

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107957

# 基于力磁耦合型的管道电磁应力检测解析模型研究\*

杨理践, 郑福印, 高松巍, 黄平, 白石

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

**摘要:**针对管道应力检测和量化研究,提出一种基于电磁检测原理的管道应力检测方法。本文以J-A模型为基础,采用分子电流理论建立了管道力磁耦合模型,结合非磁滞条件下铁磁材料磁化曲线,利用管道力磁耦合模型解析计算了磁化方向上外磁场和应力对管壁表面磁场的影响规律,并进行了系统性实验研究。研究表明,随应力强度的增加,磁化方向上管道电磁应力检测信号呈现先增大后减小的变化趋势(变化方向翻转),翻转点前后均呈线性关系,但磁场信号变化速率改变,磁力学敏感度发生变化;随着外磁场的增加,在磁化曲线处于磁饱和(磁场强度大于20 kA/m)时,应力对铁磁材料磁化强度影响较小,磁场强度约为5 000 A/m时,应力对磁化强度影响较为显著。

**关键词:**分子电流理论;力磁耦合;电磁应力检测;磁化曲线

中图分类号: TH878 TM153+.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## An analytical model of electromagnetic stress detection for pipeline based on magneto-mechanical coupling model

Yang Lijian, Zheng Fuyin, Gao Songwei, Huang Ping, Bai Shi

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

**Abstract:** Aiming at the pipeline stress detection and quantitative research, a pipeline stress detection method based on electromagnetic detection principle is proposed. Based on the J-A model and molecular current theory, a mechanical magnetic coupling model of the pipe is formulated. Combined with the magnetization curve of ferromagnetic materials under non-hysteresis condition, the influence of external magnetic field and stress on the magnetic field of the pipe wall in the magnetization direction is calculated by using the mathematical model, and a systematic experimental study is carried out. Results show that with the increase of the stress intensity, the electromagnetic stress detection signal of the pipeline increases firstly. Then, the magnetization direction decreases (the direction of change is reversed). There is a linear relationship before and after the flip point. However, when the rate of magnetic signal changes, the magneto dynamic sensitivity changes with the increase of external magnetic field. When the magnetization curve is at magnetic saturation (magnetic field intensity is greater than 20 kA/m), the stress has little effect on the magnetization of ferromagnetic materials. When the magnetic field intensity is about 5 000 A/m, the stress has more significant effect on the magnetization.

**Keywords:** molecular current theory; mechanical and magnetic coupling; electromagnetic stress detection; magnetization curve

## 0 引言

油气管道埋藏深度较浅,周围环境恶劣,输送的介质大多具有易燃易爆的特性,将对管道安全运行造成潜在威胁<sup>[1-3]</sup>。在役管道长时间受外部载荷、高温及高压等作用,管壁局部区域会出现微观损伤,进而产生应力集中,

在应力长期反复作用下会形成应力疲劳裂纹,在腐蚀环境和波动应力下,裂纹会快速增长,严重甚至会引发油气管道爆裂等灾害,威胁管道的安全运输<sup>[4-5]</sup>。常规的无损检测技术如超声、漏磁、涡流和磁粉等<sup>[6-9]</sup>,在管道的损伤检测和事故预防等方面发挥了重要的作用,但尚不能对因施工、焊接、地基沉降、介质内压、热膨胀等因素造成的尚未成形宏观体积缺陷的应力集中进行有效的评价<sup>[10-11]</sup>,从

收稿日期:2021-05-19 Received Date: 2021-05-19

\* 基金项目:国家自然科学基金(62001313)项目资助

而无法避免由于应力损伤而引发的突发性事故。

目前,对管道应力内检测大多采用管道弱磁应力内检测技术,其通过对管道表面弱磁信号的获取对管道应力进行检测,但管道内检测环境复杂,管道附近的埋地电缆和漏磁内检测后的剩余磁场等都会对弱磁信号产生干扰,给信号判读带来很大困难。电磁应力检测技术检测信号不易受环境影响,且可识别能力较强,其在油气管道损伤检测中有很好的研究价值和应用前景。

近年来,国内外学者对电磁检测技术机理进行深入研究。电磁检测技术的正演模型主要包括:基于磁偶极子模型的解析法和基于麦克斯韦方程的有限元数值算法。Shheherbinn 等<sup>[12]</sup>提出用磁偶极子模型对试件表面的点状缺陷和裂缝进行模拟计算;Edwards 等<sup>[13]</sup>使用半椭圆凹槽模拟缺陷得到均匀静磁场激励下,漏磁场的解析解;Wang 等<sup>[14]</sup>通过改进磁偶极子模型,有效地解释了漏磁场法向分量过零点、切向分量出现极值的现象,分析了漏磁场分布与应力之间的关系;随着计算机的发展,有限元方法成为了解决工程问题的有效工具,各国学者先后采用有限元方法研究漏磁场,对输油气管道内外表面的缺陷及应力集中的漏磁场做出了计算,优化设计了管壁磁化方法<sup>[15-18]</sup>。然而,磁偶极子模型在磁荷分布设置、形状参数和材料非线性磁化方面存在困难,对应力变化尚且没有有效的理论模型,而有限元计算量大,很难得到漏磁信号于缺陷参数的函数关系,为弥补磁偶极子模型和有限元方法的缺点,Cheng 等<sup>[19]</sup>采用分子电流理论,建立了缺陷处漏磁场的螺线管模型,分析了复杂缺陷的漏磁场畸变特点,对比了螺线管模型与有限元模型的结果,验证了螺线管模型的高效性和有效性,但尚未对应力集中区的分子电流模型进行建立和分析。

