

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2104541

弱磁检测技术研究进展与展望*

李博阳 廖柯熹 何国玺 何腾蛟
(西南石油大学石油与天然气工程学院 成都 610500)

摘 要:弱磁检测技术是以铁磁材料力磁耦合效应为原理,通过采集构件表面自漏磁场信号,对铁磁材料的应力集中、早期损伤等进行诊断的无损检测技术。其主要优点包括无需激励磁化设备、无需提前处理构件表面、操作简单等等。梳理了近 5 年来弱磁检测方法研究进展,总结了缺陷处磁信号描述与计算方法,重点分析了利用弱磁检测技术判断与定位缺陷、缺陷损伤评判准则等方面的主要研究成果,陈述了缺陷定量化反演的进展,最后讨论了弱磁检测技术在工程上的应用现状。基于此,对弱磁检测技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词:弱磁检测;铁磁材料;缺陷;损伤评价参数

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440. 55

Research progresses and prospects of weak magnetic testing technology

Li Boyang Liao Kexi He Guoxi He Tengjiao
(School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Weak magnetic detection technology is a nondestructive technique based on the magnetic-force coupling effect. By measuring and analyzing the magnetic signal on the surface of the material, the stress concentration, early damage, and degree of damage in the ferromagnetic material can be readily detected and evaluated. The main advantage of the weak magnetic detection technology include no manual magnetization or attached sensor, no surface treatment of component, simple operation and so on. Based on the weak magnetic detection technology in the past 5 years, a theoretical model of the technology was established and the progress made in the description and calculation methods of magnetic signals at defects, the damage assessment criteria in judging and locating defects, the progress of quantitative inversion of defects and so on. Finally, the engineering applications status of this technology was discussed. Based on this review, the future research directions of weak magnetic detection technology were proposed.

Keywords: weak magnetic testing technology; ferromagnetic materials; detect; damage evaluation parameter

0 引 言

弱磁检测技术是能够诊断铁磁材料早期应力集中和早期损伤的无损检测方法,其目的在于定位构件的应力损伤位置以及评价早期应力损伤程度。其原理在于:在地磁场和外载荷的作用下,铁磁构件内部磁畴发生了可逆或不可逆的重新取向,导致铁磁构件总磁矩变化,在应力集中区形成自漏磁场。通过检测材料表面磁信号的变化来检测铁磁构件内部损伤。因此该技术直接检测构件

的应力状态而非缺陷的几何尺寸。与其他无损检测技术相比,弱磁检测技术的优势包括:设备轻便简单、方便携带;无需专门充磁装置,在天然地磁场下即可检测,检测效率高;不需提前清理被测构件表面;可多次重复检测等等。

本文综述了近 5 年来弱磁检测技术研究最新进展。总结了缺陷处磁信号描述与计算方法,重点分析了利用弱磁检测技术判断与定位缺陷、缺陷损伤评判准则方面的主要研究成果,陈述了缺陷定量化反演的进展。最后展望了弱磁检测技术试验研究、缺陷损伤评价、工程实际

应用等方面未来研究发展的总体趋势。

1 缺陷磁信号描述与计算

弱磁检测技术的关键问题之一是确立缺陷形状、大小和性质等与表面弱磁信号间对应关系。目前描述铁磁材料表面缺陷产生的自漏磁场的研究方法主要有两种：基于磁偶极子模型的解析计算法和基于 Maxwell 方程组的有限元数值模拟法。

1.1 基于磁偶极子模型的解析法

基于磁偶极子模型的正演解析法,是用来计算形状规则的缺陷产生的自漏磁场。其基本思想是:缺陷产生的自漏磁场可认为是缺陷槽壁上,数量相等但极性相反的偶极子产生。因此计算任意位置处磁感应强度,就是对整个缺陷槽壁上所有正负磁荷在该点产生的磁场进行单元积分计算。由于缺陷形貌差异导致磁荷分布不同,磁偶极子模型可分为:点偶极子、线偶极子、面偶极子模型。与漏磁检测等强电磁类检测技术中磁荷方法相比,弱磁化状态下磁偶极子模型的特点在于:磁荷密度 ρ_m 可通过求解力磁耦合关系中的磁化强度 M 而近似获得数值,而只能借助归一化处理或经验公式计算两种手段。

Roskosz 等^[1]首次引入标量磁位求解麦克斯韦静磁方程。认为应力磁化状态下,磁偶极子在 r 点产生的弱磁场由体磁荷密度和表面磁荷密度共同引起的,表达式如式(1)所示。

$$H_m(r) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{-\nabla \cdot \mathbf{M}(s)}{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{s}) dV + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{M}(s)}{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{s}) dS \quad (1)$$

其中, V 和 S 分别代表铁磁体体积和表面积。Wang 等^[2]假设应力集中区应变和磁荷密度呈线性关系,即磁荷密度在应力集中区中部达到最大值并在边缘线性减小到零。磁荷密度分布如式(2)所示。

$$\rho(m, n) = \begin{cases} (x+b)\rho_{\max}/b & x \in [-b, 0], y \in [0, -d] \\ (x-b)\rho_{\max}/b & x \in [0, b], y \in [0, -d] \\ 0 & \text{其余位置} \end{cases} \quad (2)$$

Shi 等^[3]考虑缺陷的宽度尺寸,将 Wang 等^[2]建立的二维模型改进为包含缺陷长度、宽度和深度尺寸的三维体磁偶子模型。图1为局部应力集中的磁荷模型。

Li 等^[4]建立了极坐标下椭圆圆柱缺陷三维磁偶极子模型。通过改变椭圆长轴和短轴的长度和两者比值,模拟多种形状缺陷的自漏磁场。Xia 等^[5]建立实心圆柱状铁磁体表面扇形立方体缺陷的三维磁偶极子模型,同时该模型考虑了扇形凹槽侧壁磁荷不均匀分布。吴德会

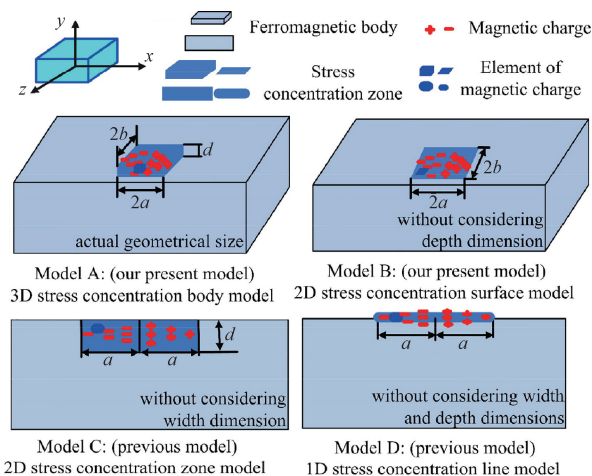


图1 局部应力集中的磁荷模型^[3]

Fig. 1 Magnetic charge models for the local stress concentration^[3]

等^[6]建立了适用于计算任意缺陷方向的表面缺陷磁场三维数学模型,该模型可分析缺陷方向性对磁场分布影响。Su 等^[7]在文献[3]的基础上,提出了一种应力相关磁荷模型。假设缺陷各处相对磁导率均相等且恒定,从而忽略了体磁荷密度,即 $\nabla \cdot \mathbf{M} = 0$ 。使式(1)可直接求解。式(3)为改进后表面自漏磁场计算模型。

$$H = \int_s \frac{M}{4\pi |\mathbf{r}|^3} r dS \quad (3)$$

时朋朋等^[8]建立了适用于裂纹产生前后的力磁耦合型偶极子模型。基于弱磁化状态一阶近似,建立了不饱和和磁化状态下磁化强度与外加磁场、外加应力间关系式,以求解缺陷的面磁荷密度。式(4)为弱磁化状态下磁化强度 M 表达式:

$$M(\sigma, H_0) = \frac{\mu_0 H_0 M_s^2}{3\alpha\mu_0 - \alpha\mu_0 M_s^2 - 3\sigma\lambda_s(1 - \beta \frac{\sigma}{\sigma_s})} \quad (4)$$

