

基于能量耗损的超细钨丝涡流检测新方法^{*}

吴德会, 陈剑杰

(厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院 厦门 361005)

摘要:针对亚毫米级超细钨丝在涡流检测中因信号微弱、信噪比低而难以有效识别微缺陷的技术难题,提出了一种基于能量耗损原理的涡流检测新方法。该方法创新地引入了能量耗损作为缺陷的直接表征量,并据此设计了基于微功率测量的涡流检测系统。首先基于建立的穿心线圈阻抗与能量耗损模型进行数值仿真,发现在0.1~1.0 mm线径范围,能量耗损信号随线径减小衰减缓慢,且在0.2 mm以下仍保持有效响应,优于传统阻抗法。进一步,设计了一套微功率测量系统,可实时采集电压、电流及相位差,进而计算有功功率以表征缺陷引起的能量耗损。基于该系统,对线径波动与裂纹缺陷进行了实验:对于0.05 mm线径波动,能量耗损法产生4.59%的信号变化,远高于传统阻抗法的0.11%和相位检测法的0.21%;对深度分别为0.05、0.08和0.10 mm的微裂纹,其信号变化率依次为0.8%、0.9%和1.1%,5次重复测量的标准差均<0.08 mW,表现出优异的重复性、灵敏度与测量稳定性。最后,在生产线上对线径0.40 mm的钨丝进行了连续在线检测,成功识别出多处位置与幅度各异的微缺陷,验证了所提方法在真实工业场景中的可行性与有效性。测试表明,所提能量耗损法在灵敏度、稳定性及抗干扰能力上显著优于传统阻抗法,为解决亚毫米级钨丝等超细丝材的无损检测难题提供了新途径。

关键词:超细钨丝;涡流检测;能量耗损;有功功率;缺陷检测

中图分类号: TH878 TM154 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Eddy current testing method for ultra-fine tungsten wires based on energy loss

Wu Dehui, Chen Jianjie

(Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Addressing the technical challenge of weak signals and low signal-to-noise ratio in eddy current testing of sub-millimeter ultra-fine tungsten wires, which hinders effective micro-defect identification, a novel eddy current testing method based on the energy dissipation principle is proposed. This method innovatively employs energy dissipation as a direct defect characterization parameter, leading to the design of an eddy current detection system centered on micro-power measurement. Numerical simulations based on established impedance and energy dissipation models of the core-type coil reveal that within the 0.1~1.0 mm wire diameter range, the energy dissipation signal decays more gradually with decreasing diameter and remains effective below 0.2 mm, outperforming traditional impedance method. A micro-power measurement system was consequently developed to acquire voltage, current, and phase difference in real time, enabling the calculation of active power to characterize energy dissipation caused by defects. Experimental investigations on diameter fluctuations and crack defects demonstrate that for a 0.05 mm diameter variation, the energy dissipation method yields a signal change of 4.59%, substantially exceeding the 0.11% and 0.21% achieved by traditional impedance and phase detection methods, respectively. For micro-cracks with depths of 0.05, 0.08, and 0.10 mm, the signal variation rates are 0.8%, 0.9%, and 1.1%, respectively, with standard deviations across five repeated measurements all below 0.08 mW, indicating exceptional repeatability, sensitivity, and measurement stability. Furthermore, continuous online testing of 0.40 mm tungsten wires on a production line successfully identified multiple micro-defects with varying locations and magnitudes, confirming the method's feasibility and effectiveness in real industrial environments. Experimental results show that the proposed energy dissipation method significantly surpasses the traditional impedance approach in sensitivity, stability, and anti-interference capability, offering a new pathway for non-destructive

testing of sub-millimeter tungsten wires and other ultra-fine filaments.

Keywords: ultra-fine tungsten wire; eddy current testing; energy loss; active power; defect detection

0 引言

在半导体和光伏产业快速发展的推动下,硅片制造技术正朝着更高精度、更稳定加工的方向不断演进^[1]。作为硅片超精密切割的核心耗材,钨丝金刚线的性能直接决定了硅片加工的良品率。但是在钨丝的多级拉丝成型过程中,塑性形变、摩擦热效应等因素会导致钨丝机械性能的波动和表面完整性的劣化^[2],进而诱发线径偏差、轴向裂纹等质量缺陷。因此,建立在线质量检测对保障钨丝金刚线的生产质量至关重要。相比于射线检测^[3]、磁粉检测^[4]、激光检测^[5]和机器视觉检测^[6]等方法,穿过式涡流检测因其非接触、高效率的特点,无需辅助介质即可在线检测,适用于棒状、丝状金属材料的质量监控^[7]。

穿过式涡流检测技术已广泛应用于金属材料的无损检测领域,尤其适用于 $>1\text{ mm}$ 的棒状材料,如铜棒、铝棒、钛棒等的电导率、直径等参数和缺陷的检测^[8-9]。目前,钨丝金刚线使用的钨丝基线直径仅为亚毫米级,为涡流检测带来了新的挑战:目前细导线的涡流检测主要集中在毫米级^[10],超细钨丝的表面缺陷(如微裂纹、凹坑)尺寸接近检测极限,涡流检测信号极其微弱,信噪比不足,传统涡流难以有效识别。针对亚毫米级超细导线的在线涡流检测研究尚属空白,亟待开发新方法以满足高精度硅片制造需求。

