

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209693

# 基于双磁场管道复合型缺陷应力信号提取方法研究\*

廉正, 刘斌, 刘桐, 武梓涵, 杨理践

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

**摘要:**缺陷和应力共同存在的复合型缺陷是影响管道安全运行的重要因素之一。双磁场管道内检测法可用于复合型缺陷处应力损伤程度判断,但应力信号提取方法亟待解决。本文将J-A理论中的磁力学关系引入磁荷模型中,解析计算了不同应力、外磁场下复合型缺陷磁信号,建立基于双磁场信号比值的复合型缺陷应力信号提取模型,提出比值因子用于缺陷处应力水平的评估,并进行了系统的实验验证。研究表明,强磁信号对缺陷处应力大小不敏感,信号主要包括缺陷尺寸信息;弱磁信号对缺陷处应力大小敏感,信号包括缺陷尺寸信息和缺陷处应力信息。提出的比值因子可反映缺陷处应力情况,弱磁场强度较低时,比值因子随缺陷处应力的平均变化率大于9%,随着弱磁场强度的增加,比值因子随应力变化幅度变小。

**关键词:**管道内检测;双磁场检测;复合型缺陷;应力

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

## Research on the stress signal extraction method of pipeline composite defect based on dual magnetic field

Lian Zheng, Liu Bin, Liu Tong, Wu Zihan, Yang Lijian

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

**Abstract:** The composite defect existing together with the stress is one of the important factors which affects the safe operation of pipeline. The dual magnetic field method can be used to judge the degree of stress damage at composite defects. But the stress signal extraction method needs to be solved urgently. In this article, the magnetomechanical relationship in the J-A theory is introduced into the magnetic charge model. The magnetic signals of composite defects under different stress and external magnetic field are analyzed and calculated. The stress signal extraction model of composite defects based on the ratio of dual magnetic field signals is formulated. The ratio factor is proposed to evaluate the stress level at the defect, and the systematic experimental evaluation is carried out. The results show that the strong magnetic signal is not sensitive to the stress at the defect, and the signal mainly includes the defect size information. The weak magnetic signal is sensitive to the stress at the defect, and the signal includes defect size information and stress information at the defect. The ratio factor can reflect the stress at the defect. When the weak magnetic field intensity is low, the average change rate of the ratio factor with the stress at the defect is larger than 9%. With the increase of weak magnetic field intensity, the variation range of ratio factor with stress decreases.

**Keywords:** in-pipe inspection; dual magnetic field detection; composite defect; stress

## 0 引言

管道在油气运输中起着重要作用,是国民经济的主动脉<sup>[1-2]</sup>。然而在役管道受内压影响,管壁缺陷周围的应力远大于管道应力的平均值,缺陷处大量的应力集中会

加速缺陷的扩展,导致管道断裂失效,这种缺陷和应力共同存在的复合型缺陷是影响管道安全运行的重要因素之一<sup>[3-4]</sup>。对于复合型缺陷,不仅需要检测缺陷尺寸,还需对缺陷处应力大小进行评估<sup>[5]</sup>。

目前,国内外针对复合型缺陷处应力的检测技术尚处于探索阶段,现阶段普遍使用漏磁法、弱磁法、巴克豪

收稿日期:2022-04-26 Received Date: 2022-04-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(61871450)、辽宁省兴辽英才计划青年拔尖人才项目(XLYC2007062)资助

森法以及一些复合检测方法进行复合型缺陷检测。Li等<sup>[6]</sup>提出一种漏磁与磁扰动复合检测方法,可以检测钢板应力和缺陷,但该方法解决重点在于缺陷的重构且难以在管道内检测中应用;Gaunkar等<sup>[7]</sup>使用巴克豪森法通过检测裂纹尖端应力的方式确定表面裂纹位置,但该方法难以检测复合型缺陷的几何参数。漏磁法、弱磁法能够有效检测管道的缺陷尺寸和应力集中区,已被广泛应用于管道缺陷的定位和几何参数表征中<sup>[8-10]</sup>。漏磁检测中,应力对饱和励磁下的磁信号影响较小,难以对复合型缺陷处应力进行有效评估<sup>[11-12]</sup>。弱磁检测中,罗旭等<sup>[13]</sup>提出一种面磁荷密度模型,解析计算了应力复合型缺陷的弱磁信号;杨晓惠等<sup>[14]</sup>提出一种扩展磁荷模型,探讨了多种复合型缺陷引起的弱磁信号变化规律;时朋朋等<sup>[15]</sup>提出了一种复合型缺陷在弱磁场作用下本构模型,计算了复合型缺陷的弱磁信号。以上研究建立了复合型缺陷的弱磁信号特征计算模型,同时证明了弱磁信号为缺陷和应力的复合信号,对于缺陷和应力信号的区分和缺陷处应力的提取仍是一个挑战<sup>[16-17]</sup>。

由于上述方法在复合型缺陷处应力提取存在局限性,国外有专家提出了双磁场管道内检测技术来评估缺陷处应力水平<sup>[18]</sup>。双磁场管道内检测法利用高、低两种不同磁化水平下,缺陷和应力损伤的磁信号差别,实现缺陷处应力损伤程度的判断,在管道复合型缺陷检测方面体现了较好的优势。但是现如今,双磁场检测机理尚不完善,其缺陷处应力的检测机理和应力信号提取方法亟待研究。

本文从吉尔·阿瑟顿(Jiles-Atherton, J-A)理论出发,建立了双磁场检测的磁力学关系;将磁力学关系引入磁荷模型建立了管道不同应力、外磁场下复合型缺陷的磁信号模型,建立了基于双磁场信号的缺陷处应力提取模型,并进行了系统性的实验验证,研究结果为双磁场法检测复合型缺陷处应力提供理论依据。

## 1 双磁场检测基本原理

在役管道运行时,缺陷周围的应力集中区将促使缺陷扩展,这种缺陷和应力同时存在的复合型缺陷严重危害了管道的安全运行,缺陷处应力导致的事故无明显征兆,在管线运行过程很难被发现,一旦缺陷处应力超出安全范围,将造成管道断裂,破坏性极大<sup>[19-20]</sup>。双磁场检测作为一种新型检测手段,可有效检测缺陷处应力。双磁场检测器包括强磁检测器和弱磁检测器,每个检测器结构大体相同,主要包括永磁铁、钢刷、探头和轭铁,两段检测器的不同之处在于检测器的永磁铁磁场强度不同,且探头能检测到的磁信号区间不同。强磁检测器中的永磁铁能产生很高的磁场强度,可将被测管道的管道壁磁化

至磁饱和或者接近磁饱和状态,探头能检测到的信号区间较高,磁信号对应力不敏感,用于检测管道缺陷;弱磁检测器中永磁铁产生的磁场强度较低,探头能检测到的信号区间较低,磁信号对应力敏感,检测到的是缺陷和缺陷处应力共同产生的磁信号。双磁场检测器的具体结构如图1所示。

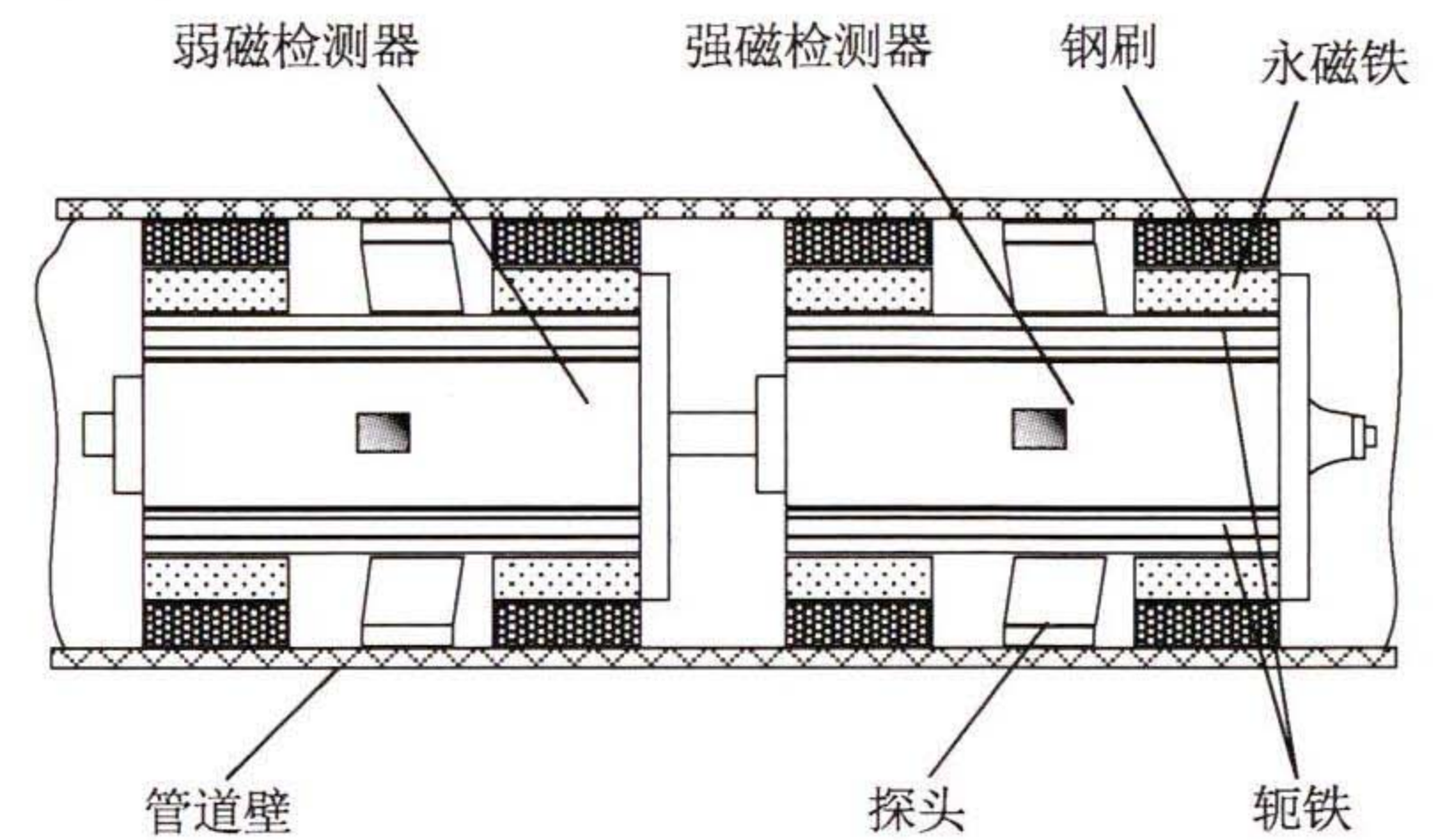


图1 双磁场检测器

Fig. 1 Dual magnetic field detector

## 2 双磁场检测数学模型建立

### 2.1 复合型缺陷磁信号解析模型

管道复合型缺陷处将受磁场与应力共同作用被磁化,在缺陷端面累积磁荷,产生泄漏磁场。本文以由X80钢制成、外径为1 219 mm、含有内壁缺陷的油气管道为例建立模型。由于管道直径较大,管道表面弧度可视为一个平面。以缺陷中心为原点,在管道表面上建立笛卡尔坐标系,管道的轴向定义为 $X$ 轴,周向定义为 $Z$ 轴,径向轴定义为 $Y$ 轴, $D_x$ 为原点到缺陷左侧或右侧面的距离; $D_y$ 为缺陷径向深度; $D_z$ 为原点到缺陷前面或后面的距离。缺陷漏磁模型示意图如图2所示。

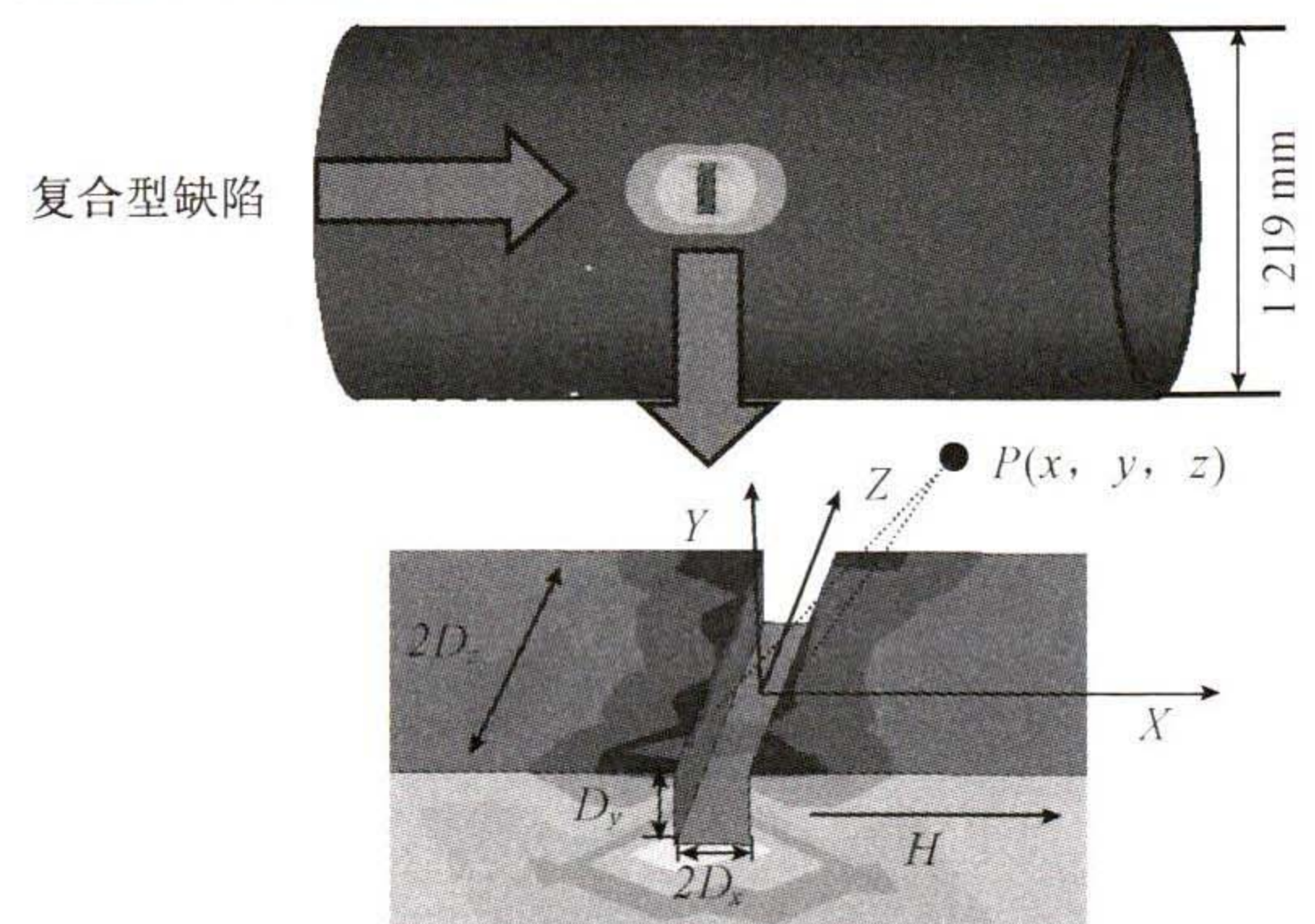


图2 管道复合型缺陷漏磁模型示意图

Fig. 2 Diagram of the magnetic flux leakage model of pipeline composite defects

由图2可知,管道内壁复合型缺陷端面上由外磁场和应力共同作用产生磁荷累积。双磁场检测器从左至右

移动,对管道壁进行检测,外磁场  $H$  从左至右平行于  $X$  轴方向。在此情况下管道缺陷处泄漏磁信号的分析式如式(1)所示<sup>[21-22]</sup>。

$$dH_0 = \frac{\rho dS}{4\pi\mu_0 |r|^3} \mathbf{r} \quad (1)$$

其中,  $H_0$  为缺陷处泄漏磁场强度,即检测器检测到的磁信号,  $\rho$  为缺陷侧壁在外磁场作用下产生的磁荷密度,  $dS$  为磁荷表面的面积元素,  $\mathbf{r}$  为磁荷表面到检测位置的方向向量,  $r$  为检测器到磁荷表面的距离,  $\mu_0$  为真空磁导率。