Wang 等^[9]建立一种考虑圆柱形通孔周围应力分布的改进磁偶极子模型。使用 Timoshenko 模型求解圆柱形通孔周围应力分布,随后采用 J-A 模型确定磁化强度数值。Han 等^[10]针对“塑性变形区表面磁信号法向分量只有一个峰值”的实验现象,提出一种适用于局部塑性变形区的双偶极子模型。异常磁源由局部塑性变形区边缘产生,且磁标量势峰值受试件应力状态和挠度影响。Li 等^[11]考虑内压作用下管道环向、轴向应力,建立了管道缺陷弱磁信号空间分布模型。将矩形缺陷壁微元产生自漏磁场沿管道环向和轴向进行积分计算。Yang 等^[12]建立了 V 形对接焊接接头一维磁偶极子模型。Liu 等^[13]考虑到管道内部裂纹应力分布不均导致的磁荷分布不均匀,假设磁荷密度与裂纹长度成线性分布,建立了管道内

裂纹弱磁信号分布模型。式(5)、(6)分别为管道环向、径向裂纹自漏磁场分布计算表达式。

$$H_r = \int_0^b dy \int_0^d \frac{[\rho_{\max}(\frac{m}{d})z + (1 - \frac{m}{d})\rho_{\max}](z_0 - z)}{2\pi\mu_0[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]} dz \quad (5)$$

$$H_a = \int_{-c}^c dx \int_0^d \frac{[\rho_{\max}(\frac{m}{d})z + (1 - \frac{m}{d})\rho_{\max}](x - x_0)}{2\pi\mu_0[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]} dz \quad (6)$$

虽然磁偶极子模型能较好地建立形状规则的缺陷与自漏磁场间关系,但该模型存在明显不足导致计算得到的磁信号强度在数值上与实际存在很大差距。首先,实际缺陷中磁荷并非均匀分布;其次,实际缺陷形状复杂多样,磁偶极子模型中的大量假设不成立;最后,磁偶极子模型未考虑材料的非线性^[14]。因此在实际应用中仅根据该模型描述磁信号的波形分布,而不能定量揭示弱磁信号与缺陷尺寸间关系。

1.2 有限元数值模拟法

大量学者利用基于有限元模拟的力-磁顺序耦合法对缺陷表面弱磁信号进行正演求解。相较于磁偶极子模型,有限元模拟法能准确分析实际工程中复杂形状缺陷的自漏磁场。有限元数值模拟包括静力学分析、静磁学分析、力磁耦合分析3个模拟阶段。具体步骤为:首先通过静力学模拟,得到铁磁结构各单元点应力与位移。随后基于磁机械耦合模型中应力与磁导率的关系,根据每单元应力的大小,计算并导入各节点的相对磁导率。然后利用磁学有限元方法,构建空气域并施加地磁场,求解各节点上磁标势大小。最后计算各位置处磁场强度分布。

苏三庆等^[15]对四点受弯作用下 Q235b 工字钢梁进行了力-磁耦合有限元模拟,得到了均布荷载作用下,两端固结钢梁磁信号和其梯度分布情况。并在文献[16]中为研究地磁场方向变化对磁信号影响,分别模拟了3种不同方式下,试件转动不同角度时,试件的初始状态和屈服后的磁信号。Hu 等^[17]用有限元方法求解了钛合金表面缺陷处磁信号强度。发现了弱磁检测技术下钛合金缺陷存在临界宽度 0.6 mm,若缺陷宽度大于 0.6 mm,信号强度随缺陷宽度增加而减小,检测灵敏度下降。随后在文献[18]中模拟了 304 奥氏体不锈钢在弹塑性变形全阶段过程中磁信号变化。图 2 为实验测得塑性变形阶段中采集磁感应强度随应变的变化曲线。

闫卓然等^[19]利用 ANSYS 软件模拟了内压作用下,不同腐蚀间距和腐蚀深度管道缺陷表面弱磁信号分布。并提出利用三方向磁信号梯度波形形状来定位管道缺陷的准则。Yao 等^[20]利用磁滞曲线中的矫顽力,采用有限

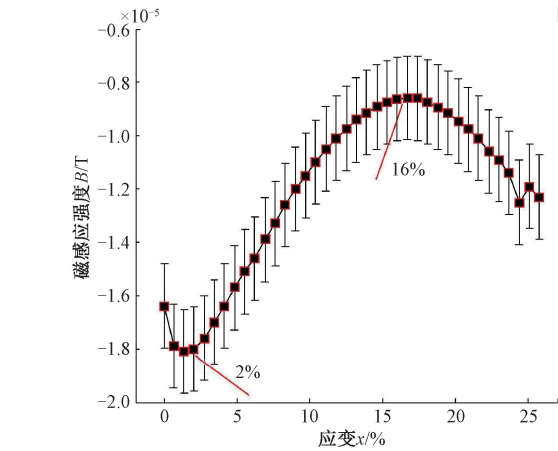


图 2 塑性变形阶段磁感应强度随应变的变化曲线^[17]
Fig. 2 Variations of magnetic field following strain in the plastic deformation^[17]

元法模拟了塑性变形对磁信号影响。提出了利用磁信号特征判断构件进入塑形变形阶段的新依据,以及利用磁信号梯度分辨构件内部处于塑性变形阶段还是已经断裂的新方法。李忠吉等^[21]考虑体积型缺陷处磁荷实际不均匀分布,通过有限元模拟得到应力分布后,通过计算每单元磁荷分布矩阵来得到缺陷每单元三分量磁信号。该方法将磁信号模量梯度峰值误差降低至 6.9%。Zhou 等^[22]对二维矩形、圆柱形、圆锥形和球形缺陷处磁信号进行了有限元模拟,并利用图像处理软件得到了不同类型缺陷引发磁信号分量云图。He 等^[23]利用 COMSOL 软件建立了管道环焊缝三维磁信号有限元分析模型,得到了不同内压、不同高度下环焊缝三维磁信号变化规律。表 1 对比了上述两种弱磁信号计算与描述方法优缺点。

表 1 两种弱磁信号计算方法优缺点对比
Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages of two calculation methods of weak magnetic signal

	基于磁偶极子模型的解析法	有限元数值模拟法
优点	1) 模型计算简单,能够较好地计算形状规则的缺陷处弱磁场; 2) 很好地反应缺陷处弱磁场分布特征。	1) 能够精确计算任意类型缺陷在任意空间点弱磁场的数值大小; 2) 计算基于力磁耦合关系,计算结果精确。
缺点	1) 在弱磁场大小上,计算结果误差较大; 2) 不适用于形状不规则的复杂类型缺陷。	1) 求解过程复杂。

2 弱磁检测技术的缺陷判断与定位

在地磁场和外载荷的作用下,铁磁构件内部磁畴发生可逆或不可逆的重新取向,导致铁磁构件总磁矩变化,

在应力集中区形成自漏磁场。铁磁构件应力集中区表面自漏磁场切向磁信号 $H_p(x)$ 具有最大值,法向磁信号 $H_p(y)$ 改变符号且经过零点。这种变化是不可逆的,在工件不受其他载荷作用时会继续保留。因此在工程应用上通常采用“法向磁信号 $H_p(y)$ 改变符号且过零点”的特征定位缺陷。但大量试验发现并不是所有的应力集中区弱磁信号法向分量都过零点。该特征不仅在线加载检测中数目不唯一、位置不固定^[24],而且完全不适用于定位受扭转作用下的缺陷^[25]。因此仅依据法向分量的零点特征并不能准确指示缺陷位置^[26-27]。

当前大多数研究选择使用基于切向或法向分量磁梯度分量的磁特征参数或者多维度空间磁特征参数来定位缺陷。Yi 等^[28]试验证明了法向磁信号梯度峰值位置即可判定为缺陷位置。Bao 等^[29]分别对含圆形缺陷、矩形缺陷平板试件进行静载拉伸试验。认为基于法向磁梯度值的特征参数比切向磁梯度特征参数更适合定位缺陷。这一观点也在 Liu 等^[30]的试验中得到了证实。刘志峰等^[31]选取了切向分量磁梯度曲线中的峰、谷值横坐标 X_{l1} 、 X_{lr} 及峰-谷横坐标之差 W_{lr} 为磁特征参数,用来定位缺陷边缘。实现了利用缺陷外侧磁信号定位内表面缺陷。Su 等^[32]提出法向磁信号梯度最大值 K_{max} 和平均值 K_{med} 之间比值 m 为磁特征参数, m 曲线发生剧烈上升的位置可判定为焊缝缺陷。Li 等^[33]采用含中心裂纹平板试件进行了循环疲劳实验。发现了开始拉伸至试件断裂,磁信号切向分量和法向分量出现了两次信号反转,根据信号出现反转特征的位置可定位裂纹。Li 等^[34]证明了铁磁管道缺陷位置处,同一方向上的磁感应强度梯度模量 G_M 发生了突变。即梯度模量 G_M 最大值位置即可定位为缺陷。Su 等^[35]对 Q235B 工字梁进行了四点弯曲试验,发现通过“翼缘磁场梯度各段曲线斜率突变点”和“腹板磁场梯度过零点”两大特征可判断应力集中位置。邢海燕等^[36]引入了隐性损伤的梯度衰减函数,建立了基于粒子群最大似然估计的焊缝隐性损伤精确定位模型。验证结果表明该算法定位误差仅为 3.48%。陈海龙等^[37]引入了磁梯度张量信号,发现了磁信号梯度张量和梯度模量局部波数分别在缺陷边界和中心出现明显峰值。可根据异变峰值位置定位缺陷。