针对低信噪比涡流信号检测这一难题,国内外学者已开展了一系列创新性研究。Fraunhofer 无损检测研究所开发了激励频率高达 100 MHz 的多频涡流检测装置,可用于检测碳纤维复合材料等涡流信号较弱的试样。高频激励虽能提高表面涡流信号和检测灵敏度,但易受环境噪声干扰^[11]。Chen 等^[12-13]基于谐振方法优化探头,通过测量谐振频率的偏移实现了高灵敏度的缺陷检测。杨超等^[14]则通过优化脉冲涡流激励线圈的线径、长度等结构参数,有效增强了低信噪比环境下的检测能力。除硬件增强外,优化特征量提取是另一有效路径^[15-16]。李佳东等^[17]通过提取峰值时间、过零时间等多维时频特征并与缺陷尺寸建立定量映射关系,提升了脉冲涡流检测的缺陷评估精度;梁子千等^[18]通过对二维阻抗图特征进行智能提取与分类,实现了强背景噪声下涡流信号的可靠识别。

针对超细钨丝在涡流检测中信号微弱、缺陷识别困难的难题本研究提出了一种基于能量耗损原理^[19]的涡流检测新方法。该方法直接定量提取缺陷引起的能量耗损来表征缺陷,避免间接表征过程中的信息损失与干扰。并在此基础上,进一步设计了基于微功率拾取的检测系

统。首先对穿心线圈的阻抗模型进行分析,并在此基础上发展了穿心线圈的能量耗损模型。通过建立该模型的数学描述与数值仿真,提取了不同线径条件下缺陷对检测信号的影响规律。所设计的检测系统可实现毫瓦级功率的测量,通过监测穿心线圈能量耗损变化,有效识别线径不均与微裂纹等缺陷。最后,构建了完整检测系统并开展了实验研究,结果验证了所提方法在超细钨丝缺陷检测中的可行性与有效性。

1 超细钨丝的穿过式涡流检测机理探究

1.1 穿心线圈的阻抗模型分析

穿过式涡流探头的检测机理可以由图 1 所示的穿心线圈物理模型来表示。

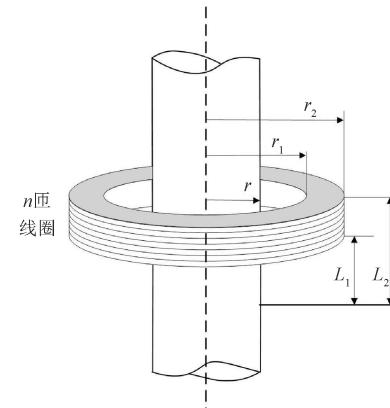


图 1 n 匝穿心线圈的结构

Fig. 1 Diagram of the structure of a n -turn through-core coil

图 1 中, n 匝线圈内、外半径分别为 r_1 和 r_2 , 线圈上表面和下表面至参考平面的距离分别为 L_1 和 L_2 , 则线圈高度为 $L = L_2 - L_1$; 被测导体棒半径为 r 。根据楞次定律, 待测钨丝内部涡流会改变线圈的阻抗特性。该阻抗变化是对待测材料进行评估的重要依据^[20]。

对于如图 1 所示待测材料穿过 n 匝圆形穿心线圈的模型, 可利用基于径向分层的圆柱体线圈的阻抗计算方法进行建模, 并利用麦克斯韦方程组进行求解。这是一个传统的电磁场问题, Uzal 等^[21]推导得出了该类穿心线圈的阻抗算式, 如式 (1) 所示。

$$Z = Z_0 + \frac{j\omega\mu_0 n^2}{L^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} \sin^2 \frac{\alpha L}{2} \phi(\alpha) P^2(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, ω 为激励角频率, Z_0 是线圈置于空气中时的阻抗, 其表达式如式 (2) 所示。

$$Z_0 = \frac{16j\omega\mu_0 n^2}{L^2(r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} \sin^2 \frac{\alpha L}{2} \times \left\{ \int_{r_1}^{r_2} \int_y^{r_2} xy K_1(\alpha x) I_1(\alpha y) dx dy \right\} d\alpha \quad (2)$$

此外,式(1)中, $P(\alpha)$ 满足: $P(\alpha) = \int_{r_1}^{r_2} x K_1(\alpha x) dx$;

$\phi(\alpha)$ 与被测材料的电磁参数有关。对于钨丝材料,则仅考虑如图1中所示的半径为 r , 电导率为 σ 的单一被测导体的情况。因此在 Uzal 等^[21] 模型的基础上, 可以得到适用于单一均匀导体的阻抗表达式。式(1)针对单一均匀导体, $\phi(\alpha)$ 可表示为:

$$\phi(\alpha) = \frac{\alpha I_0(\alpha r) I_1(\alpha_1 r) - \alpha_1 I_0(\alpha_1 r) I_1(\alpha r)}{\alpha K_0(\alpha r) I_1(\alpha_1 r) + \alpha_1 K_1(\alpha r) I_0(\alpha_1 r)} \quad (3)$$

式中: $\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu_0\sigma}$ 。

因此,当穿心线圈分别处于空气中和穿过一根线径为 d (即 $d = 2r$) 的待测金属丝两种情况时, 其阻抗变化量 $\|\Delta Z_d\|$ 表达式如式(4)所示。

$$\|\Delta Z_d\| = \|Z_d\| - \|Z_0\| = \|\Delta R + j\omega\Delta L\| = \left\| \frac{j\omega\mu_0 n^2}{L^2(r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} \sin^2 \frac{\alpha L}{2} \phi(\alpha) P^2(\alpha) d\alpha \right\| \quad (4)$$

其中, Z_d 为不同线径 d 钨丝的穿心线圈阻抗。

1.2 穿心线圈的能量耗损模型分析

待测钨丝内部涡流会改变穿心线圈阻抗, 这是利用了涡流的电磁效应。但同时, 涡流在待测钨丝中也会产生热功率耗散, 这是涡流的热效应。涡流的热效应会引发穿心线圈的能量耗损^[22-23]。在涡流检测领域, 对线圈的阻抗模型研究相对比较丰富, 而对于穿心线圈能量耗损模型的相关研究, 目前尚比较鲜见。