根据磁荷密度定义,磁荷密度与材料本身的磁化强

$$\begin{cases} H_x = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \int_{-D_z}^0 \int_{-D_y}^0 \frac{x + D_x}{[(x + D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{x - D_x}{[(x - D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} dy_m dz_m \\ H_y = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \int_{-D_z}^0 \int_{-D_y}^0 \frac{y - y_m}{[(x + D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y - y_m}{[(x - D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2]^{\frac{3}{2}}} dy_m dz_m \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{-\frac{\mu_0}{k\delta}(M_{an} - M) - \frac{c}{1-c} \frac{dM_{an}}{dH}}{\frac{\mu_0}{k\delta}(M_{an} - M) \left\{ \alpha + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(r_{1(0)} + r'_{1(0)}\sigma) + 6(r_{2(0)} + r'_{2(0)}\sigma)M^2] \right\} - \frac{1}{1-c}} \quad (4)$$

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{M_s \left[ -\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_e}{a}\right) \frac{1}{a} + \frac{a}{H_e^2} \right]}{1 + M_s \left[ \operatorname{csch}^2\left(\frac{H_e}{a}\right) \frac{1}{a} - \frac{a}{H_e^2} \right] \left\{ \alpha + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(r_{1(0)} + r'_{1(0)}\sigma) + 6(r_{2(0)} + r'_{2(0)}\sigma)M_{an}^2] \right\}} \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  为磁畴耦合系数;  $\delta$  为方向系数,励磁时为1,退磁时为-1;  $c$  为不可逆系数;  $k$  为钉扎系数;  $M_s$  为材料的饱和磁化强度;  $a$  为磁化曲线形状系数;  $\alpha$ 、 $c$ 、 $k$ 、 $M_s$ 、 $a$  均与材料本身属性有关;  $r_{1(0)}$ 、 $r'_{1(0)}$ 、 $r_{2(0)}$ 、 $r'_{2(0)}$  均为固定常数;  $\sigma$  为铁磁性材料受到的应力;  $H_e$  为金属铁磁性构件在外磁场和应力共同作用下的等效磁场强度。根据 Sablik 模型,式(4)中无磁滞磁化强度  $M_{an}$  可用朗之万函数拟合得到,如式(6)所示<sup>[26-27]</sup>。

$$M_{an} = M_s \left[ \coth\left(\frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e}\right) \right] \quad (6)$$

其中,等效磁场强度  $H_e$  可以表示为<sup>[28]</sup>:

$$H_e = H + \alpha M_{an} + H_\sigma \quad (7)$$

其中,  $H_\sigma$  为应力影响的等效外磁场强度,可以近似表示为:

$$H_\sigma = \frac{3\sigma}{\mu_0} [(r_{1(0)} + r'_{1(0)}\sigma)M + 2(r_{2(0)} + r'_{2(0)}\sigma)M^3] \quad (8)$$

在材料受到应力作用下,钉扎密度将产生变化,因此钉扎系数  $k$  将发生变化。磁畴的形状也会随着应力发生变化,导致磁畴耦合系数  $\alpha$  产生变化,这两个参数的变化

的关系如式(2)所示<sup>[23]</sup>。

$$\rho = \mu_0 M \quad (2)$$

其中,  $M$  为管道壁的磁化强度,铁磁性材料的磁化强度与外磁场强度  $H$  和材料所受的应力有关。

检测器沿管道的轴向移动,定义三维空间场点坐标,即检测器的霍尔探头坐标为  $P(x, y, z)$ ,磁荷面微元坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ ,则  $dS = dy_m dz_m$ ,该磁荷面微元在空间点  $P$  产生的轴向、径向的泄漏磁场强度可通过式(1)的积分获得,积分结果如式(3)所示。根据 J-A 理论,铁磁性材料磁化强度  $M$ 、无磁滞磁化强度  $M_{an}$  与应力、外磁场  $H$  的对应关系分别如式(4)、(5)所示<sup>[24-25]</sup>。

如式(9)、(10)所示<sup>[29-30]</sup>。

$$k = k_0 - \frac{3}{2} \eta_0 \lambda_{ws} \sigma \quad (9)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{21}{4} \frac{E_s}{\mu_0} \left\{ \lambda_{ws} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2\right] / M_s \right\}^2 \quad (10)$$

其中,  $k_0$  为初始钉扎系数;  $\alpha_0$  为初始畴壁耦合系数;  $\eta_0$  为拟合常数;  $\lambda_{ws}$  为无应力条件下材料的饱和磁致伸缩应变;  $E_s$  为弹性模量;  $\sigma_0$  为常数。将式(5)~(8)代入式(4),并代入式(9)~(10)中的钉扎系数  $k$  和磁畴耦合系数  $\alpha$ ,可得到不同应力  $\sigma$  下磁化强度  $M$  与外磁场  $H$  的关系,所建立磁力学关系结果如图3所示。其中,参数取值为:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ ,  $M_s = 1.387 \times 10^6 \text{ Am}^{-1}$ ,  $k_0/\mu_0 = 500 \text{ Am}^{-1}$ ,  $a = 180 \text{ Am}^{-1}$ ,  $\alpha_0 = 8.44 \times 10^{-6}$ ,  $E_s = 2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $\lambda_{ws} = 3.85 \times 10^{-6}$ ,  $\sigma_0 = 100 \times 10^6 \text{ MPa}$ ,  $\eta_0 = 1.5 \times 10^{-7}$ <sup>[31]</sup>。

由图3可知,应力使初始磁化曲线发生偏移,且低磁场磁化情况下偏移量远大于高磁场磁化情况下偏移量。该结果表明,高磁场磁化下,管壁磁化强度受应力影响小,复合型缺陷端面上磁荷的堆积由缺陷和外磁场决定,此时检测到的磁信号为缺陷产生的磁信号;低磁场磁化

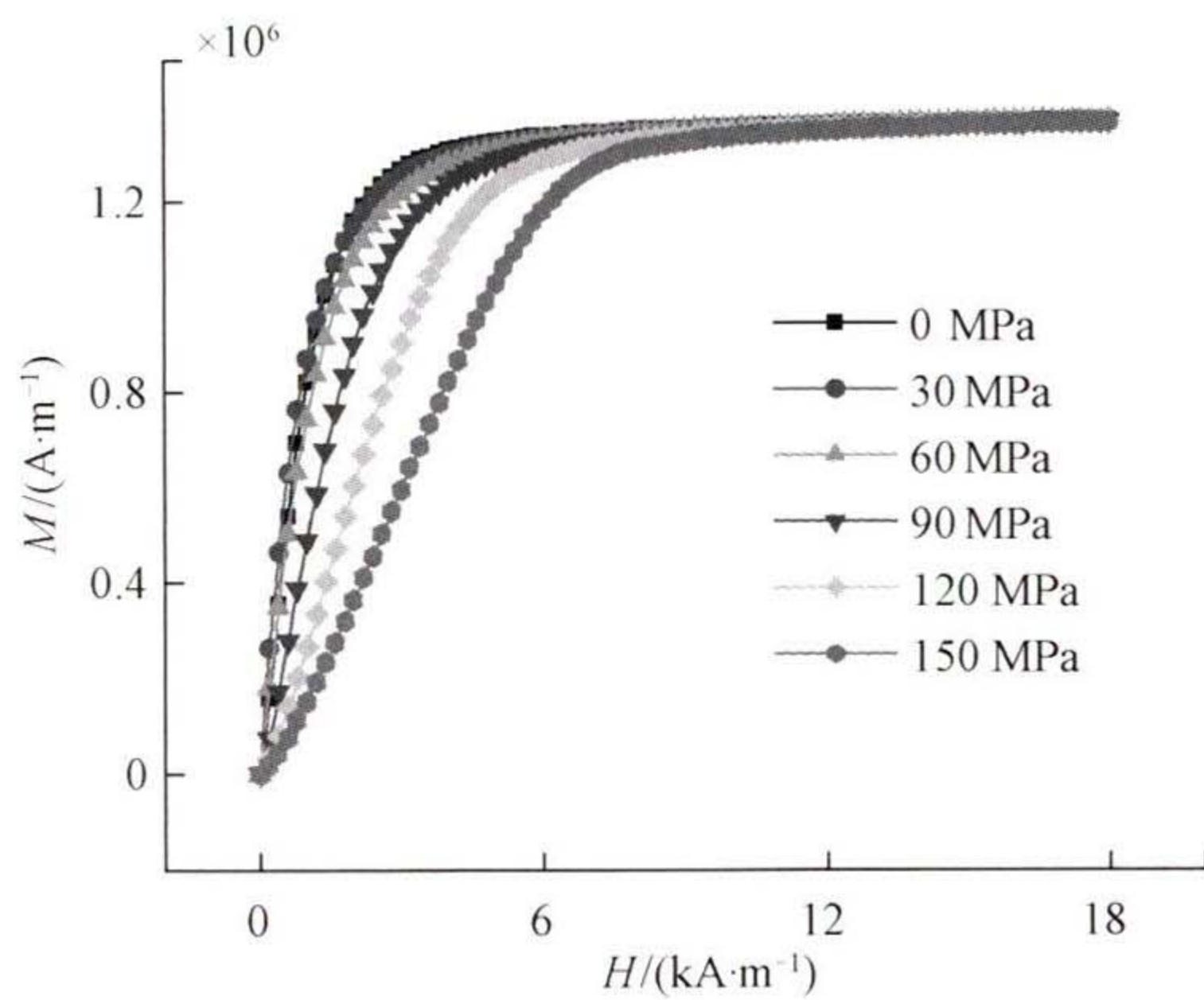


图3 不同应力下的磁力学关系

Fig. 3 Magnetomechanical relationship under different stresses

下,管壁磁化强度受应力影响大,复合型缺陷端面上磁荷的堆积由缺陷、应力和外磁场共同决定,此时检测到的磁信号为缺陷和应力共同产生的磁信号。将外磁场分别设定在 500、2 500、15 000 A/m,计算不同外磁场作用下,应力与磁化强度的关系,如图 4 所示。

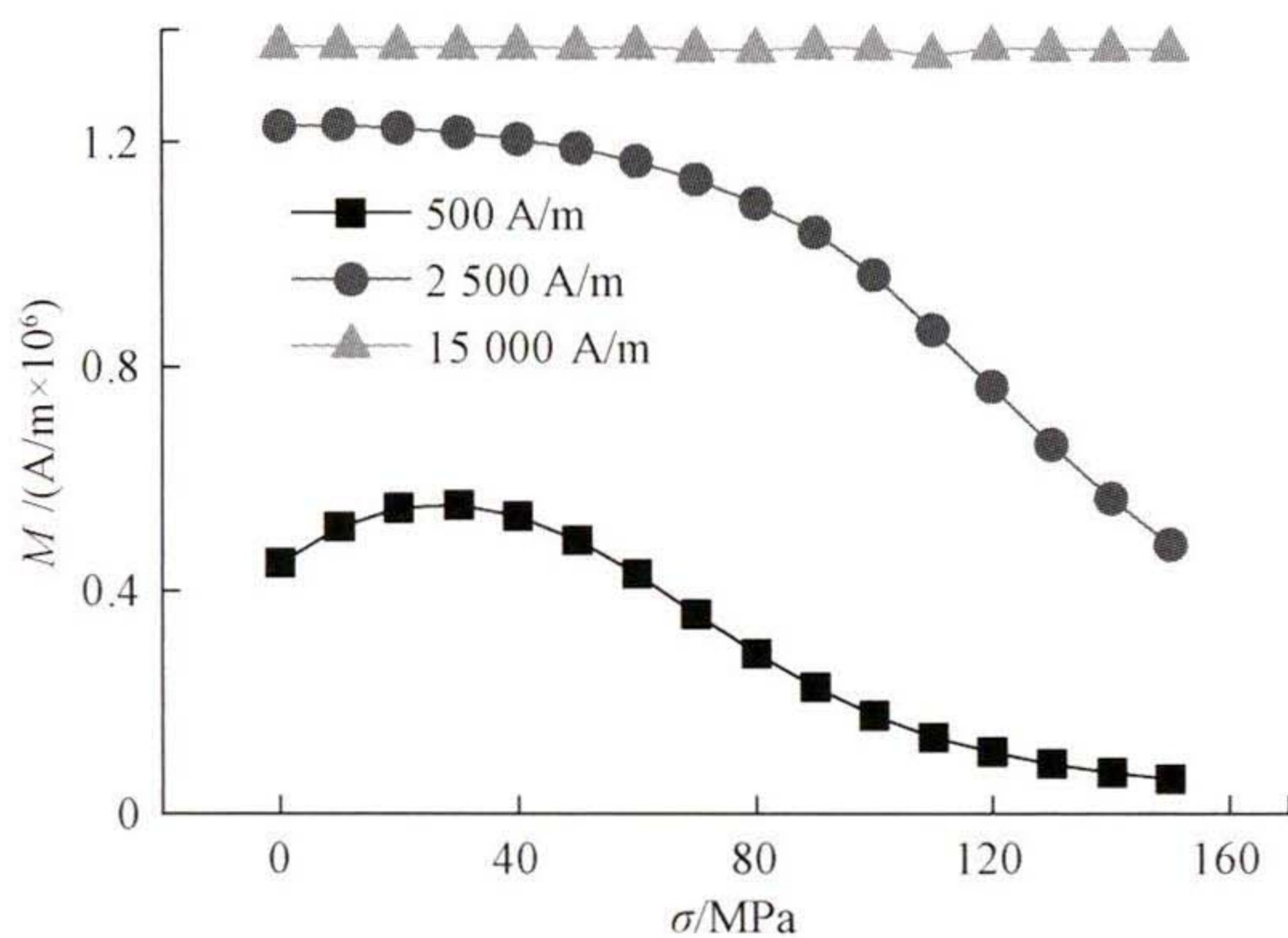


图4 不同外磁场下的磁力学关系

Fig. 4 Magnetomechanical relationship under different external magnetic fields

由图 4 可知,外磁场强度为 15 000 A/m 的情况下,应力对磁化强度影响程度较小;外磁场强度为 500 和 2 500 A/m 的情况下,应力对磁化强度影响显著。具体体现为:强磁场下,应力阻碍磁化,使得材料磁化强度略微降低,变化幅度微弱;弱磁场为 500 A/m 时,低应力区磁化强度随应力增加,随后出现峰值拐点,高应力区,磁化强度随应力的增加而衰减。该模型计算结果产生的原因是当外界磁场强度较大时,材料内部大部分磁畴均已重新排布,此时应力难以对磁畴排布造成影响;而外界磁场较小时,大部分磁畴均未重新排布,此时应力首先会导致磁畴定向转动,产生磁化强度,当应力达到一定程度时,材料内部磁化强度达到最大,继续增加应力将阻碍磁化过程。

将计算得到的 J-A 理论中的磁力学关系引入磁荷模型的计算式(5)中,解析计算不同外磁场和应力下的复合型缺陷磁信号。缺陷为深度为 1 mm,宽度为 1 mm,长度为 4 mm,应力为 0 ~ 150 MPa,探头与管壁之间的提高值为 5 mm。计算得到的不同外磁场下复合型缺陷磁信号如图 5 所示。