本文基于铁磁材料 J-A 模型,采用分子电流理论对磁化方向上管壁表面磁场进行分析,并建立管壁力磁耦合模型,得到外磁场和应力共同作用下磁化方向上管壁表面磁场分布规律和变化特征。通过搭建实验平台对不同应力下磁化方向上管壁表面磁场信号的获取和分析,明确了激励磁场和应力对管壁表面磁场的影响规律。仿真计算和实验结果为实现基于电磁检测原理的油气管道应力检测提供了理论依据。

## 1 数学模型建立

### 1.1 基于分子电流理论的螺线管模型

假设铁磁材料由一系列分子电流组成,磁化后分子电流呈环状螺线管模型分布,根据 Biot-Savart 定律和立体角公式<sup>[20]</sup>,可得位于磁矩所指向半空间内的任意场点处环电流产生的磁感应强度(另半空间,式(1)中无负号)为:

$$\vec{B}_c = -\frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \nabla \Omega \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为环电流的电流强度; $\mu_0$ 为真空磁导率,大小为 $4\pi \times 10^{-7}$  H/m; $\Omega = (S \cos \theta) / r_c^2$ 为场点到环电流的立体角; $S$ 为环电流包围的面积; $r_c$ 为场点到环电流中心的距离; $\theta$ 为环电流中心和场点连线与环电流轴线之间的夹角。

如图1所示,有一条半无限长螺线管,其中心位于  $x$  轴负半轴,电流磁矩的指向  $x$  轴的正方向,其端面的中心点位于坐标原点,场点  $P(x, y, z)$  到坐标原点的距离为  $r$ 。取长度为  $dx_0$  的螺线管作为螺线管微元,令其中心坐标为  $(x_0, 0, 0)$ ,螺线管微元的单位长度上匝数为  $n$ ,电流为  $I$ ,则螺线管微元对应的电流为  $dI = nI dx_0$ 。

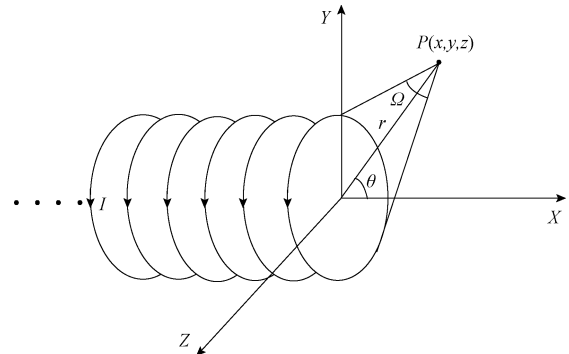


图1 半无限长螺线管产生的空间磁场

Fig. 1 Space magnetic field produced by semi-infinite solenoid

半无限长螺线管微元右半空间内的任意场点  $P(x, y, z)$  处的磁感应强度(螺线管微元左半空间中,等式中有负号)可表示为:

$$\vec{B}_s = \frac{\mu_0 n I S}{4\pi} \frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为螺线管端面中心点到场点的矢量, $r$ 的模为  $r$ 。

### 1.2 管道三维力磁耦合模型建立

根据非磁滞条件下铁磁性材料磁化曲线,当对管壁局部磁化时,假设磁化区域的磁化强度为  $M_h$ (外磁场下,管壁磁化强度),未磁化区域的磁化强度为 0。铁磁材料磁化产生的“螺线管”将在磁化区域边缘处发生断裂,断裂的“螺线管”可视为空间磁场的源,因此,可螺线管模型对磁化区域管壁表面磁场进行仿真计算。

对于单个环电流,磁矩满足: $\mathbf{P}_m = IS$ ,式(2)中的  $IS$  可用磁矩  $\mathbf{P}_m$  替代,磁化方向上磁化区域左右两端面的磁源分布与环电流的磁矩  $\mathbf{P}_m$  有关。磁化强度  $\mathbf{M} = \Sigma \mathbf{P}_m / \Delta V$ ,其中  $\Delta V$  为螺线管微元体积。由于,管壁磁化区域与未磁化区域在同一断裂面产生的磁场方向相反,则磁化方向上的磁化区域左端面(右端面符号相反)在空间任意一点磁场强度可表示为:

$$dH_s = -\frac{M_h}{4\pi} \frac{\mathbf{r}}{r^3} ds \quad (3)$$

式中:ds 为磁化区域左端面微元。

以管壁磁化区域上表面中心为原点,应力  $\sigma$  和磁化区域磁场  $H$  平行于  $X$  轴(轴向)方向,垂直于管壁表面的方向为  $Z$  轴(法向),磁化区域上表面垂直于外磁场方向为  $Y$  轴(周向),建立直角坐标系,如图 2 所示。

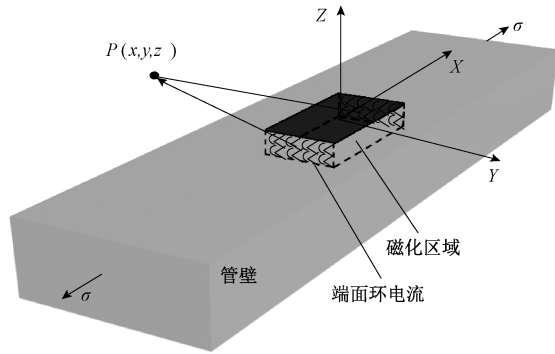


图 2 管道三维力磁耦合模型

Fig. 2 3D mechanical and magnetic coupling model of pipeline

图 2 中,磁化区域长度为  $2Dx_1$ 、宽度为  $2Dy_1$ 、深度为  $Dz_1$ ,根据三维螺线管模型,磁化区域两端面坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ 、 $(-x_m, y_m, z_m)$  在空间场点  $P(x, y, z)$  处形成的磁场  $H$  为磁化区域左右两端面环电流共同作用下的合成磁场,故对  $dH_s$  进行如下积分,得到场点  $P$  的磁场强度轴向分量(磁化方向)如下表达式:

$$H_x = -\frac{M_h}{4\pi} \times \frac{\int_{-D_{y1}}^{D_{y1}} \int_{-D_{z1}}^0 \left[ \frac{(x+x_m) dy_m dz_m}{[(x+x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x-x_m) dy_m dz_m}{[(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right]}{(4)} \quad (4)$$

