量 E 具体可以表示为:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (1)$$

式中: m^* 为电子的有效质量; k 为电子在空间中的电子态。

巡游电子在铁磁性材料中不仅影响能量分布,还通过自旋极化效应决定了铁磁性材料的总原子磁矩 μ 。由于自旋向上与自旋向下电子在能带中的分布存在不对称

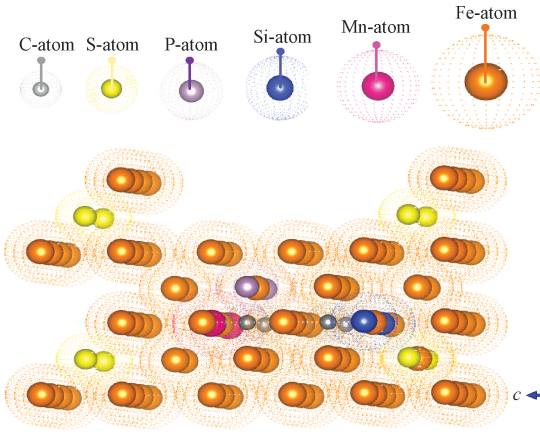


图 2 管道晶体结构

Fig. 2 Diagram of pipeline crystal structure

性,这种自旋分裂会导致费米面附近的态密度差异,进而形成净磁矩。结合巡游电子总能量表达式,可进一步引入态密度函数 $N(E)$ 对用于描述单位能量区间内电子态的分布特征^[38],具体可以表示为:

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:态密度函数 $N(E)$ 可以表示能量为 E 的自由电子密度,从能量角度可分为自旋向上和自旋向下的态密度具体可表示为:

$$N(E) = N_+(E) + N_-(E) \quad (3)$$

式中: $N_+(E)$ 表示自旋向上的电子数; $N_-(E)$ 表示自旋向下的电子数。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{\Delta V} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_B \left[\left(\left(\frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h^2 k^2}{2m} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \uparrow - \left(\frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h^2 k^2}{h^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \downarrow \right) + \sum_j J_{ij} S_j \cdot f(E_F - E_j, T) \cdot \Delta \rho(E_j) \right]}{\Delta V} \quad (5)$$

在外加载荷与外磁场共同作用下,铁磁体内部的磁畴壁发生取向重排与位移,导致磁化方向改变,这一力-磁协同响应过程即为磁弹性效应。与此同时,氢原子在铁基材料内部的扩散渗透及固溶与陷阱行为,会引起晶格畸变并形成局部应力集中区,进一步扰动材料内部磁畴结构与磁各向异性,使得铁磁性金属单位体积内的总自由能不仅取决于磁化强度,还与晶体各向异性、外场能、应变能及应力-磁相互作用密切相关。此时,单位体积内的总自由能 F 可表示为:

$$F = K_1 (g_1^2 g_2^2 + g_2^2 g_3^2 + g_3^2 g_1^2) - \frac{1}{2} \mu_0 \int_V M \cdot \Delta \phi dV + \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \theta \quad (6)$$

式中: K_1 表示一阶各向异性常数; g_1, g_2, g_3 表示磁化矢量在晶体主轴(x, y, z)方向上的余弦分量; μ_0 表示真空磁导率; ϕ 表示磁极分布产生的磁势函数; C_{ijkl} 表示材料

基于式(1)~(3),铁磁性材料磁性总原子磁矩可由自旋向上态和自旋向下态在费米能级附近的积分差值表示,并结合局域交换相互作用项共同体现,其主要贡献可通过式(4)进行表示,即:

$$\mu = \mu_B \left[\left(\left(\frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h^2 k^2}{2m} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \uparrow - \left(\frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h^2 k^2}{h^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \downarrow \right) + \sum_j J_{ij} S_j \cdot f(E_F - E_j, T) \cdot \Delta \rho(E_j) \right] \quad (4)$$

式中: μ_B 表示玻尔磁子; h 表示普朗克常数; m 表示电子的有效质量; k 表示电子在空间中的电子态; J_{ij} 表示第 i 个原子与其邻近第 j 个原子的磁交换常数; S_j 表示第 j 个原子的自旋量子数; $f(E_F - E_j, T)$ 表示费米-狄拉克分布函数,体现温度和电子态分布关系; $\Delta \rho(E_j)$ 表示由其他掺杂元素引起的第 j 原子能级态密度变化。

由式(4)可知,铁磁性材料的总原子磁矩 μ 主要来源于自旋极化电子态的贡献及局域交换相互作用对自旋取向的调控,在铁磁性体系中,根据 Stoner 判据^[39],微观原子磁矩的定向排列会实现稳定的铁磁有序态表现为宏观的磁化强度。然而,当氢原子在材料内部发生氢富集并形成 α -Fe-H 晶体结构时,会使局部巡游电子能量和自旋极化效应发生变化,对应原子磁矩发生改变,这是氢致损伤区域磁信号异常响应的重要原因之一。因此对于局部氢富集铁磁性材料,取一个体积元 ΔV ,单位体积内的磁化强度可以表示为:

四阶弹性刚度张量; ε_{ij} 表示应变张量分量; λ_s 表示饱和磁致伸缩系数; θ 表示应力方向与磁化矢量之间的夹角。

其中,自由能中的应变能项与材料所受应力状态直接相关,复杂应力状态下的应力分布和集中会影响局部能量分布及磁性演化行为,特别是对于管体局部氢富集区域,因此本研究引入第四强度理论^[40],通过复杂应力等效法来描述氢致损伤处整体的应力集中现象,具体可表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

式中: σ_1, σ_2 和 σ_3 分别为正交方向上的 3 个主应力。

由式(7)可知,管体局部早期氢致损伤单元体承受来自不同方向的复杂应力耦合作用,表现出多轴应力状态特征。在该应力条件下,铁磁性材料的磁响应行为为不

仅受到主应力方向的影响,还与各应力分量间的能量耦合密切相关。因此基于广义虎克定律^[41],铁磁性材料在复杂应力状态下发生失效的判断依据是单位体积总弹性应变能密度达到材料在拉伸状态下的最大值。此时,铁磁性金属材料单位体积的应变能 W 具体表示为:

$$W = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 表示单元体的 3 个主应变; E 表示弹性模量。

基于磁畴演化理论^[42],尤其在弱磁场与复杂应力场共同作用下,氢致损伤区的磁响应可通过有效磁场 H_{eff} 进行表征,具体表达式为:

$$H_{\text{eff}} = H + \sum_j \chi_{ij} \cos \theta_{ij} M + \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} - \frac{2b\lambda_s \sigma}{M_s B_s} (1 + \nu) \quad (9)$$

式中: χ_{ij} 表示材料的晶格对称性和局部磁化率张量; M_s 为饱和磁化强度; B_s 为饱和磁感应强度; λ_s 为饱和磁致伸缩系数; H 为外界磁场; σ 为复杂应力; ν 为泊松比; λ 为磁滞伸缩系数,对于铁磁性金属一般可以简化为 $\lambda = \gamma_1 M^2 + \gamma_2 M^4$ 。

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\frac{3E\sigma}{2(1+\nu)\xi}(M_{an} - M) + cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_{\text{eff}}}{a}\right) - \frac{a}{H_{\text{eff}}^2} \right] \left\{ \frac{3}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma_1^1 \sigma)M + 2(\gamma_2 + \gamma_2^1 \sigma)M^3] \right\}}{1 - cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_{\text{eff}}}{a}\right) - \frac{a}{H_{\text{eff}}^2} \right] \left[\frac{3\sigma}{\mu_0} (\gamma_1 + 6\gamma_2 M^2) + \alpha - \frac{3\lambda_s \sigma}{M_s B_s} \right]} \quad (12)$$

前述式(4)和(5)表明,铁磁性材料的宏观磁化强度 M 本质来源于原子尺度自旋极化电子态产生的总磁矩叠加效应。在经典电磁学理论中^[43],材料宏观磁化强度 M 与外部励磁场 H 之间的关系可由相对磁导率 μ_r 进行近似表征,具体对应表达式为:

$$\frac{d\mu_r}{d\sigma} = \frac{\frac{3E\sigma}{2(1+\nu)\xi} [M_{an} - (\mu_r - 1)H] + cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_{\text{eff}}}{a}\right) - \frac{a}{H_{\text{eff}}^2} \right] \left\{ \frac{3}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma_1^1 \sigma)(\mu_r - 1)H + 2(\gamma_2 + \gamma_2^1 \sigma)(\mu_r - 1)^3 H^3] \right\}}{\left\{ 1 - cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_{\text{eff}}}{a}\right) - \frac{a}{H_{\text{eff}}^2} \right] \left[\frac{3\sigma_r}{\mu_0} (\gamma_1 + 6\gamma_2 (\mu_r - 1)^2 H^2) + \alpha - \frac{3\lambda_s \sigma}{M_s B_s} \right] \right\} H} \quad (14)$$