部分学者尝试通过解析检测磁信号,区分应力集中损伤和体积型缺陷。Le 等^[38]提取同一试件在不同拉伸载荷下的弱磁信号间差值曲线。发现应力集中区磁信号一阶差分曲线形状平整光滑且变化连续。而圆孔周围磁信号一阶差分曲线形状非光滑不连续,法向分量差分曲线 ΔH_z 峰值两侧存在两个凸起的极大值,且极大值间距 w 等于试件表面圆孔的直径,如图 3 所示。因此可根据差值曲线形状有效区分体积型缺陷和应力集中区。

Chen 等^[39]发现裂纹边界处磁信号总梯度模量衰减

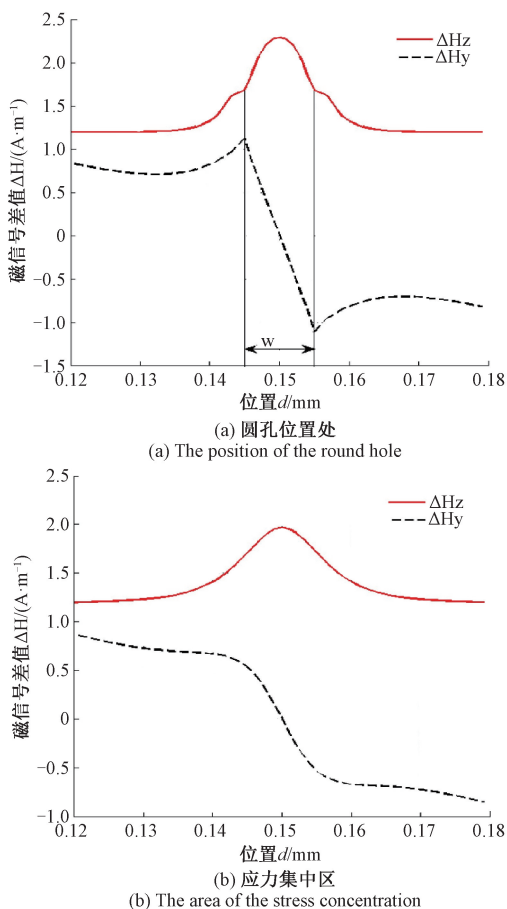


图 3 两种类型缺陷处采集切向磁信号、法向磁信号差值曲线分布图^[38]

Fig. 3 The difference of axial magnetic signal and normal magnetic signal of two types of defects^[38]

速度和幅度远大于应力集中处。因此可在不同提高高度下采集磁信号,分析损伤边界处总梯度模量衰减情况,准确区分裂纹和应力集中缺陷。图 4 为不同提高高度 h 下,裂纹(2#,3#)和应力集中处(1#)的边界处归一化磁梯度模量 C_h^{max}/C_h^{max} 测试曲线。

万勇等^[40]提出一种磁信号多特征量阈值统计与识别方法。通过大量室内试验分别得到应力集中和腐蚀缺陷的磁特征量阈值范围。通过将现场采集的磁信号与多特征量阈值比较,用来区分管道腐蚀缺陷和早期应力集中。现场应用证明该方法缺陷类型正确识别率达到 80% 以上。

3 弱磁检测技术的缺陷损伤评判

3.1 弱磁信号表征应力集中程度的研究

为利用磁信号表征缺陷位置的应力集中程度,学者们开展了大量试验研究,主要包括静载试验和疲劳试验

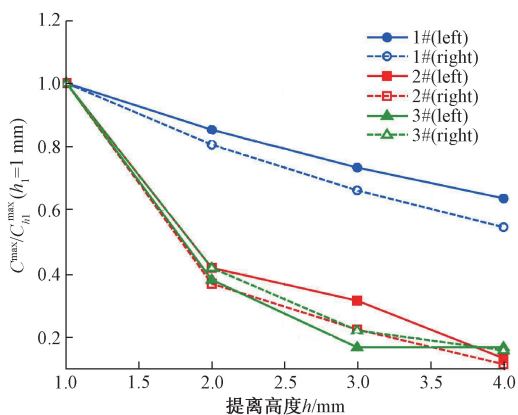


图4 不同提高高度 h 下,裂纹和应力集中处归一化磁梯度模量变化曲线^[39]

Fig. 4 Curve of normalized magnetic gradient on the boundary of crack and stress concentration at different lift-off heights h ^[39]

两种^[41]。学者们对采集磁信号进行数学处理,从不同角度提出了各种磁信号特征参量,其中各分量梯度值应用最广泛,达到了定量评价材料应力集中程度的目的。

Huang 等^[42]最早提出利用法向磁场分量梯度最大值 $K_{\max}(x)$ 表征缺陷位置处应力集中程度。Bao 等^[43]对不同应力集中程度下的含缺陷钢试件进行拉伸试验。发现仅在塑形变形阶段,剩余磁场 RMF 3 方向分量的最大梯度 $K_{\max}$ 与缺陷应力集中系数成线性关系。在弹性阶段,引入基于法向磁场最大梯度的经验参数 β 。该参数与应力集中系数和缺陷面积成线性关系。且具有良好的数值稳定性,不受缺陷形状影响,适用于定量评价应力集中程度^[44]。在后续研究^[45]中推荐磁异常变化范围内的切向磁信号曲线下方与 x 轴围成的面积 A_m ,与整个切向磁信号曲线下方面积 A_0 之间的比值 α 评价应力集中程度。并通过含 U 形缺口平板试件的拉伸实验数据,拟合成经验公式。Fu 等^[46]提出基于切向磁信号的磁特征参数 α_m (同一采集线上切向磁信号最小值与切向信号平均值之间比值) 表征缺陷应力集中程度。且 α_m 不受拉伸载荷大小的影响。Li 等^[47]分别对含穿孔、半穿圆形槽和边缘切槽的 X80 钢施加单轴拉伸荷载至塑性变形。建立了切向弱磁信号峰谷值之差 B_z 与最大塑性应变 E_z 之间的经验公式,可定量评价含缺陷 X80 钢应力集中程度。易术春等^[48]通过无缺陷钢板件静载拉伸试验,建立了磁场梯度指数 ξ 和荷载 σ 间的定量关系。同时指出法向磁信号梯度最大值算术平均值 $K_{\max\text{avg}}$ 可反映试件损伤程度,磁场梯度指数 ξ 可表征构件应力状态。Xu 等^[49]认为随着外荷载增大,同一缺陷磁场强度及其梯度先减小后增大,在临界断裂阶段急剧增大。因此不能仅根据磁场强度及梯度变化特征来评价缺陷应力集中程度,必须考

虑外荷载大小及材料所处变形阶段。Wu 等^[50]提出两个新的垂直于载荷方向上的应力集中评价参数,以表征垂直于载荷方向上应力集中程度。张军等^[51]提出了封闭的法向相轨迹+法向梯度大小方法,半量化评估缺陷的应力集中状态。通过相轨迹是否封闭来判断并定位缺陷、通过封闭区最大梯度值判断应力集中程度。任吉林等^[52]构建切向及法向磁信号梯度值联合绘制的封闭李萨如图。当缺陷应力集中程度增大时,李萨如图中封闭环面积也增大。因此可利用李萨如图面积大小为准则定量描述缺陷应力集中程度。冷建成等^[53]提出了基于休哈特控制图的弱磁早期损伤诊断方法。该方法能够有效去除梯度波动干扰,并给出试件进入屈服阶段时的准确异常预警范围。

