DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2413040

基于电磁法的管道屈服强度检测方法研究*

金新玖,耿 浩,杨理践

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:为评估在役管道的屈服强度,本文研究了钢材微观结构对机械性能的影响,以及微观结构对电磁特性的影响,提出了一种基于电磁法的管道屈服强度检测方法,分析了钢材电磁特性对检测线圈阻抗的影响原理,建立仿真模型研究了检测频率对磁 通密度及感应电流的影响,通过实验对所提出方法的有效性进行验证,并研究了温度与表面腐蚀对检测方法的影响。研究结果 表明,基于电磁法的屈服强度检测方法对于 Q345 及 Q235 钢材具有良好的检测效果,当检测频率为 10 kHz 时两种钢材的屈服 强度均与检测线圈阻抗值具有近似线性的对应关系,皮尔逊相关系数分别为 0.94 与 0.87,阻抗值均随屈服强度增大而增大,该 方法为管道屈服强度的检测提供了理论依据及实验基础。

关键词:屈服强度;管道内检测;涡流阻抗;材料无损检测

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

Study on the electromagnetic method for measuring pipe yield strength

Jin Xinjiu, Geng Hao, Yang Lijian

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

Abstract: To assess the yield strength of in-service pipes, this paper investigates the impact of steel microstructure on mechanical properties and its effect on electromagnetic characteristics. A method for detecting pipe yield strength using electromagnetic techniques is proposed. The study examines how steel's electromagnetic properties influence the impedance of a detection coil and develops a simulation model to explore how detection frequency affects magnetic flux density and induced current. The method's effectiveness is validated through experiments, and the impact of temperature and surface corrosion on detection is analyzed. The results indicate that the electromagnetic-based yield strength detection method performs effectively for Q345 and Q235 steels. At a detection frequency of 10 kHz, the yield strength of both steels shows an approximately linear relationship with the detection coil's impedance, with Pearson correlation coefficients of 0.94 and 0.87, respectively. Impedance values increase with yield strength, providing both theoretical and experimental support for pipeline yield strength detection

Keywords: yield strength; pipeline inspection; eddy current impedance; nondestructive testing of materials

0 引 言

油气管道随着使用年限的增加,会出现不同程度的 缺陷、腐蚀、老化等问题^[1-2]。管道的强度会有不同程度 的降低,同时会伴随着爆管、泄露等管道事故的发生^[3-5]。 准确评估管道材料的屈服强度有助于确认管道中的薄弱 环节并评估管道的最大许用应力,从而准确把握管线的 最大运行压力,使其在最低风险的状态下保持高效运行。 部分管道由于修建年代较早,相关资料缺失,现已无法确 认其材质型号以及屈服强度,因此需寻找方法重新确认 管道的材料级别与屈服强度。

管道内检测器是目前最主流的管道检测方法,能够靠 管道内介质的压力差作为前进动力,管道内检测器搭载的 主要检测技术有漏磁技术、超声波探伤技术、涡流检测技 术等^[6-8],其中漏磁、涡流等电磁检测技术在管道检测领域 已有较为成熟的应用。Yang等^[9-10]利用涡流平衡场技术 检测管道上的轴向与周向裂纹,Liu等^[11-12]研究了长输油

*基金项目:辽宁省科技计划联合计划项目(应用基础研究项目)(2023JH2/101700272)、国家自然科学基金项目(62101356)资助

收稿日期:2024-07-11 Received Date: 2024-07-11

气管道外表面缺陷模型,分析了不同壁厚和缺陷尺寸的漏 磁信号特征及其传播模式,然而目前管道检测仪在材料及 屈服强度检测方面仍然缺乏有效的手段。

最近的研究表明,电磁检测法不仅可以用于裂纹及 缺陷的检测,也可以应用于材料微观结构及机械性能的 检测,Kahrobaee 等^[13]利用电磁检测技术根据不同硬化 层厚度试样的显微组织和硬度值的差异,得到了硬度值 与输出电压之间的线性关系。Jolfaei等^[14]研究了钢中铁 素体分数和铁素体晶粒尺寸对磁导率的影响,利用多频 电磁传感器预测钢的抗拉强度并推断其微观结构。 Li等^[15]分析了增量磁导率和微观结构之间的关系,利用 增量磁导率表征材料的平均晶粒尺寸和晶格摩擦,提出 一种基于脉冲涡流技术的钢板质量无损评价方法。长输 油气管道由于里程较长、工作状况复杂,需要一种结构简 单、结果稳定、耗电量较小且便于管道检测仪搭载的检测 方法来完成管道屈服强度的检测。