由式(14)可知,基于第一性原理,对氢原子在铁基晶体内部的扩散行为、晶格畸变引发的原子磁矩与局部应力场变化进行系统分析,并结合经典力-磁耦合理论,得到氢富集高压应力集中区相对磁导率与复杂应力的对应关系表达式相对磁导率作为铁磁性材料的关键磁响应参数,其变化趋势能够间接表征材料内部磁畴结构的重构行为与磁化强度的演化特征,为后续针对不同影响因素对管体局部氢致损伤处磁信号异常响应的机理研究提供有效支撑,进一步丰富并完善管道弱磁内检测技术

由式(9)可知,弱励磁场与复杂应力场共同作用下形成的有效磁场 H_{eff} 不仅调控铁磁性金属材料的磁化状态,还会通过磁畴取向重排与局部应力场的相互作用,进一步影响其内部应变分布。因此,单位体积内的弹性应变能 W 可用于描述该耦合效应下材料的应力状态,为进一步分析复杂应力状态下对材料局部应力集中的影响,对材料单位体积的应变能 W 进行求导,对应表达式为:

$$dW = d\left(\frac{1+\nu}{3E}\sigma^2\right) = \frac{2(1+\nu)}{3E}\sigma d\sigma \quad (10)$$

在此基础上,材料内部的磁化强度变化会伴随弹性应变能的重新分配与释放,两者之间存在内在的耦合平衡关系,磁化强度 M 与单位体积应变能 W 之间的微分耦合关系表达式具体可表示为:

$$\frac{dM}{dW} = \frac{1}{\xi}(M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (11)$$

式中: ξ 为单位体积能量度量因子; M_{an} 为理想状态下的磁化强度。

结合式(10)和(11),其中式(10)描述了氢富集局部区域复杂应力集中状态,式(11)揭示了磁化强度与单位体积应变能之间的耦合关系,可进一步推导出复杂应力状态下的应力磁化解析公式,即:

$$M = (\mu_r - 1)H \quad (13)$$

因此,结合有效磁场与复杂应力场的调控作用,将式(13)代入式(12),可进一步得管道氢致损伤处相对磁导率与复杂应力的对应关系表达式为:

在氢致损伤检测与评估领域的理论体系与工程应用基础。

2 仿真计算

2.1 模型建立

长输油气管道局部氢致损伤作为一种新型材料失效模式,涉及材料的微观结构变化、氢的扩散行为及应力集中影响等多因素协同作用的影响,展现出较强的隐性

与突发性特征,具有重要研究价值。为实现数值模拟与实验验证条件的一致性,因此以 Q235 低强度碳素结构钢与 Q345 高强度低合金结构管道钢作为仿真对象,建立了对应的三维实体管道几何模型,目的是使数值模拟与实验试件保持一致性,具体示意图如图 3 所示。

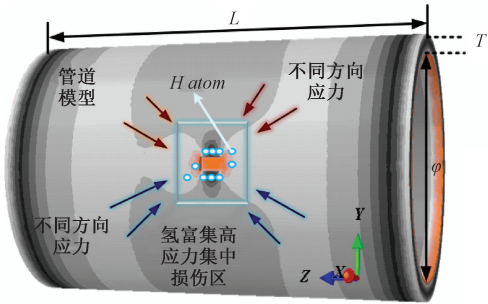


图 3 管体局部氢致损伤失效分析示意图

Fig. 3 Diagram of localized hydrogen-induced damage failure analysis in pipeline

由图 3 可知,建立管道实体模型长 $L=1\text{ m}$, 直径 ϕ 为 1.016 m , 壁厚为 $T=0.0145\text{ m}$, 位于管体表面中心处建立长为 0.03 m , 深为 0.003 m , 宽为 0.01 m 的氢富集应力集中损伤区,用于模拟长输管道服役过程中典型的氢致局部缺陷特征。模型外部添加 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的空气盒子,在空气盒子的一个面施加边界条件 $MAG=0$,沿空气盒子单轴方向施加 40 A/m 的磁场,采用自由网格划分,网格划分等级为 1 级,网格形状为四面体,共包含 43 247 个节点,13 655 个单元。针对 Q235 钢母材,设定力学性能参数为:硬度 HRC 30、杨氏模量为 210 GPa 、泊松比为 0.3 ,针对 Q345 钢母材,设定力学性能参数为:硬度 HRC 34、杨氏模量 215 GPa 、泊松比为 0.3 以表征无损区域的基准状态;针对 Q235 钢管体局部氢致损伤区,设定力学性能参数变化范围为:硬度参数变化范围: HRC $36.9\sim 37.9$ 、杨氏模量参数变化范围: $217\sim 223\text{ GPa}$ 、泊松比参数变化范围: $0.28\sim 0.29$; 针对 Q345

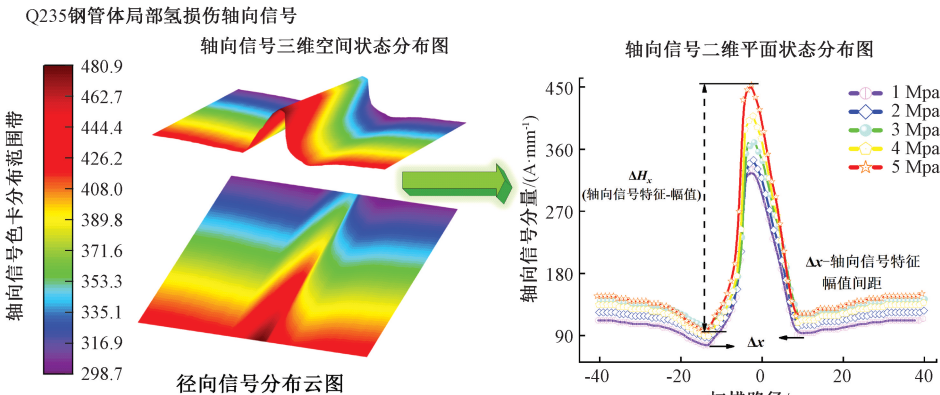
钢管体局部氢致损伤区,设定力学性能参数变化范围为:硬度参数变化范围: HRC $39.5\sim 41.0$ 、杨氏模量参数变化范围: $220\sim 229\text{ GPa}$ 、泊松比参数变化范围: $0.27\sim 0.285$,以反映氢致损伤引发的材料局部性能劣化特征;此外为了更真实还原实际检测环境,模型中空气的相对磁导率参数设定为 1,将磁信号采集位置设定为距离缺陷区域上方 1.5 mm 处,以贴合工程中内检测传感器工作距离和检测条件,该设置在兼顾磁信号灵敏获取与环境噪声抑制之间实现了有效平衡。为接下来分析不同管道性能钢在内压与励磁强度等重要影响因素作用下氢致损伤区磁响应特性与信号表征关系研究提供系统的数值分析支持。

2.2 管体内压作用下氢致损伤区磁响应特性与信号表征关系研究

在管体内压作用下,铁磁性材料局部微观结构,会受到应力集中效应的影响,进而诱发应力辅助扩氢过程,加速氢致损伤的形成与扩展。随着管体内压的升高,材料内部的残余应力状态与氢的扩散行为协同演化,导致局部磁导率的异常变化。在此基础上,为系统揭示不同内压作用下氢致损伤区域的磁响应机制,将不同内压条件 ($1\sim 5\text{ MPa}$) 下铁磁性材料局部残余应力与磁导率变化参数作为输入,赋值至图 3 所示的管道仿真模型中所对应的局部缺陷区域(即氢富集与应力集中叠加区)。开展不同管道性能钢在氢致损伤区的磁响应演化及信号对比分析,具体仿真结果如图 4、5 所示。