3.2 弱磁信号表征疲劳损伤的研究

利用弱磁信号判断裂纹萌生或扩展以防止结构疲劳损伤是近年来弱磁检测技术研究的重点方向。众多学者开展了各种形式的疲劳试验,例如拉-拉循环疲劳、拉-压循环疲劳、动态弯曲循环和旋转弯曲疲劳等。观察裂纹扩展过程中,磁信号变化特征,并与损伤程度、应力强度因子、扩展长度等多个疲劳损伤参数进行拟合。最终达到定量评价疲劳损伤程度、计算剩余寿命的目的。

Liu 等^[54]发现随着疲劳循环次数增加,轴向磁信号平均值 $B_{x,\text{ave}}$ 与法向弱磁信号 B_z 梯度值 K_z 变化程度很小,均适合评价钢材早期疲劳损伤程度。图 5 为实验测得,4 种不同拉伸荷载下,拉伸过程中,法向磁梯度值 K_z 随剩余寿命变化曲线。

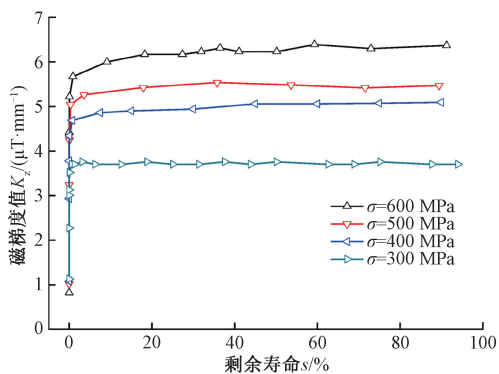


图5 法向磁梯度值 K_z 随剩余寿命变化曲线^[54]

Fig. 5 Variations of normal magnetic gradient K_z following the remaining life^[54]

Li 等^[33]采用中心裂纹循环疲劳实验,讨论疲劳寿命与磁信号两分量间定量关系。使用“切向磁信号峰值 B_{ip} ”与“法向磁信号两个峰值间最大梯度值 K_m ”两个磁特征参数评价疲劳损伤程度并预测裂纹扩展。Ni 等^[55]通过含单边预切裂纹的 35CrMoA 试样的三点弯曲疲劳

试验,建立了 N 个加载循环周期下的磁信号梯度曲线 K_r 的面积与合金损伤程度 D 间定量关系,以利用磁信号梯度 H_{py} 和损伤参数 D 预测含裂纹合金钢的疲劳寿命。Zhang 等^[56]建立多个疲劳裂纹扩展参数与切向磁信号梯度 G 间定量关系式,以预测疲劳裂纹应力强度因子、扩展长度、扩展速率和剩余寿命等多个力学性能。实验证明该模型误差在 20% 以内。Zhao 等^[57]研究了四点弯曲疲劳载荷下, Q345B 工字型钢梁表面裂纹扩展过程中磁信号变化过程。提出了使用切向磁信号峰谷值之差 $\Delta H_p(y)$ 作为构件断裂失效前的预警参数,使用磁信号梯度最大值与梯度绝对平均值间比值 m 判断裂纹是否扩展。Su 等^[58]基于低周疲劳试验,选取法向磁分量拟合曲线斜率 K 为磁特征参数与累积塑性损伤 D 进行拟合。并考虑材料参数、提高高度等多因素改进表达式。该模型可通过磁信号定量计算低碳钢在低周疲劳下的累积塑性应变。任尚坤等^[59]采用不同检测方向下磁场矢量合成梯度峰值和均值作为评价焊件疲劳损伤程度的特征量。建立两个磁特征参数与疲劳剩余寿命 N_r 间拟合公式,实现了定量评估含隐形缺陷的焊件疲劳寿命。Huang 等^[60]通过 Q235 含缺口焊接试件动态弯曲疲劳试验,证明了焊接接头位置处磁信号最大梯度 $K_{\max}$ 随裂纹长度呈指数关系增加。且最大梯度值 $K_{\max}$ 可作为监测弯曲载荷下焊接件裂纹扩展的磁特征参数。图 6 为实验测得,加载周期 N 由 20 000 增加至 30 000 的过程中,裂纹长度 L 与法向磁信号最大梯度值 $K_{\max}$ 变化曲线。

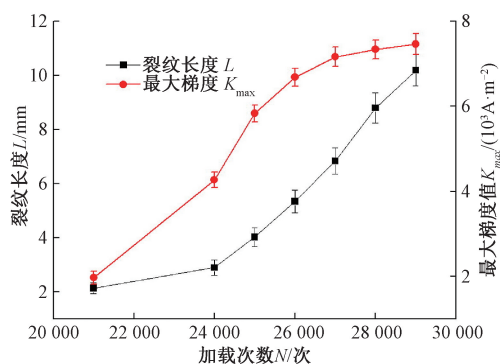


图 6 裂纹长度 L 与最大梯度 $K_{\max}$ 随加载次数变化曲线图^[60]

Fig. 6 Variations of crack length L and maximum gradient $K_{\max}$ following cycle N ^[60]

Qian 等^[61]引入内聚力模型中牵引力-位移本构关系,分别建立静态和疲劳载荷作用下内聚力-磁机械耦合模型来预测界面裂纹萌生和扩展。并提出磁特性参数 $dH_{\max}/dN$ 量化表征界面裂纹扩展速度。拟合公式如式(7)所示。

$$\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = \lg C_2 + m_2 \lg\left(\frac{dH_{\max}}{dN}\right) \quad (7)$$

邢海燕等^[62]引入李萨如图提取焊缝隐性损伤临界状态磁信号特征。基于不同疲劳循环周次下磁信号梯度 K ,建立正交矢量梯度比 K_r 与剩余寿命 N_r 间定量关系,以定量评价焊缝隐性损伤出现后的剩余寿命。朱达荣等^[63]采用小波变换包对检测磁信号依次进行降噪、分解和重构。提取了小波包能量、奇异性指数、磁信号梯度峰值作为评估构件疲劳损伤的特征量。冷建成等^[64]将多尺度模糊熵引入到磁信号提取中。计算了不同损伤状态下的模糊熵值。采用高斯函数拟合得到了磁信号多尺度模糊熵值 MFE 与疲劳周次 N 之间定量关系,实现了定量评估铁磁材料疲劳累积损伤程度。拟合公式如式(8)所示。

$$MFE = y_0 + Ae^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg N - x_c}{w}\right)^2} \quad (8)$$

Liu 等^[65]提取了疲劳过程中法向磁信号及梯度的样本熵特征,并与损伤因子 D 进行拟合,得到了基于样本熵的损伤状态量化模型。邢海燕等^[66]引入了多种信息熵及熵带进行焊缝位置磁信号特征提取。建立了基于信息熵带和 D-S 证据理论联合的焊缝等级弱磁检测量化模型。实验证明该方法计算得到的焊缝缺陷等级识别的不确定度为 0.008。

4 弱磁检测的缺陷定量化反演计算

弱磁检测缺陷定量化反演分析是运用反演迭代算法,通过对检测磁信号进行处理与训练,得到缺陷的形貌尺寸。其中运用最广泛的是模式匹配法:首先通过有限元模拟或室内试验,获得已知缺陷处的磁信号特征值,如峰谷值间距、磁异常幅值、磁异常峰-峰值等作为预测值。随后基于 SVM 算法或 BP 神经网络对样本值进行计算与训练,逐步调整缺陷参数,使弱磁信号理论值与预测信号间误差达到最小。最终实现缺陷几何参数的预测与判断。

Shi 等^[67]基于共轭梯度迭代法和精确线搜索算法对缺陷尺寸和位置同时进行定量化反演,证明了该算法重构结果误差明显小于梯度重构算法。同时分析了弱磁信号完备性、采样间隔、提高值等因素对定量化精度的影响。郭萌梦等^[68]提取了 16 组缺陷信号磁异常特征值为输入值,建立了多类分类支持向量机 Libsvm 反演模型。反演结果表明该算法缺陷宽度反演效果最好,精度达到了 92.708 3%。李思岐等^[69]引入了模拟退火智能算法,优化支持向量回归机算法(SVM)中参数,建立了多层结构的支持向量回归机焊缝缺陷弱磁定量反演模型。反演结果表明:未焊透缺陷尺寸最大相对误差为 7.96%,夹渣缺陷为 4.97%。Fu 等^[70]将研究对象转变为 304 奥氏体不锈钢裂纹,采用支持向量机(SVM)算法训练。结果