本文研究了钢材机械性能与电磁特性间的关系以及 涡流对材料磁特性的响应原理,提出了基于电磁法的管 道屈服强度检测方法,搭建实验平台对Q345钢板进行电 磁检测,并对样品的屈服强度、微观结构、元素成分及磁 化曲线进行测试,确定了最适合屈服强度检测的涡流频 率,得出了实验钢材涡流阻抗和屈服强度之间的线性输 出关系,为解决管道屈服强度检测提供了新的思路。

1 微观结构与电磁特性

由于元素配比与热处理工艺的不同,钢材微观结构 有很大不同,主要反映在晶粒尺寸和形态上,微观结构直 接影响钢材的机械性能,其关系可以表示为^[16]:

 $\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \tag{1}$

其中,σ。是材料的屈服强度,d是晶粒直径,σ。是单 晶的屈服强度,k是与材料相关的系数。通常情况下晶 粒越细、越均匀,材料的屈服强度就越高。以压力容器常 用材质 Q345 为例,Q345 钢材主要是由珠光体与铁素体 构成,珠光体是铁素体和渗碳体的混合物,具有较小的晶 粒结构,因此可以通过观察晶粒尺寸与珠光体含量来推 断 Q345 钢材的屈服强度^[17]。

材料微观结构不仅决定了材料的机械性能,还会对 其电磁性能产生影响。钢的磁特性与其磁畴结构和外加 磁场下磁畴壁运动有关,由于晶界会对磁畴运动造成阻 碍,磁畴尺寸与晶粒尺寸的平方根成正比^[18],因此材料 磁性能会受到晶粒尺寸的影响。同样影响磁畴运动的还 有钉扎效应^[19],假设钢材的单位体积中有 n 个钉扎点, 每个钉扎点的钉扎能量为 $\mu_0 \varepsilon_{\pi}$,钉扎能量与畴壁克服钉 扎效应移动单位体积所需的能量成正比。因此,磁畴壁 运动所造成的能量损失如下:

$$dE_{loss} = n\mu_0 \varepsilon_{\pi} A dx \tag{2}$$

其中, *A* 是畴壁的横截面面积, *dx* 是畴壁移动距离。 当磁畴壁移动 *dx* 时, 磁化强度变化如下:

$$dM = 2M A dx \tag{3}$$

其中, M_s 是磁畴的自发磁化强度。结合式(2)、(3) 可得:

$$dE_{loss} = \frac{n\mu_0 \varepsilon_{\pi} dM}{2M_s} \tag{4}$$

从上式可以看出,钉扎效应、晶界等因素将对磁畴壁 的运动产生阻力。钉扎点越多、晶界面积越大,畴壁弯曲 和平移就越困难,畴壁运动所需的能量越多,即磁滞损耗 越大。

Q345钢材主要是由珠光体与铁素体构成,与铁素体 晶粒中的磁畴结构相比,珠光体片层中的磁畴壁结构更 为复杂,许多磁畴壁位于片层、夹杂物和高度位错区域附 近^[20]。因此与铁素体相比,珠光体晶粒内部有更多的钉 扎点,这使得珠光体与铁素体的磁特性具有一定差异。

钉扎效应与晶界等因素不仅影响钢材的磁特性,也 会对电阻率造成影响,当电子在没有热效应的情况下通 过完美的金属晶体传导时,理论上不存在电子散射,电阻 率为零。然而杂质、晶界、钉扎和热振动引起的位错,可 能会散射金属中的电子;位错密度的增加会导致电阻率 增加^[21]。这一现象可以用马蒂森规则表示:

$$\boldsymbol{\rho}_{total} = \boldsymbol{\rho}_{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\rho}_{i} + \boldsymbol{\rho}_{d} \tag{5}$$