由式(4)可知,磁化方向上管壁表面磁场空间分布模型与管壁磁化强度和场点位置坐标有关。因此定义:  $K$  为传递系数,  $f$  为传递因子,分别描述两部分,令:  $H=K \times f$ , 则有:

$$K = -\frac{M_h}{4\pi} \quad (5)$$

$$f = \int_{-D_{y1}}^{D_{y1}} \int_{-D_{z1}}^0 \left[ \frac{(x+x_m) dy_m dz_m}{[(x+x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x-x_m) dy_m dz_m}{[(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (6)$$

其中,传递系数  $K$  与励磁方向上管壁未磁化区域和磁化区域的磁化强度差值相关,传递因子  $f$  与磁化区域

的尺寸及空间点坐标有关,可用于计算管壁表面磁场的传递特性。

理想状态下的非磁滞磁化强度  $M_{an}$  由玻尔兹曼分布确定,在各项同性的材料中,可表示成与有效磁场的关系,称之为朗之万函数,如下所示<sup>[21]</sup>:

$$M_{an} = M_s \left[ \coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right] \quad (7)$$

式中:  $M_s$  为饱和磁化强度;  $a$  为表征无磁滞磁化曲线的形状参数。

当应力作用于管壁时,管壁的有效磁场  $H_e$  可表示<sup>[22]</sup>为:

$$H_e = H + \alpha M_{an} + \frac{3\sigma}{2\mu_0} [(\gamma_{11} + \gamma_{12}\sigma)M_{an} + (\gamma_{21} + \gamma_{22}\sigma)M_{an}^3] \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为平均场系数;  $\sigma$  为管壁应力;  $\gamma_{11}$ 、 $\gamma_{12}$ 、 $\gamma_{21}$  和  $\gamma_{22}$  为材料相关系数。

联立式(4)、(7)和(8)即可计算励磁方向上不同应力条件下磁化区域内管壁应力集中表面空间磁场的分布特征和变化规律。

由式(8)可知,应力的等效磁场  $H_\sigma$  可表示为:

$$H_\sigma = \frac{3\sigma}{2\mu_0} [(\gamma_{11} + \gamma_{12}\sigma)M_{an} + (\gamma_{21} + \gamma_{22}\sigma)M_{an}^3] \quad (9)$$

式中:  $H_\sigma$  是关于应力  $\sigma$  一元二次方程,其对称轴为  $-(\gamma_{11} + \gamma_{22}M_{an}^2)/2(\gamma_{12} + \gamma_{21}M_{an}^2)$ ,即有效磁场关于对称轴呈轴对称。对称轴位置与材料相关系数  $\gamma_{11}$ 、 $\gamma_{12}$ 、 $\gamma_{21}$ 、 $\gamma_{22}$  及磁化强度  $M_{an}$  有关,而这些系数与材料的掺杂、磁导率及力学性能等之间呈现复杂函数关系。

### 1.3 管道电磁应力检测方法数学模型建立

为避免外界直流电磁场的干扰,采用电磁应力检测技术对管壁应力进行检测,其主要基于电磁感应的原理,通过感应式磁传感器获取应力集中处表面磁场信号。其励磁方式与传统永磁或直流励磁方式不同,激励信号呈周期性变化,采用感应式磁传感器对磁场信号进行采集。

激励线圈在低频信号激发下产生交变电磁场,透过被测试件,从一侧传导向另一侧,应力引起表面磁场发生变化,进而感应式磁传感器输出信号的幅值会产生变化,电磁应力检测系统如图 3 所示。

假设励磁磁路内磁场强度变化为  $H = H_0 \sin\omega t$ ,  $H_0$  为磁场强度峰值,  $\omega$  为电磁场角频率,  $t$  为时间,当外磁场较低时,磁化曲线大致呈线性变化,则磁化区域的磁化强度可近似为:  $M_h = M_0 \sin\omega t$ ,其中,  $M_0$  为磁化区域内正常处磁化强度峰值,未磁化区域磁场强度  $H = 0$  A/m,则未磁化区域的管壁磁化强度为 0。根据管道三维力磁耦合模型可知,在磁化区域与非磁化区域交界面会形成环电流,

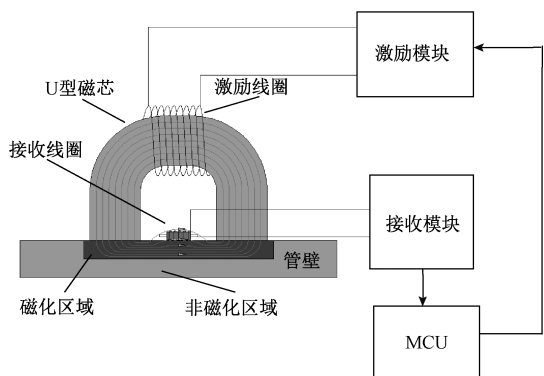


图3 电磁应力检测系统

Fig. 3 Electromagnetic stress detection system

根据式(4)可得,励磁方向上的磁化区域表面空间磁感应强度为:

$$B_x = -\frac{\mu_e M_0 \sin \omega t}{4\pi} \times \int_{-D_{y1}}^{D_{y1}} \int_{-D_{z1}}^0 \left[ \frac{(x+x_m) dy_m dz_m}{[(x+x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x-x_m) dy_m dz_m}{[(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (10)$$