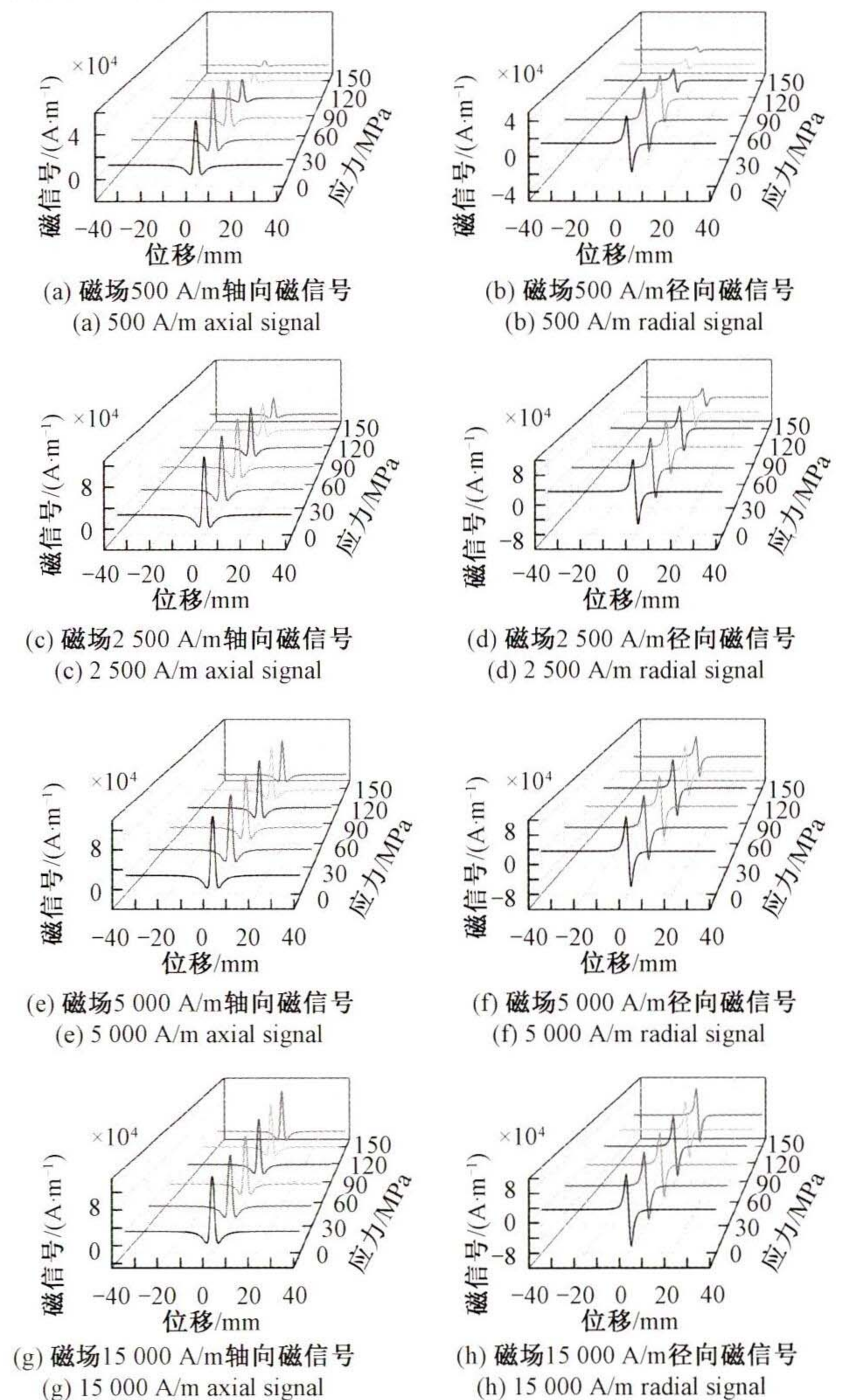


图5 不同外磁场下复合型缺陷磁信号

Fig. 5 Magnetic signals of composite defects under different external magnetic fields

由图 5 可知,外磁场强度较低时,应力对磁信号影响较为剧烈,外磁场强度较高时,应力对磁信号影响微弱。具体分析外磁场强度为低磁场 500 A/m 和高磁场 15 000 A/m 下的复合型缺陷磁信号特征,应力影响下双磁场轴向和径向磁信号特征分别如图 6、7 所示。

由图 6 可知,弱磁励磁下磁信号随应力显著变化,此时弱磁检测器的探头检测到的为管道壁上的缺陷和应力共同产生的磁信号;而强磁励磁下,应力对磁信号峰值影响幅度很小,此时探头检测到的为管道壁上缺陷产生的磁信号。

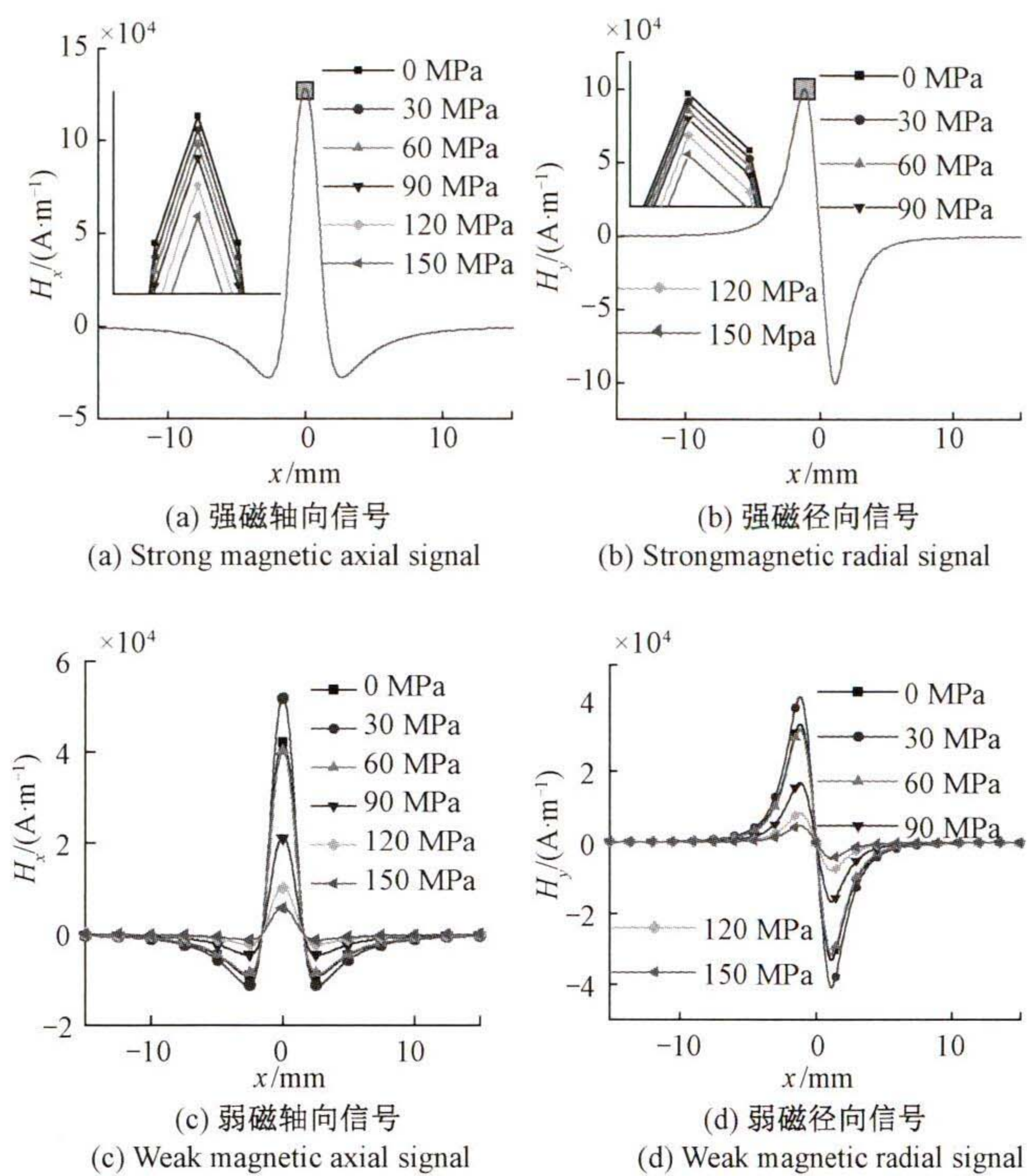


图6 复合型缺陷双磁场信号

Fig. 6 Dual magnetic field signals of composite defect

## 2.2 复合型缺陷应力提取模型

为了消除复合型缺陷尺寸对信号的影响,得到双磁场信号与缺陷处应力的关系,定义比值因子  $K$  为强磁信号与弱磁信号的比值:

$$K = \frac{H_{\text{强}}}{H_{\text{弱}}} \quad (11)$$

其中,  $H_{\text{强}}$  为复合型缺陷处强磁信号,  $H_{\text{弱}}$  为复合型缺陷处弱磁信号,在双磁场检测复合型缺陷的过程中,在式(5)中,将与尺寸有关的参数及常数一同定义为  $F$ ,则复合型缺陷泄漏磁场强度  $H$ 、磁荷密度  $\rho$  之间的关系满足  $H = \rho \times F$ ,由于强磁检测器和弱磁检测器检测的是同一缺陷,因此强磁、弱磁检测中的  $F$  相等,比值因子只与强磁、弱磁的磁荷密度有关。计算不同弱磁场下,比值因子与复合型缺陷处应力关系,如图7所示。

由图7可知,不同弱磁场强度下,比值因子与缺陷处应力的对应关系不同。在弱磁场为 500 A/m 时,比值因子随缺陷处应力的变化幅度最大,低应力区比值因子随应力增加而减小;然后出现拐点,高应力区比值因子随应力显著增加;随着弱磁场的增加,比值因子随缺陷处应力变化幅度降低。因此,在弱磁场强度较低时,可根据比值因子与缺陷处应力存在的对应关系对缺陷处应力进行评估。此外,比值因子还受材料属性影响,但随应力变化的整体趋势不变。