为便于理论分析, 将穿心线圈与被测导体之间的电磁耦合等效为如图2所示的变压器模型。穿心线圈通以固定频率的交流激励电流 I ; 穿心线圈因导线电阻等非理想因素, 需考虑线圈等效内阻 R_C , 故其一次侧等效为 R_C 和 L_0 串联电路, 二次侧代表被测导体。

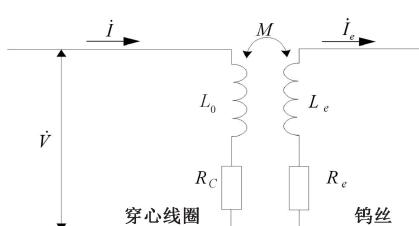


图2 穿心线圈与钨丝耦合的等效变压器模型

Fig. 2 Equivalent transformer model of a through-core coil coupled with tungsten wire

基于互感作用, 一次侧阻抗产生 $\Delta Z = \Delta R + j\omega\Delta L$ 变化量, 其中 ΔR 和 ΔL 分别表示涡流反射电阻和耦合感应

电感。由此可进一步简化为图3所示等效电路。

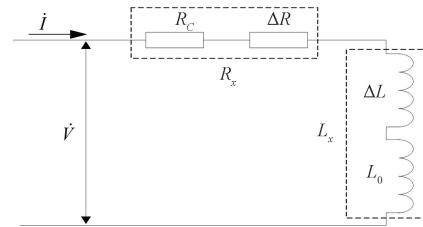


图3 穿心线圈与钨丝耦合的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of a through-hole coil coupled with tungsten wire

对于如图1所示穿心线圈问题, 利用电磁感应定律, 求解穿心线圈的感应电压, 其表达式如式(5)所示。

$$\dot{V} = \frac{j\omega 2n^2 I}{L^2(R_2 - R_1)^2} \int_{L_1}^{L_2} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^\infty r \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha L}{2} \cos \alpha(z - L_0) T(\alpha, r) d\alpha dr dz + IR_C \quad (5)$$

其中, $T(\alpha, r)$ 满足如式(6)所示的表达式, 即:

$$T(\alpha, r) = \int_{r_1}^{r_2} r_0 Q(\alpha, r, r_0) dr_0 \quad (6)$$

式中: $Q(\alpha, r, r_0)$ 满足如(7)式所示的关系, 即:

$$Q(\alpha, r, r_0) =$$

$$\begin{cases} [\phi(\alpha) K_1(\alpha r) + I_1(\alpha r)] K_1(\alpha r_0), & r < r_0 \\ [\phi(\alpha) K_1(\alpha r_0) + I_1(\alpha r_0)] K_1(\alpha r), & r > r_0 \end{cases} \quad (7)$$

所以, 穿心线圈的复功率可表示为如式(8)所示。

$$\bar{S} = \dot{V} \dot{I}^* = P + jQ \quad (8)$$

其中, \dot{I}^* 是激励电流 \dot{I} 的共轭复数, P 和 Q 分别为电路的有功功率和无功功率。有功功率 P 可以用如式(9)表示, 其中 θ 是线圈的电流和电压之间的相位差。

$$P = V I \cos \theta \quad (9)$$

涡流的能量耗损可用线圈的有功功率损失 $\|\Delta P\|$ 来表征^[24]。因此, 由于线径 d 的钨丝而造成穿心线圈的能量耗损 $\|\Delta P_d\|$, 其具体表达式如式(10)所示。

$$\|\Delta P_d\| = P_d - P_0 = I^2 \Delta R = \operatorname{Re}(\bar{S}) \quad (10)$$

其中, P_d 为不同线径 d 对应穿心线圈有功功率; P_0 是无导体时穿心线圈有功功率, 由内阻 R_C 造成。

2 数值分析与检测方案设计

2.1 数值计算和分析

为探究钨丝线径变化对穿心线圈的影响规律, 基于上文所建模型, 开展不同线径条件下, 穿心线圈的阻抗变化量 $\|\Delta Z\|$ 和能量耗损 $\|\Delta P\|$ 的数值分析研究。穿心线圈关键模型参数详见表1。此外, 钨丝电导率为 $1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

表 1 穿心线圈模型参数

Table 1 Through-hole coil simulation parameters

线圈参数	值
内径/mm	1.000
外径/mm	4.000
高度/mm	1.000
匝数	175.000
等效电阻/Ω	18.500
自感/μH	48.634

待检测超细钨丝的线径 d (即 $2r$) 在亚毫米级 (即 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 的范围), 线径的变化量 Δd 为 0.01 mm 。为此, 在数值分析过程中, 穿心线圈的激励频率固定设为 1 MHz , 钨丝线径 d 由 1.0 mm 逐步减小到 0.1 mm , 间隔为 0.05 mm , 以对应亚毫米线径的超细钨丝。

利用上文中阻抗模型和能量耗损模型, 计算不同线径 d 造成穿心线圈阻抗变化量 $\|\Delta Z_d\|$ 和能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 的基础信号。得到的数值计算结果如图 4 所示。

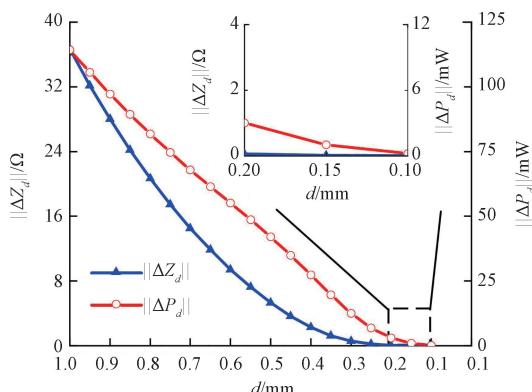


图 4 不同线径 d 下阻抗变化量 $\|\Delta Z_d\|$ 和能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 的基础信号对比

