

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311157

基于双层排线探头的轧辊表面微裂纹检测方法

姜 春,汪圣涵,唐 健,康宜华

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘 要:针对冷轧轧辊的表面微细裂纹检测问题,提出了一种双层排线磁化的交流漏磁检测方法,利用双层柔性排线对轧辊工作表面进行仿形磁化,采用高精度隧穿磁阻(TMR)阵列作为检测元件,使其具备大曲率表面微米级裂纹的检测能力;并通过调控双层排线的激励电流抵消切向背景磁场,进一步提高激励电流的同时,避免TMR超量程饱和问题;将磁场的切向分量用以表征缺陷,使其能在单一扫查方向下表征多向裂纹。基于以上分析,建立了双层排线与轧辊的三维有限元仿真模型,通过仿真研究轧辊半径、缺陷角度和深度对交流漏磁信号的影响。最后搭建了相应验证实验平台,实验结果表明该探头能有效磁化大曲率表面并可检出与区分多向裂纹,可检测出15 μm 深的微细裂纹。

关键词:双层柔性排线;交流漏磁;切向分量;背景磁场;冷轧轧辊;微细裂纹

中图分类号: TH878 TG335.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Micro-crack detection method on roll surface based on double-layer parallel cables probe

Jiang Chun, Wang Shenghan, Tang Jian, Kang Yihua

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the problem of micro-cracks detection on the surface of cold-rolled rolls, this article proposes an alternating current magnetic flux leakage detection method excited by double-layer flexible parallel cables, which is used to profile the working surface of the rolls, and uses the high-precision tunnel magnetoresistance (TMR) sensor array as the detection sensor. It has the ability to detect micro-cracks on large curvature surfaces. Meanwhile, by adjusting the excitation current of the double-layer PCs to offset the tangential component of the background magnetic field, the excitation current is increased further and the TMR overrange saturation problem is avoided. The tangential component of the magnetic field is used to characterize defects, enabling it to characterize multidirectional cracks in a single scanning direction. Based on the analysis above, this article establishes a three-dimensional finite element simulation model of double-layer PCs and roll, and studies the influence of roll radius, defect angles and depth on AC MFL signal through simulation. Finally, a corresponding verification experimental platform is established. Experiment shows that the probe can effectively magnetize the surface with large curvature, detect and distinguish multidirectional cracks, and detect micro-cracks at a depth of 15 μm .

Keywords: double-layer flexible parallel cables; AC MFL; tangential component; background magnetic field; cold rolling roller; micro-cracks

0 引 言

在钢铁工业中,一般采用冷轧方式生产薄板、带钢,冷轧产品由于精度高、稳定性好等特点而被广泛应用于航空航天、石油化工、舰船工业等领域。冷轧轧辊作为冷轧工艺中最重要的加工零件,其表面状况将直接影响冷轧钢板的加工质量,严重时甚至会导致脱落、爆辊等危害

生命财产安全的重大事故^[1]。因此,对冷轧轧辊进行表面裂纹无损检测有利于保证钢板质量、降低轧辊消耗、提升生产效能。

电磁无损检测是一种应用电磁场与工件相互作用的非破坏性检测技术,它具有非接触、响应速度快、灵敏度高、易实现自动化等诸多优势^[2-7]。随着电磁检测技术的不断发展与完善,它已经被广泛应用于钻杆^[8]、钢管^[9]、方钢^[10]、火车车轨^[11]、飞机叶片^[12]等重要铁磁性构件的检测

之中。常见的轧辊电磁检测技术包括磁粉检测^[13]、涡流检测、漏磁检测等,磁粉检测精度高,但不易实现自动化、污染环境;涡流检测受环境影响大、误报率较高;漏磁检测自动化程度较高,但背景磁场大、磁化曲面工件较困难^[14]。

漏磁检测根据磁化方式的不同,主要分为永磁磁化、直流磁化、交流磁化和脉冲磁化^[15-17]。永磁磁化存在安装和拆卸困难等问题;直流磁化的磁化线圈体积庞大、发热严重且需退磁处理^[18];交流磁化仅适用于表面缺陷的检测^[19];脉冲磁化的灵敏度较低、信号处理复杂^[20]。在以上方法中,交流漏磁(alternating current magnetic flux leakage, AC MFL)对于曲面微细裂纹的检测具有磁化器体积小、无需退磁等优势。在交流漏磁工业化应用中,常使用U型磁轭式磁化器对工件表面进行磁化^[21],然而其体积和重量较大,难以适应不同规格轧辊,因此设计一种能够适应轧辊表面的交流磁化器具有重要的应用价值。