证明该算法量化缺陷宽度、长度和深度准确率为 92.71%、80.69% 和 65.63%。Shi 等^[71] 实验比较了 SVM 算法、神经网络、粒子群优化后的 SVM 算法对管道缺陷深度和半径的反演效果与精度。结果表明:粒子群优化后 MLS-SVM 算法反演精度最高。与 SVM 算法相比,缺陷深度反演误差降低了 49.07%,半径误差降低了 79.77%。邢海燕等^[72] 建立遗传算法优化后的 BP 模型对焊缝等级进行弱磁信号定量评价及分级。

但与此同时,国外部分学者对基于磁信号的缺陷尺寸反演及应力量化评价研究持质疑或反对意见。具体原因包括:1) 缺陷形貌的不连续性或缺陷位置处厚度减薄,导致整个采集过程中传感器与试件表面间距并不恒定,因此通过磁信号反演得到的缺陷厚度可能偏小^[73]; 2) 材料应力状态与弱磁信号间关系是非线性和非局部的。且实际工程中试件摆放方向、磁信号采集方向、周围铁磁物体干扰等诸多因素都会直接影响磁信号。缺陷尺寸的反演量化研究必须基于有限元模拟或室内拉伸实验,很难适用于工程应用中^[74]; 3) 局部磁场强度取决于 3 个独立变量:即磁化强度、缺陷位置处的几何不连续和磁导率,每个变量都可分为应力相关函数和非应力相关函数。且磁场大小受残余应力和剩余磁场的影响,皆与应力有关。因此通过反演弱磁信号对应力量化完全不可能^[75]。

5 弱磁检测技术的工程应用

5.1 弱磁检测技术在油气管道检测领域上的应用

Liu 等^[76-77] 首次将弱磁检测技术应用于油气管道内检测领域。基于能量守恒关系,建立了非饱和磁场下磁机械模型。证明了非磁饱和状态下,弱磁检测信号与应力呈一次线性关系。考虑提高高度对信号强度影响,引入 Boltzmann 修正因子改进磁力学模型。式(9)为检测磁信号 B_z 与应力 σ 间定量关系式:

$$B_z = \frac{1}{1 + e} \cdot \frac{3\sigma\lambda}{H} + \mu_0\mu_1 H \quad (9)$$

Liu 等^[78-79] 研究了弱磁检测技术在长输管道内部轴向裂纹内检测中应用。试验发现轴向裂纹磁信号特征变化大于环向裂纹磁信号,裂纹处磁信号对深度尺寸变化更敏感。考虑实际内压作用下,管道受多方向荷载作用,在文献[80]中引入材料应变能理论,建立了复杂应力状态下管道力-磁耦合模型。加压实验证明该模型计算得到的力磁变化率与实验结果误差率仅为 0.5%,远小于单向应力状态模型误差率 89.4%。图 7(a) 为 3 条采集路线下管道表面裂纹采集法向磁信号,图 7(b) 为 3 条采集路线下管道表面裂纹采集切向磁信号。

Song 等^[81] 由磁梯度张量理论推导缺陷处等效磁矩

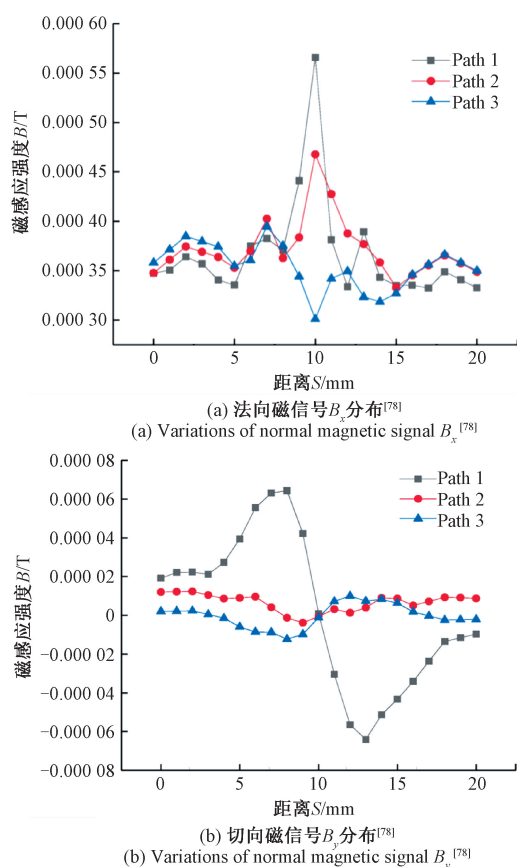


图 7 管道表面裂纹采集弱磁法向信号分布图^[78]

Fig. 7 Variations of the testing magnetic signal of pipeline surface crack^[78]

计算公式,并应用于埋地管道非接触式弱磁检测。现场实验证明等效磁偶极矩可定位埋地管道缺陷与识别缺陷几何形态,并定量评价缺陷应力集中程度。Li 等^[82] 试验研究了管道附近铁磁构件对管道弱磁信号干扰。建议清除磁通门传感器与管道间距两倍距离范围内的其他铁磁物体,否则干扰磁信号约比管道缺陷弱磁信号高约 2~3 倍。闵希华等^[83] 提出管道不同运行压力下两次弱磁内检测方法,并提出对应管道应力集中程度风险等级评价方法。龚灯等^[84] 以各项异性磁阻传感器 HMC5883 L 探头为核心,自主研发了一种基于弱磁检测方法的管道应力检测设备。Liu 等^[85] 引入“难、易磁化轴”的概念来改进环焊缝处磁化强度。提出了内压作用下,管道环焊缝内部磁信号定量计算模型。试验研究了管道环焊缝裂纹磁信号特征及影响因素。黄杰等^[86] 和曲杰等^[87] 使用各自开发的非接触式弱磁检测仪成功定位埋地管道环焊缝,误差小于 1 m。

本课题组致力于长输管道非接触式弱磁检测。基于 TMR 传感器,自主研发了一套非接触式管道磁力检测设备及配套管道缺陷定位与风险评价方法。通过在地面采

集埋地管道自漏磁场信号,达到判断管道应力安全状态的目的。廖柯熹等^[88]在地面采集管线自漏磁场信号以定位管道缺陷,计算磁异常综合指数 F 反应应力集中情况,对 $F>0.85$ 的点开挖并使用传统检测技术进一步检测。该方法直接量化管道应力水平,而非计算缺陷的几何参数^[89]。该技术同样利用磁信号曲线周期性定位管道环焊缝,并对管道环焊缝缺陷进行识别与评级^[90]。He等^[23]基于全尺寸管道水压实验,将环焊缝处检测磁信号与提离高度拟合,并引入修正因子建立定量表达式。提出了三方向磁梯度模量 K_w 来表征环焊缝应力状态,首次实现了环焊缝应力定量分析。

5.2 弱磁检测技术在钢筋检测方面的应用

赵亚宇等^[91]发现切向磁信号分量归一化峰值与腐蚀程度间关系拟合曲线成 Boltzmann 函数分布并给出拟合表达式。将磁信号切向分量峰值作为评判钢筋腐蚀程度的特征参量。江胜华等^[92]探讨钢筋自漏磁场梯度张量局部模量与钢筋锈蚀率间定量关系。通电锈蚀试验证明,该模型反演得到的钢筋锈蚀率与实测失重率间平均误差小于5%。Xia等^[93]考虑初始残余磁场和测量距离两因素影响,提出了新的无量纲磁信号损伤指标 X ,用来定量计算钢筋腐蚀率。Qu等^[94]提出基于同一测线上,相邻测点弱磁场大小的空间差分参数 S_w 。该磁特性参数与钢筋所受应力大小成高度线性关系,因此可定量计算钢筋真实应力。图8为实验测得弹塑性阶段钢筋空间差分磁特征参数 S 随应力 σ 变化曲线。