Fig. 4 $\|\Delta Z_d\|$ and $\|\Delta P_d\|$ under different wire diameters d

从图 4 中数值模型计算结果可以看出, 随着待测钨丝线径 d 由 1.0 mm 减小至 0.1 mm , 呈现的规律为: 1) 穿心线圈的能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 相较于阻抗变化量 $\|\Delta Z_d\|$ 衰减的更慢; 2) 阻抗变化量 $\|\Delta Z_d\|$ 在钨丝线径 $d < 0.3 \text{ mm}$ 时几乎趋近于 0, 而能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 在线径 d 降至约 0.15 mm 才基本消失; 3) 在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ 范围, 能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 与线径 d 之间具有较为良好的线性关系。因此, 以穿心线圈的能量耗损 $\|\Delta P_d\|$ 作为涡流检测指标, 其“基础信号”随线径 d 减小而衰减更缓慢, 更适合亚毫米级超细钨丝检测的实际需要。

随后, 对待测钨丝缺陷引起的检测信号进行分析。为便于对穿心线圈的阻抗变化量 $\|\Delta Z\|$ 和能量耗损 $\|\Delta P\|$ 进行定量分析, 用缺陷信号变化率作为对比参数。不妨设当前待测钨丝的线径为 d , 并包含线径波动 $\Delta d = 0.01 \text{ mm}$ 作为缺陷。那么, 针对该缺陷, 所引发穿心线圈阻抗变化 $\|\Delta Z\|$ 的信号变化率如式 (11) 所示。

$$\delta_z = \frac{\|\Delta Z\|}{\|Z_d\|} = \frac{\|Z_{d-\Delta d}\| - \|Z_d\|}{\|Z_d\|} \times 100\% \quad (11)$$

同样, 该穿心线圈能量耗损 $\|\Delta P\|$ 的信号变化率如式 (12) 所示。

$$\delta_p = \frac{\|\Delta P\|}{\|P_d\|} = \frac{\|P_{d-\Delta d}\| - \|P_d\|}{\|P_d\|} \times 100\% \quad (12)$$

再利用前述的阻抗模型和能量耗损模型, 分别计算不同线径 d 条件下, 同一个缺陷所带来的缺陷信号变化率 δ_z 和 δ_p 。上述模型实际计算结果如图 5 所示。

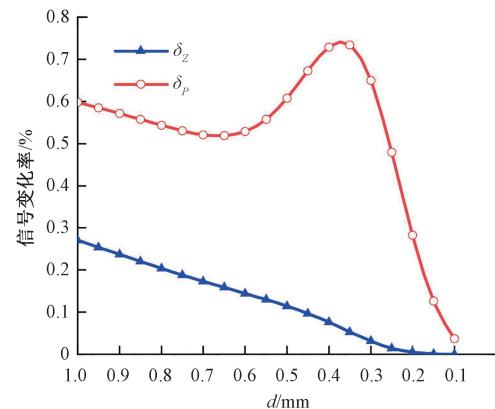


图 5 不同线径 d 下的缺陷信号变化率 δ_z 和 δ_p 对比

Fig. 5 Comparison of the variation rates (δ_z and δ_p) of the defect signal under different wire diameters d

对比图 5 中同一个缺陷的缺陷信号可以看出: 对于亚毫米级超细钨丝, 无论是能量耗损信号变化率 δ_p , 还是阻抗信号变化率 δ_z 都很微弱, 均 $< 1\%$ 。这也客观验证了对超细钨丝进行穿心涡流检测的技术难度。

进一步对比分析发现: 1) 缺陷的阻抗信号变化率 δ_z 随待测钨丝线径 d 减小而持续减小, 在 $< 0.2 \text{ mm}$ 时趋近于 0; 2) 缺陷的能量耗损信号变化率 δ_p 基本平稳且始终大于 δ_z ; 3) 在线径 $d = 0.35 \text{ mm}$ 处, δ_p 呈现一个峰值 0.72% ; 4) δ_p 在线径 d 降至 0.1 mm 时, 仍能保持 0.05% 信号变化率。因此穿心线圈的能量耗损 $\|\Delta P\|$ 信号对微小缺陷更为敏感, 尤其是检测线径 d 为 0.1 mm 超细钨丝, 仍能保持较明显的缺陷信号幅度。

2.2 检测方案

为实现对穿心线圈有功功率 P 的实时测量, 以得到线圈的能量耗损 $\|\Delta P\|$, 设计了一种毫瓦级的微功率测量系统, 其结构如图 6 所示。

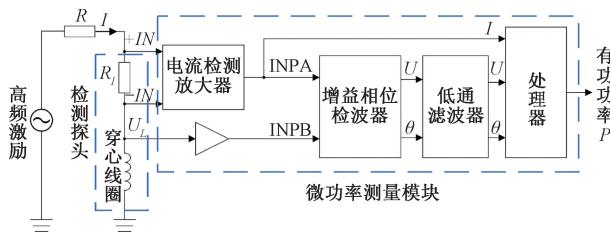


图 6 微功率测量系统的拓扑结构

Fig. 6 Micro-power measurement system topology

该系统核心原理为:采用高频激励源和限流电阻 R 来驱动穿心线圈。由于 R 的阻抗远大于线圈的阻抗 ($R > |Z_L|$),可使激励电流 I 基本保持稳定。随后,通过采样电阻与电流检测放大器相结合的方式精确提取电路电流,同步采集电路电压。提取的电压与电流信号输入至增益相位检波器,以计算线圈两端电压及电压与电流之间的相位差 θ 。最终,依据式(9),由电压 U 、电流 I 及相位差 θ 实时计算有功功率 P 。