由图 4 和 5 可知,随着管体内压升高,不同管道性能钢在局部氢致损伤区域的磁信号分量均呈现出明显的异常变化,且整体趋势表现为单调递增,其量值与管体内压系数呈正相关性。通过进一步分析发现,轴向与径向磁信号分量的变化特征存在差异。其中,轴向磁信号分量表现出明显的幅值变化 (ΔH_x) 及对应的幅值间距 (Δx),近似为轴对称分布;而径向分量则具有峰-峰值特征 (ΔH_y) 及峰-峰间距 (Δy),近似呈中心对称分布。

为进一步比较不同管体局部氢致损伤在内压作用下对磁信号异常响应的敏感性,引入多分量磁特征融合响



(a) 不同内压作用下Q235钢管体局部氢致损伤轴向信号分量

(a) Axial signal component of localized HIID in Q235 pipeline steel under different internal pressures

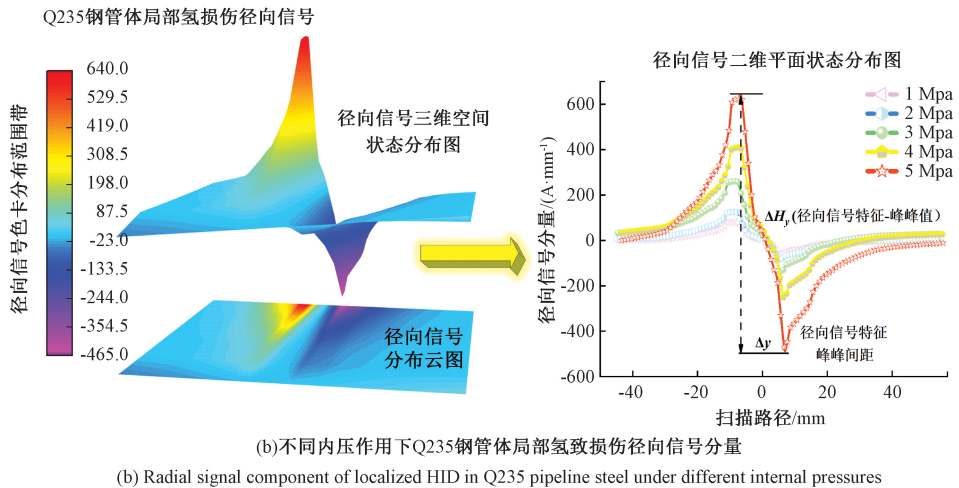
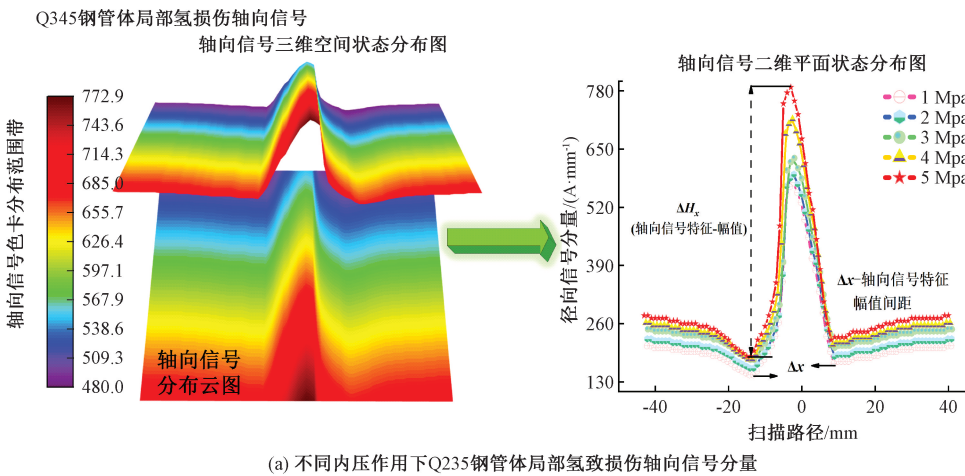


图 4 不同内压作用下 Q235 钢管体局部氢致损伤磁信号分量

Fig. 4 Magnetic signal components of localized HID in Q235 pipeline steel under different internal pressures



Q345钢管体局部氢损伤径向信号

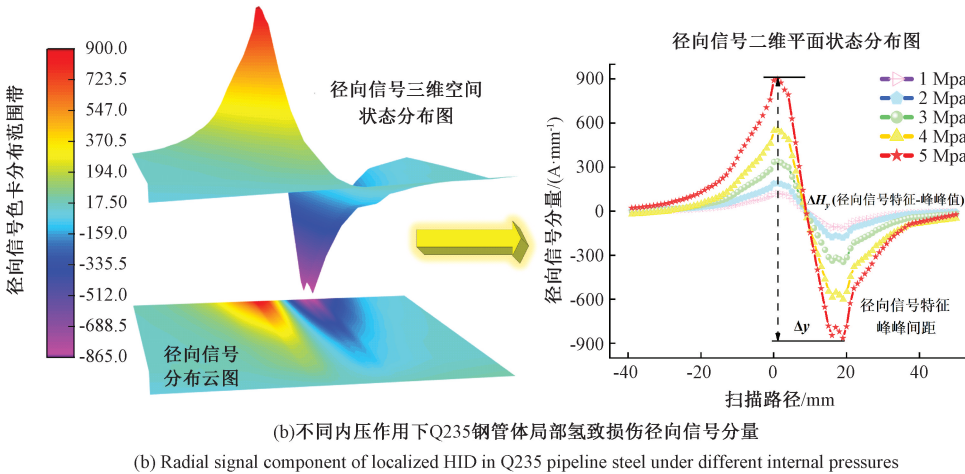


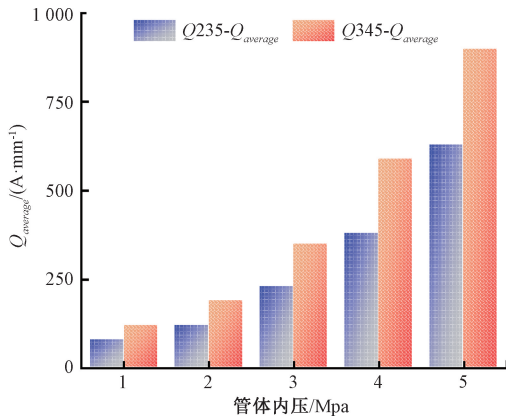
图 5 不同内压作用下 Q345 钢管体局部氢致损伤磁信号分量

Fig. 5 Magnetic signal components of localized HID in Q345 pipeline steel under different internal pressures

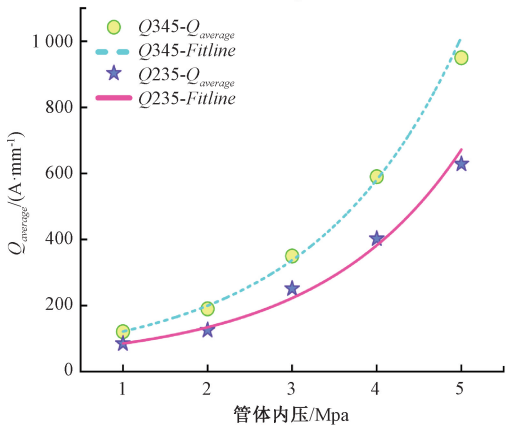
应参数 $Q_{average}$, 分别提取不同内压下的磁信号分量特征值, 进行分析计算, 具体表达式见式 (15), 拟合结果图如图 6 所示。

$$Q_{average} = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_0}^{x_0 + \Delta x} [\delta H_x(x) + \delta H_y(x)] \cdot \frac{1}{2} dx \quad (15)$$

式中: x_0 表示缺陷区域起始位置; Δx 表示缺陷区域积分区间长度; $\delta H_x(x)$ 轴向磁信号分量随位置 x 的变化函数, 近似为 ΔH_x 在空间上的分布; $\delta H_y(x)$ 径向磁信号分量随位置 x 的变化函数, 近似为 ΔH_y 在空间上的分布。



(a) 不同性能管道钢 $Q_{average}$ 柱状图
(a) Bar chart of $Q_{average}$ for pipeline steels



(b) 不同性能管道钢 $Q_{average}$ 拟合图
(b) Fitting curve of $Q_{average}$ for pipeline steels