 $\rho_{\rm T} = \rho_0 + {\rm a}T \tag{6}$

其中, ρ_{total} 是材料的电阻率, ρ_T , ρ_i 、和 ρ_d 分别是热效 应、杂质效应和变形效应的影响, ρ_0 是残余电阻率, a 是常 数,*T* 是温度。晶粒尺寸越小, 晶界面积越大, 位错和缺 陷就越多, 电子散射就越明显, 电阻率也就越大。

综上所述,不同微观结构的钢材将会具有不同的屈 服强度、磁特性及电阻率,因此可以通过评估钢材磁特性 与电阻率实现对屈服强度的预测。

2 电磁法材料检测原理

涡流检测是一种广泛使用的电磁无损检测技术,具 有快速且无接触的特点,由于涡流对材料的磁导率和电 阻率变化具有敏感性,可以采用特定频率的涡流对材料 特性进行表征。其基本原理如图1所示,通交流电的线 圈接近导电材料时,初级交变磁场穿透材料并产生连续 的圆形涡流,在试件内流动的感应电流产生1个次级磁 场,该次级磁场通常与初级磁场方向相反。导电材料中 的反向磁场对初级磁场有削弱作用,通过监测电压或电 流信号,测量线圈阻抗变化,可以揭示特定信息,例如试 件的电导率、磁导率和表面状况^[22]。



图 1 涡流原理示意图 Fig. 1 Eddy current principle diagram

假设空气中的电导率为0,磁导率表示为μ₀,将涡流探 头靠近金属放置而引起的线圈阻抗变化可以表示为^[23]:

$$\Delta Z = Kj\omega \int_{0}^{\infty} M^{2}(\alpha) \frac{A(\alpha)}{\alpha^{6}} \left(\frac{\mu_{r}\alpha - \alpha_{1}}{\mu_{r}\alpha + \alpha_{1}} \right) d\alpha$$
(7)

其中, μ ,为相对磁导率,金属中的波矢量 α_1 是与电导率 σ 相关的函数,由式(8)表示,M,A,K均是与线圈尺寸有关的函数,分别由式(9)~(11)表示:

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu_R\mu_0\sigma} \tag{8}$$

$$M(\alpha) = \int_{ar_1}^{ar_2} x J_1(x) \, \mathrm{d}x$$
 (9)

$$A(\alpha) = (e^{-ah_1} - e^{-ah_2})^2$$
(10)

$$K = \frac{m\mu_0 n}{L^2 (r_2 - r_1)^2}$$
(11)

其中, r_1 、 r_2 分别是线圈的内径和外径, h_1 表示提离 值, h_2 表示金属到线圈顶部的距离, n 表示线圈匝数, $L = h_2 - h_1$ 。当涡流探头靠近磁导率为 μ_1 的金属时得到 的阻抗 Z 可以表示为:

$$Z = Z_1 + Kj\omega \int_0^\infty M^2(\alpha) \frac{A(\alpha)}{\alpha^6} \left(\frac{\mu_r \alpha - \alpha_1}{\mu_r \alpha + \alpha_1} \right) d\alpha \qquad (12)$$

其中, Z₁ 为空气中的线圈阻抗,由此可知涡流探头 靠近钢材时的阻抗值会受到钢材磁导率与电导率的影 响,两者均是由钢材微观结构决定的,因此钢材的阻抗测 量结果能够在一定程度上反映钢材微观结构上的差异, 进而可以通过阻抗测试结果推断钢材的屈服强度。

采用 COMSOL 仿真软件对探头及钢板进行建模,探 头结构如图 2 所示,线圈中间加入铁氧体磁芯以集中线 圈产生的磁场,钢板采用 Q345 材质,线圈采用铜材质,缠 绕长度 20 mm,缠绕匝数为 300 匝,提离值 2 mm,给线圈 施加 2 V 交流电,当频率分别设置为 0.1、1、10、100 kHz 时钢板表面的电磁分布如图 3 所示。

从图3可以看出频率较低时钢板表面磁通密度较大, 且分布范围较广,随着频率增加磁通密度逐渐减小,影响 范围也随之收缩。感应电流密度在1kHz时达到最大,同 时影响范围最广,并随着频率继续增加逐渐减小。涡流在 不同频率下的感应深度可以根据趋肤效应计算:



图 2 线圈结构示意图 Fig. 2 Coil structure diagram



(a) 0.1 kHz磁通密度与电流密度 (a) 0.1 kHz magnetic flux density and current density





(b) 1 kHz磁通密度与电流密度 (b) 1 kHz magnetic flux density and current density



(c) 10 kHz磁通密度与电流密度 (c) 10 kHz magnetic flux density and current density



(d) 100 kHz磁通密度与电流密度 (d) 100 kHz magnetic flux density and current density

图 3 钢板表面不同频率的电磁分布

Fig. 3 Electromagnetic distribution of different frequencies on the surface of steel plate 其中,*f*是涡流激发的频率,*σ*是测试样品的电导率, μ是材料的磁导率。当涡流激发频率增加时,由于趋肤 效应,电流将聚集在样品表面,因此涡流频率过高将导致 检测范围停留在表面,无法反映出钢材本身的微观结构, 当频率分别设置为 0.1、1、10、100 kHz 时钢板纵向的电 磁分布如图 4 所示。



Fig. 4 Electromagnetic distribution of different frequencies in steel plate section 从图 4 可以看出检测频率不仅影响磁化深度,也会 影响磁芯内的磁场分布以及钢板内感应电流的纵向分 布范围。检测频率越高磁化深度越浅,磁芯内的磁通 密度也越小,若检测频率过高,磁化密度及感应电流会 集中在钢板表面位置,由钢板引发的阻抗变化也会严 重受到表面状况的干扰,若检测频率过低,可能会在管 道检测过程中受到移动速度等因素的较大干扰,因此 基于涡流的屈服强度检测需要将检测频率控制在相对 合适的范围。

3 实验及结果分析

实验选取 15 块来自不同批次的 Q345 钢板,分别编 号为 A1~A15,以及 15 块来自不同批次的 Q235 钢板,分 别编号为 B1~B15 作为实验样品,所有钢板厚度均为 10 mm,实验均在室温 27℃下进行。涡流设备采用日置 IM3570 阻抗分析仪搭载自制涡流探头,能够满足不同频 率的涡流检测需求。实验装置及探头结构如图 5 所示, 探头铁氧体尺寸为 12 mm×12 mm×50 mm 在铁氧体底部 缠绕 300 匝 0.3 mm 漆包线,线圈连接阻抗分析仪并实时 反馈阻抗变化。将所有钢板切割成 500 mm×300 mm× 10 mm 进行实验,钢板的长度和宽度远大于探头的尺寸, 能够避免涡流的边缘效应,每块钢板均在 5 个固定位置 上分别进行 5 次不同频率的涡流测量,试验频率分别为 100 Hz、500 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz、50 kHz、100 kHz、 500 kHz。



图 5 实验仪器及测量位置 Fig. 5 Experimental instrument and measuring position

根据《GB/T228 金属材料室温拉伸试验方法》将各钢板加工成如图 6(a)所示的 5 个拉伸试件,其中每个拉伸试件的中间位置都对应在涡流检测位置上。采用如 图 6(b)所示拉力机对加工后的试件进行拉伸试验。

对每块钢板上的5个拉伸试件的拉伸实验结果取平均值以表征该钢板的屈服强度与抗拉强度,结果如表1 所示。







(a) Test specimen

(b) 拉力实验机 (b) Tensile machine

屈服强度实验器材 图 6

Fig. 6 Yield strength test equipment

表 1 钢板抗拉强度与屈服强度
 Table 1
 Tensile strength and yield strength of steel plate

样品 序号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	样品 序号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa
A1	590.4	501.0	B1	488.6	334. 2
A2	574.8	437.6	B2	487.2	340.0
A3	599.2	416.2	B3	497.8	353.2
A4	579.6	402.6	B4	488.0	334.2
A5	589. 2	498.8	B5	503.8	357.4
A6	596.0	414.0	B6	496.0	349.0
A7	569.6	383.4	B7	492.2	348.8
A8	597.4	508.2	B8	494.2	347.8
A9	583.8	402.4	B9	483.8	329.8
A10	560.0	394.0	B10	487.2	334.0
A11	574.2	410.4	B11	481.6	331.6
A12	572.8	399.4	B12	486.0	338.8
A13	569.8	401.8	B13	489.2	337.8
A14	552.4	388.4	B14	486. 8	338.0
A15	531.4	368.2	B15	480.0	330. 2