3 实验验证

3.1 实验系统搭建

为验证基于能量耗损的超细钨丝涡流检测方法(简称能量耗损法)有效性,搭建如图 7 所示的钨丝涡流检测系统。系统整体由涡流检测探头、运动平台、微功率检测模块和上位机等组成。微功率检测模块为核心采集单元,其关键性能参数为:激励频率为 1 MHz,采样率为 1 kSPS,功率分辨率为 0.01 mW,量程为 0~500 mW,噪声水平低于 -3.11 dBm。该模块采集穿心线圈的微功率变化。运动平台包括收卷机构和运动控制模块,用于控制钨丝走丝速度;数据采集模块采集探头信号并上传;上位机负责进行数字信号处理,转换为能量耗损信号 $\|\Delta P\|$ 以实现缺陷的识别与评估。

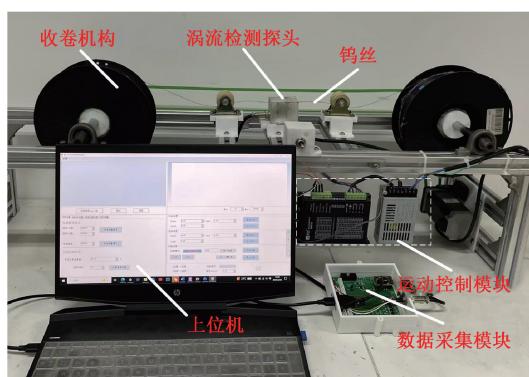


图 7 基于能量耗损的钨丝检测实验系统

Fig. 7 Experimental system for detecting tungsten filaments based on energy loss

物理实验中的待测钨丝线径均 < 0.5 mm,因此需使用更小内径的穿心线圈,其参数如表 2 所示。

表 2 实验用穿心线圈参数

Table 2 Experimental coil parameters

线圈参数	值
内径/mm	0.50
外径/mm	4.00
高度/mm	1.00
匝数	220.00
等效电阻/Ω	21.13
自感/μH	60.64

同时,根据表 2 的参数制作了一个包含相同穿心线圈的传统涡流检测探头。使用 HIOKI-IM3523 型 LCR 仪作为信号采集设备,检测其阻抗信号。实验过程中,将同一组钨丝样品分别利用能量耗损法和传统阻抗法进行检测,对比分析两者的信号,以评估两种方法在缺陷检测灵敏度方面的差异。

3.2 缺陷检测试验与结果分析

1) 线径波动类型缺陷

为验证能量耗损法对线径波动类型缺陷检测的有效性,准备了线径为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 和 0.40 mm 的钨丝样品,如图 8 所示,模拟线径不均缺陷的检测情形。利用图 7 所示检测系统,分别采用能量耗损法与传统阻抗法对各样品进行测试。

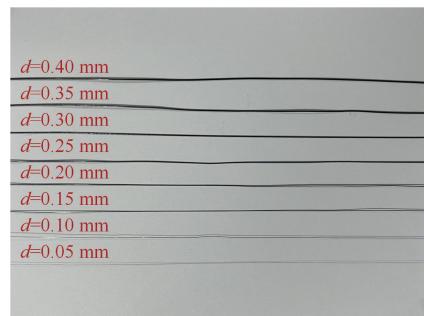


图 8 不同线径钨丝样品

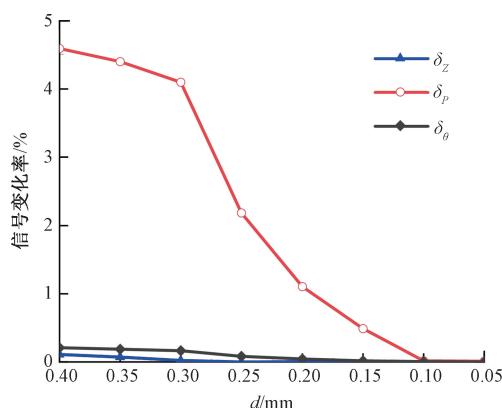
Fig. 8 Tungsten wire samples of different diameters

首先对线径波动的检测信号进行分析。设待测样品钨丝的线径为 d ,取更小一号的钨丝作为线径减小的缺陷,即包含线径波动 $\Delta d = 0.05$ mm。在 1 MHz 激励频率下,样品钨丝线径 d 从 0.40 mm 逐步减小至 0.05 mm,分别采用所提能量耗损法、传统阻抗法与相位检测法对各线径样品进行测试。其中相位参数由传统涡流检测探头和 HIOKI-IM3523 配合测得。在相同条件下重复 5 次实验,得到结果如表 3 和图 9 所示。

表 3 不同线径下缺陷信号变化率的统计结果

Table 3 Statistical results of the defect signal variation rate under different wire diameters

线径/mm	平均值/mW	标准差/mW	95% 置信区间/mW	缺陷信号相对变化率 $\delta/\%$
0.40	250.06	0.074	(249.97, 250.16)	4.59
0.35	238.57	0.089	(238.46, 238.68)	4.40
0.30	228.07	0.142	(227.89, 228.24)	4.10
0.25	218.71	0.067	(218.63, 218.80)	2.18
0.20	213.94	0.054	(213.87, 214.00)	1.10
0.15	211.58	0.070	(211.50, 211.67)	0.49
0.10	210.55	0.046	(210.49, 210.60)	0.01
0.05	210.57	0.048	(210.51, 210.63)	0.01