式中: $\mu_e$ 为接收线圈磁芯磁导率。由于激励磁场频率较低,可近似为静磁场,趋肤深度 $d$ 可表示为:

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \xi}} \quad (11)$$

式中: $\mu$ 为铁磁材料的磁导率; $\xi$ 为铁磁材料的电导率。由趋肤深度定义可知,铁磁材料表面磁场强度最大,随着深度的增加逐渐减小直至为0,因此,认为磁化强度也呈线性衰减,因此不同深度的磁化强度可表示为:

$$M_h = M_0 \sin(\omega t) + \frac{M_0 \sin(\omega t)}{d} z_m, \quad -d \leq z_m \leq 0 \quad (12)$$

因此,磁化方向上的磁化区域表面空间输出感应电动势分布可表示成:

$$u = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{NSdB}{dt} = \frac{fNS\mu_e}{2} \times \left\{ \int_{-D_{y1}}^{D_{y1}} \int_{-d}^0 \left( M_0 \cos \omega t + \frac{M_0 \cos \omega t}{d} z_m \right) \times \left[ \frac{(x+x_m) dy_m dz_m}{[(x+x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x-x_m) dy_m dz_m}{[(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \right\} \quad (13)$$

式中: $\phi$ 为磁传感器磁通量; $f$ 为线圈激励频率; $N$ 为接收线圈匝数; $S$ 为接收线圈截面积。在实际工程检测中,得

到 $u$ 的有效值 $u_{eff}$ (电压最大值 $u_{max}$ 除以 $\sqrt{2}$ )即可,其表达式为:

$$u_{eff} = \frac{u_{max}}{2\sqrt{2}} = \frac{fNS\mu_e}{2\sqrt{2}} \times \left\{ \int_{-D_{y1}}^{D_{y1}} \int_{-d}^0 \left( M_0 + \frac{M_0}{d} z_m \right) \times \left[ \frac{(x+x_m) dy_m dz_m}{[(x+x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x-x_m) dy_m dz_m}{[(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \right\} \quad (14)$$

由式(13)可以得管壁不同应力状态下,空间任意一点的电磁应力检测系统检测信号有效值。空间任意一点的检测信号有效值大小与驱动频率、接收线圈匝数、接收线圈截面积、接收线圈磁芯磁导率、磁化区域宽度、深度呈正相关关系,但由于励磁频率与磁化深度呈负相关关系,因此不同频率下,电磁应力检测系统检测信号有效值变化趋势计算较为复杂<sup>[23]</sup>,参考文献<sup>[23]</sup>中励磁频率对检测结果的影响规律,本文采用励磁频率为20 Hz进行数值仿真与实验分析。

## 2 数值仿真计算

基于管道电磁应力检测方法数学模型,计算管道壁厚为8 mm,磁化区域长度为 $2D_x = 40$  mm,宽度为 $2D_y = 20$  mm,管壁应力 $\sigma_0 = 100$  MPa,最大磁化强度 $H_0$ 为5 000 A/m。设置管道表面磁场检测提高 $z$ 为1 mm,检测范围为沿 $X$ 轴-15~15 mm范围, $Y$ 轴-10~10 mm范围,即 $x = -15 \sim 15$  mm, $y = -10 \sim 10$  mm, $z = 1$  mm。在管道实际检测中 $X$ 分量为轴向分量, $Z$ 分量为径向分量, $Y$ 方向为周向分量。模型中参数选取<sup>[24-25]</sup>如下: $\mu_e = 0.376 8$  mH/m、 $N = 1\ 000$ 、 $f = 20$  Hz、 $c = 0.1$ 、 $M_s = 1.585 \times 10^6$  A/m、 $S = 0.785 4$  mm<sup>2</sup>、 $\mu = 0.251 2$  mH/m、 $\xi = 9.93 \times 10^6$   $\Omega \cdot \text{m}$ 、 $k = 1.52 \times 10^{-3}$  A/m、 $a = 900$  A/m、 $\gamma_{11} = 7 \times 10^{-18}$  A<sup>-2</sup>·m<sup>2</sup>、 $\gamma_{12} = -1 \times 10^{-25}$  A<sup>-2</sup>·m<sup>2</sup>·Pa<sup>-1</sup>、 $\alpha = 0.001$ 、 $\gamma_{21} = -3.3 \times 10^{-30}$  A<sup>-4</sup>·m<sup>4</sup>和 $\gamma_{22} = 2.1 \times 10^{-38}$  A<sup>-4</sup>·m<sup>4</sup>·Pa<sup>-1</sup>,模型中磁化方向沿着轴向方向,利用模型求解磁化方向上的电磁应力检测系统检测信号有效值分布如图4所示。

不考虑磁滞影响,应力与外磁场同向时,应力分别为0、50、100、150和200 MPa时,模型其他参数不变,管壁磁化曲线如图5所示。

由图5可知,在非磁滞条件下,在磁场强度处于起始状态和磁饱和状态时,应力对铁磁材料磁化强度影响较小,磁场强度处于磁化曲线“拐点”附近(约4~6 KA/m)时,应力对磁化强度影响显著。根据电磁应力检测数学模型,设定激励磁场幅值 $H_0 = 5\ 000$  A/m,可得到不同应力下管道磁化区域磁化强度如表1所示。