轧辊表面多为大曲率圆柱面,在冷轧过程中极易产生短、浅的表面微细裂纹,同时其要求剩磁极低。Wang等^[10,22]提出了一种基于单层排线的交流漏磁正交裂纹检测方法,认为利用单层排线(parallel cables, PCs)作为磁化器具有适用表面复杂的工件、轻量化、低功耗等优势,但仍然存在检测精度低、背景磁场大等问题。基于以上检测问题和需求,本文提出了一种双层排线磁化的冷轧轧辊表面微细裂纹交流漏磁检测方法,将磁场的切向分量用以表征缺陷,双层排线作为激励源在提升磁化强度的同时,也能通过调控双层排线的电流消除切向背景磁场,因此可兼容灵敏度更高的磁敏元件;柔性的特征使其能适应多曲率、多规格轧辊的缺陷检测需求。此外,该方法采用隧穿磁阻传感器(tunnel magnetoresistance, TMR)阵列探头,可实现轧辊表面微细裂纹和多向裂纹的高效检测。

1 基于双层排线的轧辊表面裂纹交流漏磁检测方法

1.1 轧辊表面缺陷检测难点

轧辊实物如图1所示,由于冷轧轧辊不仅要承受磨削过程中的振动,还要直接承受金属塑性变形的巨大变形抗力和交变轧制载荷作用,因此在轧辊表面极易产生振动裂纹和疲劳裂纹,这些裂纹的主要特征为:深度浅(几十微米)、长度短(≤ 10 mm)、易扩展、方向多样,如图2所示。此外,轧辊表面还存在诸如疲劳剥落、软点等其他类型缺陷。

轧辊表面缺陷检测的难点在于动态扫查下实现几十微米乃至十几微米深度裂纹的在役原位检测,并且检测要求剩磁低、适应轧辊规格类型多、误报率低,同时轧辊大曲率表面也是检测过程中的一大挑战。



图1 轧辊实物

Fig. 1 Image of roller

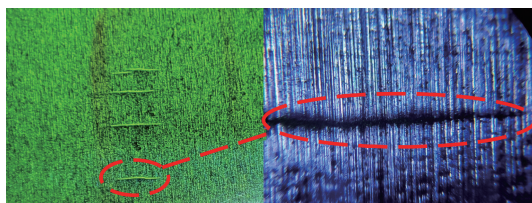
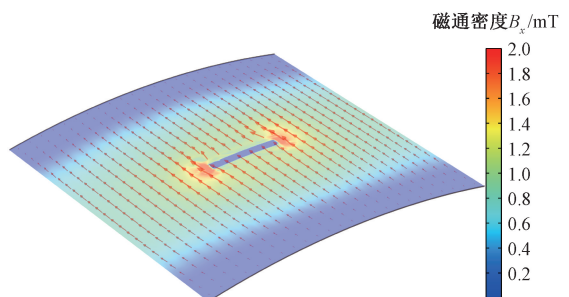


图2 轧辊表面缺陷荧光磁粉检测图及放大图

Fig. 2 Fluorescent magnetic particle detection result and enlarged view of surface defects on roll

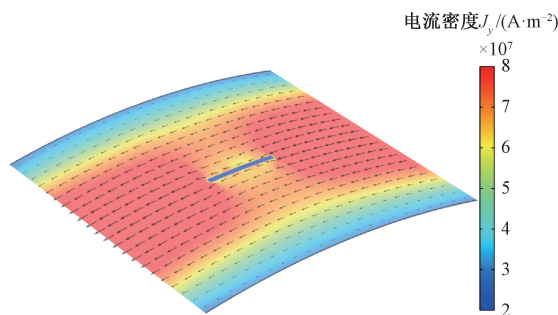
1.2 轧辊表面微细裂纹交流漏磁检测方法

交流漏磁检测方法是一种利用低频交流电在工件表面产生交变磁场,通过磁敏元件检测交流漏磁场的无损检测方法,由于趋肤效应的影响,一方面限制了其仅能检测表层与近表层缺陷,另一方面又使其容易将工件趋肤层磁化至饱和,有利于微细裂纹和多向裂纹的检出。此外,交流磁化器的设计更加多样化、小型化,而交流排线磁化器能在大曲率轧辊表面形成稳定的交流磁化场和电流场,如图3所示,其剩磁小,并且磁化器结构简单、具有柔性,可适用多种规格轧辊。