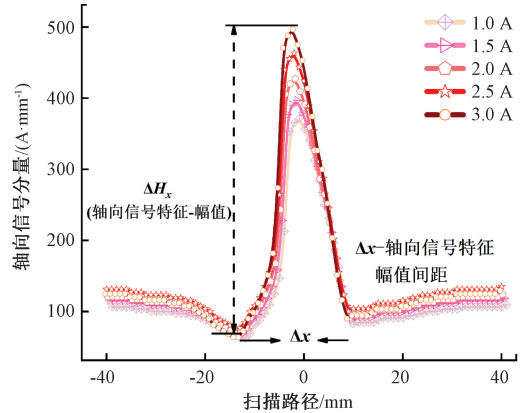
图 6 不同管道性能钢在内压作用下 $Q_{average}$ 柱状及拟合分析图
Fig. 6 Bar and fitting analysis of $Q_{average}$ for pipeline steels with different properties under internal pressure

由图 6 可知, 随着管内压的升高, $Q_{average}$ 呈现双指数非线性增长趋势, 具体表现为: $Q_{average} = 29.69 \exp(-x/-1.63) + 29.69 \exp(-x/-1.99) + 18$; $Q_{average} = 86.69 \exp(-x/-1.57) + 27.78 \exp(-x/-1.92) + 86$; (Q235 钢拟合优度 $R^2 = 0.984$, 平均响应增长率 $K = 137 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{MPa}$); (Q345 钢拟合优度 $R^2 = 0.977$, 平均响应增长率 $K = 195 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{MPa}$), 相较于 Q235 钢, Q345 钢由于具有更高的位错密度与残余应力水平, 在受到管内压加载作

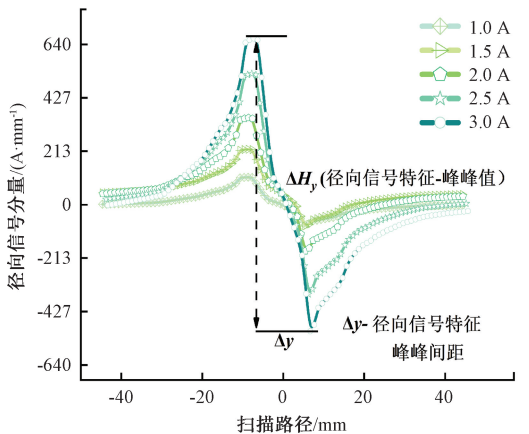
用时, 更易在晶界、位错等微结构缺陷处形成深层氢陷阱, 诱发局部应力集中并促进氢致损伤的发生与扩展, 反映出更高灵敏度的磁信号响应特征。

2.3 外部励磁作用下氢致损伤区磁响应特性与信号表征关系研究

在外部励磁场作用下, 铁磁性材料损伤处的磁畴结构及其磁信号响应特性会发生变化, 尤其是在氢致损伤影响下, 磁响应信号变化加剧。为进一步揭示氢致损伤区磁信号的形成机制与表征特征, 在 2.2 节确认管体内压为 5 MPa 时, 不同性能管道钢的磁信号异常特征变化更显著, 因此以 5 MPa 作为管体内压条件, 基于多分量磁信号融合与建模分析, 进一步计算不同励磁作用下 (1~3 A) 缺陷区域的相对磁导率参数, 作为输入赋值至图 3 所示的管道磁学模型中对应的局部缺陷区域 (即氢富集与应力集中叠加区), 并通过力-磁耦合场计算, 系统开展不同性能管道钢在该区域的磁响应行为特征研究, 具体结果如图 7 和 8 所示。

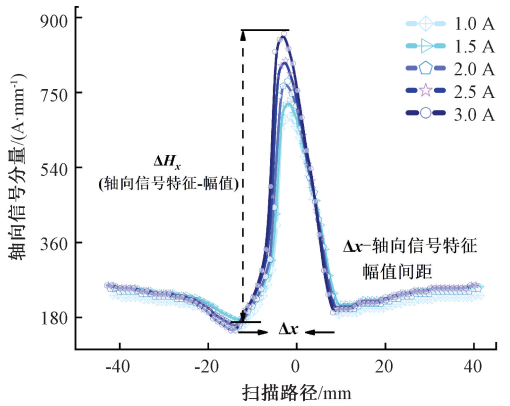


(a) 外部励磁作用下 Q235 钢管体局部氢致损伤轴向磁信号分量
(a) Axial magnetic signal component of localized HID in Q235 pipeline steel under external excitation



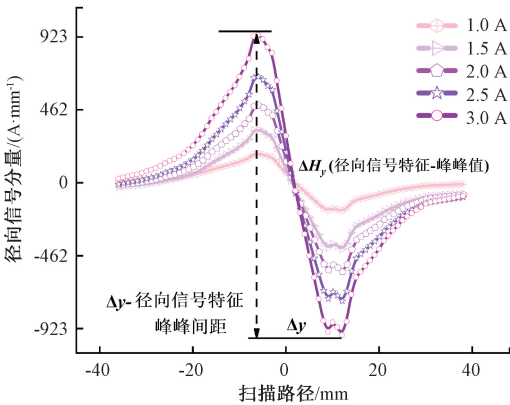
(b) 外部励磁作用下 Q235 钢管体局部氢致损伤径向磁信号分量
(b) Radial magnetic signal component of localized HID in Q235 pipeline steel under external excitation

图 7 不同励磁作用下 Q235 钢管体局部氢致损伤磁信号分量
Fig. 7 Magnetic signal components of localized HID in Q235 pipeline steel under different external excitation



(a) 外部励磁作用下Q345钢管体局部氢致损伤轴向磁信号分量

(a) Axial magnetic signal component of localized HID in Q345 pipeline steel under external excitation



(b) 外部励磁作用下Q345钢管体局部氢致损伤径向磁信号分量

(b) Radial magnetic signal component of localized HID in Q345 pipeline steel under external excitation

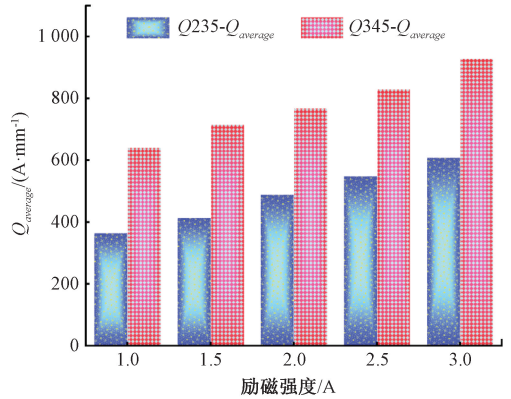
图8 不同励磁作用下 Q345 钢管体局部氢致损伤磁信号分量

Fig. 8 Magnetic signal components of localized HID in Q345 pipeline steel under different external excitation

由图 7、8 可知,随着外部励磁强度升高,Q235 与 Q345 两种管道钢在局部氢致损伤区域的磁信号分量整体呈单调递增变化,且信号幅值大小与励磁强度呈正相关性。此外通过分析发现,轴向与径向磁信号的异常变化特征与 2.2 节中不同内压条件下的信号响应趋势一致,轴向分量具有轴向幅值 (ΔH_x) 及对应的幅值间距 (Δx),其分布形态近似为轴对称;径向分量具有峰-峰值特征 (ΔH_y) 及对应峰-峰间距 (Δy),分布近似呈中心对称特征变化。上述结果进一步表明磁信号分量(轴向、径向信号)在氢致损伤检测与表征中的响应灵敏性与有效性。

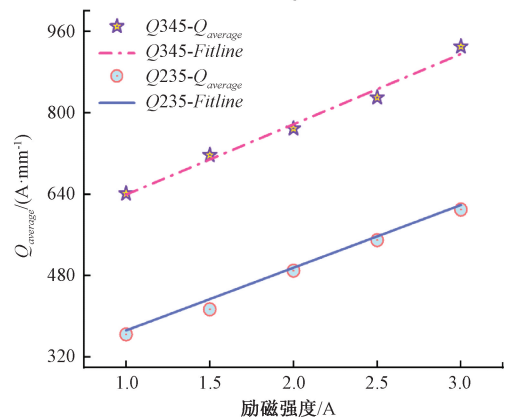
为系统对比不同管道钢在励磁强度作用下对磁信号异常响应的敏感性,通过提取不同励磁强度条件下的磁信号分量特征值对多分量磁特征融合响应参数