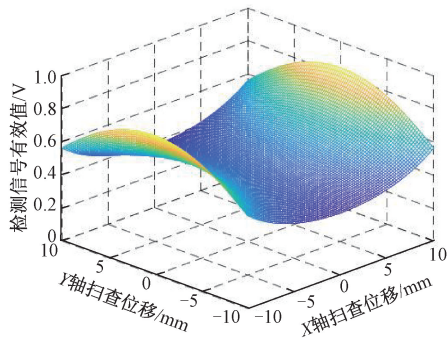


图 4 电磁应力检测系统检测信号有效值分布云图  
Fig. 4 Distribution of RMS of detection signal in the electromagnetic stress detection system

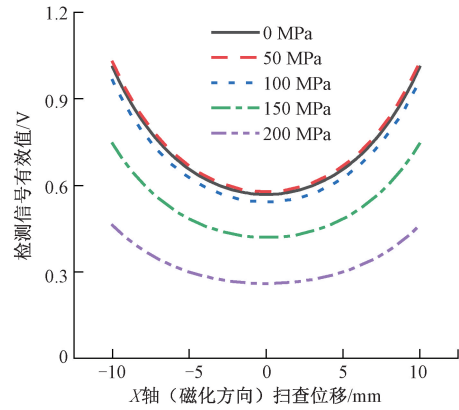


图 6 不同应力下电磁应力检测系统检测信号有效值分布图

Fig. 6 Distribution of effective value of detection signal of electromagnetic stress detection system under different stresses

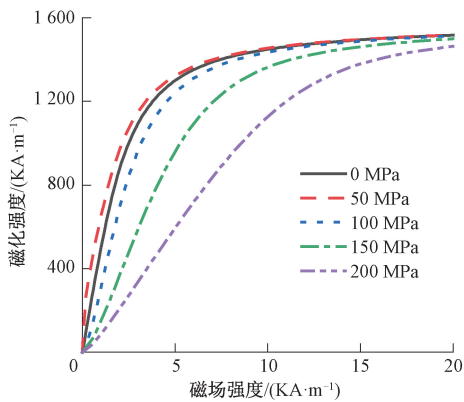


图 5 不同应力下管壁磁化回线

Fig. 5 Magnetization loop of pipe wall under different stress

表 1 不同应力下管道磁化区域磁化强度

Table 1 Magnetization of pipeline magnetization area under different stresses

应力值/MPa	磁化区域磁化强度/( $A \cdot m^{-1}$ )
0	1 298 969
50	1 322 315
100	1 240 380
150	958 065
200	593 914

根据式(13)可知,同一检测路径下磁化方向上电磁应力检测系统检测信号有效值仅与磁化区域最大磁化强度有关。设置扫查路径为沿 X 轴 -15~15 mm, Y 轴为 0 mm, Z 轴为 1 mm,模型其他参数如图 4 所示。不同应力下,磁化方向上磁化区域内电磁应力检测系统检测信号有效值分布如图 6 所示。

如表 1 和图 6 可知,随着应力的增加,管道磁化区域

磁化强度及电磁应力检测系统检测信号有效值均呈现先减小后增加的变化趋势。当外磁场为 5 000 A/m 时,管壁受到应力大小为 0~200 MPa(间隔 20 MPa),扫查路径中心点的电磁应力检测系统检测信号有效值的变化趋势如图 7 所示。

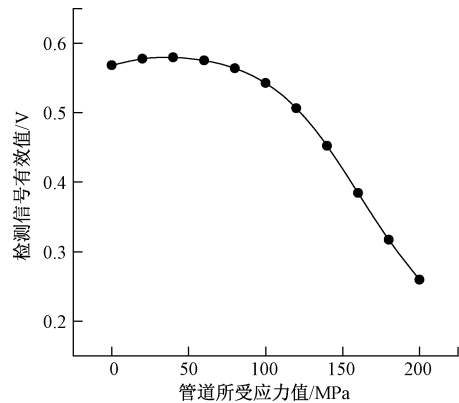


图 7 不同应力下扫查路径中心点的电磁应力检测系统检测信号有效值变化趋势

Fig. 7 Change trend of effective value of detection signal of electromagnetic stress detection system at the center of scanning path under different stresses

由图 7 可知,随着管壁应力值增加,管道磁化区域表面磁场强度轴向分量幅值呈非线性变化趋势,其在 40 MPa 处发生翻转。基于饱和磁致伸缩系数的应力依赖关系可知:磁力学曲线翻转点与饱和磁致伸缩系数的零点重合,当管道饱和磁致伸缩系数出现零点后,铁磁材料弹性模量和抗拉能力发生变化<sup>[26]</sup>,所以可基于此翻转点对管道抗拉能力进行评估。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 应力对磁化曲线影响

为分析应力对铁磁材料磁化曲线影响,采用 WAW-2000 微机控制电液伺服万能拉力试验机和磁特性分析仪 MATS-2010D 对不同应力下 Q235 磁化曲线进行测量。被测材料为长 500 mm、宽 15 mm、厚度 12 mm 的 Q235 钢条,将钢条两端固定在拉力试验机夹具上;将激励线圈均匀缠绕在 U 型磁芯(磁芯为 Q235 材质,极靴与钢条宽度和厚度相同)上,并使 U 型磁芯两极靴固定在 Q235 钢条侧面上,于两极靴之间的钢条上缠绕接收线圈,将激励线圈与接收线圈连接到磁特性分析仪 MATS-2010D 的激励和接收端子上,实验过程如图 8 所示。



图 8 不同应力下 Q235 磁化曲线测试实验图  
Fig. 8 Experimental diagram of Q235 magnetization curve under different stresses

通过磁特性分析仪可同时对激励线圈的励磁信号与接收线圈的检测信号进行采集,当应力分别为 80、120、160 和 200 MPa 时,得到不同应力下 Q235 材料磁化曲线如图 9 所示。