Q345 实验结果 3.1

将 Q345 钢板上全部 75 个测试点位的涡流测试结果 绘制在阻抗平面图上并用颜色表示其对应拉伸试件的屈 服强度测试结果,结果如图7所示。

从图 7 可知当检测频率在 500 Hz 左右时,阻抗的虚 部与样品屈服强度间已经显现出一定联系,屈服强度大 的样品普遍电抗较高。随着涡流频率增大,阻抗实部随 样品屈服强度增大而增大的规律越来越明显,当涡流频 率为5~100 kHz 时样品在阻抗平面上排列成一条直线. 且基本按照屈服强度由小到大的顺序排列,屈服强度与



Fig. 7 Impedance plan of Q345 at different frequencies

涡流检测结果的实部与虚部均具有近似线性的关系。当 涡流频率继续增大,样品在阻抗平面上不再呈直线状,且 不再符合检测结果随屈服强度增大而增大的规律。随着 涡流频率增加,电感测量值将减小并过零点变为负数,这 是由于磁化强度和涡流的竞争效应造成的[24]。当涡流 频率为500 kHz 时电感测量值为负数,屈服强度与涡流 检测结果已无明显关系。

综合比对各频率下的阻抗平面图发现,涡流频率在 10 kHz 时检测结果与样品屈服强度间具有较好对应关 系,其阻抗与屈服强度的对应关系如图8所示。

从图 8 可知当检测频率在 10 kHz 时,Q345 的屈服强 度与阻抗测量值具有近似线性的对应关系,可以将其拟合 成 ReL=3.05Z-1 482.58 的直线以描述其对应关系,其中 ReL 为屈服强度, Z 为阻抗, 拟合直线 R^2 约为 0.89, 两个变 量间的皮尔逊相关系数约为 0.94,说明 Q345 钢材屈服强 度与阻抗之间高度相关。



Fig. 8 Correspondence between impedance and yield strength of Q345 steel

3.2 Q235 实验结果

将 Q235 钢板上全部 75 个测试点位的涡流测试结果 绘制在阻抗平面图上并用颜色表示其对应拉伸试件的屈 服强度测试结果,结果如图 9 所示,Q235 钢材主要由珠光体 与铁素体组成,其涡流阻抗的变化原理与 Q345 钢材相似。





从图 9 可知当检测频率在 500 Hz 左右时,阻抗的 虚部与样品屈服强度开始显现出一定联系,屈服强度 大的样品电抗相对较高。当涡流频率在 5~50 kHz 范 围内时,涡流检测结果近似排列成直线且屈服强度高 的样品阻抗也相对较高。随着涡流频率进一步增大, 涡流检测结果不再排列成直线。与 Q345 钢材的实验 结果相比较,Q235 钢材在阻抗平面上相对较为分散, 两者均在 10 kHz 阻抗平面上有最好的线性规律,且阻 抗值均随屈服强度增大而增大。当检测频率为 10 kHz 时 Q235 钢材的屈服强度与阻抗值间的对应关系如 图 10 所示。



Fig. 10 Correspondence between Q235 impedance and yield strength

从图 10 中可以看出 Q235 阻抗测量值总体上随屈服 强度的升高而升高,可以将其拟合成 *ReL* = 0.82*Z* -162.58 的直线以描述其对应关系,拟合直线 *R*² 约为 0.75,两个变量间的皮尔逊相关系数约为 0.87,虽然 Q235 钢材屈服强度与阻抗间的相关性低于 Q345,但两 者仍然强相关,因此可以利用电磁方法对 Q345 与 Q235 屈服强度进行检测。

3.3 方法验证

为验证所提出方法的准确性,额外选取5块不同批次的Q345钢板,编号为A16~A20,以及5块不同批次的Q235钢板,编号为B16~B20,按照相同实验方法对其进行电磁检测与拉伸实验,对每块钢板上的5个拉伸试件的拉伸实验结果取平均值以表征该钢板的屈服强度与抗拉强度,结果如表2所示。