$Q_{average}$ 进行计算,并展开拟合分析,具体拟合结果图 9 所示。



(a) 不同性能管道钢 $Q_{average}$ 柱状图

(a) Bar chart of $Q_{average}$ for pipeline steels



(b) 不同性能管道钢 $Q_{average}$ 拟合图

(b) Fitting curve of $Q_{average}$ for pipeline steels

图9 不同管道性能钢在内压作用下 $Q_{average}$ 柱状及拟合分析图

Fig. 9 Bar and fitting analysis of $Q_{average}$ for pipeline steels with different properties under different external excitation

由图 9 可知,随着励磁强度的升高 (1~3 A),不同性能管道钢的多分量磁特征融合响应参数随励磁强度提升呈现正向线性增长关系,表明引入的 $Q_{average}$ 可以有效反映不同管体材料在励磁条件作用下的磁响应演化规律。具体表现为 Q235 钢: $Q_{average} = 61.24x + 310$ (拟合优度 $R^2 = 0.984$, 平均响应增长率 $K = 61.24 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$); Q345 钢: $Q_{average} = 69.06x + 570$ (拟合优度 $R^2 = 0.977$, 平均响应增长率 $K = 69.06 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$),相较于 Q235 钢, Q345 钢本征组织具有较高的屈服强度,外部励磁场的增强更易诱发磁畴重排与壁运动,尤其是在微结构缺陷密集区域,如位错、晶界及应力集中区域,磁畴响应更为剧烈,从而磁信号表现出更高的幅值增长率和更强的异常特征。

3 实验验证

为系统验证理论分析的科学与有效性, 并更真实

地模拟管道在服役状态下的受力与磁响应环境, 本次试验按照国家标准 GB/T 5224—2023, 以 Q235、Q345 管道钢作为实验载体, 设计钢条磁力学拉伸试验, 试件具体化学成分与力学性能如表 1 所示^[44-45]。

表 1 Q235 与 Q345 管道钢的化学组成及力学性能参数
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Q235 and Q345 pipeline steels

管道钢	C/wt. %	Si/wt. %	Mn/wt. %	P/wt. %	S/wt. %	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
Q235	≤0. 22	≤0. 35	≤1. 40	≤0. 045	≤0. 045	≥ 235	370~500
Q345	≤0. 20	≤0. 45	≤1. 70	≤0. 035	≤0. 035	≥ 345	470~630

为保证实验的一致性与可重复性, 选取长×宽×厚为 600 mm×60 mm×15 mm 的 Q235 和 Q345 钢条试件各 3 根, 分别编号为 1-1Q235、1-2Q235、1-3Q235 和 2-1Q345、2-2Q345、2-3Q345。其中, 1-1Q235 与 2-1Q345 为无损对照组, 其余试件(1-2Q235、1-3Q235、2-2Q345、2-3Q345)分别在试件中心圆形区域进行乙炔焰炬高温加热处理^[46], 采用弱酸性冷却介质进行快速冷却, 该过程易使金属基体表面产生活泼反应, 促进氢原子的解离生成^[47-48]。与此同时, 急速冷却使氢原子难以充分扩散逸出, 伴随管道高压高流速的输送介质, 铁磁性材料易在应力集中与氢聚集的双重作用下诱发氢致损伤的萌生与扩展, 上述处理方法为实验模拟实际运行条件下氢致损伤区域的形成机制与磁响应特性提供可控实验环境。具体试件处理流程如图 10 所示。

机—量程 100 kN, 符合 ASTM E8 国际通用金属材料拉伸性能测试标准)、励磁单元(SS-10010P 直流电源-输出 0~10 V/10 A, 驱动亥姆霍兹线圈, 产生均匀励磁场)、信号采集单元由差分式 N5-794 复合传感器(灵敏度 25 μV/nT, 分辨率 1 nT, 符合 IEC 61786-1 磁传感器测量性能评估的国际标准)和高速数据采集模块(16 位 ADC, 采样率 250 kHz, 本底噪声<0. 2 nT), 为优化磁场空间分辨率并提取信号特征分量, 高灵敏度磁传感器通过非磁性陶瓷夹具固定于励磁线圈的几何中心, 所有信号线均采用双层屏蔽接地以抑制噪声。具体试验操作平台如图 11 所示。

为模拟长输油气管道的真实服役工况, 试验采用拉力试验机调节夹具开合以对试件进行安装与固定, 分别对 Q235 和 Q345 两组试件施加 10 kN 轴向拉力(保证处于弹性范围内)。此外, 使用精密直流电源(型号: SS-10010P, 输出稳定性±0. 05%)调节励磁电流, 构建可控磁场环境。在此基础上, 设置 2 组对照: 一组在 0 A 地磁场条件下采用金属磁记忆方法; 另一组在 7 A 磁饱和条件下采用漏磁检测方法, 进行对比分析, 以进一步验证弱磁检测方法在管道氢致损伤识别与评估中的有效性与适用性。通过 16 通道高灵敏度复合磁传感器阵列对磁信号数据进行采集(各通道同步采样), 并通过上位机记录试件在不同励磁环境下的磁信号变化。重复上述实验步骤, 以保证结果的准确性和真实性。具体磁信号分量结果如图 12 所示。图 12(a)~(d)和(e)~(h)为 Q235 钢 10 kN 下 0~3 A 轴向和径向弱磁信号数据采集分量; 图 12(i)~(l)和(m)~(p)为 Q345 钢 10 kN 下 0~3 A 轴向和径向弱磁信号数据采集分量; 图 12(q)~(r)和(s)~(t)为 Q235、Q345 钢 10 kN 下 7A 轴向和径向强磁信号数据采集分量。

由图 12 可知, 在强饱和 7 A 励磁场环境下(即漏磁检测条件下), 轴向与径向的磁信号分量均未呈现明显的局部异常特征, 表明该方法对氢致损伤早期阶段的检测灵敏度较低。这主要是由于漏磁检测依赖于施加高强度外磁场, 使材料内部磁畴趋于饱和并沿外场方向高度有