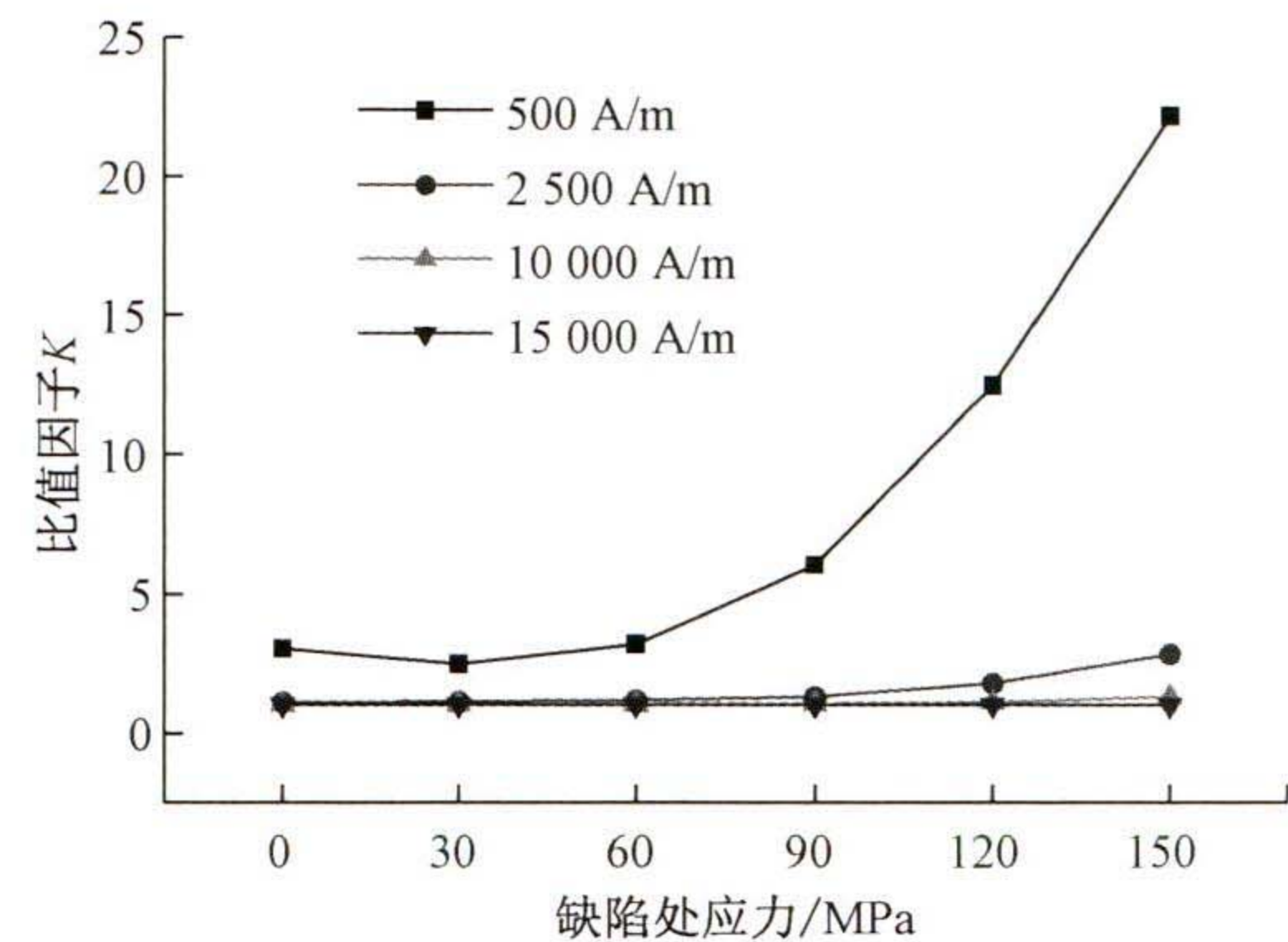


图7 比值因子与复合型缺陷处应力的关系

Fig. 7 Relationship between ratio factor and stress at composite defect

## 3 实验及结果分析

### 3.1 不同应力下的磁力学关系实验

为了验证本文根据 J-A 理论计算的磁力学关系,本研究进行了不同应力下的磁力学关系实验。

#### 1) 实验过程

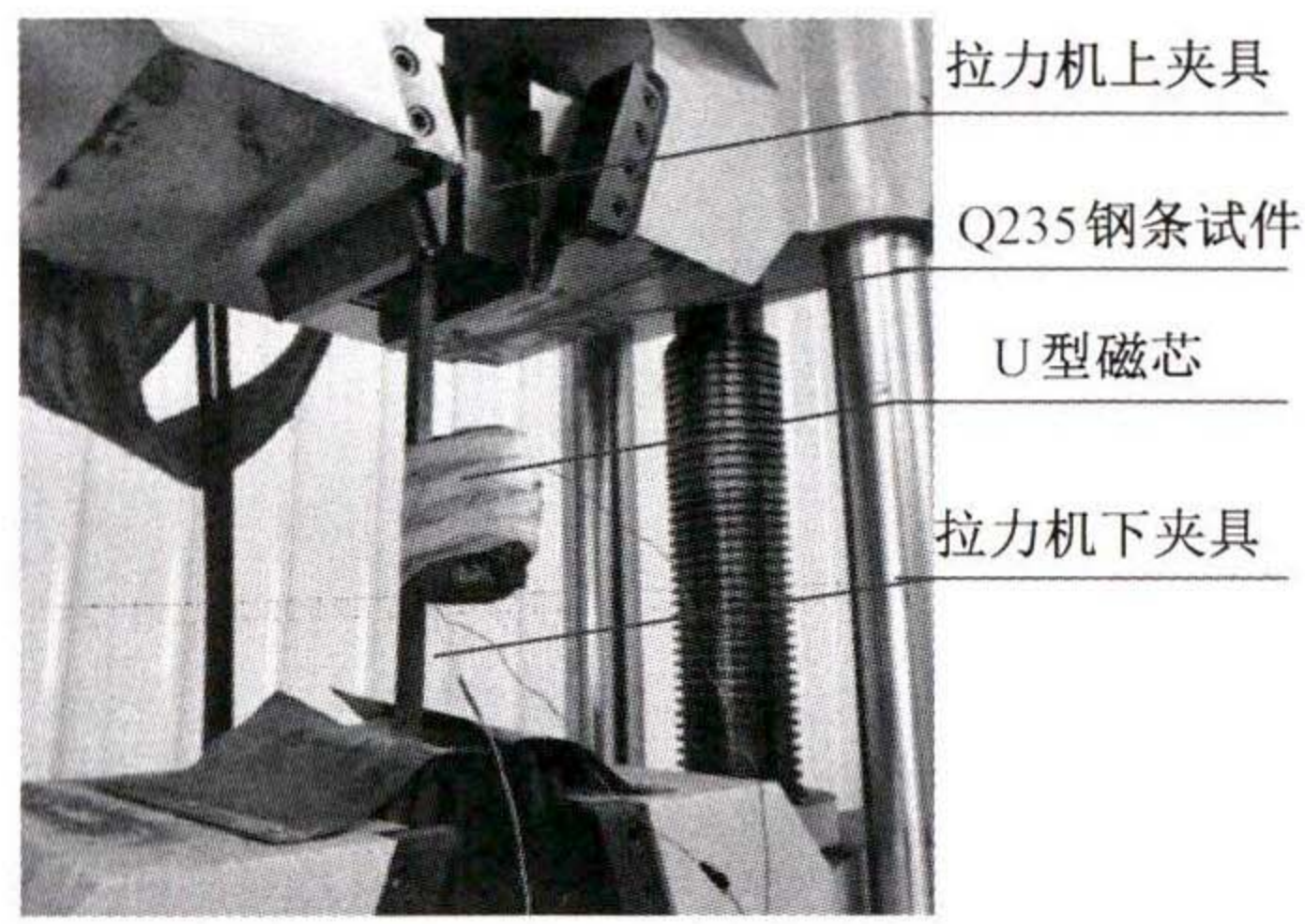
实验采用 WAW-2000 微机控制电液伺服万能拉力试验机和磁特性分析仪 MATS-2010SD,测量不同应力下 Q235 试件初始磁化曲线,分析不同应力下的磁力学关系。被测 Q235 试件尺寸为 500 mm×15 mm×12 mm,试件的两端分别固定在拉力机的上下夹具上;将激励线圈均匀缠绕在 U 型磁芯上,并使 U 型磁芯两极靴固定在 Q235 钢条侧面上,用于给 Q235 试件提供外磁场。在两极靴之间的钢条上缠绕接收线圈,用以检测 Q235 试件产生的磁感应强度,试件安置在拉力机上的实验设备如图 8(a) 所示。将激励线圈与接收线圈连接到磁特性分析仪 MATS-2010SD 的激励和接收端子上,磁特性分析仪实验设备如图 8(b) 所示。

将安置好激励线圈的试件安装在拉力试验机的夹具上,并控制拉力机的拉力为保持在 80 MPa,使用磁特性分析仪计算此时试件的初始磁化曲线;接着控制拉力机分别保持在 120、160 和 200 MPa 的拉力,重复使用磁特性分析仪分别测量试件的初始磁化曲线,得到不同拉应力下的初始磁化曲线。

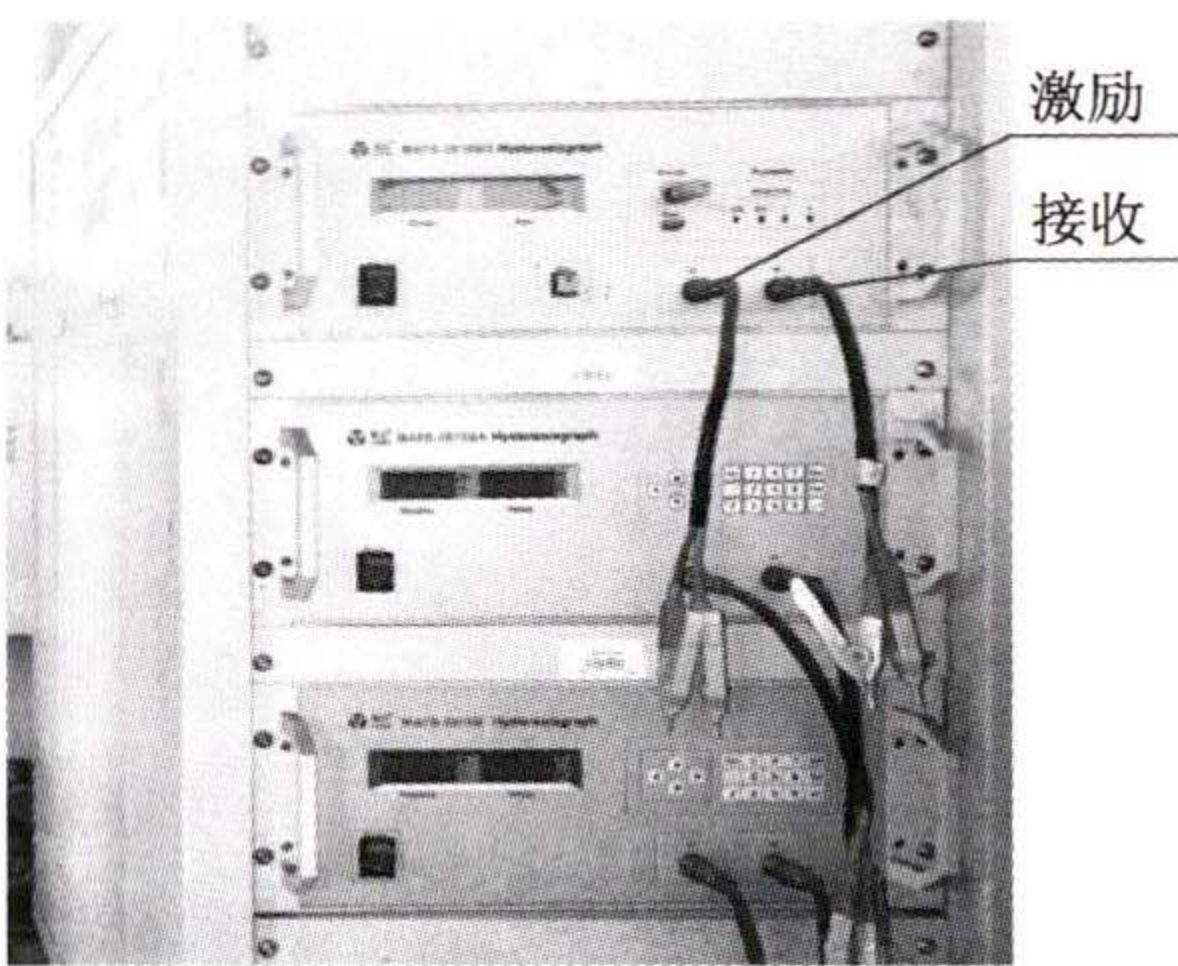
#### 2) 实验结果

通过磁特性分析仪采集初始磁化曲线。当应力分别为 80、120、160 和 200 MPa 时,得到不同应力下 Q235 材料的初始磁化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,Q235 的初始磁化曲线随着应力的增加出现偏移,证明应力可以改变铁磁性材料的磁化强度。实验结果表明,在应力增加的情况下,磁化强度对应力的



(a) 拉力机、试件、磁芯  
(a) Tensile machine, test piece, magnetic core



(b) 磁特性分析仪  
(b) Magnetic characteristic analyzer

图8 不同应力下磁力学关系实验设备  
Fig. 8 Experimental equipment for magnetomechanical relationship under different stresses

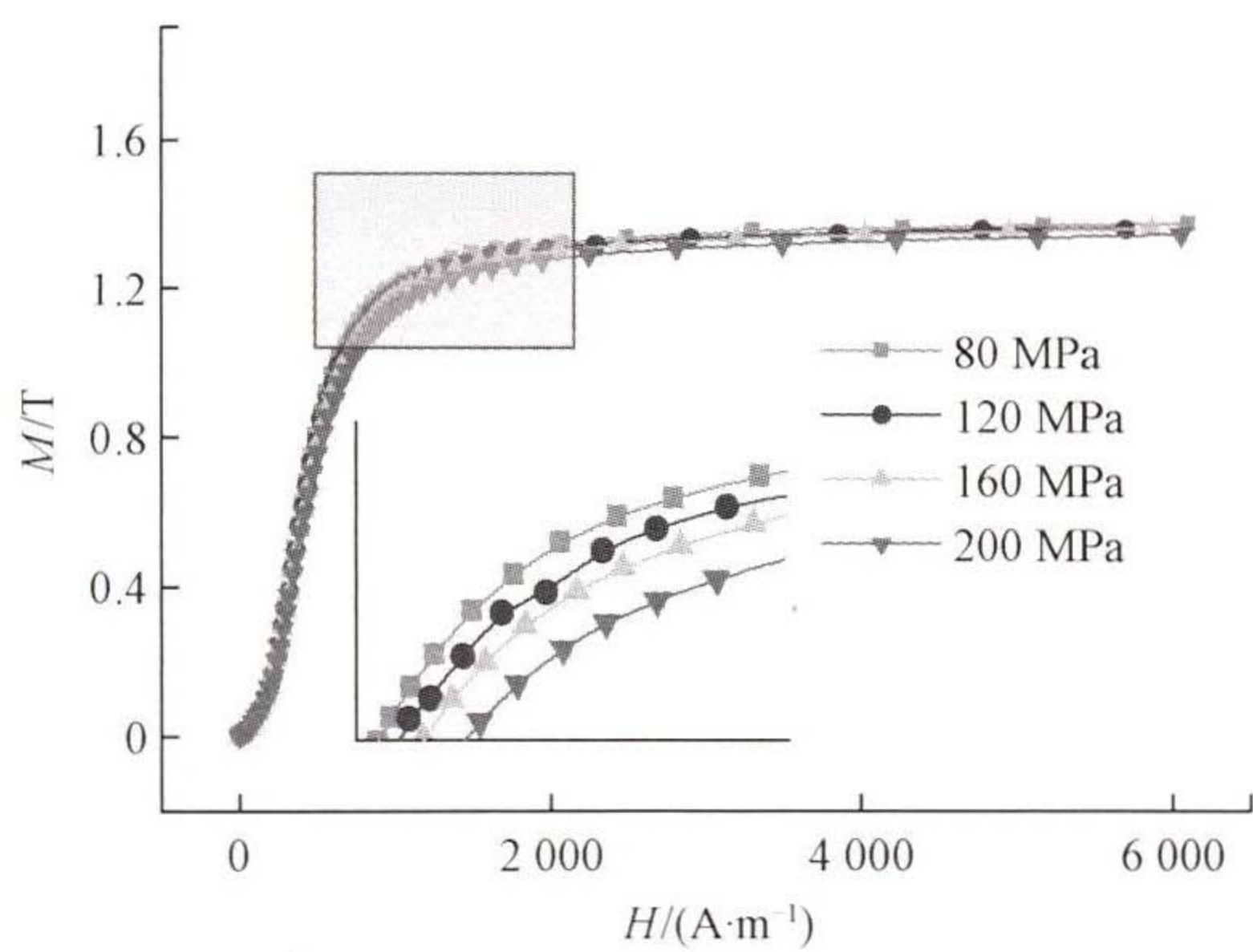


图9 不同应力磁力学关系实验结果  
Fig. 9 Experimental results of magnetomechanical relationship under different stresses

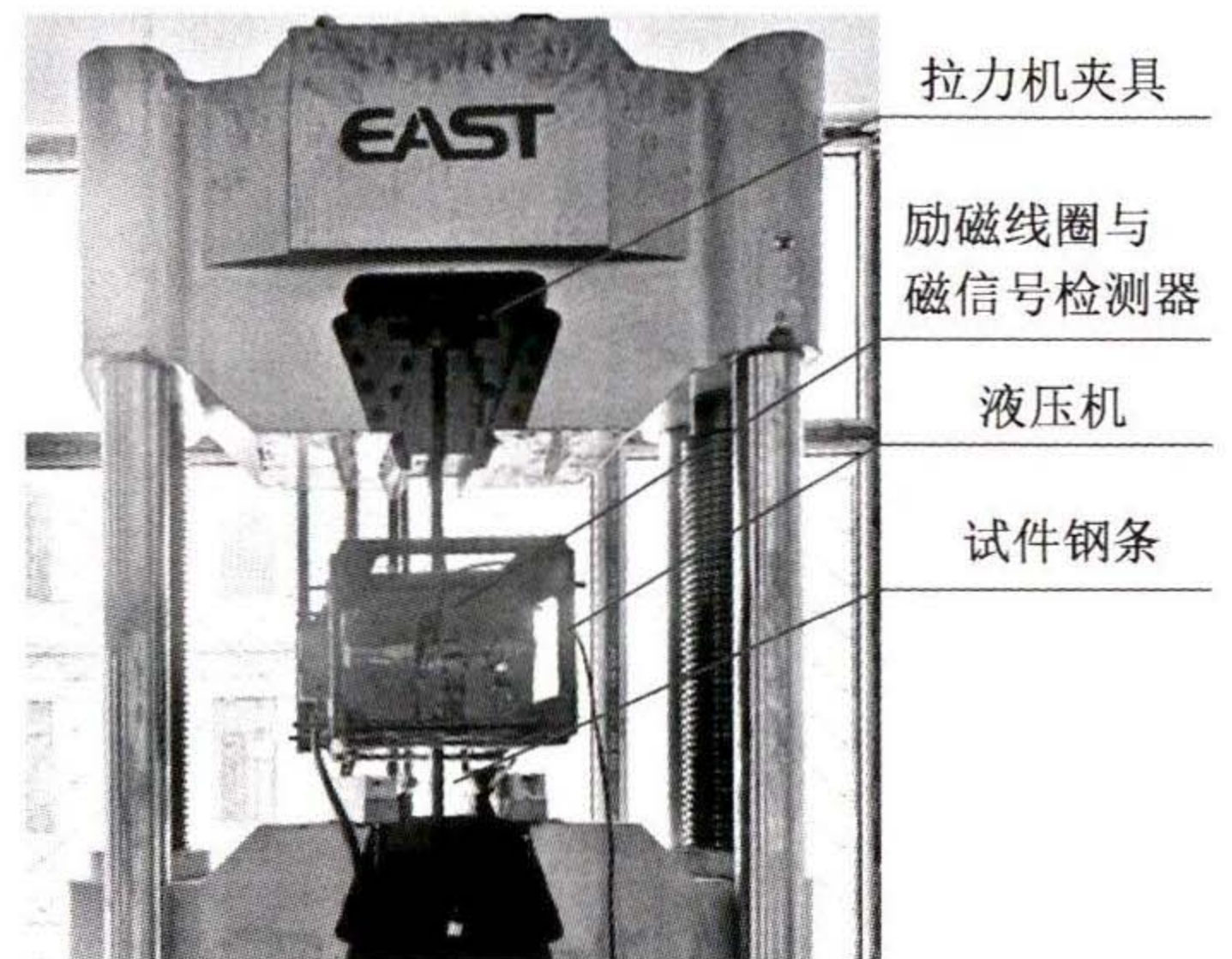
区分度随着外磁场的增加先增大,再减小,证明高磁场磁化下,检测到的磁信号为复合型缺陷本身产生的磁信号;低磁场磁化下,检测到的磁信号为缺陷和应力共同产生的复合信号。