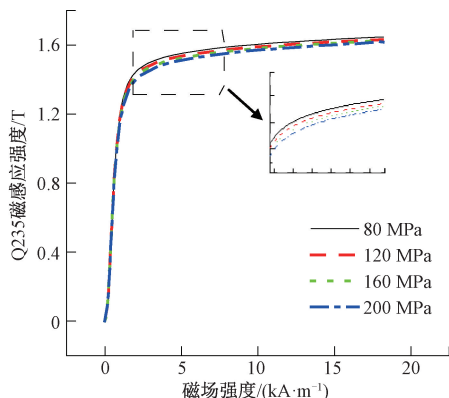


图 9 不同应力下 Q235 材料的磁化曲线图  
Fig. 9 Magnetization curve of Q235 under different stresses

由图 9 所示,实验结果说明,随着应力的增大,Q235 材料磁化曲线和磁滞回线整体呈下降趋势,应力对材料的磁化起到阻碍作用,在磁化起始和饱和阶段,应力的阻碍作用不明显,当外磁场增强至中等磁场阶段后,应力对磁化的阻碍作用较为明显。实际检测中,由于掺杂的不均匀,使管道的磁力学特征参数产生差异,会导致磁力学曲线的偏移和改变,进而产生磁滞现象,对铁磁性管道进行检测时,应先对同材质和尺寸的管道进行试验,得到最佳激励磁场强度。该实验中,外磁场在 5 000 A/m 时,应力对磁化曲线影响最为明显。

#### 3.2 磁力学特征实验

##### 1) 实验方法

为了研究管道应力与电磁应力检测系统测量值之间的对应关系,设计拉伸磁力学实验如图 10 所示,实验材料为与管道同材质的长 500 mm,宽度 80 mm,厚度 12 mm 的 Q235 钢条对管道受力进行模拟。

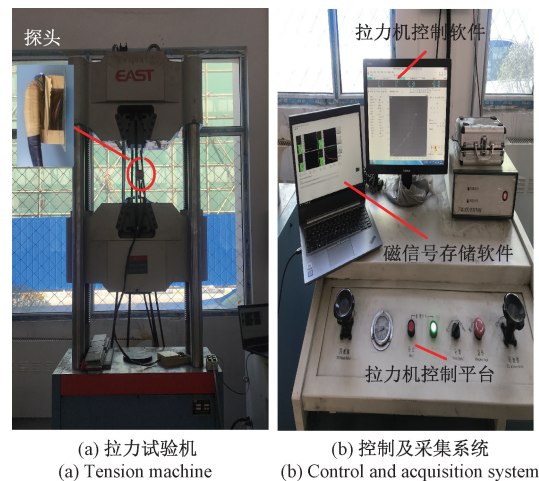


图 10 Q235 钢条磁力学实验图  
Fig. 10 Magneto-mechanical experiment of Q235 steel bar

利用拉力试验机的上下夹具将钢条两端夹紧,并把电磁应力检测系统(分辨力:0.1 mV,噪声:±5 mV)的探头固定于钢条表面,启动拉力试验机对钢条进行拉伸,并对使用电磁应力检测系统对钢条表面磁信号进行采集和记录,由于钢条拉伸方向为长度方向,认为拉应力集中在长度方向,电磁应力检测系统为单轴接收,为更好的对应力信号检测,使拉力方向、磁化方向和信号接收方向在一个轴线上。将 Q235 钢条从 0 kN 拉伸至 250 kN,钢条所受拉力与钢条应变值对应曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,在应力-应变曲线的初始部分(AB 段),材料服从胡克定律,应力应变呈正比;随着应力的增大,许多材料的应力应变曲线会偏离线性关系形成非线性弹性形变,Q235 材料有应变落后于应力的现

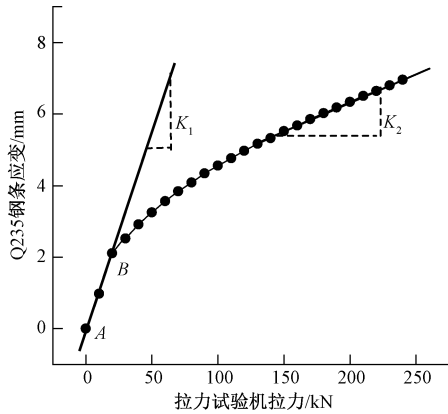


图 11 拉伸试验拉力与 Q235 钢条应变值关系图  
Fig. 11 Relationship between tensile force and strain value of Q235 steel bar in tensile test

象,这种现象称为滞弹性<sup>[27]</sup>,表征材料的形变在应力移去后能够恢复但不是立即恢复的能力。滞弹性的产生原因涉及一种弹性变形的微观机制-短程扩散,由于原子的扩散需要时间,附加的应变不能立刻完成,需要一定的时间,从造成弹性应变落后于应力的现象,表现为滞弹性,又称为弹性后效,因此在实际工程应用中应力应变曲线在弹性阶段分为线性弹性变形和非线性弹性变形。

2) 实验结果分析

通过实验采集管壁周向应变值与励磁方向(管道的周向)的电磁应力检测系统检测量化值,得到管道打压时管壁的磁力学特征曲线,如图 12 所示。

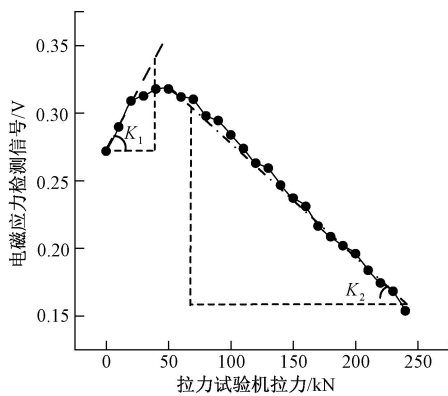


图 12 拉力机拉伸实验的磁力学特征曲线  
Fig. 12 Magneto mechanical characteristic curve of tensile test of tensile machine