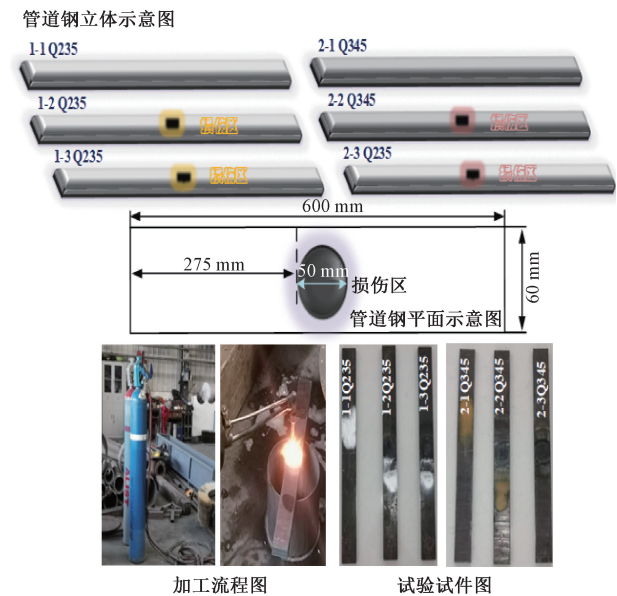


图 10 不同性能管道钢试件分析图

Fig. 10 Analysis of pipeline steels with different properties

在试件加工处理后, 进行整体拉伸试验平台搭建主要包括拉伸加载单元(SHT-4106 微机控制拉伸试验



图 11 整体拉伸试验平台搭建

Fig. 11 Diagram of the integrated tensile testing platform

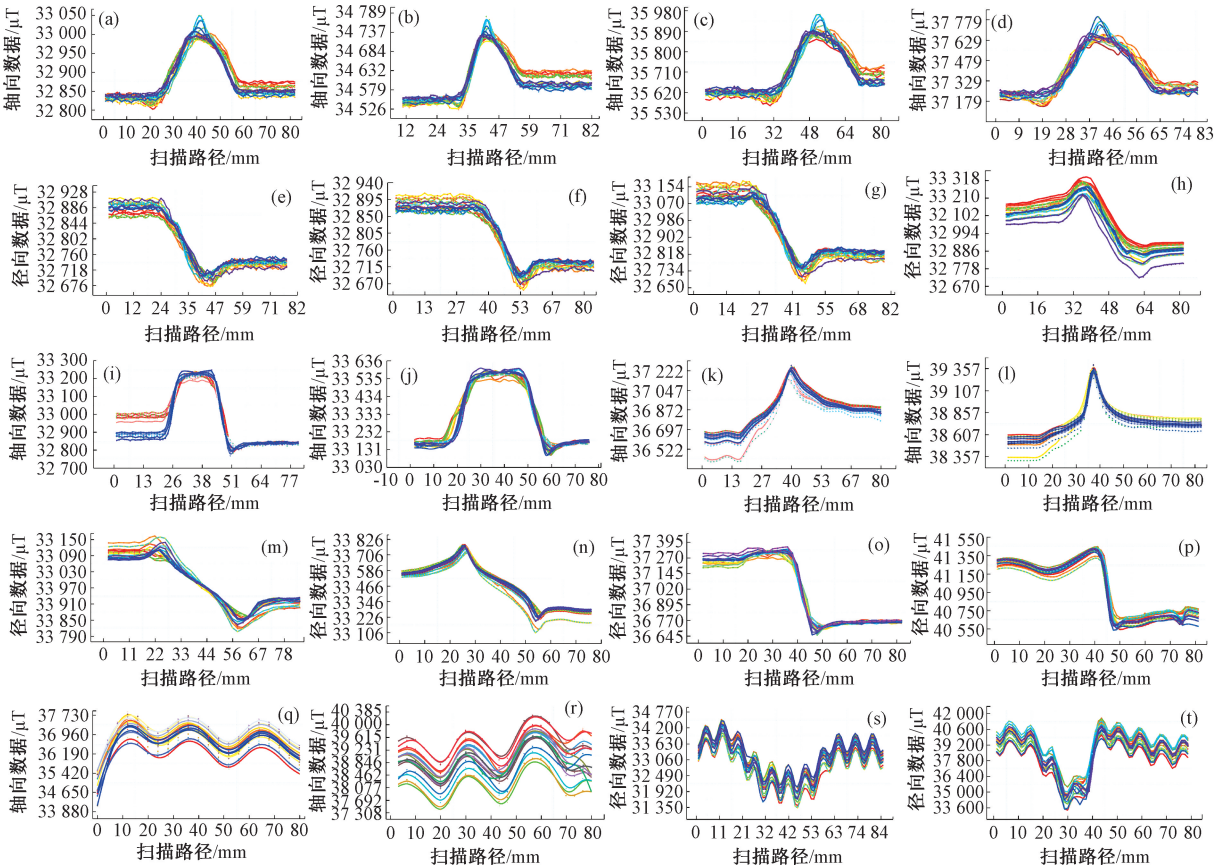


图 12 不同励磁强度下 Q235、Q345 钢试件试验数据

Fig. 12 Experimental data of the Q235 and Q345 steel specimens under varying excitation intensities

序排列,宏观体积缺陷可通过扰动漏磁通进行有效检测,而氢致损伤引起的位错累积、局部应力集中及晶格畸变

难以对饱和磁路产生显著影响,导致早期损伤磁信号难以被有效捕捉。此外在地磁场(金属磁记忆检测条件

下)与弱励磁(弱磁检测条件下),不同管道钢试件在局部氢致损伤区域的磁信号试验数据分量均呈现出异常变化,轴向与径向磁信号分量的变化特征与理论分析结果趋势一致,具体表现为轴向磁信号分量近似为轴对称分布,具有幅值特征;而径向分量近似为中心对称分布则具有峰-峰值特征,为进一步验证不同管道钢试件在不同检测方法(弱磁检测方法、金属磁记忆检测方法)作用下对磁信号异常响应的敏感性,分别提取不同励磁强度下的磁信号数据采集分量特征值,对 $Q_{average}$ 进行计算,获得不同励磁强度与 $Q_{average}$ 拟合分析曲线如图 13 所示。

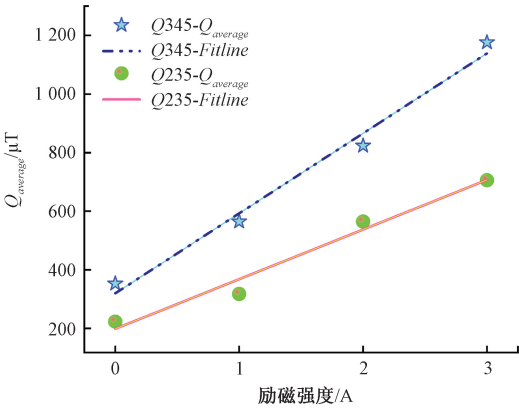


图 13 不同管道性能钢在励磁作用下 $Q_{average}$ 拟合分析图

Fig. 13 $Q_{average}$ fitting analysis of different pipeline steels under external excitation

由图 13 可知,随着外部励磁强度的增加,不同试件(Q235, Q345)磁信号采集数据分量整体趋势表现为近似单调线性递增趋势,与金属磁记忆检测方法相比(地磁场强度弱、环境磁干扰大,信噪比低),3 A 弱励磁下的 Q235 和 Q345 试件下的磁信号分量数据提升分别约 215% 和 233%。试验结果表明,弱磁检测技术无论是低强度碳素结构钢(Q235)还是高强度低合金结构钢(Q345)均对氢致损伤表现出较强的磁响应能力。其中, Q345 钢因具备更高的屈服强度及更显著的残余应力集中特性,在氢致损伤诱发的磁畴扰动过程中表现出更高的响应灵敏性。

为进一步分析不同拉力对试件氢致损伤的磁信号的特征影响。在上述试验分析中确定 3 A 弱励磁条件下对试件氢致损伤区域磁信号响应能力更强,因此后续实验在 3 A 励磁环境下分别对 Q235 和 Q345 两组试验试件施加轴向拉力,构建可控拉伸应力场(10~40 kN),实验采用 16 通道复合型传感器对磁信号数据进行采集,并通过上位机记录试件在不同拉力环境下的磁信号分量变化数据。重复上述实验步骤,以保证结果的准确性和真实性。具体磁信号分量结果如图 14 所示。图 14(a)~(d)和(e)~(h)为 Q235 钢 3 A 下 10~40 kN 轴向和径向磁信号数据采集分量;图 14(i)~(l)和(m)~(p)为 Q345 钢 3 A 下 10~40 kN 轴向和径向磁信号数据采集分量。

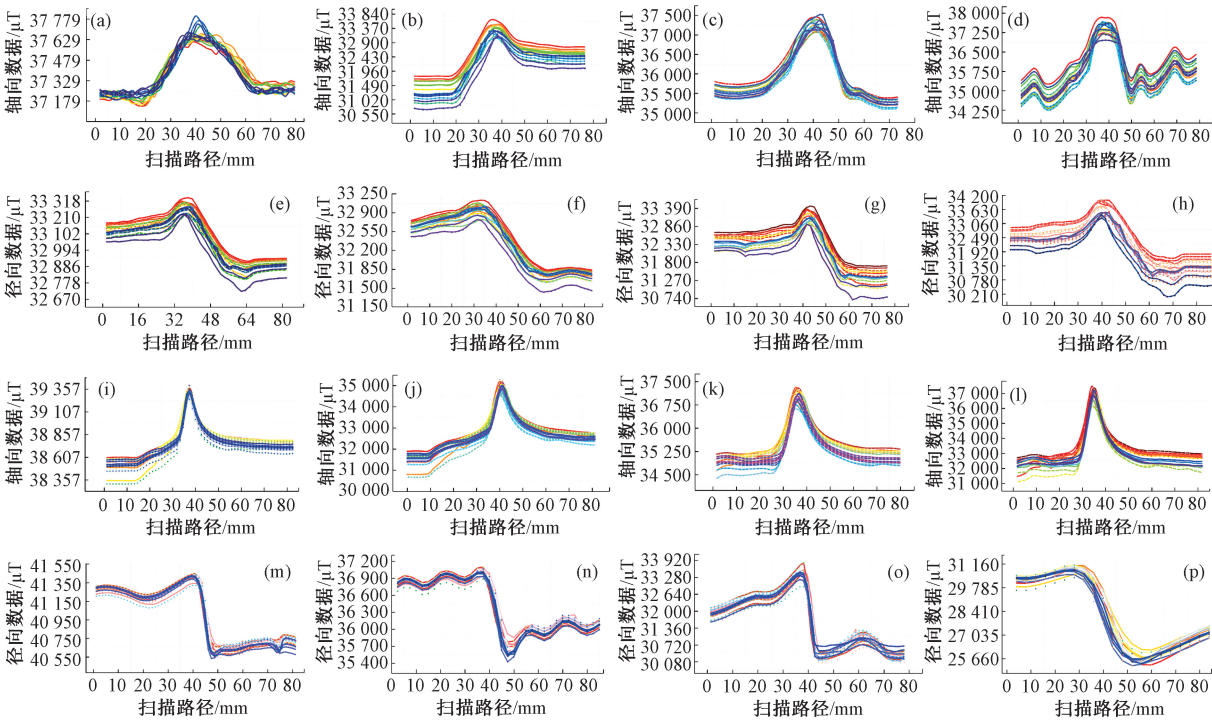


图 14 不同拉力下 Q235、Q345 钢试件试验数据

Fig. 14 Experimental data of the Q235 and Q345 steel specimens under tensile loads