### 3.2 不同外界磁场下的磁力学关系实验

为了获取不同外磁场下复合型缺陷的磁信号,验证本文复合型缺陷磁信号解析模型和复合型缺陷应力提取模型,本研究设计了不同外界磁场下的磁力学关系实验。

### 1) 实验过程

实验器材主要包括用于施加拉力的 WAW-2000 微机控制电液伺服万能拉力试验机,用于产生激励磁场的励磁线圈,用于检测磁场的磁信号检测器,用于模拟带缺陷的管道壁的试件钢条,实验设备和实验环境如图 10 所示。



(a) 拉伸实验设备  
(a) Tensile test equipment



(b) 拉力机控制平台与磁信号采集平台  
(b) Tension machine control platform and magnetic signal acquisition platform

图10 不同外界磁场下的磁力学关系实验设备  
Fig. 10 Experimental equipments for magnetomechanical relationship under different external magnetic fields

由图 10 可知,进行实验时将试件钢条穿过励磁线圈与磁信号检测装置,固定在拉力机夹具上。使用液压机控制励磁线圈与磁信号检测装置上下扫描,检测试件钢条在不同外磁场下的磁力学关系。其中,试件钢条采用 Q235 钢条,中间带有垂直于钢条的缺陷,试件钢条的实物图如图 11 所示,钢条尺寸为 600 mm×60 mm×15 mm,缺陷尺寸为 1 mm 宽,1 mm 深。

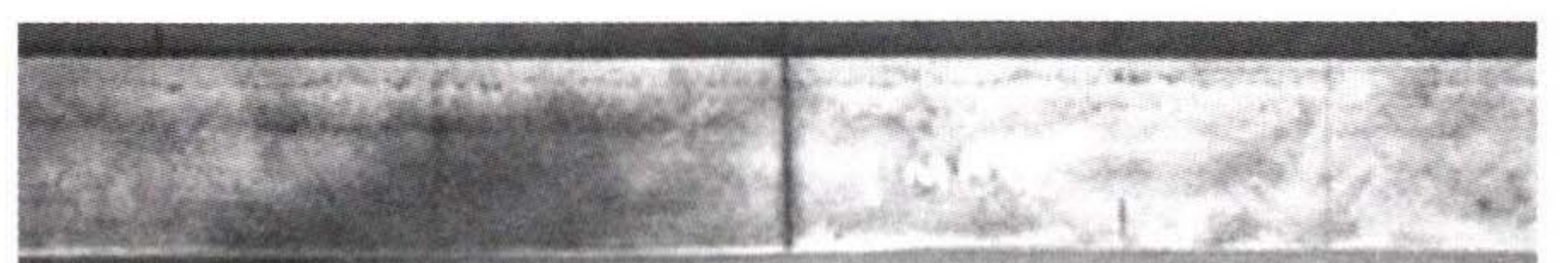


图11 试件钢条  
Fig. 11 Test piece

实验过程中,对试件钢条施加不同拉力,在试件钢条的缺陷处将产生应力集中区,成为复合型缺陷。钢条一端固定,另一端施加 80 MPa 拉力的情况下,复合型缺陷处的应力集中情况如图 12 所示。

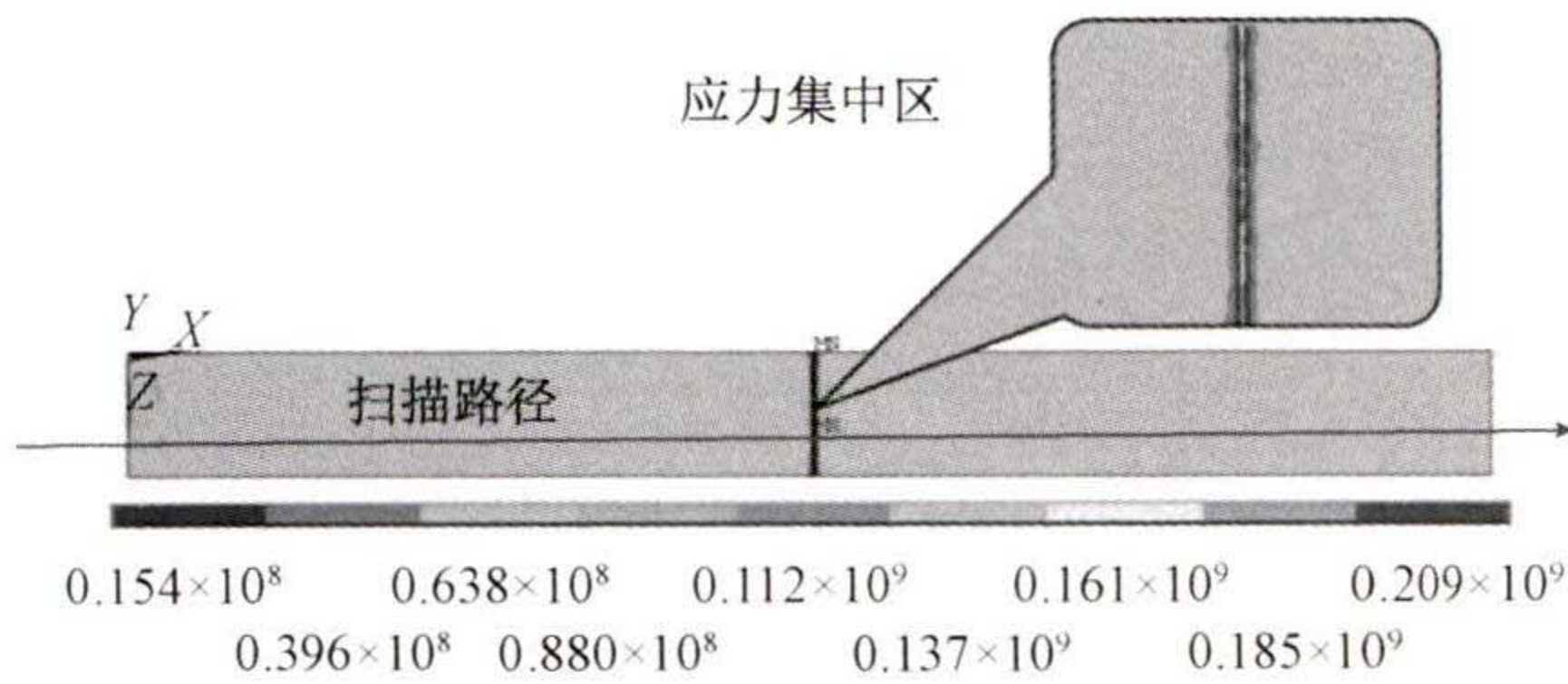


图 12 试件钢条应力集中区

Fig. 12 Stress concentration area of test piece

由图 12 可知,对钢条拉伸过程进行力学仿真,模拟拉伸实验的过程,得出钢条在一端固定,另一端施加 80 MPa 拉力的情况下,缺陷尖端应力最高达 209 MPa, Q235 试件钢条屈服强度为 235 MPa,因此实验设计中为防止断裂危险,最大施加到 80 MPa 的拉力。励磁线圈与磁信号检测器沿扫描路径在钢板上移动,通过改变励磁线圈电流值来改变外磁场强度。励磁电流从 0 A 增加到 8 A 的过程中,对应外磁场强度为 0 ~ 31.2 kA/m。分别在不同外磁场强度下测量试件钢条复合型缺陷的磁信号特征,得到实验结果。

2) 实验结果

实验时先通过励磁线圈激励平台调节励磁线圈产生的磁场,使用拉力机控制系统控制拉力机夹具,对试件钢条施加 0 ~ 72 kN 的拉力,对应压强为 0 ~ 80 MPa。由上到下使用磁信号检测装置扫描试件钢条,测量在不同外磁场和应力下试件钢条缺陷处的磁信号。相对于切向的单峰值信号特征,法向的峰峰值信号特征更易提取,比值因子对于切向和法向信号具有一样效果,因此使用法向信号。得到的不同应力、外磁场下的磁信号法向分量如图 13 所示。

由图 13 可知,不同外磁场下,法向磁信号存在波峰和波谷,与模型计算结果一致。提取不同外磁场和应力下的试件钢条的法向信号的峰峰值,提取结果如图 14 所示。

由图 14 可知,由不同外磁场下拉伸试验试件钢条法向信号峰峰值显示,在不同外磁场下,磁力学关系不同。在励磁电流为 0 的情况下,磁信号特征不明显;励磁电流为 2 A 的情况下,应力对磁信号的影响较为明显,励磁电流继续增大则应力对磁信号的影响重新变小,与双磁场检测机理相符。计算比值因子与缺陷处应力的关系,如表 1 所示。

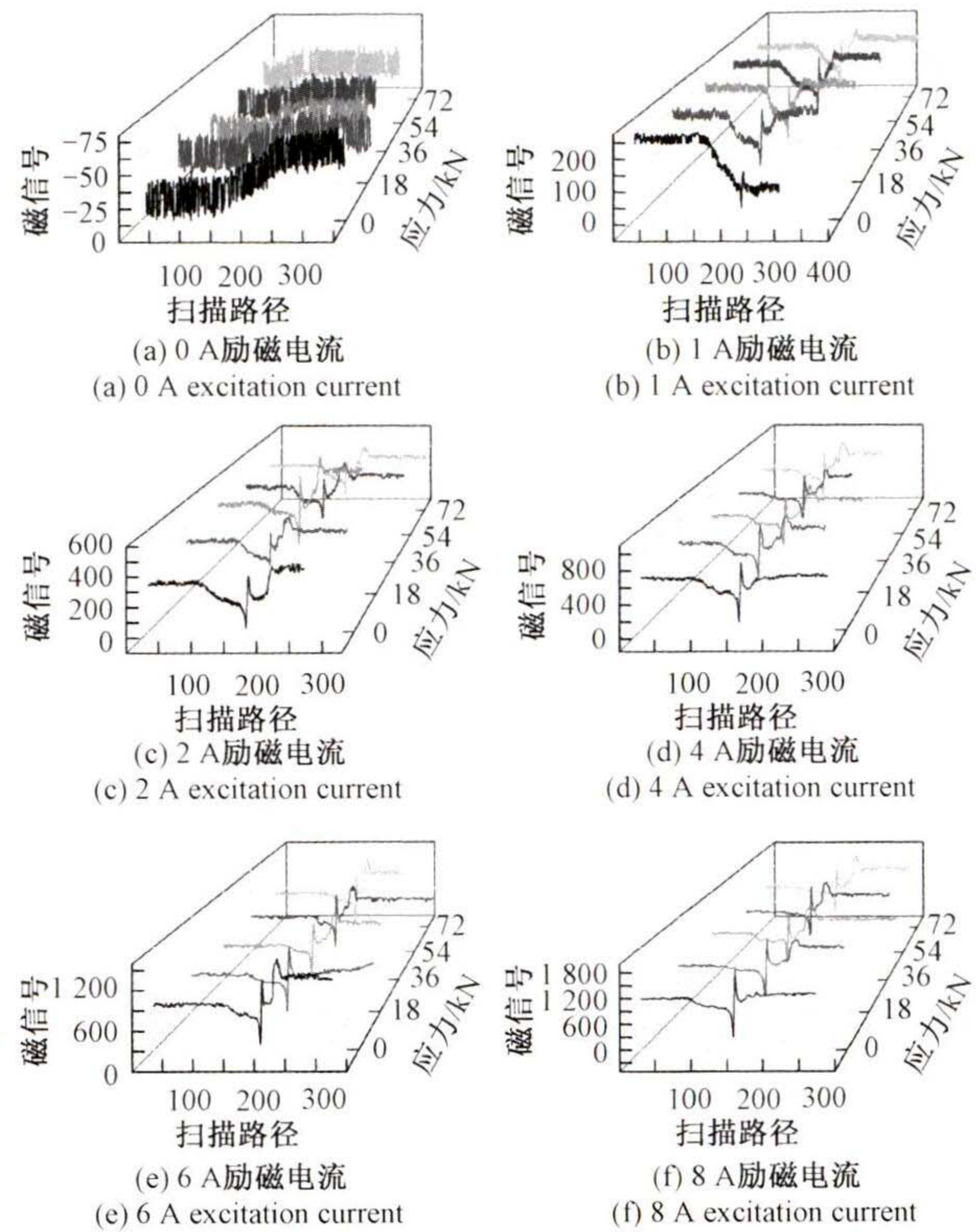


图 13 不同外磁场、应力下复合型缺陷磁信号

Fig. 13 Magnetic signals of tensile experiment with different external magnetic fields

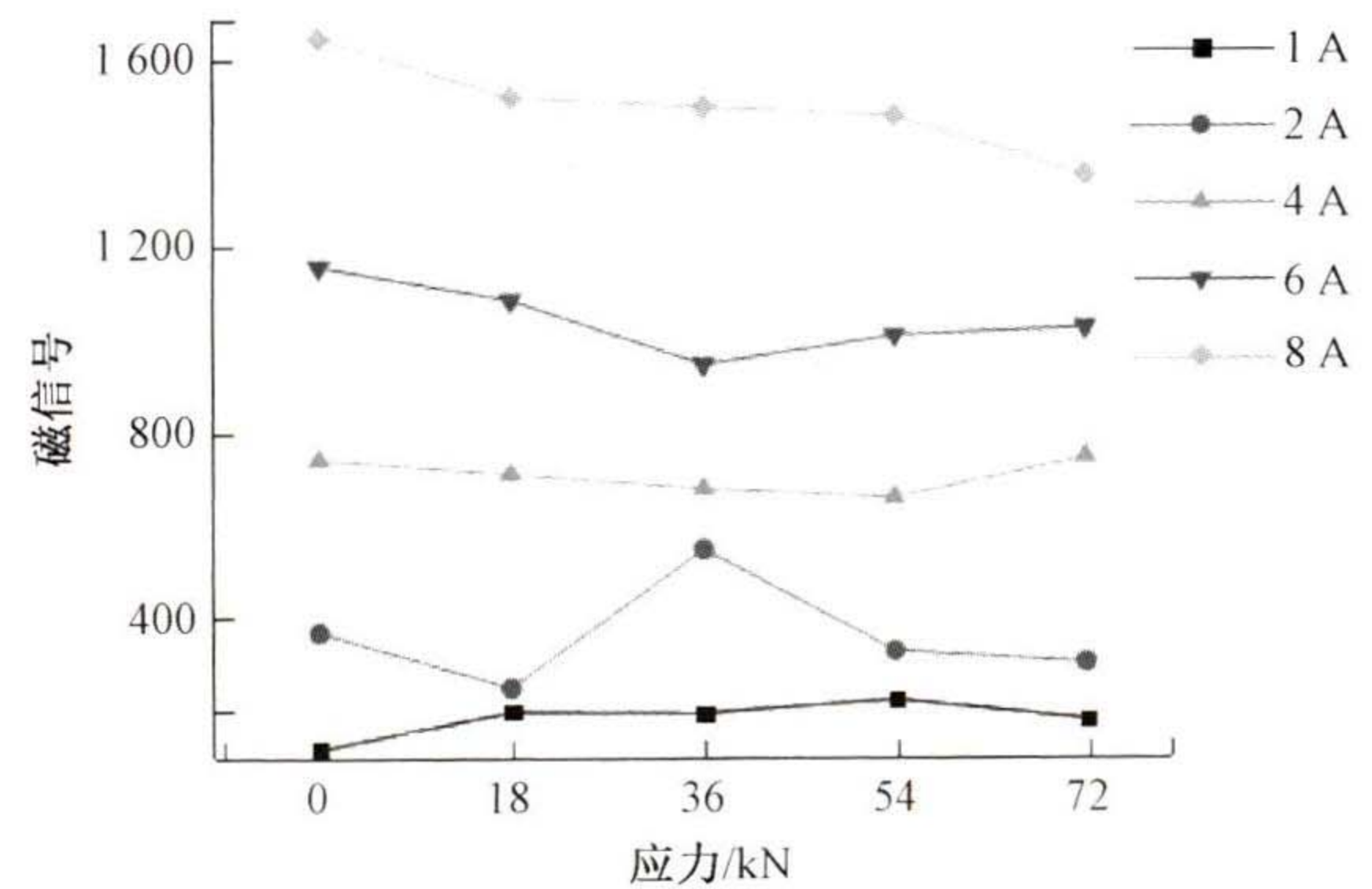


图 14 法向信号峰峰值

Fig. 14 Normal signal peak values

表 1 比值因子与缺陷处应力关系

Table 1 Relationship between ratio factor and stress at defect

弱磁 励磁电流	0 kN	18 kN	36 kN	54 kN	72 kN
2 A	4.46	6.09	2.74	4.50	4.46
4 A	2.22	2.14	2.21	2.24	1.81
6 A	1.43	1.40	1.58	1.46	1.32