(a) 交流漏磁曲面磁场分布

(a) Magnetic field distribution of AC MFL on curved surface



(b) 交流漏磁曲面电流分布

(b) Current distribution of AC MFL on curved surface

图3 交流漏磁曲面磁场和电流分布

Fig. 3 Magnetic field and current distribution of AC MFL on curved surface

至此,为了满足“高速、高精、无盲区、适用范围广”的检测需求,本文提出了一种双层排线磁化的轧辊表面微细裂纹交流漏磁检测方法。

1.3 双层排线近零背景磁场磁化方法

该磁化方法采用双层排线相互叠加的方式对轧辊表面施加交流磁化,其三维结构如图4所示,内外排线的结构参数保持一致。

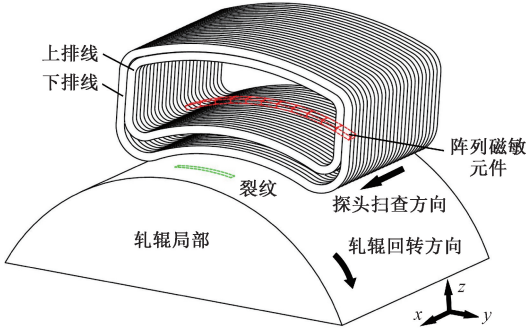


图4 双层排线三维结构示意图

Fig. 4 Diagram of 3D structure of double-layer PCs

在漏磁检测领域,常使用霍尔传感器、线圈、异向磁阻、巨磁电阻等作为磁传感器,对于检测轧辊表面的微细裂纹而言,上述几种传感器无法拾取有效漏磁信号。TMR 相较于以上传感器具有更优良的温度稳定性,同时在其线性范围内具有更高灵敏度。因此,双层排线探头采用 TMR 作为检测元件更适用于微细裂纹的检测。

TMR 磁电阻随外加磁场的变化曲线如图5所示,其中 TMR 灵敏度与响应曲线斜率成正比。从图中可看出, R - H 曲线具有低阻态 R_L 和高阻态 R_H 两种状态,其高灵敏度区域是在零场附近,即在高低阻态之间,当背景磁场大小接近 $\pm H_0$ 时, TMR 灵敏度会快速下降,甚至直接饱和。因此,为 TMR 工作提供一个近零背景磁场是保证其灵敏度的重要条件。

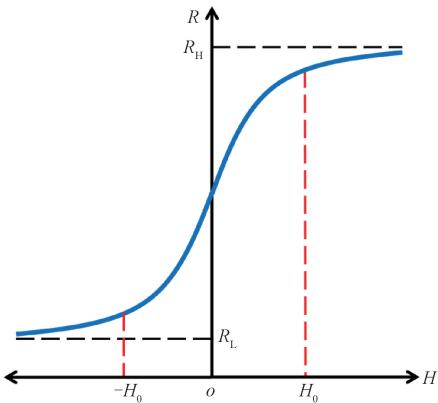


图5 TMR 电阻随磁场的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of TMR resistance with magnetic field

为了保证 TMR 位于近零背景磁场之中, TMR 阵列被布置在双层排线之间的中部区域内,其磁敏感方向与 x 轴方向平行,对 B_x 具有最大灵敏度。

双层排线在轧辊表面上某一时刻产生的磁场轴向截面如图6所示,将双层排线视作一个统一整体时,其如同单层排线对轧辊施加交流磁化,排线产生磁场被约束在趋肤层内;而将双层排线视作两个独立的个体时,其在下层排线激励强度上叠加了上层排线的激励强度。同时由于上下排线通以同相位、同频率的正弦交流电,通过调控上排线激励电流的幅值,如式(1)所示,使得两者在测量点上的背景磁场相互抵消,从而为 TMR 提供一个近零背景磁场环境。

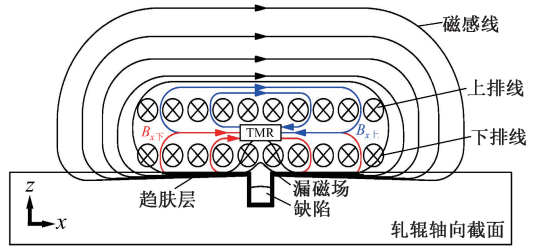


图6 双层排线轴向截面磁场分布示意图

Fig. 6 Diagram of magnetic field distribution in axial section of double-layer PCs