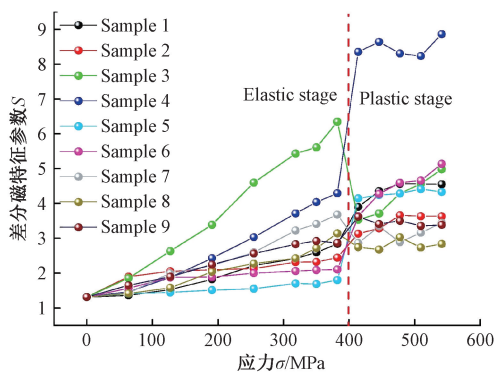


图8 空间差分磁特征参数 S 与应力 σ 间关系图^[94]

Fig.8 Relationship between the spatial difference magnetic characteristic parameter S and the stress σ ^[94]

Qiu等^[95]试验研究了腐蚀钢筋自漏磁场与抗弯强度间关系,并对比有无箍筋对钢筋腐蚀区自漏磁场影响。分别建立了基于磁信号峰值值的磁特征参数 $NBP(x)$ 与归一化抗弯强度 NBS 间半定量关系。并在文献^[96]中提出了一个不受剩余磁化强度、提离高度、箍筋等因素影响的磁特征参数 K 。基于18条腐蚀钢筋1775条弱磁检测结果,利用贝叶斯法建立了磁特征参数 K 与腐蚀钢筋

抗弯损失率 β 间定量关系。Xia等^[97]基于磁荷模型轴向弱磁信号表达式提出了磁特征参数 X ,以定量计算钢筋腐蚀损失率 α 。结合贝叶斯模型,提出了基于弱磁信号的电缆腐蚀程度的概率评估方法。

6 结 论

本文概述了近5年来弱磁检测技术研究最新进展,阐明了缺陷与磁信号之间关系研究新进展、基于磁信号的缺陷判断与定位研究新进展,探讨了弱磁检测技术的损伤评判,缺陷量化反演计算,总结了弱磁技术在工程中应用情况。但弱磁检测技术在很多方面有待完善,仍存在问题需进一步探讨。总体来说,弱磁检测技术未来发展趋势有如下几方面。

1)在试验研究方面,目前试验研究集中在材料弹性变形阶段下的单轴方向上的静载拉伸或疲劳循环试验。受载形式过于单一。而实际工程中的铁磁构件往往受到各个方向、大小不定的拉压应力,并可能受到弯矩、剪力和交变荷载等复杂应力。此时单向应力状态力磁耦合模型已不能适用。因此今后应开展复杂应力状态下的弱磁检测试验研究。试验对象不拘泥于平板试件,而是针对不同构件,开展实际工况下的全尺寸试验。

2)在缺陷损伤评价方面,现阶段大多选用单方向的标量磁信号作为特征参数。而缺陷产生的磁场是三维空间变化的张量场。单一的标量特征割裂了不同方向磁场分量之间的联系,不能全面而准确地囊括所有缺陷信息。因此有必要探讨多维磁信号与应力损伤间对应关系。引入张量场以及包含3个方向上的多维空间磁特征参数,例如:磁梯度张量、磁梯度模量等等。研究合理的多维磁信号的数据处理分析方法,探索出表征应力集中程度的多维磁信号特征量。

3)在弱磁技术工程应用方面,检测磁信号极易受外界其他铁磁物体的干扰。因此有必要对磁检测信号进行降噪处理。开发多种自适应滤波降噪方法,从含噪声的原始信号源中提取缺陷的完整磁信号,保留缺陷特征信号的完整性。

参考文献

- [1] ROSKOSZ M, BIENIEK M. Analysis of the universality of the residual stress evaluation method based on residual magnetic field measurements [J]. NDT & E International, 2013, 54(2): 63-68.
- [2] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration [J]. NDT & E International, 2010, 43(6): 513-518.
- [3] SHI P P, ZHENG X J. Magnetic charge model for 3D

- MMM signals [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, 31(1): 45-60.
- [4] LI C J, LI ZH J, JIA W L. Theoretical study on the characteristics of self-magnetic flux leakage signals from pipeline defects [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2019, 61(9): 536-541.
- [5] XIA R CH, ZHANG H, ZHOU J T, et al. Studies on the spatial location method of corrosion defect in bridge cable considering self-magnetic flux leakage effect[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2021, 50(1): 20200367-20200382.
- [6] 吴德会, 刘志天, 王晓红, 等. 表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响[J]. *物理学报*, 2017, 66(4): 266-276.
- WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. Mechanism analysis of influence of surface-breaking orientation on magnetic leakage field distribution [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(4): 266-276.
- [7] SU S, MA X, WANG W, et al. Stress-dependent magnetic charge model for micro-defects of steel wire based on the magnetic memory method[J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2020, 31(1): 24-47.
- [8] 时朋朋, 郝帅. 磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解[J]. *物理学报*, 2021, 70(3): 105-114.
- SHI P P, HAO SH. Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for metal magnetic memory method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(3): 105-114.
- [9] WANG Y J, LIU X CH, WU B, et al. Dipole modeling of stress-dependent magnetic flux leakage[J]. *NDT & E International*, 2018, 95(3): 1-8.
- [10] HAN G, HUANG H H. A dual-dipole model for stress concentration evaluation based on magnetic scalar potential analysis [J]. *NDT & E International*, 2021, 118(10): 102394-102406.
- [11] LI C J, CHEN CH, LIAO K X. A quantitative study of signal characteristics of non-contact pipeline magnetic testing [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2015, 57(6): 324-330.
- [12] YANG Y Y, SU S Q, WANG W, et al. Comparative study on the characteristics of magnetic memory signals for welding and non-welding steels with different materials under tension-compression fatigue [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 62(3): 1-25.
- [13] LIU B, LIU Z Q, LUO N, et al. Research on features of pipeline crack signal based on weak magnetic method[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 810-825.
- [14] 李岩松, 刘启智, 刘君, 等. 基于磁偶极子模型的材料缺陷漏磁检测正演问题的单元积分计算方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(21): 176-185.
- LI Y S, LIU Q ZH, LIU J, et al. The unit integral calculation method of defective material's forward question of magnetic flux leakage detection based on the magnetic dipole model [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(21): 176-185.
- [15] 苏三庆, 秦彦龙, 王威, 等. 基于磁记忆的 Q235b 受弯钢梁力磁效应数值模拟[J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28(5): 11-21.
- SU S Q, QIN Y L, WANG W, et al. Numerical simulation of stress-magnetization effect for bending states of Q235b steel beam based on magnetic memory [J]. 2020, 28(5): 11-21.
- [16] 苏三庆, 马小平, 王威, 等. 有关大地磁场对金属磁记忆信号影响的数值模拟[J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 51(4): 463-470.
- SU S Q, MA X P, WANG W, et al. Numerical simulation about the influence of geomagnetic field on metal magnetic memory signals [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 51(4): 463-470.
- [17] HU B, LIU Y, YU R Q. Magnetic anomaly characteristics of surface crack defects in a titanium alloy plate[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2021, 36(2): 209-224.
- [18] HU B, LIU Y, YU R Q. Numerical simulation on magnetic-mechanical behaviors of 304 austenite stainless steel[J]. *Measurement*, 2019, 151(2): 107185-107195.
- [19] 闫卓然, 曾斌, 谢伟, 等. 埋地铁磁小管道腐蚀力-磁耦合仿真研究[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(7): 1121-1127.
- YAN ZH R, ZENG B, XIE W, et al. Study on coupling simulation of corrosive stress and magnetization for small buried ferromagnetic pipeline [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(7): 1121-1127.
- [20] YAO K F, DENG B, WANG Z D. Numerical studies to signal characteristics with the metal magnetic memory-effect in plastically deformed samples [J]. *NDT & E International*, 2012, 47(3): 7-17.
- [21] 李忠吉, 李长俊, 成婷婷, 等. 埋地管道缺陷的自漏磁场计算方法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(9): 153-157.
- LI ZH J, LI CH J, CHENG T T, et al. Study on calculation method of self-leakage magnetic field for defect of buried pipeline [J]. *Journal of Safety Science*