由表1可知,在高磁场励磁电流固定为8 A,低磁场励磁大小为2 A的情况下,比值因子随应力变化最为剧烈,平均变化率大于9%,低磁场励磁电流增加到4 A、6 A的情况下,比值因子随应力变化平缓,平均变化率小于1%,比值因子对缺陷处应力的辨识能力降低。

### 3.3 应力提取模型阈值的研究

经过本研究的理论分析可知,双磁场检测中高磁场励磁下检测到的磁信号为缺陷产生的磁信号;低磁场励磁下检测到的磁信号为缺陷和应力共同产生的磁信号,并根据双磁场磁信号特征建立了应力提取模型。但实际实验过程中,存在缺陷尺寸过小,或弱磁场过低时,无弱磁信号的情况,此时比值因子分母为0,无法评估缺陷处应力水平。本研究通过不同外界磁场缺陷磁信号实验,指出应力提取模型的阈值。

#### 1) 实验过程

不同外界磁场缺陷磁信号采集实验过程如图15所示。检测设备由用于放置试件钢板的导轨、用于推拉钢板的液压泵、用于控制外磁场强度的励磁调节电路、用于给钢板励磁的励磁单元和用于检测磁信号的磁信号探头组成。实验时,将试件钢板安置在导轨上,由液压泵带动试件钢板在导轨上行进,励磁调节电路用来调节施加到试件钢板上的外磁场强度,钢板在液压泵的拖动下穿过励磁单元和磁信号探头,得到不同外磁场下的磁信号。

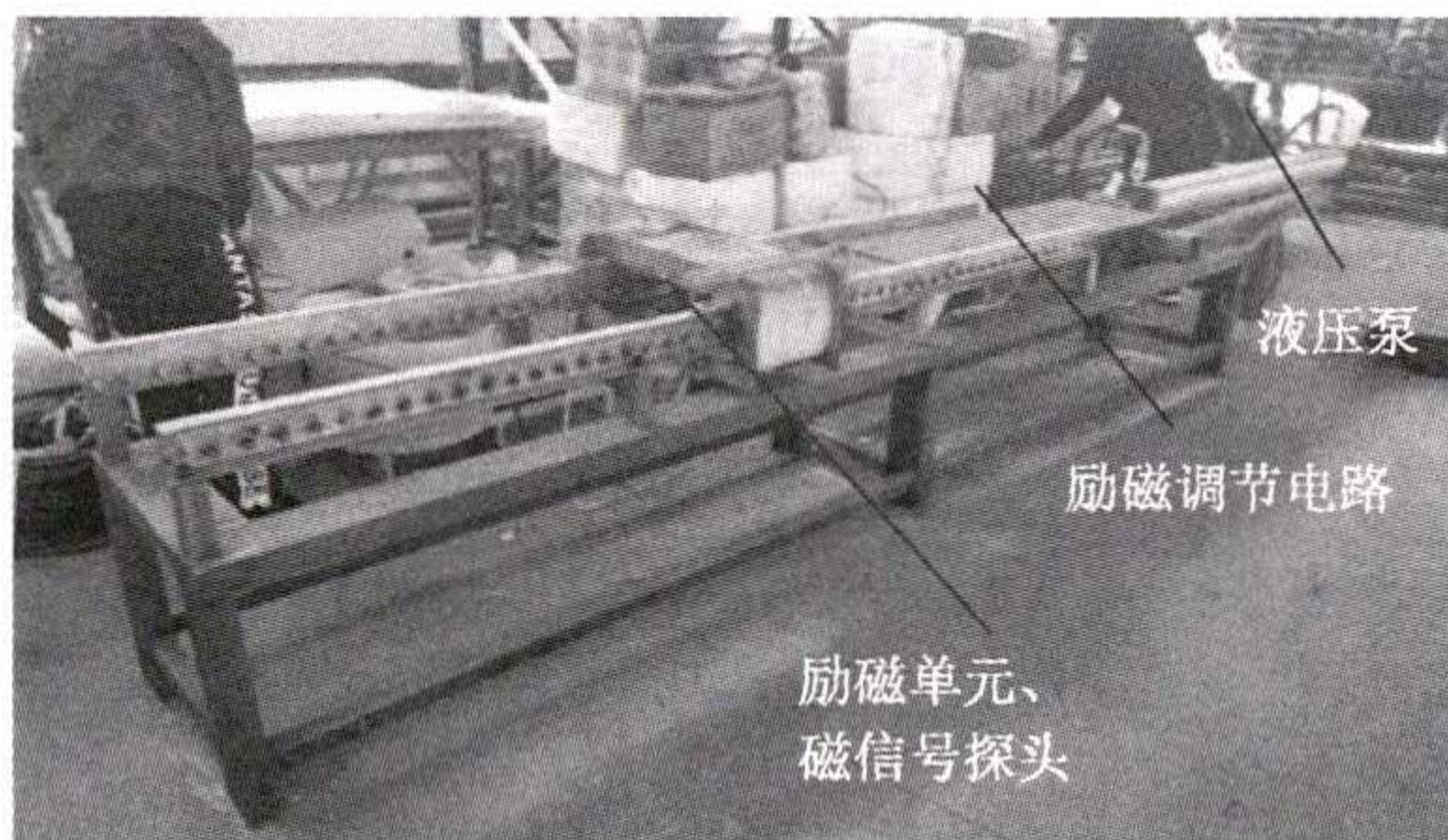


图15 不同外界磁场缺陷磁信号采集实验设备

Fig. 15 Experimental equipment for magnetic signal acquisition of different external magnetic field defects

为了模拟缺陷深度变化的情况下,低磁场励磁作用下信号强度,选取刻有3处缺陷的试件钢板,3处缺陷长宽深分为:11 mm×20 mm×0.5 mm、11 mm×20 mm×1 mm、11 mm×20 mm×2 mm,分别为缺陷1、2、3。将励磁电流从0.5 A上升到20 A,对应外磁场强度为0~36 kA/m,得到不同外磁场下的磁信号。如图16所示为试件钢板示意图。

由图16可知,为了模拟长输油气管道内壁缺陷,采用Q235材质,尺寸为1500 mm×450 mm×10 mm的试件钢板。钢板在导轨上由右至左移动,因此检测器相对于钢板的检测方向为由左至右。钢板完全穿过励磁单元和

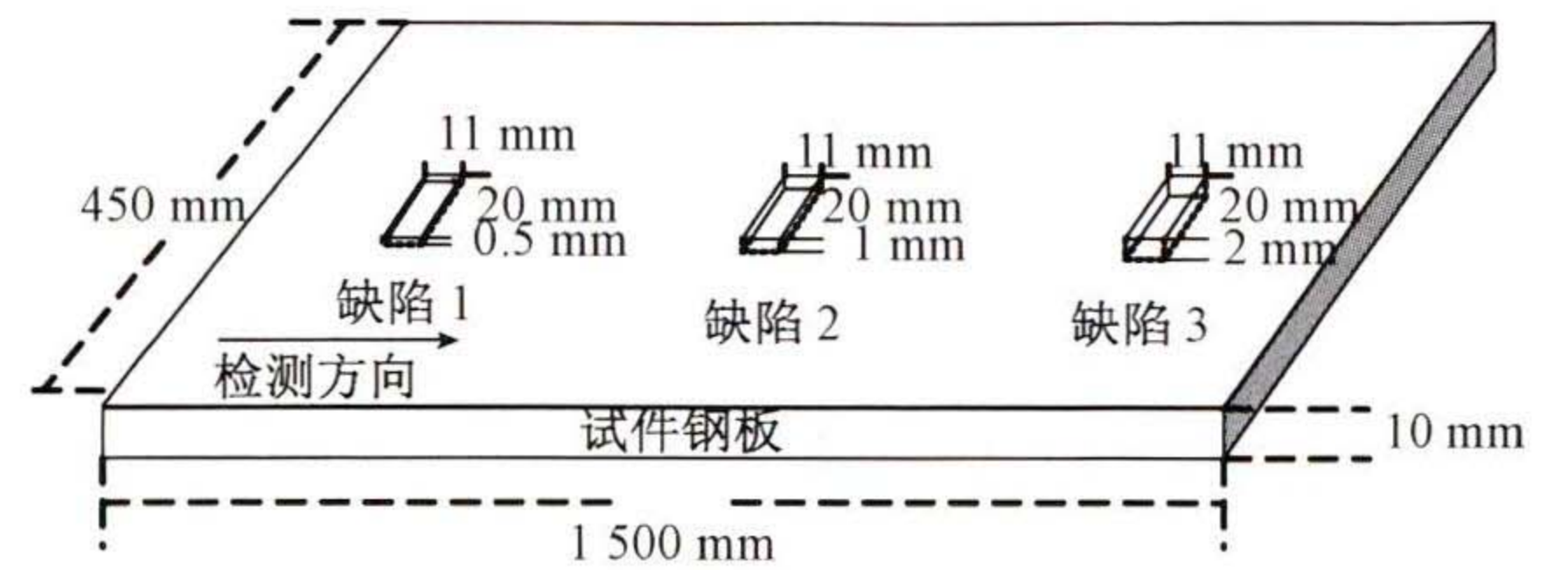


图16 试件钢板

Fig. 16 Steel plate of test piece

磁信号探头后,再返回检测一次。

#### 2) 实验结果

使用上位机采集不同励磁电流下的磁信号,不同励磁电流下的磁信号如图17所示。

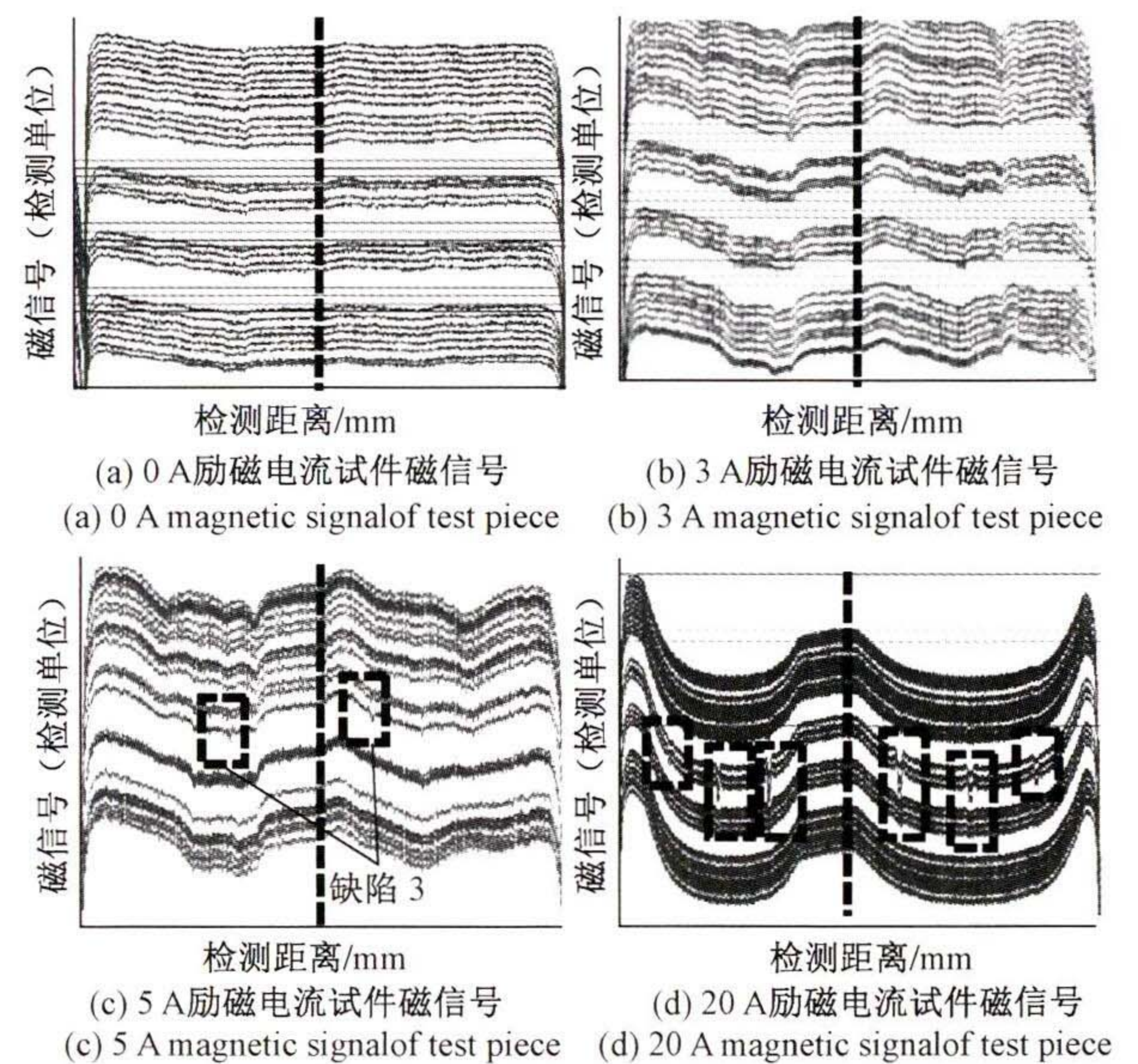


图17 不同尺寸缺陷在不同外磁场下的磁信号

Fig. 17 Magnetic signals of defects with different sizes under different external magnetic fields

由图17可知,在励磁电流为1 A的情况下,钢板缺陷磁信号不可见,在励磁电流上升的过程中,钢板缺陷信号逐渐显现。在励磁电流为5 A的情况下,可辨别深度为2 mm的缺陷磁信号,励磁电流为20 A的情况下,可见全部缺陷磁信号。提取各电流下信号最明显的信号通道,得到不同励磁电流下磁信号对比如图18所示。

由图18可知,在低磁场励磁下,可检测到部分缺陷信号。对于缺陷1,励磁电流为10 A以上能检测到磁信号;对于缺陷2,励磁电流为5 A以上可检测到信号;对于缺陷3,励磁电流为2 A以上可检测到磁信号。因此若缺陷较浅或弱磁场强度较低时,存在弱磁检测不到信号的情况,与磁荷模型计算结果存在差异,此时由于比值因子分母为0,仅能根据强磁信号得到缺陷信息,无法得到缺陷处应力信息。