图 9 0.05 mm 线径波动下缺陷信号变化率 δ_p (能量耗损法)、 δ_z (传统阻抗法) 和 δ_θ (相位检测法)Fig. 9 Variation rates of δ_p (energy loss method), δ_z (traditional impedance method) and δ_θ (phase detection method) under 0.05 mm diameter fluctuation

其中参考式(11)和(12)中的 δ_z 和 δ_p 的定义, 相位相对变化率 δ_θ 的定义如式(13)所示。

$$\delta_\theta = \frac{\|\Delta\theta\|}{\|\theta_d\|} = \frac{\|\theta_{d-\Delta d}\| - \|\theta_d\|}{\|\theta_d\|} \times 100\% \quad (13)$$

由表 3 可知, 所提能量耗损法在较宽的线径范围内(0.40~0.15 mm)均能产生显著缺陷信号, 且测量结果具有较高的可重复性。

从图 9 中可以看出, 这 3 种方法的缺陷信号均随钨丝线径 d 减小而衰减, 但变化规律存在差异。传统阻抗法和相位检测法的缺陷信号在 0.05~0.4 mm 线径范围幅度变化很小, 相位检测法信号 δ_θ 的最大变化率约 0.21%, 传统阻抗法信号 δ_z 的最大变化率约 0.11%, 难以反映线径 d 的变化; 而能量耗损法的缺陷信号幅值

更大, 其变化率 δ_p 可达 4.59%。当线径 $d < 0.25$ mm 时, 传统阻抗法的缺陷信号已趋于 0; 相位检测法表现稍优, 但在线径 > 0.20 mm 时信号也近乎消失; 而能量耗损法在 0.15 mm 以上仍保持有效响应。

2) 裂纹类型缺陷

为了测试该检测系统应用于超细钨丝裂纹缺陷时的检测效果, 利用激光加工的方法, 在 0.40 mm 线径的钨丝表面, 人工刻蚀了 3 个长 0.5 mm, 宽 0.05 mm, 深度分别为 0.05、0.08 和 0.10 mm 的轴向裂纹类型缺陷。上述 3 个人工裂纹的显微镜成像如图 10 所示。

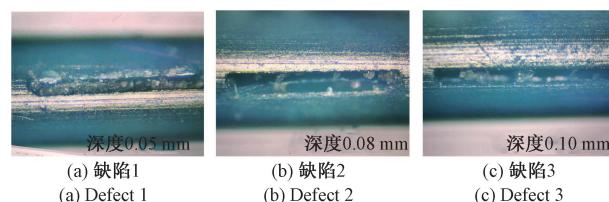


图 10 显微镜观察的不同深度裂纹缺陷

Fig. 10 Microcrack defects observed at varying depths via microscopy

分别用所提能量耗损法、传统阻抗法和相位检测法对上述裂纹进行检测, 在相同条件下重复 5 次实验, 并计算实测缺陷信号变化率 δ_z 、 δ_p 和 δ_θ 。得到统计结果和相对变化率曲线如表 4 和图 11 所示。

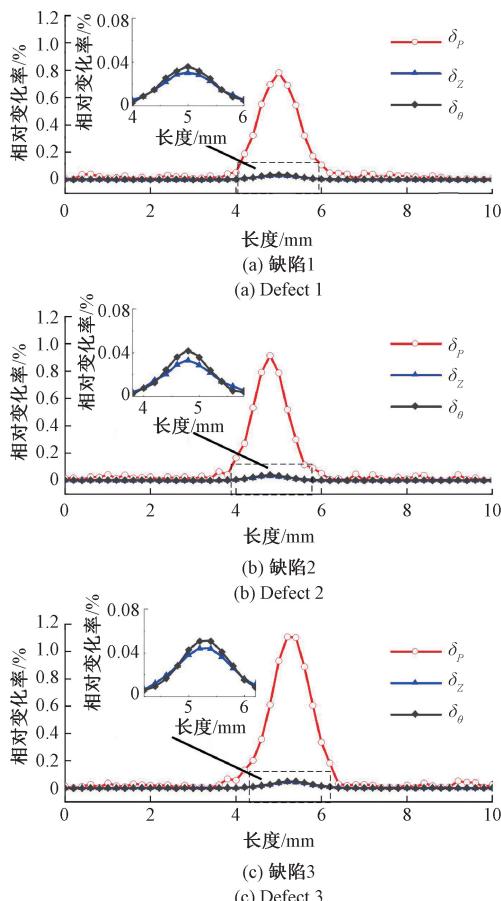
表 4 不同深度裂纹缺陷的检测结果

Table 4 Detection results of crack defects with different depths

缺陷序号	平均值/mW	标准差/mW	95% 置信区间/mW	缺陷信号相对变化率 $\delta/\%$
缺陷 1	247.00	0.055	(246.93, 247.07)	0.8
缺陷 2	246.82	0.079	(246.72, 246.92)	0.9
缺陷 3	245.73	0.053	(245.66, 245.80)	1.1

表 4 的数据统计特性表明, 各缺陷条件下多次测量的标准差均 < 0.08 mW, 具有较高的重复性和精密度。在图 11 中, 针对 3 种不同缺陷, 传统阻抗法和相位检测法的信号曲线几乎完全重合, 即使针对深度 0.10 mm 的裂纹, 其缺陷信号变化率 δ_z 和 δ_θ 也仅有 0.044% 和 0.051%。在实际检测中易淹没在背景噪声中。而对于所提的能量耗损法, 3 个人工裂纹的缺陷信号变化率 δ_p 分别达到 0.8%、0.9% 和 1.1%, 明显优于传统阻抗法和相位检测法。实验表明, 能量耗损法对超细钨丝的裂纹类缺陷也具有良好的检测效果。