将 A16~A20 钢板共计 25 个测试点位的 10 kHz 阻抗值带入拟合直线 *ReL* = 3.05*Z* - 1482.58 中,结果如图 11 所示, A16~A20 钢板阻抗与屈服强度的皮尔逊相关系数约为 0.97, 各测试点方差如图 12 所示。

从图 11、图 12 可以看出 Q345 屈服强度预测值与实际值较为接近,验证了规律的准确性,实验结果表明

表 2 用于验证的钢板强度									
Table 2 Steel plate strength for verification									
样品 序号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	样品 序号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa				
A16	550. 2	390.4	B16	472.6	325.4				
A17	545.6	385.2	B17	471.6	326.6				
A18	550. 56	426.8	B18	479.4	336.0				
A19	549.6	400.8	B19	476.6	337.0				
A20	556.7	403.8	B20	487.8	345.2				





图 11 Q345 钢材的拟合直线 Fig. 11 Fitting straight lines for Q345 steel



Q345 钢材 10 kHz 阻抗与屈服强度高度相关,其对应关系可以近似表示为 ReL = 3.05Z - 1 482.58。

将 B16~B20 钢板共计 25 个测试点位的 10 kHz 阻抗值带入拟合直线 *ReL* = 0.82*Z* - 162.58 中,结果如图 13 所示,B16~B20 钢板阻抗与屈服强度的皮尔逊相关系数约为 0.89,各测试点方差如图 14 所示。

从图 13、图 14 可以看出 Q235 屈服强度预测值与 实际值同样较为接近,Q235 钢材 10 kHz 阻抗与屈服强 度强相关,其对应关系可以近似表示为 ReL=0.82Z-



图 13 Q235 钢材的拟合直线

Fig. 13 Fitting straight lines for Q235 steel



162.58。实验结果表明当检测频率为10 kHz 时,Q345 与Q235 的屈服强度均与阻抗值具有近似线性的关系,阻抗随屈服强度增大而增大,证明了检测方法的可行性。

3.4 影响因素分析

在管道内检测过程中,管道运行温度与管道内表面 的腐蚀情况可能会对阻抗检测结果产生影响,为探究运 行温度对本方法的影响,对 Q235 钢板进行了升温实验, 测量其在 27℃~50℃区间内 10 kHz 阻抗变化情况,并计 算其相对于 27℃检测结果的变化率,检测结果如表 3 所 示,不同频率的阻抗变化率情况如图 15 所示。

从表 3 及图 15 可以看出,在实验涉及的多数频率中 阻抗均随温度的升高不断升高,1~100 kHz 的阻抗受温 度影响较为稳定,500 kHz 阻抗受温度影响变化十分剧 烈。实验结果表明,在实际应用中管道运行温度会对阻 抗检测结果产生一定影响,但在 10 kHz 时影响较为稳 定,为保证结果的准确性,在后续实际检测中需搭配温度 传感器并开发相应算法以便根据管道实时温度对检测结 果进行校准。

表 3 阻抗随温度的变化情况 Table 3 Impedance changes with temperature

	-	1		1	
温度	阻抗	变化率	温度	阻抗	变化率
∕°C	$/\Omega$	/%	∕°C	$/\Omega$	/%
27	603.041 8	_	39	608.905 6	0.972
28	603.749 4	0.117	40	609.2917	1.036
29	604.3253	0.212	41	609.640 1	1.094
30	605.123 2	0.345	42	610.031 7	1.159
31	605.7984	0.457	43	610.656 0	1.263
32	606.746 6	0.614	44	610. 659 9	1.263
33	607.1114	0.675	45	610. 949 4	1.311
34	607.456 9	0.732	46	611.0996	1.336
35	607.911 6	0.807	47	611.455 5	1.395
36	608.149 6	0.847	48	612.020 9	1.489
37	608.464 1	0.899	49	612.634 1	1. 591
38	608.6596	0.932	50	613.169 8	1.679



图 15 各频率阻抗随温度变化情况

Fig. 15 The frequency impedance changes with temperature

为探究表面腐蚀情况对检测方法的影响,将一块 Q235钢板进行酸性溶液腐蚀,并测量腐蚀前后钢板中心 位置的阻抗,腐蚀前后的表面情况如图 16 所示,腐蚀前 后钢板各频率的阻抗值如表 4 所示。