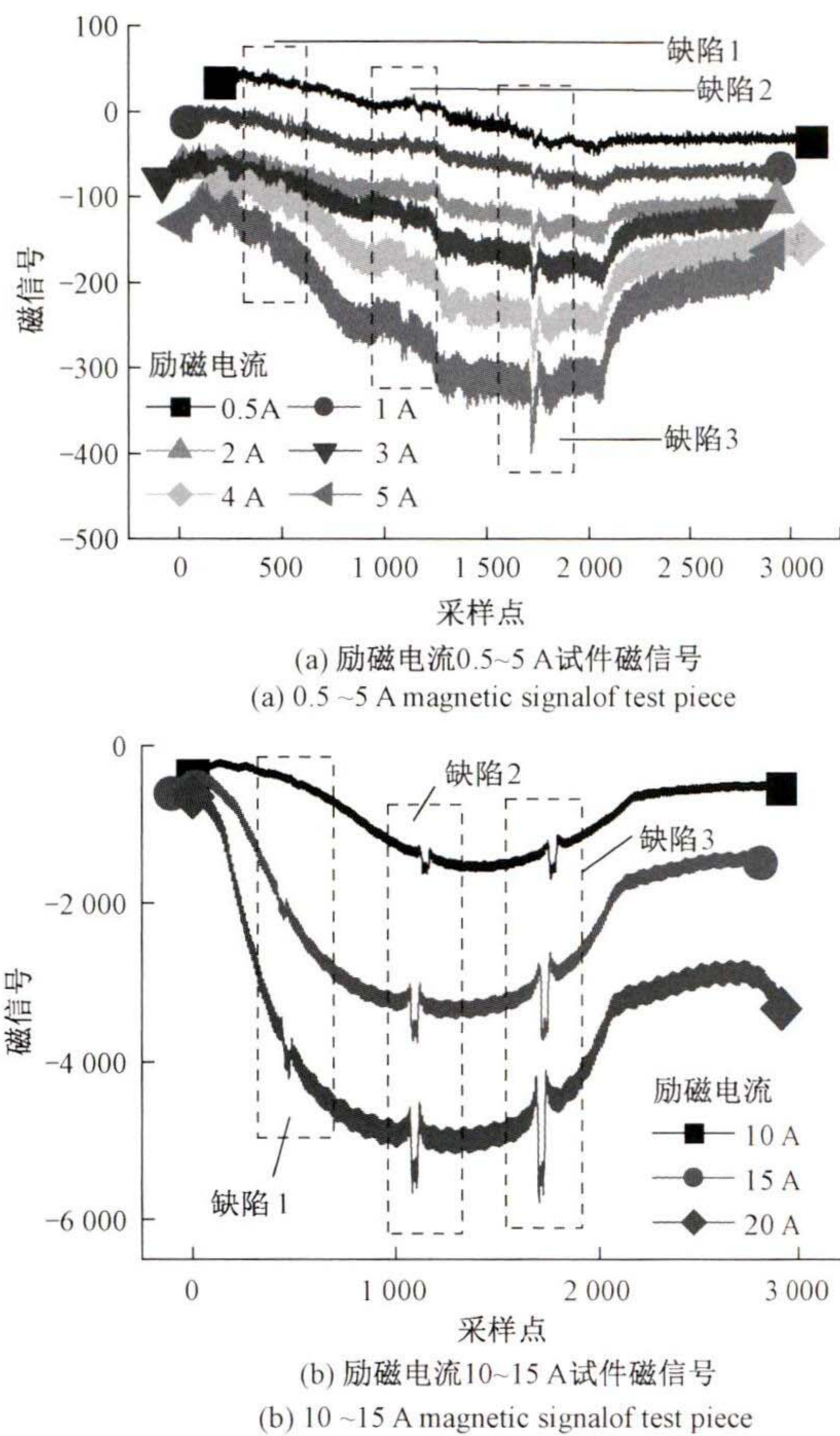


图 18 不同尺寸缺陷在不同外磁场下的磁信号对比  
Fig. 18 Comparison of magnetic signals of defects with different sizes under different external magnetic fields

造成实际检测与理论模型存在差异的原因在于弱励磁下,复合型缺陷处泄漏磁场较小,探头难以检测到该微弱的泄漏磁场。为了修正理论模型,对弱励磁阶段的数学模型建立阈值函数  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\text{sign}(h - h') + 1}{2} \quad (12)$$

其中,  $h$  为缺陷的深度,  $h'$  为所定的深度阈值。将阈值函数  $\varepsilon$  与弱磁信号  $H_{弱}$  相乘,若结果为零则表明该处无弱磁信号,此时比值因子分母为 0,无法评估缺陷处应力水平。在本实验中,深度阈值  $h'$  为 1,可描述弱磁场励磁电流为 5 A 时,2 mm 深缺陷有信号,0.5 mm、1 mm 深缺陷无信号的情况,为今后双磁场检测复合型缺陷处应力提供依据。

### 3.4 双磁场检测器工程试验研究

为验证双磁场检测复合型缺陷理论的正确性,进行工程试验。双磁场检测器由玛纳斯发出,到达乌鲁木齐,平均时速 2.43 m/s,被测管道直径为 1 219 mm、壁厚为 18.4 mm,长度为 137 km。检测器发球现场如图 19 所示。



图 19 双磁场管道内检测器发球  
Fig. 19 Dual magnetic field in-pipe detector serves

通过数据分析,发现管道环焊缝 11 891 处,弯头 52 处,阀门 7 处、法兰 2 处、三通 12 处,除上述管道基础信号特征外,存在其他信号特征 2 748 处,为缺陷或应力处的磁信号特征。选取三处代表性强磁、弱磁信号分别如图 20、21 所示。

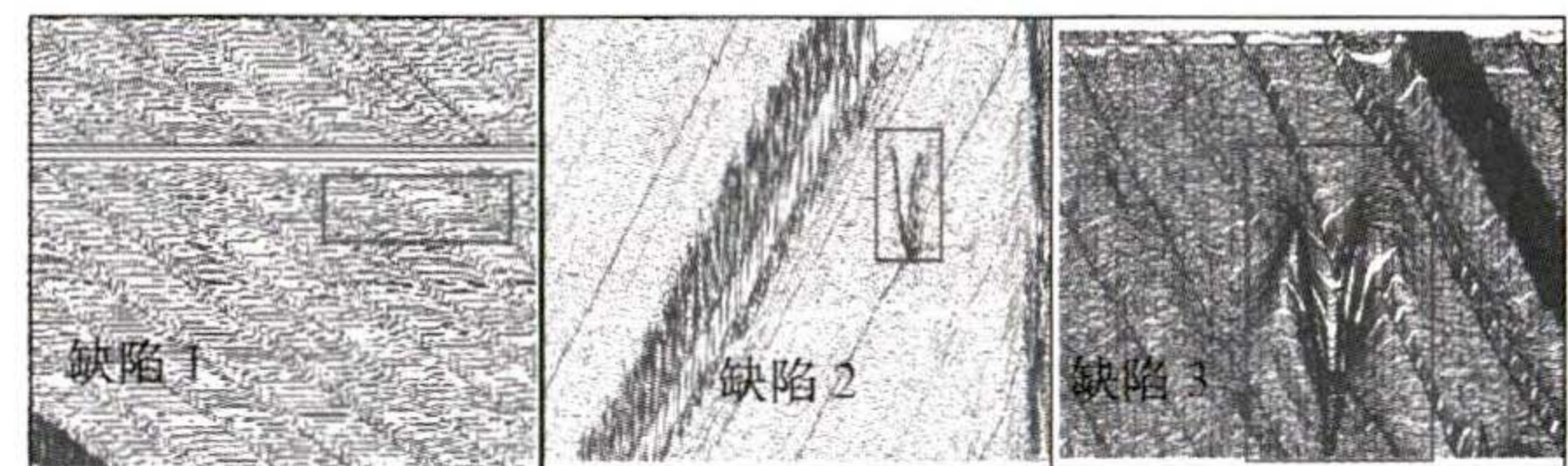


图 20 强磁检测信号  
Fig. 20 Strong magnetic signal

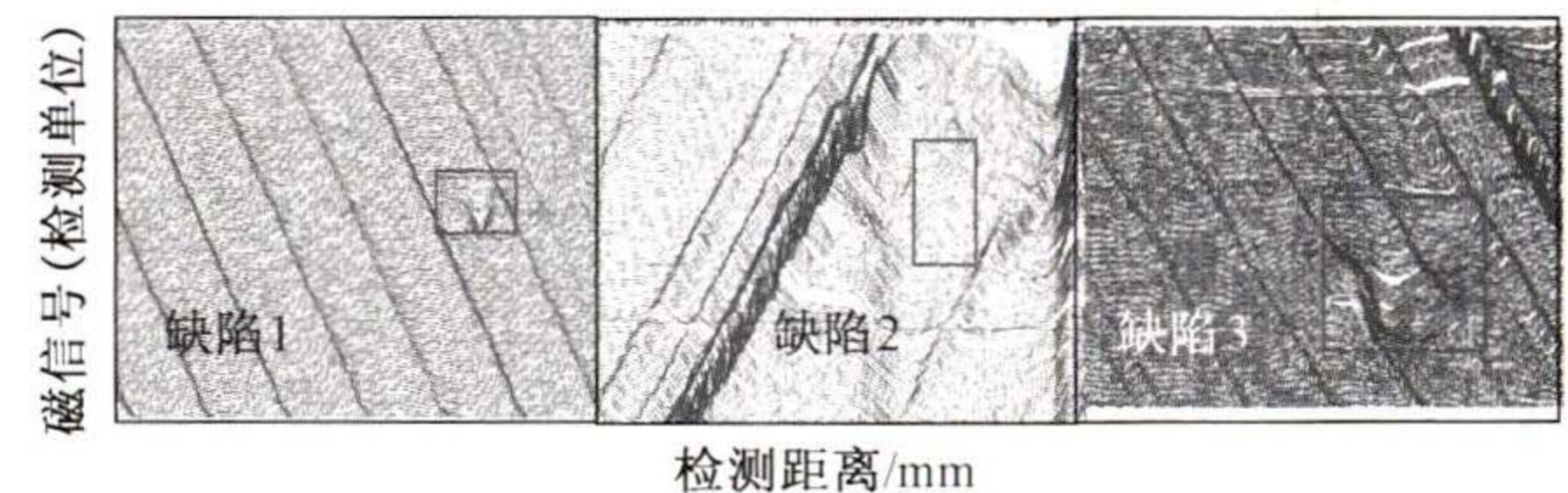


图 21 弱磁检测信号  
Fig. 21 Weak magnetic signal

由图 20、21 可知,对于缺陷 1,强磁检测器不能检测到磁信号,而弱磁检测器可以检测到磁信号,根据理论模型可得缺陷 1 是一处应力集中区;对于缺陷 2,强磁检测器可以检测到磁信号,弱磁检测器检测不到磁信号,证明缺陷 2 是一处尺寸小于阈值的开口缺陷,且缺陷周围不存在应力集中区;对于缺陷 3,强磁、弱磁检测器均可检测到磁信号,证明缺陷 3 是一处缺陷和应力共同存在的复合型缺陷,计算比值因子后选取比值因子较大的两点开挖,验证复合型缺陷周围的应力情况。两处开挖点如图 22 所示。

由图 22 可知,开挖后,发现两处均存在明显缺陷,使用超声测厚后确定分别为 28% 和 13% 壁厚深度的缺陷。为验证复合型缺陷周围的应力情况,使用 TSC-2M-8 型磁记忆检测设备,分别沿缺陷中心的路径 1 和缺陷上方 15 cm 处的路径 2 进行磁记忆检测,检测过程如图 23 所示。

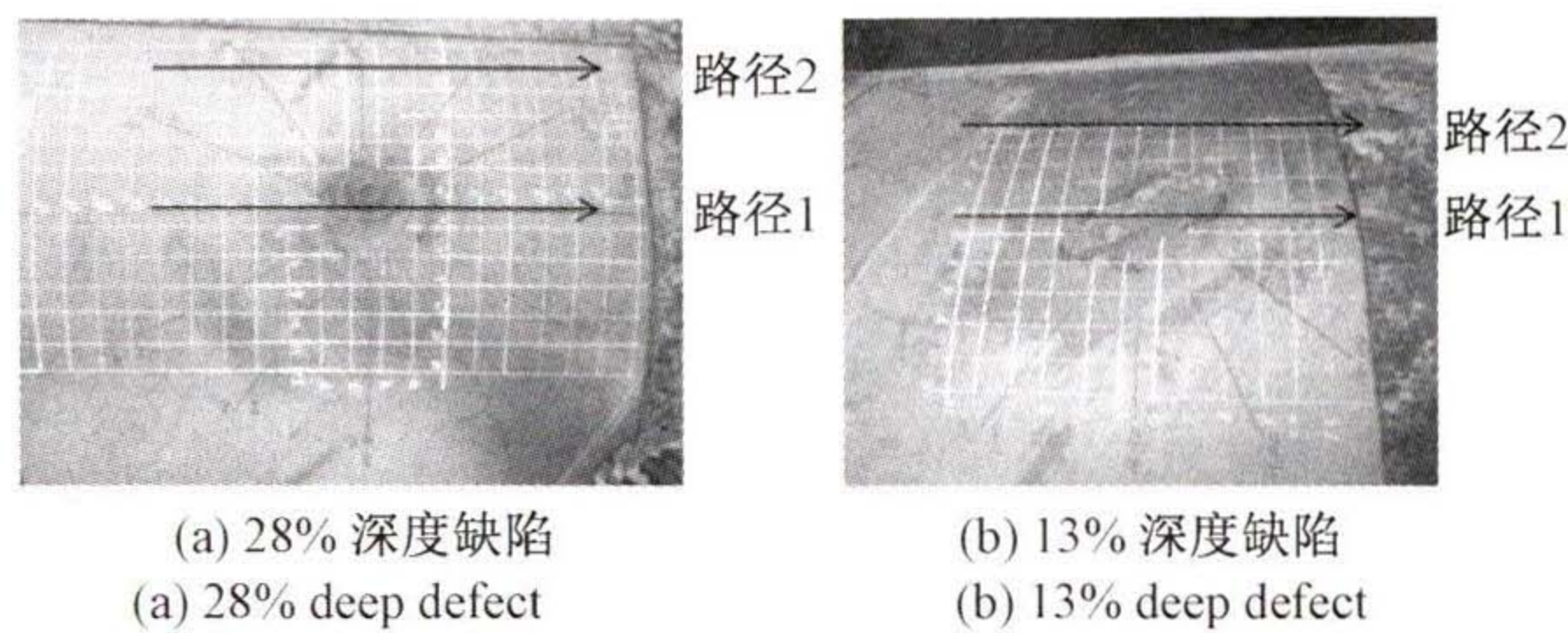


图 22 两处开挖点  
Fig. 22 Two excavation points



图 23 磁记忆检测过程  
Fig. 23 Magnetic memory detection process

路径 1 由于在缺陷正中心,因此检测到的磁记忆信号为缺陷和应力共同产生;路径 2 由于在缺陷正上方,因此检测到的磁记忆信号为应力信号。两点磁记忆信号如图 24、25 所示。