在本实验中, 使用式(11)~(13) 定义的缺陷信号变化率 δ_p 、 δ_z 和 δ_θ 来进行对比和评价。 δ_z 、 δ_p 和 δ_θ 代表的

图 11 不同深度裂纹缺陷信号变化率 δ_p 、 δ_z 和 δ_θ 对比Fig. 11 Comparison of parameters δ_p , δ_z and δ_θ δ_θ under different crack depths

是对应方法对缺陷的表征能力。通过改变放大倍数、信号增益均不会对该表征能力造成影响。

3) 连续探伤验证与测试

前述实验研究已验证了基于功率耗损法对线径波动和裂纹缺陷具有高检测灵敏度。然而,真实的工业现场情况更加复杂,为评估本方法的实际工业应用潜力,本研究在钨丝制造生产线上进行了实地测试与应用验证。对一卷线径 0.40 mm、长度约为 100 m 的亚毫米级超细钨丝进行在线涡流检测,走丝速度设置为 17 m/min。以穿心线圈的能量耗损 $\|\Delta P\|$ 作为检测信号,并利用数据采集模块连续记录该检测信号。经过 6 min 的连续检测,获得原始的能量耗损检测信号 $\|\Delta P\|$,如图 12(a)所示;再经式(12)转换为缺陷信号(变化率) δ_p 作为检测结果,如图 12(b)所示。

图 12 在检测信号中标出了缺陷深度分别为 5%、12.5% 和 25% 时所对应的检测阈值线。从结果可以看出,在真实的工厂环境中,由于机械振动、钨丝瑕疵和电磁干扰等问题,检测信号 $\|\Delta P\|$ 中存在噪声。但所提

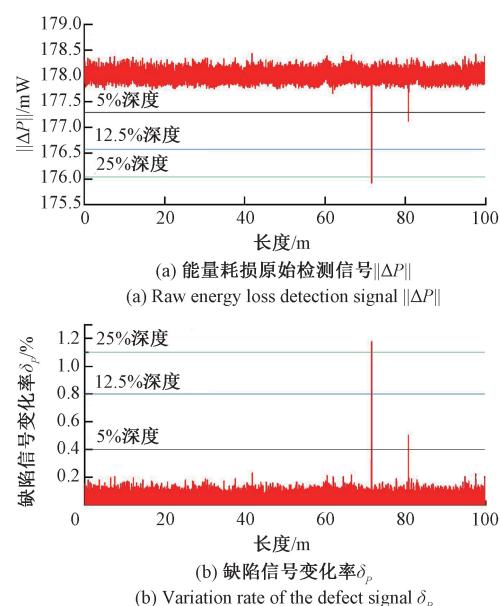


图 12 工业现场测试结果

Fig. 12 Industrial field test results

方法仍能在亚毫米级超细钨丝中有效检出缺陷;检测结果可知,该卷钨丝的第 71.6 和 80.8 m 的位置有异常信号,且经过人工复检,证实这两处确有缺陷。

为系统评估该方法在工业环境中的性能,进一步对现场检测数据进行统计分析,得到在实际工业现场噪声水平为 -3 dBm,检测阈值和信噪比如表 5 所示。

表 5 实际工业场景下的系统性能指标

Table 5 System performance metrics in actual industrial scenarios

性能指标	缺陷深度	测试结果
	5% 深度缺陷	177.27
检测阈值/mW	12.5% 深度缺陷	177.85
	25% 深度缺陷	176.04
	5% 深度缺陷	4.56
信噪比/dB	12.5% 深度缺陷	7.57
	25% 深度缺陷	8.95

由表 5 可知,在信噪比方面,对于 5% 深度缺陷,信噪比仍可达 4.56 dB,并随着缺陷深度增加至 25% 而提升至 8.95 dB,显示出优异的缺陷响应特性。

这证明了基于功率耗损的检测方法能够有效克服工业现场复杂环境的干扰,实现对于微细缺陷的可靠检出,验证了其在实际工业应用中的有效性与实用性。

4 结 论

围绕超细钨丝的穿过式涡流检测,从理论建模、数值仿真、系统设计与实验验证等方面,系统探究了基于能量耗损的涡流检测新方法,得出的主要结论为:

1) 基于穿心线圈数学模型的定量分析,提出了以能量耗损作为缺陷表征量的新检测参量,并建立了其与线径及缺陷的定量关系。数值仿真结果表明,该能量耗损法在亚毫米级超细导线检测中,相较于传统阻抗法表现出更小的信号衰减与更高的信噪比,在线径 $<0.3\text{ mm}$ 时仍能保持稳定响应。

2) 基于能量耗损理论分析,设计了一套以微功率测量为主要手段的新型涡流探伤系统,并据此开展实验。实验结果表明:在超细钨丝的缺陷检测中,所提能量耗损法不论是针对线径不均缺陷还是微裂纹缺陷,都明显优于传统阻抗法和相位检测法的检测效果。

3) 本研究验证了基于能量耗损法的涡流检测技术在超细钨丝缺陷识别中的有效性和优越性,该方法适用于高阻值、小体积导电材料的无损检测,为超细丝材在线质检提供了新途径,对扩展涡流检测在微细导电材料领域的应用具有较好的参考价值。