由图 12 可知,随着应力值的增加,应力方向电磁检测信号呈先增大后减小的变化趋势,且拐点前后都为近似线性变化,磁力学曲线出现翻转点大致为

45 MPa(拉伸应力  $P = F/S$ ,  $F$  为拉力,KN,  $S$  为拉力对应的截面面积,  $\text{mm}^2$ ),与图 7 理论推导的变化趋势基本一致,可基于此点对材料的抗拉能力进行评估。将图 11 翻转前后的磁力学曲线进行线性拟合,计算翻转前后的斜率绝对值为:0.002 和 0.000 7,翻转后 Q235 材料的磁力学敏感度降低,由于掺杂的不均匀等因素,使材料的磁力学特征参数产生差异,进而对磁力学曲线的翻转点造成偏移,同时也影响翻转前后磁力学曲线斜率<sup>[26]</sup>。

在实际管道检测过程中,管道为很多单节管焊接而成的,在管道运行中采用单节管为直径 273 mm、壁厚 7 mm,长度为 13.8 m 的中压管道,其压力范围为:1.6~10 MPa,根据管道行业标准,无缺陷或应力集中的管段,输送介质内压产生的环向应力可表示为:

$$\sigma_h = \frac{PD}{2\delta} \tag{15}$$

式中: $\sigma_h$  为管道内压作用下产生的环向应力; $P$  为输送介质产生的内压; $D$  为管道的内径; $\delta$  为管道的壁厚。

由输送介质产生的轴向应力为:

$$\sigma_l = 0.5\sigma_h \tag{16}$$

根据式(14)和(15)可知,实际工程中,管道运行时,环向应力范围为:31.2~195 MPa;轴向应力范围为:15.6~97.5 MPa,合应力范围为:34.92~218.25 MPa。

由式(9)可知,实际电磁应力检测信号中的翻转点,即为理论模型中的有效磁场强度对称轴对应的点位。根据图 11,电磁应力检测信号翻转点低于 45 MPa。在实际检测中,尽管管道生产中,由于掺杂的不均匀等因素,会造成磁力学曲线的翻转点的偏移,但在役的管道应力基值在翻转点之上或在其附近,因此,在对管道应力进行定量分析及应力集中(应力强度大于平均应力)检测时,可忽略翻转点的影响,实际检测中应力强度与电磁应力检测信号大致呈线性关系,在实际检测和定量化分析中可忽略翻转点的影响。

4 结 论

磁力学现象是客观存在的,但是磁力学检测机理至今没有定论,因此应力检测技术的定量化分析始终是该项技术的瓶颈问题。本文以电磁应力检测技术为研究背景,在分子电流基础上,建立了管道磁力学模型,分析计算了外磁场和应力对磁化方向上管道表面磁场强度分布特征的影响,并通过实验进行验证,主要得出以下结论:

- 1) 管道表面磁场信号随应力增加呈线性变化;持续



的应力值增加会导致管道表面磁场信号变化方向发生翻转,翻转点前后的磁力学曲线斜率值绝对值改变,可见翻转导致管道磁力学敏感度发生变化;

2)随着外磁场的增加,在磁化曲线处于起始以及磁饱和(磁场强度 20 KA/m)状态时,应力对铁磁材料的磁化强度影响较小,磁场强度处于磁化曲线“拐点”(磁场强度 5 KA/m)附近时,应力对磁化强度影响显著;

3)在实际工程检测中,由于管道运行平均应力大于翻转点所对应的应力值,电磁应力检测信号变化方向的翻转点对定量研究几乎无影响,在分析电磁应力信号与实际应力信号关系时,可将二者近似为线性关系。理论模型与电磁应力检测技术的检测信号可准确的对应应力集中区进行描述和分析。

在后续中,需要进一步考虑涡流、磁滞、材料的相关力学系数和非磁化区域剩余磁场强度等因素,同时,优化理论模型并设计三轴探头,完成多维磁场信号的采集分析,对管道应力的定量化研究提供更为可靠的理论和实验依据。