由图14可知,随着轴向拉力升高,两组试件磁信号试验数据分量均表现出异常变化,相比前节在不同励磁场下的响应情况,本章在拉力作用下所呈现的磁信号波形变化趋势保持一致(轴向磁信号分量近似为轴对称分布,具有幅值特征;而径向分量近似为中心对称分布则具有峰-峰值特征),进一步验证了励磁强度与应力状态对磁响应机制的协同影响。

为深入探究不同钢材在拉力作用下对氢致损伤区域磁响应的敏感程度,分别提取不同拉力下的磁信号数据,采集分量特征值对 $Q_{average}$ 进行计算,并获得不同拉力 $Q_{average}$ 拟合曲线,具体结果如图15所示。

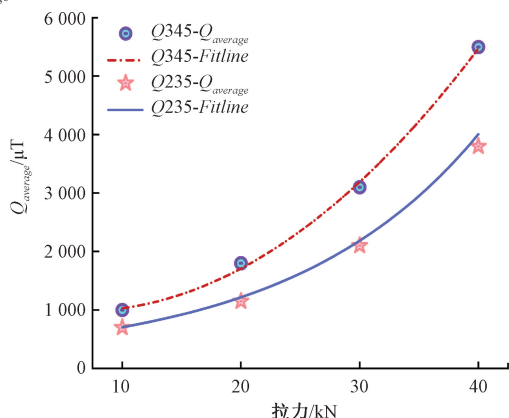


图15 不同管道性能钢在拉力作用下 $Q_{average}$ 拟合分析图

Fig. 15 $Q_{average}$ fitting analysis of different pipeline steels under different tensile loads

实验结果表明,随着轴向拉力的增加,不同试件(Q235, Q345)磁信号采集数据分量整体趋势表现为非线性递增趋势,说明在对长输油气管道进行氢致损伤的无损检测过程中,运行压力的升高会加剧管体局部应力集中与氢原子聚集效应,从而使损伤区域的磁信号响应更为敏感。进一步验证了弱磁检测技术在识别铁磁性材料氢致损伤方面的可行性与科学性,尤其是在复杂服役环境中具备良好的工程适用性,与理论分析呈正相关性。

4 结 论

聚焦于管道弱磁内检测技术在氢致损伤中的应用潜力,基于铁磁性材料氢致损伤的位错钉扎-磁畴再取向耦合机制,建立反映等效应力场与磁化率张量各向异性演化的本构关系,提出一种面向长输油气管道局部氢致损伤与磁信号响应关系的多尺度交叉分析方法。重点研究不同管体材料、外部应力及励磁场等影响因素对磁信号特征的综合响应,具体研究结果为:

1) 相较于饱和磁场下漏磁检测方法对早期氢致损伤磁信号检测灵敏度较低,以及金属磁记忆方法地磁场

强度较弱,受环境磁干扰较大等问题,弱磁内检测技术在表征不同性能管道钢氢致损伤方面展现出良好的适用性与有效性。在多物理场耦合作用下,损伤区磁各向异性增强,局部磁导率发生改变,磁信号响应异常,整体变化趋势与理论分析一致,具体表现为:轴向分量呈现幅值特征,近似轴对称分布;径向分量表现为峰峰值特征,近似中心对称分布。为实现早期氢致损伤的检测与评估提供技术支撑。

2) 引入多分量磁特征融合响应参数 $Q_{average}$, 实现对管体局部氢致损伤的有效表征。 $Q_{average}$ 随外部应力升高呈现双指数非线性增长趋势,主要源于应力作用导致材料内部位错密度增加,局部磁响应的增强; $Q_{average}$ 随励磁强度提升呈现正向线性增长关系,归因于外部磁场作用直接增强了材料的磁化程度,促进磁矩有序排列。上述变化趋势与实际试验中磁信号分量的演变规律呈现正相关性。

3) Q345 钢在应力与励磁作用下的平均磁响应增长率($195 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{MPa}$ 和 $69.06 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$) 均高于 Q235 钢($137 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{MPa}$ 和 $61.24 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}/\text{A}$), 这主要源于 Q345 钢具有更高的屈服强度与位错密度,氢富集区更易形成局部应力集中与磁畴重构,进一步增强磁响应特性。因此,应重点加强对长输油气管道中高强度合金钢材料的氢致损伤检测,对于低强度碳素钢,需聚焦应力集中区域的磁信号变化,防范隐性局部氢致损伤的形核与扩展。

总体而言,对管道氢致损伤生成机制及磁信号响应的特征理解进一步深化,为长输油气管道内检测技术在氢致损伤缺陷检测识别与评估提供新方向,有助于检修人员依据检测信号特征制定更精准的风险评估方案,从而最大限度降低运营成本与潜在安全隐患。然而,管道氢致损伤的形成与演化机理高度复杂,涉及多物理场及多因素的耦合作用,仍亟需系统深入研究。未来,拟通过材料科学与无损检测技术的多学科交叉研究方法,重点针对不同提离值、温度及检测速度等典型工况下氢致损伤对磁信号特性的影响开展系统分析,并制定优化方案,旨在进一步完善对管道中氢诱导损伤处的完整性评估。

参考文献

- [1] ZEROUALI B, SAHRAOUI Y, NAHAL M, et al. Reliability-based maintenance optimization of long-distance oil and gas transmission pipeline networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 249: 110236.
- [2] 丁建林, 西昕, 张对红. 能源安全战略下中国管道输送技术发展展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 632-639.
- DING J L, XI X, ZHANG D H. Development and outlook of China's pipeline transportation technologies

- under energy security strategy[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 632-639.
- [3] QIN B Y, WANG H ZH, LIAO Y, et al. Challenges and opportunities for long-distance renewable energy transmission in China[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, 69: 103925.
- [4] DI LULLO G, GIWA T, OKUNLOLA A, et al. Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(83): 35293-35319.
- [5] FOLENA M C, DA CUNHA P J A. Assessment of hydrogen embrittlement severity of an API 5LX80 steel in H₂S environments by integrated methodologies [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 111: 104380.
- [6] LONG Y, SONG W W, FU AN Q, et al. Combined effect of hydrogen embrittlement and corrosion on the cracking behaviour of C110 low alloy steel in O₂-contaminated H₂S environment [J]. *Corrosion Science*, 2022, 194: 109926.
- [7] 刘正通, 赵杰, 王莹. 湿硫化氢环境中输气管道内腐蚀研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2014, 26(6): 559-563.
- LIU ZH T, ZHAO J, WANG Y. Research progress on corrosion in gas pipelines in wet H₂S environment [J]. *Corrosion Science And Protection Technology*, 2014, 26(6): 559-563.
- [8] 宋雨霖, 李玉星. 氢气在管线钢表面的解离吸附机制及影响因素研究进展[J]. *油气储运*, 2024, 43(11): 1212-1223.
- SONG Y L, LI Y X. Research review of the mechanism and influencing factors in dissociative adsorption of hydrogen on pipeline steel surface [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(11): 1212-1223.
- [9] FUKAI Y, SUGIMOTO H. Diffusion of hydrogen in metals [J]. *Advances in Physics*, 1985, 34(2): 263-326.
- [10] 李春晖, 吕岩, 孟祥来, 等. 基于 YOLOv8 的油气管道漏磁检测缺陷智能识别技术研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(2): 247-254.
- LI CH H, LYU Y, MENG X L, et al. Research on intelligent defect recognition in oil and gas pipeline magnetic flux leakage detection based on YOLOv8 [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(2): 247-254.
- [11] 张仕忠, 李红梅, 赵春田. 漏磁检测多排传感器的数据修正理论及方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 243-251.
- ZHANG SH ZH, LI H M, ZHAO CH T. Theory and method of data correction for multi-row sensors in MFL detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(11): 243-251.
- [12] LIU B, LIANG Y S, HE L Y, et al. Quantitative study on the propagation characteristics of MFL signals of outer surface defects in long-distance oil and gas pipelines [J]. *NDT & E International*, 2023, 137: 102861.
- [13] FAN T, LIU ZH Y, LI M ZH, et al. Development of cost-effective repair system for locally damaged long-distance oil pipelines [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 333: 127342.
- [14] 刘金海, 赵真, 付明芮, 等. 基于主动小样本学习的管道焊缝缺陷检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(11): 252-261.
- LIU J H, ZHAO ZH, FU M R, et al. Active small sample learning based the pipe weld defect detection method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(11): 252-261.
- [15] 王晓娟, 杨帆, 王错, 等. 面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 71-80.
- WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5): 71-80.
- [16] GHOSH G, ROSTRON P, GARG R, et al. Hydrogen induced cracking of pipeline and pressure vessel steels: A review [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 199: 609-618.
- [17] 刘志坦, 吴溢凡, 李玉刚, 等. 掺氢天然气管道氢致损伤及检测技术研究现状 [J]. *材料导报*, 2025, 39(10): 193-200.
- LIU ZH T, WU Y F, LI Y G, et al. Research status of hydrogen damage and detection technology in hydrogen-doped natural gas pipelines [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(10): 193-200.
- [18] CAMPARI A, USTOLIN F, ALVARO A, et al. A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(90): 35316-35346.
- [19] VIANA F F C L, ALENCAR M H, FERREIRA R J P, et al. Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(42): 18424-18440.
- [20] QIN G J, ZHANG ZH W, HOU X Q, et al. Condition assessment of underground corroded pipelines subject to