(a) 腐蚀前(b) 腐蚀后(a) Before corrosion(b)After corrosion图 16钢板腐蚀实验Fig. 16Corrosion test of steel plate

表	2 4	钢材	反腐蚀	主前	后	阻	抗	变	ſŁ	
-					•					

 Table 4 Impedance change of steel plate before and after corrosion

频率/kHz	腐蚀前阻抗/Ω	腐蚀后阻抗/Ω	变化率/%	
0.1	18. 269 13	18.241 36	0.152	
0.5	58. 113 68	57.983 8	0. 223	
1	101.428 10	101.194 8	0.230	
5	366.67690	366. 314 1	0.099	
10	659.620 30	658.983 9	0.096	
50	2 580. 610 00	2 580. 546	0.002	
100	5 020. 256 00	5 028.779	0.170	
500	32 519. 570 00	33 794. 18	3.920	

从表4可以看出表面腐蚀对不同频率的阻抗值均会 造成一定影响,但腐蚀对 500 kHz 阻抗的影响远大于其 他频率,受趋肤效应影响检测频率越大检测深度越浅, 500 kHz 频率的检测范围比其他频率更集中在表面,因此 在后续研究中可以考虑采用多种频率相结合的方法,利 用高频检测结果表征表面腐蚀情况并开发相应算法以修 正低频检测结果。

4 结 论

准确评估管道材料的屈服强度有助于确认管道中的 薄弱环节并评估管道的最大许用应力,部分管道由于修建 年代较早,无法确认其材质型号以及屈服强度,因此需寻 找方法对其进行重新确认。本研究讨论了钢材微观结构 对电磁特性的影响原理,提出了一种基于电磁法的屈服强 度检测方法,分析了钢材电磁特性对检测线圈阻抗的影 响,建立仿真模型研究了检测频率对磁通密度及感应电流 的影响,通过实验对方法的有效性进行验证,并研究了温 度与表面腐蚀对检测方法的影响,主要研究结论如下:

1)基于电磁法的屈服强度检测方法对于 Q345 钢材 具有良好的检测效果,当检测频率为 10 kHz 时钢材的屈 服强度与检测线圈阻抗值有近似线性的对应关系,其拟 合直线可以近似表示为 *ReL* = 3.05*Z* - 1 482.58, 皮尔逊 相关系数约为 0.94。

2) 当检测频率为 10 kHz 时 Q235 钢材的屈服强度同 样与检测线圈阻抗值有近似线性的对应关系,其拟合直 线可以近似表示为 ReL = 0.82Z - 162.58, 皮尔逊相关系 数约为 0.87。

3)温度与表面腐蚀会对检测结果造成一定影响, 10 kHz 阻抗值会随温度升高而上升,在后续实际管道检 测中需开发相应算法并配合温度传感器以应对管道运行 温度及表面腐蚀带来的影响。

参考文献

 [1] 赵东升,杨理践,耿浩,等.基于多尺度特征的管道环 焊缝定位方法研究[J].仪器仪表学报,2023,44(8): 118-129.

> ZHAO D SH, YANG L J, GENG H, et al. Research on the positioning method of pipeline girth weld based on multi-scale characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(8):118-129.

- [2] 杨理践,赵东升,耿浩,等. 漏磁信号增强算法研 究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):176-186. YANG L J, ZHAO D SH, GENG H, et al. Research on MFL signal enhancement algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(2):176-186.
- [3] LIU B, WANG F CH, WU Z H, et al. Research on magnetic memory inspection signal characteristics of multi-parameter coupling pipeline welds [J]. NDT & E International, 2024, 143(2):103019.
- [4] SCALES M, ANDERSON J, KORNUTA J A, et al. Accurate estimation of yield strength and ultimate tensile strength through instrumented indentation testing and chemical composition testing [J]. Materials, 2022, 15(3),832.
- [5] GAO B X, ZHAO H, MIAO X Y, et al. Multi-modal cascade detection of pipeline defects based on deep transfer metric learning [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 160:108216.
- [6] ZHANG L Y, BIAN Y CH, JIANG P, et al. Improving pipeline magnetic flux leakage (MFL) detection performance with mixed attention mechanisms (Ams) and deep residual shrinkage networks (DRSNs) [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(4):5162-5171.
- [7] 杨理践,张佳,邢燕好,等. 一种管道中T(0,1)模态单 向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2): 98-106.

YANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. The utility model relates to a T (0, 1) mode unidirectional electromagnetic ultrasonic transducer in a pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.

 [8] 杨理践,郑文学,李佳音,等. 基于平衡电磁技术的管 道裂纹全角度检测方法[J]. 仪器仪表学报,2021, 42(6):103-112.

YANG L J, ZHENG W X, LI J Y, et al. Full angle detection method of pipeline crack based on balanced electromagnetic technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(6):103-112.

[9] YANG L J, LI J Y, ZHENG W X, et al. Simulation and design of a balanced-field electromagnetic technique

sensor for crack detection in long-distance oil and gas pipelines [J]. Energies, 2022, 15(14):5274.

- [10] ZHENG W X, LI J Y. Method for detecting and locating cracks in aluminum plates based on balanced field electromagnetic technique [J]. Measurement, 2024, 229:114505.
- LIU B, LIANG Y S, HE L Y, et al. Quantitative study on the propagation characteristics of MFL signals of outer surface defects in long-distance oil and gas pipelines[J].
 NDT & E International, 2023, 137:102861.
- [12] 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. Quantification of detection signals in pipeline MFL under load [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(1):
- [13] KAHROBAEE S, AKHLAGHI I A, DAVIS C, et al. Detection of decarburising depth in hadfield steels using a multi-magnetic NDE method [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022, 37(4):482-494.

262-273.

- [14] JOLFAEI M A, LIU J, ZHOU L F, et al. Nondestructive evaluation of magnetic anisotropy associated with crystallographic texture of interstitial free steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 568:170374.
- [15] LI K Y, LI L, WANG P, et al. A fast and nondestructive method to evaluate yield strength of coldrolled steel via incremental permeability [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 498:166087.
- [16] LIU J, TIAN G Y, GAO B, et al. Domain wall characterization inside grain and around grain boundary under tensile stress [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 471:39-48.
- [17] 洪福东,冯路路,乔文玮,等. 热处理工艺对 16Mn 钢 组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(12): 157-160.
 HONG F D, FENG L L, QIAO W W, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 16Mn steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019,44(12): 157-160.
- [18] RUMICHE F, INDACOCHEA J E, WANG M L. Assessment of the effect of microstructure on the magnetic behavior of structural carbon steels using an electromagnetic sensor [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17:586-593.
- [19] LI K Y, QIU P C, WANG P, et al. Estimation method of yield strength of ferromagnetic materials based on

pulsed eddy current testing [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 523:167647.

- [20] THOMPSON S M, TANNER B K. The magnetic properties of pearlitic steels as a function of carbon content [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1993, 123(3):283-298.
- [21] BERGMANN A, KAVEH M, WISER N. Electrondislocation scattering and negative deviations from matthiessen's rule [J]. Solid State Communications, 1980, 33(5):369-373.
- [22] GARCIA-MARTIN J, GOMEZ-GIL J, VAZQUEZ-SANCHEZ E. Non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. Sensors, 2011, 11(3):2525-2565.
- [23] ROSE J H, UZAL E, MOULDER J C. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation [M]. Boston: Springer US, 1995.
- [24] YIN W, PEYTON A J, STRANGWOOD M, et al. Exploring the relationship between ferrite fraction and morphology and the electromagnetic properties of steel[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42:6854-6861.

作者简介



金新玖,2014年于沈阳建筑大学获得学 士学位,2022年于沈阳工业大学获得硕士学 位,现为沈阳工业大学博士研究生,主要研 究方向为材料无损检测技术。

E-mail:497074893@ qq. com

Jin Xinjiu received his B. Sc. degree in

2014 from Shenyang Jianzhu University, received his M. Sc. degree in 2022 from Shenyang University of Technology, He is currently a Ph. D. student at Shenyang University of Technology. His main research direction is the material nondestructive testing technology.



耿浩(通信作者),2020年于沈阳工业 大学获得博士学位,现为沈阳工业大学副教 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:1025284323@qq.com

Geng Hao(Corresponding author) received her Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2020. She is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. Her primary research interests are in detection technology for long-distance oil and gas pipelines, related theories, and nondestructive testing technology.



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.