- and Technology, 2019, 15(9): 153-157.
- [22] ZHOU ZH M, QIN M, WAN F, et al. Recognizing coiled tubing defect characteristics based on weak magnetic detection technology[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2019, 55(9): 1-6.
- [23] HE G X, HE T G, LIAO K X, et al. Experimental and numerical analysis of non-contact magnetic detecting signal of girth welds on steel pipelines [J]. ISA Transactions, 2021, DOI: 10.1016/j.isatra. 2021. 06.006.
- [24] 尹大伟,徐滨士,董世运,等. 不同检测环境下磁记忆信号变化研究[J]. 兵工学报, 2007(3): 319-323.
YIN D W, XU B SH, DONG SH Y, et al. Change of magnetic memory signals under different testing environments [J]. Acta Armamentarii, 2007 (3): 319-323.
- [25] MA X P, SU S Q, WANG W, et al. Damage location and numerical simulation for steel wire under torsion based on magnetic memory method [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 60(2): 223-246.
- [26] 苏三庆,刘馨为,王威,等. 金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1557-1572.
SUN S Q, LIU X W, WANG W, et al. Progress and key problems in the research on metal magnetic memory testing technology [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1557-1572.
- [27] 李冲冲,李国禄,董丽虹,等. 载荷激励下预制裂纹位向与磁记忆信号的相关性[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(4): 10-16.
LI CH CH, LI G L, DONG L H, et al. Correlation between artificial cracks and 3D magnetic memory signals under load excitation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(4): 10-16.
- [28] YI SH C, WANG W, SU S Q. Bending experimental study on metal magnetic memory signal based on von Mises yield criterion[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 49 (4): 547-556.
- [29] BAO SH, FU M L, LOU H J, et al. Defect identification in ferromagnetic steel based on residual magnetic field measurements[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 441(21): 590-597.
- [30] LIU B, MA Z Y, HE L Y, et al. Quantitative study on the propagation characteristics of MMM signal for stress internal detection of long distance oil and gas pipeline[J]. NDT & E International, 2018, 100(8): 40-47.
- [31] 刘志峰,刘健伟,黄海鸿,等. 基于铁磁性材料表面弱磁信号反演内部损伤程度的研究[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 64-68.
LIU ZH F, LIU J W, HUANG H H, et al. Inversion of internal damage based on weak magnetic signal of ferromagnetic materials [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 64-68.
- [32] SU S Q, ZHAO X R, WANG W, et al. Metal magnetic memory inspection of Q345 steel specimens with butt weld in tensile and bending test [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(3): 1-17.
- [33] LI CH CH, DONG L H, WANG H D, et al. Metal magnetic memory technique used to predict the fatigue crack propagation behavior of 0.45% C steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 405: 150-157.
- [34] LI C J, CHEN CH, LIAO K X. A quantitative study of signal characteristics of non-contact pipeline magnetic testing [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2015, 57(6): 324-330.
- [35] SU S Q, YI SH C, WANG W, et al. Bending experimental study of structural steel beam on magnetic field gradient based on modified Jiles-Atherton model[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55(3): 409-421.
- [36] 邢海燕,陈思雨,李思岐,等. 基于粒子群最大似然估计的焊缝早期隐性损伤磁记忆精确定位模型[J]. 工程科学学报, 2017, 39(10): 1559-1564.
XING H Y, CHEN S Y, LI S Q, et al. MMM accurate location model of early hidden damage in welded joints based on PSO and MLE [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(10): 1559-1564.
- [37] 陈海龙,王长龙,朱红运. 基于磁梯度张量的金属磁记忆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 602-609.
CHEN H L, WANG CH L, ZHU H Y. Metal magnetic memory test method based on magnetic gradient tensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 602-609.
- [38] LE S, LIU X E, NIU H P. A method for identifying geometrical defects and stress concentration zones in MMM technique [J]. NDT and E International, 2019, 107(7): 102133-102139.
- [39] CHEN H L, WANG CH L, ZUO X ZH. Research on methods of defect classification based on metal magnetic memory[J]. NDT and E International, 2017, 92(8): 82-87.
- [40] 万勇,王宇,杨勇,等. 管道缺陷类型多特征量阈值识

- 别方法[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 268-276.
- WAN Y, WANG Y, YANG Y, et al. Multi-characteristic threshold identification method for pipeline defect types[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 268-276.
- [41] 王威, 易术春, 苏三庆, 等. 金属磁记忆无损检测的研究现状和关键问题[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 1-21.
- WANG W, YI SH CH, SU S Q, et al. Research status and critical problems of metal magnetic memory testing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 1-21.
- [42] HUANG H H, JIANG S L, YANG CH, et al. Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 29(4): 377-390.
- [43] BAO SH, LOU H J, FU M L, et al. Correlation of stress concentration degree with residual magnetic field of ferromagnetic steel subjected to tensile stress[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(3): 255-268.
- [44] BAO SH, LOU H J, ZHAO Z Y. Evaluation of stress concentration degree of ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(1): 109-117.
- [45] BAO SH, JIN P F, ZHAO ZH Y, et al. Evaluation of stress concentration of U-shaped notch based on residual magnetic field measurements[J]. Strain, 2019, 55(6): 12328-12341.
- [46] FU M L, BAO SH, LOU H J. Characterization of stress concentration by tangential component $H_p(x)$ of metal magnetic memory signals[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2018, 33(6): 1486-1490.
- [47] LI Y F, ZENG X G, WEI L M, et al. Characterizations of damage-induced magnetization for X80 pipeline steel by metal magnetic memory testing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 54(1): 23-35.
- [48] 易术春, 王威, 苏三庆, 等. 利用磁记忆信号特征参数表征拉伸应力状态[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(4): 667-672, 836-837.
- YI SH CH, WANG W, SU S Q, et al. Modal testing method for thin-sheet cylinder parts based on single-point laser continuous scanning vibrometry[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 667-672, 836-837.
- [49] XU K SH, YANG K, LIU J, et al. Study on metal magnetic memory signal of buried defect in fracture process[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 498(7): 166139-166144.
- [50] WU L B, YAO K, SHI P P, et al. Influence of inhomogeneous stress on biaxial 3D magnetic flux leakage signals[J]. NDT & E International, 2020, 109(1): 102178-102195.
- [51] 张军, 朱晟桢, 毕贞法, 等. 基于金属磁记忆效应的高铁轮对早期故障检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 162-170.
- ZHANG J, ZHU SH ZH, BI ZH F, et al. Early fault detection in high-speed wheel set based on the magnetic memory effects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 162-170.
- [52] 任吉林, 刘海朝, 宋凯. 金属磁记忆检测技术的兴起与发展[J]. 无损检测, 2016, 38(11): 7-15, 20.
- REN J L, LIU H ZH, SONG K. The rise and development of metal magnetic memory testing technology[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(11): 7-15, 20.
- [53] 冷建成, 张经纬, 高雅田. 基于休哈特控制图的磁记忆早期损伤检测方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(2): 81-85.
- LENG J CH, ZHANG J W, GAO Y T. Magnetic memory detection method for early damage based on Shewhart control chart[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2): 81-85.
- [54] LIU B, ZENG ZH H, WANG H P. Study on the early fatigue damage evaluation of high strength steel by using three components of metal magnetic memory signal[J]. NDT & E International, 2021, 117(1): 102380-102386.
- [55] NI CH, HUA L, WANG X K. Crack propagation analysis and fatigue life prediction for structural alloy steel based on metal magnetic memory testing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 462(18): 144-152.
- [56] ZHANG K, ZHANG J, JIN W L, et al. A novel method for characterizing the fatigue crack propagation of steel via the weak magnetic effect[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 146(sup1): 106166-106183.
- [57] ZHAO X R, SU S Q, WANG W, et al. Metal magnetic memory inspection of Q345B steel beam in four point bending fatigue test[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 514(22): 167155-167169.
- [58] SU S Q, MA X P, WANG W, et al. Quantitative evaluation of cumulative plastic damage for ferromagnetic steel under low cycle fatigue based on magnetic memory method[J]. Strain, 2021, 57(3): 12379-12403.