- hydrogen damage and combined internal pressure and axial compression [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 142: 105389.
- [21] QIU F, SHEN ZH Y, BAI Y ZH, et al. Hydrogen defect acoustic emission recognition by deep learning neural network[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 54: 878-893.
- [22] SHIRAIWA T, KAWATE M, BRIFFOD F, et al. Evaluation of hydrogen-induced cracking in high-strength steel welded joints by acoustic emission technique[J]. *Materials & Design*, 2020, 190: 108573.
- [23] TAKEDA S, OHARA Y, UCHIMOTO T, et al. Characterization of fatigue crack of hydrogen-charged austenitic stainless steel by electromagnetic and ultrasonic techniques[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(75): 32223-32234.
- [24] HU H, HU X, JIANG W, et al. Research on hydrogen-induced damage detection technology using shear horizontal SH0 mode nonlinear ultrasonic guided waves[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2025: 1-35.
- [25] ZHOU H T, HUANG H D, YE D D, et al. The impact of hydrogen on mechanical performance of carbon alloy plates detected by eddy current method[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023, 38(4): 683-699.
- [26] BELLEMARE J, MÉNARD D, SIROIS F. Detection of hydrogen embrittlement in plated high-strength steels with Eddy currents: Is the sensitivity sufficient? [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39(2): 46.
- [27] 张家轩, 王财林, 刘翠伟, 等. 掺氢天然气环境下管道钢氢脆行为研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 76-88.
- ZHANG J X, WANG C L, LIU C W et al. Research progress on hydrogen embrittlement behavior of pipeline steel in the environment of hydrogen-blended natural gas[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 76-88.
- [28] MAILLET E, BAKER C, MORSCHER G N, et al. Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 75: 77-83.
- [29] 李伟, 邵鑫宇, 张伯莹, 等. 交流电磁场和电磁超声复合无损检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(16): 153-159.
- LI W, SHAO X Y, ZHANG B Y, et al. Research on composite ACFM and EMAT nondestructive testing technology [J]. *Journal Of Mechanical Engineering*, 2022, 58(16): 153-159.
- [30] 靳建辉, 张卿, 韩博, 等. 复杂裂纹涡流检测与评估方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(2): 280-288.
- JIN J H, ZHANG Q, HAN B, et al. Research on eddy current testing and defect evaluation methods for complex cracks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(2): 280-288.
- [31] 杨晓惠, 蒲海峰, 陈龙, 等. 基于扩展磁荷模型的埋地管道弱磁检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 218-226.
- YANG X H, PU H F, CHEN L, et al. Weak magnetic detection method on the buried pipeline based on the extended magnetic charge model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(5): 218-226.
- [32] LIU B, SUN J Y, HE L Y, et al. Quantitative study on internal detection signal of weak magnetic stress in oil and gas pipelines based on force-magnetic noncoaxial effect[J]. *Measurement*, 2023, 215: 112870.
- [33] 闵希华, 杨理践, 王国庆, 等. 长输油气管道弱磁应力内检测技术[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 19-27.
- MIN X H, YANG L J, WANG G Q, et al. Weak magnetism stress internal testing technology of the long distance oil-gas pipeline [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 19-27.
- [34] LIU B, TIAN R F, YU H, et al. Research on the characteristics of weak magnetic internal detection signals for critical damage in pipeline stress based on density functional theory [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 159: 108145.
- [35] LIU B, ZHANG H, ZHANG B Q, et al. Investigating the characteristic of weak magnetic stress internal detection signals of long-distance oil and gas pipeline under demagnetization effect[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 3112782.
- [36] BAHADORI A. Oil and gas pipelines and piping systems: Design, construction, management, and inspection[M]. Gulf Professional Publishing, 2016.
- [37] 王思远, 梁添寿, 时朋朋. 金属磁记忆应变诱导磁性变化的原子尺度作用机理[J]. *物理学报*, 2022, 71(19): 305-315.
- WANG S Y, LIANG T SH, SHI P P. Mechanism of strain-induced magnetic properties changes for technology on atomic scale metal magnetic memory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(19): 305-315.
- [38] YANG L J, LIU B, CHEN L J, et al. The quantitative interpretation by measurement using the magnetic memory

- method (MMM)-based on density functional theory[J]. NDT & E International, 2013, 55: 15-20.
- [39] HE L Y, HAN L CH, LIU B, et al. Mechanism of strain-induced magnetic signal change in ferromagnetic materials under weak magnetic environment[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 606: 172362.
- [40] YU M H. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century [J]. Applied Mechanics Reviews, 2002, 55(3): 169-218.
- [41] DELL'ISOLA B F, SCIARRA G, VIDOLI S. Generalized Hooke's law for isotropic second gradient materials [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009, 465(2107): 2177-2196.
- [42] SUBRAMANIAN K. The origin, evolution and signatures of primordial magnetic fields[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076901.
- [43] VAN VLECK J H. A survey of the theory of ferromagnetism[J]. Reviews of Modern Physics, 1945, 17(1): 27.
- [44] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 碳素结构钢: GB/T 700—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Carbon structural steels: GB/T 700—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [45] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2008[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Low alloy high strength structural steels: GB/T 1591—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [46] BELANGER A, BARKER T. Multiple data inspection of hard spots and cracking[C]. 10th International Pipeline Conference 2014, 2014, 46117: V002T06A02.
- [47] SUN Y H, CHENG Y F. Hydrogen-induced degradation of high-strength steel pipeline welds: A critical review[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 133: 105985.
- [48] ANIJ DAN S H M, ARAB G, SABZI M, et al. Sensitivity to hydrogen induced cracking, and corrosion performance of an API X65 pipeline steel in H₂S containing environment: Influence of heat treatment and its subsequent microstructural changes [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 1-16.

作者简介



武梓涵 (通信作者), 2017 年于辽宁石油化工大学获得学士学位, 2020 年于辽宁石油化工大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论。

E-mail: wuzihan@smail.sut.edu.cn

Wu Zihan (Corresponding author) received his B.Sc., and M.Sc. degrees both from Liaoning Shihua University in 2017, and 2020, respectively. He is currently pursuing his Ph.D. degree at Shenyang University of Technology. His research interests include line, inspection technologies and related theories for long-distance oil and gas pipelines.



刘斌, 分别于 2004 年、2007 年、2013 年于沈阳工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为沈阳工业大学信息科学与工程学院院长、“翔源学者”特聘教授、博士生导师。主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论研究。

E-mail: 13998284051@163.com

Liu Bin received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Shenyang University of Technology in 2004, 2007, and 2013, respectively. He is currently the dean of the School of Information Science and Engineering at Shenyang University of Technology. He is a “Xiangyuan Scholar” distinguished professor and a Ph.D. advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include stress internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline and Related theoretical research.