#### 参考文献

- [ 1 ] 李健,陈世利,黄新敬,等.长输油气管道漏监测与准实时检测技术综述[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1747-1760.  
LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi real-time detection technologies for long gas & oil pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [ 2 ] YU M S, XING X, ZHANG H. Corrosion fatigue crack growth behavior of pipeline steel under underload-type variable amplitude loading schemes[J]. Acta Materialia, 2015(96): 159-169.
- [ 3 ] 李明菲,薛向东,马健,等.复杂天然气管网系统运行期可靠性评价体系[J].油气储运,2019(7):738-744.  
LI M F, XUE X D, MA J, et al. Reliability evaluation system of complex natural gas pipeline network system during operation [ J ]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019(7): 738-744.
- [ 4 ] 张杰,陈小华,鲁鑫,等.逆断层作用下埋地管道局部屈曲行为研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):172-179.  
ZHANG J, CHEN X H, LU X, et al. Study on local buckling behavior of buried pipeline under reverse fault action [ J ]. Journal of Southwest Petroleum University ( Natural Science Edition ), 2019, 41 ( 3 ): 172-179.
- [ 5 ] XU Q, SHAO F, BAI L Y, et al. Corrosion fatigue crack growth mechanisms in welded joints of marine steel structures [ J ]. Journal of Central South University, 2021, 28(1): 58-71.
- [ 6 ] 黄海鸿,刘文杰,钱正春,等.零件表面损伤对再制造修复件承载能力影响的超声相控阵检测研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(7):32-41.  
HUANG H H, LIU W J, QIAN ZH CH, et al. Study on the influence of surface damage on the bearing capacity of remanufactured repair parts by ultrasonic phased array testing [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 ( 7 ): 32-41.
- [ 7 ] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.  
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology for long distance oil and gas pipeline [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 ( 8 ): 1736-1746.
- [ 8 ] ARJUN V, SASI B, RAO B, et al. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates [ J ]. Sensors and Actuators A Physical, 2015, 226:69-75.
- [ 9 ] KASAI N, TAKADA A, FUKUOKA K, et al. Quantitative investigation of a standard test shim for magnetic particle testing [ J ]. NDT & E International, 2011, 44(5): 421-426.
- [ 10 ] 刘斌,何璐瑶,饶心,等.磁记忆信号定量分析的电子交换模型及性能[J].仪器仪表学报,2017,38(11):2744-2751.  
LIU B, HE L Y, RAO X, et al. Electron exchange model and performance of quantitative analysis of magnetic memory signal [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 ( 11 ): 2744-2751.
- [ 11 ] LIU B, LIU Z Q, LUO N, et al. Research on features of pipeline crack signal based on weak magnetic method [ J ]. Sensors ( Basel, Switzerland ), 2020, 20(3): 1-15.
- [ 12 ] SHCHERBININ V E, ZATSEPIN N N. Calculation of the magnetostatic field of surface defects. I. Field topography of defect models [ J ]. Defektoskopija, 1966(5): 50-59.
- [ 13 ] EDWARDS C, PALMER S B. The magnetic leakage



- field of surface-breaking cracks[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2000, 19(4): 657-673.
- [14] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(4): 354-359.
- [15] 唐莺,潘孟春,罗飞路,等. 基于三维场测量的脉冲漏磁检测技术[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2297-2302.
- TANG Y, PAN M CH, LUO F L, et al. Pulsed magnetic flux leakage detection based on three dimensional field measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2297-2302.
- [16] 宋凯,陈超,康宜华,等. 基于 U 形磁轭探头的交流漏磁检测法机理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(9): 1980-1985.
- SONG K, CHEN CH, KANG Y H, et al. Mechanism of AC magnetic flux leakage detection based on U-shaped yoke probe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [17] 杨理践,郑文学,高松巍,等. 基于平衡电磁技术的钢板裂纹缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10): 198-205.
- YANG L J, ZHENG W X, GAO S W, et al. Detection method of steel plate crack defect based on balanced electromagnetic technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(10): 198-205.
- [18] KARUPPANAN S, AMINUDIN A S, WAHAB A A. Burst pressure estimation of corroded pipeline with interacting defects using finite element analysis [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2012, 12(24): 2626-2630.
- [19] CHENG Y H, WANG Y G, YU H C, et al. Solenoid model for visualizing magnetic flux leakage testing of complex defects[J]. *NDT&E International*, 2018, 100: 166-174.
- [20] WANG Y G, CHENG Y H, BAI L B, et al. Solenoid model for the magnetic flux leakage testing based on the molecular current[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(12): 6203014.
- [21] 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): 034101.
- 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): 034101.
- [22] LI J W, XU M Q. Modified jiles-atherton-sablik model for asymmetry in magneto-mechanical effect under tensile and compressive stress[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(6): 1-4.
- [23] YANG L J, HUANG P, BAI S, et al. An effective method for differentiating inside and outside defects of oil and gas pipelines based on additional eddy current in low-frequency electromagnetic detection technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020(59): 096505.
- [24] 罗旭,朱海燕,丁雅萍. 基于力磁耦合效应的铁磁材料修正磁化模型[J]. *物理学报*, 2019, 68(18): 295-306.
- LUO X, ZHU H Y, DING Y P. Modified magnetization model of ferromagnetic materials based on magneto mechanical coupling effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(18): 295-306.
- [25] 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.
- [26] SZEWCZYK R. Stress-induced anisotropy and stress dependence of saturation magnetostriction in the Jiles-Atherton-Sablik model of the magnetoelastic villari effect[J]. *Archives of Metallurgy & Materials*, 2016, 61(2): 607-612.
- [27] 庄毅. 粒子强化高温合金的滞弹性松弛、循环蠕变和应力断裂行为[J]. *金属学报*, 1983(4): 31-43.
- ZHUANG Y. Anelastic relaxation, cyclic creep and stress fracture behavior of particle strengthened superalloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1983(4): 31-43.

### 作者简介



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

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B.Sc. degree from Shenyang

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



**郑福印**, 2015 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为无损检测技术、长输油气管道漏磁内检测技术理论及应用、管道应力检测技术理论及应用。

E-mail: zhengfuyin666@163.com

**Zheng Fuyin** received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015. He is currently a Ph.D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include the theory and application of magnetic

leakage internal detection technology for long-distance oil and gas pipelines, and the theory and application of pipeline stress detection technology.



**白石 (通信作者)**, 2016 年于九州大学获得工学博士学位, 现为沈阳工业大学信息科学与工程学院特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为磁医学检测技术, 无损检测, 高温超导应用技术等。

E-mail: stworldyy@wo.cn

**Bai Shi** (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Kyushu University in 2016. He is currently a distinguished professor and a Ph.D. advisor in the School of Information Science and Engineering at Shenyang University of Technology. His main research directions are magnetic medical testing technology, nondestructive testing and high-temperature superconductivity application technology, etc.