- [59] 任尚坤,祖瑞丽. 基于磁记忆技术对含缺陷焊缝的疲劳试验[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 251-262.
REN SH K, ZU R L. Fatigue test of welds with defects based on magnetic memory technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 251-262.
- [60] HUANG H H, QIAN ZH C, YANG C, et al. Magnetic memory signals of ferromagnetic weldment induced by dynamic bending load [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(2): 166-184.
- [61] QIAN Z CH, HUANG H H. Coupling fatigue cohesive zone and magneto mechanical model for crack detection in coating interface [J]. NDT & E International, 2019, 105(5): 25-34.
- [62] 邢海燕,王犇,王学增,等. 基于双正交法的焊缝早期隐性损伤临界状态磁记忆特征[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 71-76.
XING H Y, WANG B, WANG X Z, et al. Metal magnetic memory critical characteristics of early hidden damage of welded joints based on the biorthogonal method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 71-76.
- [63] 朱达荣,潘志远,刘涛,等. 金属疲劳过程磁记忆信号多特征量提取研究[J]. 现代制造工程, 2018(10): 123-129.
ZHU D R, PAN ZH Y, LIU T, et al. The magnetic memory signal wavelet packet frequency band energy feature extraction [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(10): 123-129.
- [64] 冷建成,李政达,王玉洁,等. 循环应力对磁记忆效应影响的试验研究[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 1723-1727, 1733.
LENG J CH, LI ZH D, WANG Y J, et al. Experimental study on the effect of cyclic stress on magnetic memory effect [J]. Materials Reports, 2019, 33(10): 1723-1727, 1733.
- [65] LIU T, WANG F B, XU L. The mechanics-magnetic properties analysis and experiment of ferromagnetic material specimen in tensile process [J]. International Journal of Internet Manufacturing and Services, 2016, 4(2): 75-90.
- [66] 邢海燕,葛桦,韩亚潼,等. 基于熵带与DS理论的焊缝等级磁记忆量化评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 610-616.
XING H Y, GE H, HAN Y T, et al. Quantitative MMM evaluation of weld levels based on information entropy and DS evidence theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 610-616.
- [67] SHI P P, JIN K, ZHANG P P, et al. Quantitative inversion of stress and crack in ferromagnetic materials based on metal magnetic memory method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(10): 1-11.
- [68] 郭萌梦,胡博,彭贤虎,等. 基于 Libsvm 的 304 不锈钢人工缺陷弱磁信号反演研究[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 293-299.
GUO M M, HU B, PENG X H, et al. Research on magnetic inversion of 304 stainless steel artificial defects weak magnetic signal based on Libsvm [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2): 293-299.
- [69] 李思岐,俞洋,党永斌,等. 基于改进的支持向量回归机算法的磁记忆量化缺陷反演[J]. 工程科学学报, 2018, 40(9): 1123-1130.
LI S Q, YU Y, DANG Y B, et al. Metal magnetic memory quantitative inversion of defects based on optimized support vector machine regression [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(9): 1123-1130.
- [70] FU P, HU B, LAN X W, et al. Simulation and quantitative study of cracks in 304 stainless steel under natural magnetization field [J]. NDT & E International, 2021, 119(3): 102419-102428.
- [71] SHI M, LIANG Y, ZHANG M, et al. Pipeline damage detection based on metal magnetic memory [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(8): 1-15.
- [72] 邢海燕,葛桦,秦萍,等. 基于遗传神经网络的焊缝缺陷等级磁记忆量化研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(2): 33-38.
XING H Y, GE H, QIN P, et al. MMM quantifying of welded joint defect levels based on BP neural network optimized by genetic algorithm [J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(2): 33-38.
- [73] SONNTAG N, SKROTZKI B, STEGEMANN R, et al. The role of surface topography on deformation-induced magnetization under inhomogeneous elastic-plastic deformation [J]. Materials, 2018, 11(9): 1518.
- [74] GUO J, FU H Y, BO P, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 54-78.
- [75] AUGUSTYNIAK M, USAREK Z. Discussion of derivability of local residual stress level from magnetic stray field measurement [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(3): 1-9.
- [76] LIU B, HE L Y, MA Z Y, et al. Study on internal stress damage detection in long-distance oil and gas pipelines via weak magnetic method [J]. ISA Transactions, 2019, 89(6): 272-280.
- [77] LIU B, MA Z Y, LIU Z Q, et al. Research on internal detection technology for axial crack of long-distance oil

- and gas pipeline based on micromagnetic method [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 1123-1136.
- [78] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. Research on stress detection technology of long-distance pipeline applying non-magnetic saturation [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(2): 168-174.
- [79] LIU B, HE Y Y, ZHANG H, et al. Study on characteristics of magnetic memory testing signal based on the stress concentration field [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1): 2-8.
- [80] LIU B, ZHENG S M, HE L Y, et al. Study on internal detection in oil-gas pipelines based on complex stress magneto mechanical modeling [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(7): 5027-5036.
- [81] SONG Q, DING W X, PENG H, et al. A new magnetic testing technology based on magnetic gradient tensor theory [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(6): 325-329.
- [82] LI Z CH, JARVIS R, NAGY P B, et al. Experimental and simulation methods to study the Magnetic Tomography Method (MTM) for pipe defect detection [J]. NDT & E International, 2017, 92(8): 59-66.
- [83] 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.
- [84] 龚灯, 韩刚. 基于磁记忆方法的管道应力检测设备的开发 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 94-100.
- GONG D, HAN G. Development of pipeline stress detection equipment based on magnetic memory method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 94-100.
- [85] LIU B, FENG G, HE L Y, et al. Quantitative study of MMM signal features for internal weld crack detection in long-distance oil and gas pipelines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(99): 1-13.
- [86] 黄杰, 陈浩, 刘国军, 等. 埋地铁磁管道环焊缝非开挖定位技术研究 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39(7): 1048-1052.
- HUANG J, CHEN H, LIU G J, et al. Research of non-excavation positioning technology of girth weld in underground ferromagnetic pipeline [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(7): 1048-1052.
- [87] 曲杰, 王怀江, 陈秋华, 等. 基于磁梯度测量的金属管道焊缝与缺陷检测实验研究 [J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(3): 289-299.
- QU J, WANG H J, CHEN Q H, et al. Experimental study on weld and defect detection of metal pipeline based on magnetic gradient measurement [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(3): 289-299.
- [88] 廖柯熹, 何腾蛟, 李明红, 等. 埋地油气管道应力集中磁力外检测技术 [J]. 中国测试, 2019, 45(12): 25-30, 55.
- LIAO K X, HE T J, LI M H, et al. Stress concentration zones magnetic detection technology for buried oil and gas pipeline [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(12): 25-30, 55.
- [89] HE G X, HE T J, LIAO K X, et al. A novel three-dimensional non-contact magnetic stress inspection technology and its application on lng pipeline [C]. International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84461: V003T04A028.
- [90] 廖柯熹, 彭浩, 何腾蛟, 等. 埋地管道环焊缝非接触式磁力检测技术及应用 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(23): 111-117.
- LIAO K X, PENG H, HE T J, et al. Non-contact magnetic detection technology and application of ring weld in buried pipe [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(23): 111-117.
- [91] 赵亚宇, 周建庭, 夏润川, 等. 基于磁记忆弱漏磁效应的钢绞线腐蚀检测 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(3): 260-267.
- ZHAO Y Y, ZHOU J T, XIA R CH, et al. The detection of corrosion of steel strands based on weak magnetic flux leakage effect of metal magnetic memory [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering) 2019, 36(3): 260-267.
- [92] 江胜华, 侯建国, 何英明. 基于磁场梯度张量局部模量的钢筋锈蚀监测方法 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1176-1184.
- JIANG SH H, HOU J G, HE Y M, Steel corrosion monitoring using magnetic gradient tensor partial contraction [J], Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1176-1184.
- [93] XIA R CH, ZHANG H, ZHOU J T, et al. Corrosion non-destructive testing of loaded steel strand based on self-magnetic flux leakage effect [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(1): 1-15.
- [94] QU Y H, ZHANG H, ZHAO R Q, et al. Study on working stress measurement method for steel bars inside RC bridges based on self-magnetic flux leakage spatial

- signals[J]. Measurement, 2021(2):109371-109382.
- [95] QIU J L, ZHANG H, ZHOU J T, et al. Experimental analysis of the correlation between bending strength and SMFL of corroded RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214(20): 594-605.
- [96] QIU J L, ZHOU J T, ZHAO S Y, et al. Statistical quantitative evaluation of bending strength of corroded RC beams via SMFL technique[J]. Engineering Structures, 2020, 209(9): 110168-110182.
- [97] XIA R CH, ZHANG H, ZHOU J T, et al. Probability evaluation method of cable corrosion degree based on self-magnetic flux leakage [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 522(2):167544-167553.

作者简介



李博阳 (通信作者), 2019 年在西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为油气管道弱磁检测、油气储运系统完整性管理。

E-mail: 201921000787@stu.swpu.edu.cn

Li Boyang (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is now a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interests include the theory and application of weak magnetic testing technology for oil and gas pipelines, and integrity management of oil and gas storage and transportation system.