参考文献

- [1] 丰宗强, 应一鹏, 章甫君, 等. 基于深度学习的金刚线光斑点检测[J]. 光学精密工程, 2023, 31(15): 2260-2272.
- FENG Z Q, YING Y P, ZHANG F J, et al. Detection of light spots on diamond wire based on deep learning[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(15): 2260-2272.
- [2] ABDELWAHED M S, ALGHAMDI A, ELTAHER M A. Improving product quality of wire drawing process using design of experiments [J]. Journal of Computational Applied Mechanics, 2024, 55(1): 8-25.
- [3] SUN SH Y, LYU L L, LI CH, et al. Defects identification of wind turbine blades based on radiographic testing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025, 83(10): 71-84.
- [4] BAHARLOUEI Z, ENAYATI M H, NAHVI S M. Fluorescent cobalt ferrite nanoparticles for non-destructive magnetic particle testing [J]. Journal of Materials Research, 2024, 39(17): 2469-2481.
- [5] XUE Y, GAO J Y, LIU J CH, et al. Nondestructive testing of internal defects by ring-laser-excited ultrasonic [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39(8): 2277-2294.
- [6] KRYSKO N V, SKRYNNIKOV S V, SHCHIPAKOV N A, et al. Classification and sizing of surface defects in pipelines based on the results of combined diagnostics by ultrasonic, eddy current, and visual inspection methods of nondestructive testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2023, 59(12): 1315-1323.
- [7] 靳建辉, 张卿, 韩博, 等. 复杂裂纹涡流检测与评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 280-288.
- JIN J H, ZHANG Q, HAN B, et al. Research on eddy current testing and evaluation method for complex cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 280-288.
- [8] HUANG P, PENG L SH, WEN SH ZH, et al. A novel measurement of permeability, conductivity, and diameter for magnetic metallic rod using multifrequency ECT[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 6003009.
- [9] XIE Y D, DU K Y, HUANG P, et al. Conductivity measurement of metal tube based on high-frequency eddy current method[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025: 1-14.
- [10] TRAN K S, SHIRINZADEH B, SMITH J. Eddy current-based identification and depth investigation of micro-defects in steel filaments[J]. Sensors, 2024, 24(16): 5101.
- [11] YI Q J, MAES V, WOO W L, et al. Imaging and reconstruction of asymmetric wrinkles in carbon fibre composites using high-frequency eddy current and full matrix capture-based ultrasound[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 287: 111873.
- [12] CHEN W X, WU D H, WANG X H, et al. A self-frequency-conversion eddy current testing method [J]. Measurement, 2022, 195: 111129.
- [13] MA M, LIU SH Y, ZHANG R H, et al. Non-destructive testing of carbon fiber-reinforced plastics (CFRPs) using a resonant eddy current sensor [J]. Sensors, 2024, 24(11): 3449.
- [14] 杨超, 孙虎, 唐超. 电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(4): 132-140.
- YANG CH, SUN H, TANG CH. Research on metal pipe defect detection based on electromagnetic pulsed eddy current testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(4): 132-140.
- [15] 陈涛, 尹永奇, 吕程, 等. 脉冲涡流缺陷检测理论与技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 1-10.
- CHEN T, YIN Y Q, LYU CH, et al. Review of research

- on theory and technology of pulsed eddy current testing for detection of defects [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 1-10.
- [16] 朱红运,王长龙,江涛,等.激励电流对脉冲涡流检测的影响研究[J].仪器仪表学报,2016,37(1): 1-8.
ZHU H Y, WANG CH L, JIANG T, et al. Study on the effect of excitation current on pulsed eddy current testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 1-8.
- [17] 李佳东,张彦杰,邱俊杰,等.带包覆层管道缺陷的脉冲涡流检测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2024,38(10): 137-146.
LI J D, ZHANG Y J, QIU J J, et al. Research on pulse eddy current testing method for pipeline defects with coating layer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 137-146.
- [18] 梁子千,玄文博,王婷,等.基于二维阻抗特征的管道环焊缝缺陷涡流检测[J].仪器仪表学报,2017,38(9): 2138-2145.
LIANG Z Q, XUAN W B, WANG T, et al. Eddy current NDT for the cracks of girth welds of pipes based on 2D impedance characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2138-2145.
- [19] JIANG F, ZHANG Y H, ZHAO L, et al. Research on gear defect detection using electromagnetic induction eddy current and infrared thermography [J]. Measurement, 2025, 253: 117641.
- [20] HAO K SH, HUANG S L, ZHAO W, et al. Analytical modelling and calculation of impedance and pulsed magnetic field for rectangular meander coil based on second order potential [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 078103.
- [21] UZAL E, OZKOL I, KAYA M O. Impedance of a coil surrounding an infinite cylinder with an arbitrary radial conductivity profile[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(1): 213-217.
- [22] CHEN X T, TIAN G Y, DING S, et al. Investigation of skewness feature for evaluation of defects using eddy current pulsed thermography [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24): 12118-12125.
- [23] HE Y Z, PAN M CH, TIAN G Y, et al. Eddy current pulsed phase thermography for subsurface defect quantitatively evaluation [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(14): 144108.
- [24] 高源,张梁,梁政,等.电磁激励器结构的多目标优化设计与研究[J].仪器仪表学报,2025,46(7): 235-250.
GAO Y, ZHANG L, LIANG ZH, et al. Multi-objective optimization design and research of electromagnetic actuator structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 235-250.

作者简介



吴德会(通信作者),1996 年于宁波大学获得学士学位,2003 年于合肥工业大学获得硕士学位,2006 年于合肥工业大学获得博士学位,现为厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院教授、博士生导师,主要研究方向为无损检测、智能测控和传感器技术。

E-mail: wudehui@xmu.edu.cn

Wu Dehui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Ningbo University in 1996, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Hefei University of Technology in 2003 and 2006, respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor in the Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology at Xiamen University. His main research interests include non-destructive testing, sensor technology, and intelligent measurement and control technology.



陈剑杰,2023 年于厦门大学获得学士学位,现为厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院硕士研究生,研究方向为无损检测。

E-mail: JacobChen255@outlook.com



Chen Jianjie received his B. Sc. degree from Xiamen University in 2023. He is currently a master's candidate in the Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology at Xiamen University. His main research interest includes non-destructive testing.