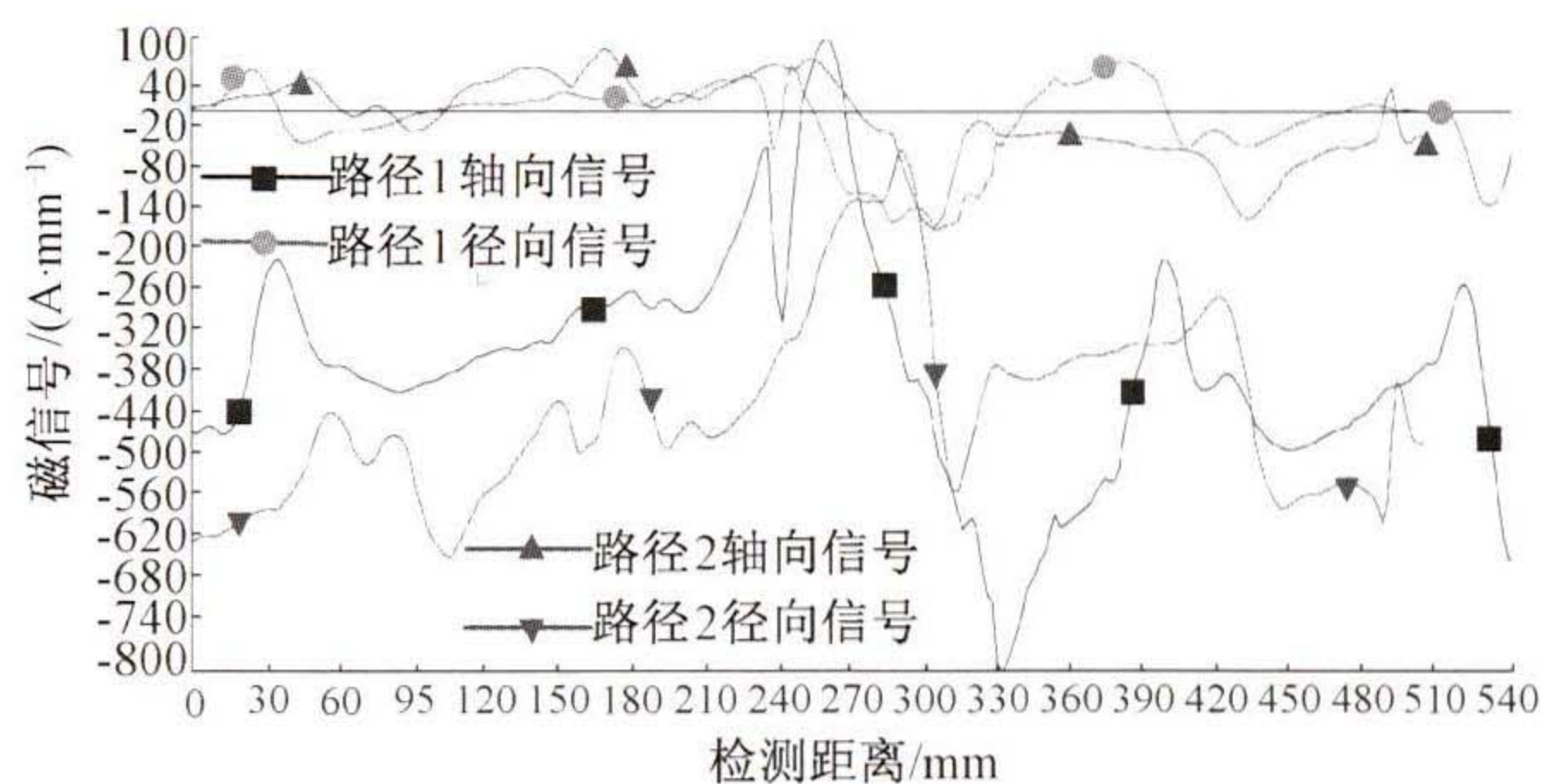


图 24 28% 深度缺陷磁记忆检测结果  
Fig. 24 Test results of 28% deep defect magnetic memory

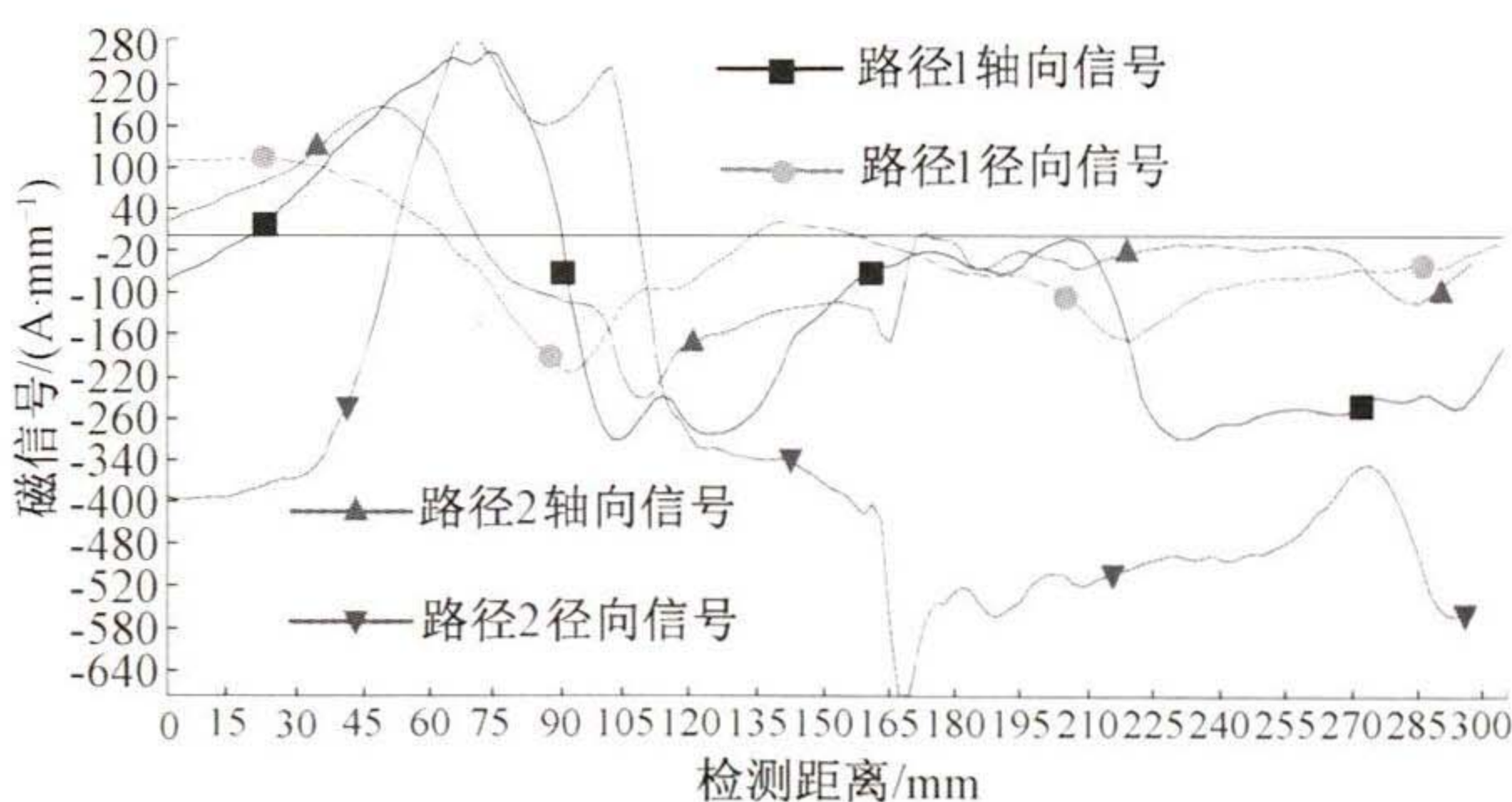


图 25 13% 深度缺陷磁记忆检测结果  
Fig. 25 Test results of 13% deep defect magnetic memory

由图 24、25 可知,缺陷路径 1、路径 2 均存在明显磁记忆信号,因此可以验证选取的两处复合型缺陷周围存在应力集中区,双磁场管道内检测法可用于复合型缺陷处应力损伤程度判断。

## 4 结 论

在役长输油气管道在内压作用下,缺陷处会产生的大量应力集中区,这种复合型缺陷是影响管道安全运行的重要问题。本研究将 J-A 模型建立的磁力学关系引入到磁荷模型中,解析计算了不同应力、不同外磁场下复合型缺陷的磁信号。建立基于双磁场信号比值的缺陷处应力信号提取模型,提出比值因子用于缺陷处应力水平的评估,并经过了系统性的实验验证。主要研究结论如下:

1) 在双磁场管道复合型缺陷内检测过程中,高磁场励磁作用下磁信号对应力不敏感,低磁场励磁情况下磁信号对应力敏感;高磁场励磁作用下主要检测到缺陷处磁信号,低磁场励磁作用下主要检测到缺陷和应力复合信号。

2) 提出比值因子用于缺陷处应力的评估:比值因子与管道缺陷处应力大小有关;缺陷处存在应力时,随着应力的增加,比值因子先微弱减小后显著增加;在双磁场检测中的弱磁场强度变化的情况下,弱磁场强度越强,比值因子随缺陷处应力的变化幅度越小。

3) 提出阈值函数描述低磁场励磁作用下无检测信号的情况:在缺陷尺寸过小,或外磁场强度过低时无弱磁信号,无法得到缺陷处应力情况,使比值因子分母为 0,无法评估缺陷处应力。对弱励磁阶段的数学模型建立阈值函数,使数学模型与实验现象相符。

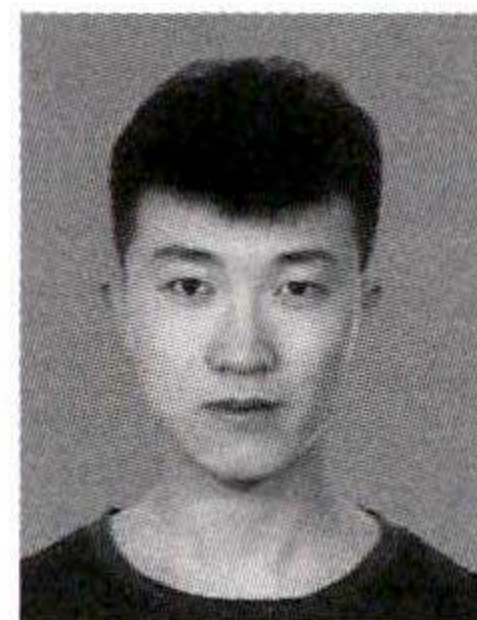
## 参考文献

- [1] 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 of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [2] 李秋扬,赵明华,张斌,等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337,1348.  
LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330-1337,1348.
- [3] 刘桐,刘斌,冯刚,等. 载荷作用下管道漏磁内检测信号定量化研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 262-273.

- LIU T, LIU B, FENG G, et al. Quantization of pipeline magnetic flux leakage detection signal under load [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 262-273.
- [4] MORI K, ABE Y, SEDOGUCHI K. Delayed fracture in cold blanking of ultra-high strength steel sheets [J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 297-300.
- [5] 杨理践, 郑福印, 高松巍, 等. 基于力磁耦合型的管道电磁应力检测解析模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 249-258.
- YANG L J, ZHENG F Y, GAO S W, et al. An analytical model of electromagnetic stress detection for pipeline based on magneto-mechanical coupling model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 249-258.
- [6] LI H T, LIU X C, WU B, et al. Accurate 3D reconstruction of complex defects based on combined method of MFL and MFDs[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(7): 075402.
- [7] GAUNKAR N P, JILES D C, GAUNKAR G. Detection of surface cracks in ferromagnetic materials by C-scan mapping of residual stresses using Barkhausen emissions[J]. AIP Advances, 2020, 10(1): 015246.
- [8] 卢森骧, 神祥凯, 张俊楠, 等. 基于三轴融合的漏磁内检测数据缺陷反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 245-253.
- LU S X, SHEN X K, ZHANG J N. et al. Research on defect inversion method of magnetic flux leakage internal inspection data based on triaxial fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 245-253.
- [9] 杨理践, 梁成壮, 高松巍, 等. 管道漏磁内检测的管壁缺陷漏磁场解析模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 106-114.
- YANG L J, LIANG CH ZH, GAO S W, et al. Analytical model of magnetic flux leakage field of pipe wall defects based on magnetic flux leakage internal detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 106-114.
- [10] 李博阳, 廖柯熹, 何国玺, 等. 弱磁检测技术研究进展与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 1-14.
- LI B Y, LIAO K X, HE G X, et al. Research progresses and prospects of weak magnetic testing technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 1-14.
- [11] LIU B, LUO N, FENG G. Quantitative study on MFL signal of pipeline composite defect based on improved magnetic charge model [J]. Sensors, 2021, 21(10): 3412.
- [12] WANG Y, LIU X, WU B, et al. Dipole modeling of stress-dependent magnetic flux leakage [J]. NDT & E International, 2018, 95: 1-8.
- [13] 罗旭, 王丽红, 吕良, 等. 基于面磁荷密度的金属磁记忆检测正演模型[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 103-119.
- LUO X, WANG L H, LYU L, et al. Forward model of metal magnetic memory testing based on equivalent surface magnetic charge theory [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 103-119.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] VILLEGAS-SAUCILLO J J, DÍAZ-CARMONA J J, CERÓN-ÁLVAREZ C A, et al. Measurement system of metal magnetic memory method signals around rectangular defects of a ferromagnetic pipe [J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2695.
- [17] 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.
- [18] NESTLEROTH J B, DAVIS R J. The design of a mechanical damage inspection tool using dual field magnetic flux leakage technology [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 274-283.
- [19] GOODMAN L R, SINGH P M. Repassivation behavior of X65 pipeline steel in fuel grade ethanol and its implications for the stress corrosion cracking mechanism [J]. Corrosion Science, 2012, 65: 238-248.
- [20] YANG Y, CHENG Y F. Stress enhanced corrosion at the tip of near-neutral pH stress corrosion cracks on pipelines [J]. Corrosion, 2016, 72(8): 1035-1043.
- [21] LIU B, MA Z, LIU Z, 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.
- [22] FU M R, LIU J H, ZHANG H G, et al. Multi-sensor fusion for magnetic flux leakage defect characterization under information incompleteness [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4382-4392.
- [23] LIU B, FENG G, HE L, 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: 1-13.
- [24] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537.
- [25] JILES D. Introduction to magnetism and magnetic materials [M]. CRC Press, 2015.
- [26] JILES D C, LI L. A new approach to modeling the magnetomechanical effect [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 7058-7060.
- [27] 赵志刚, 马习纹, 姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 26-34.  
ZHAO ZH G, MA X W, JI J AN. Parameter identification and verification of J-A dynamic hysteresis model based on hybrid algorithms of AFSA and PSO [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 26-34.
- [28] SHI P, JIN K, ZHENG X. A magnetomechanical model for the magnetic memory method [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 124: 229-241.
- [29] 刘清友, 罗旭, 朱海燕, 等. 基于 Jiles-Atherton 理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正 [J]. 物理学报, 2017, 66(10): 297-306.  
LIU Q Y, LUO X, ZHU H Y, et al. Modeling plastic deformation effect on the hysteresis loops of ferromagnetic materials based on modified Jiles-Atherton model [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 297-306.
- [30] LI J, XU M, LENG J, et al. Modeling plastic deformation effect on magnetization in ferromagnetic materials [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(6): 063909.
- [31] 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. A modified model of magneto-mechanical effect on magnetization in ferromagnetic materials [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(18): 295-306.

### 作者简介



廉正, 2019、2022 年于沈阳工业大学分别获得学士、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应力内检测技术、无损检测技术及相关理论。

E-mail: 457123468@qq.com

**Lian Zheng** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shenyang University of Technology in 2019 and 2022, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include internal stress testing technology, nondestructive testing technology and related theories for long oil and gas pipelines.



刘斌(通信作者), 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副院长、“翔源学者”特聘教授、博士生导师。主要研究方向为油气长输管道应力内检测技术及相关理论。

E-mail: 13998284051@163.com

**Liu Bin** (Corresponding author) received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees from Shenyang University of Technology in 2004, 2007, and 2013, respectively. He is currently the Deputy Dean of School of Information Science and Engineering at Shenyang University of Technology. He is the “Xiangyuan Scholar” distinguished professor and a Ph. D. advisor at Shenyang University of Technology. His research interests include stress internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline and related theories.