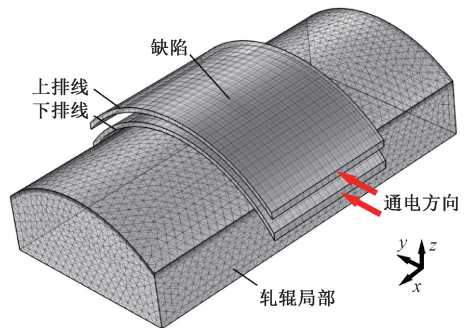
$$B_{x \text{ 背景磁场}} = B_{x \text{ 下}} - B_{x \text{ 上}} \approx 0 \quad (1)$$

在排线设计方面,该探头采用柔性印制电路板 (flexible printed circuit board, FPCB) 作为排线的承载基础,其结构参数一致性较高、柔性好并且厚度小,尽可能避免了提离变化对信号的影响。

2 仿真分析

2.1 双层排线仿真模型

为了验证双层排线探头的各项性能以及对轧辊表面多向微细裂纹的检测能力,本文在 COMSOL 中建立了排线柔性仿形探头和平面探头两组仿真模型,如图7所示。



(a) 双层排线柔性仿形探头仿真模型

(a) Simulation model of double-layer flexible profiling probe

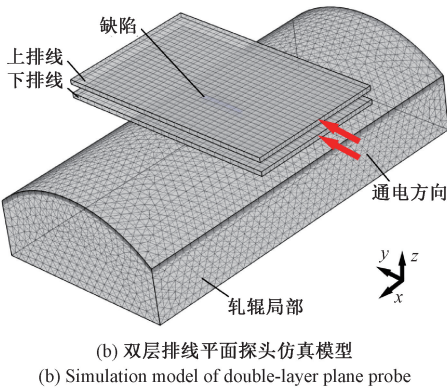


图 7 双层排线仿真模型
Fig. 7 Simulation model of double-layer PCs

双层排线仿真模型尺寸标注如图 8 所示,在轧辊表面设置边界层,同时对缺陷区域的网格进行了细化以提高计算准确性,仿真模型基本参数如表 1 所示。仿真采用 $10\text{ mm}\times1\text{ mm}\times1\text{ mm}$ 的标准漏磁缺陷,缺陷设置在轧辊表面的中心区域。建立直角坐标系如图 7(a) 所示, x 轴为轧辊轴线方向, y 轴为轧辊表面切线方向, z 轴为轧辊表面法线方向。此外,后续仿真均以 L 作为磁场扫描路径。

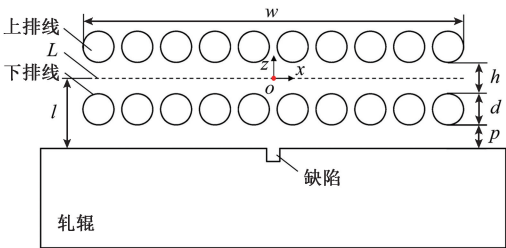


图 8 仿真模型尺寸
Fig. 8 Size of simulation model

表 1 仿真模型参数

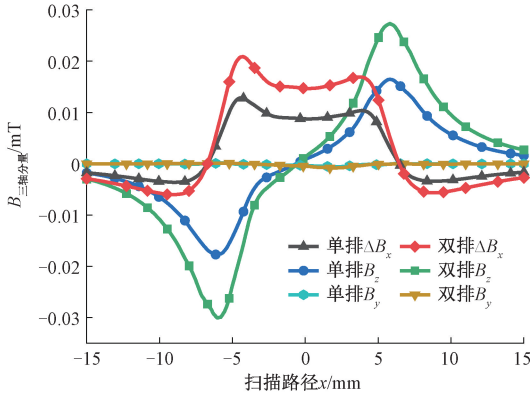
Table 1 Simulation model parameters

参数	数值	参数	数值
排线宽度 w/mm	30	排线线径 d/mm	1
测点路径提离 l/mm	2.5	激励频率 f/kHz	100
激励电流 I/A	2	轧辊直径 φ/mm	100
排线提离 p/mm	0.5	轧辊电导率 $\kappa/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	1×10^7
双层排线间距 h/mm	2	单层排线匝 N	30
轧辊相对介电常数 ε	1	轧辊相对磁导率 μ_r	700

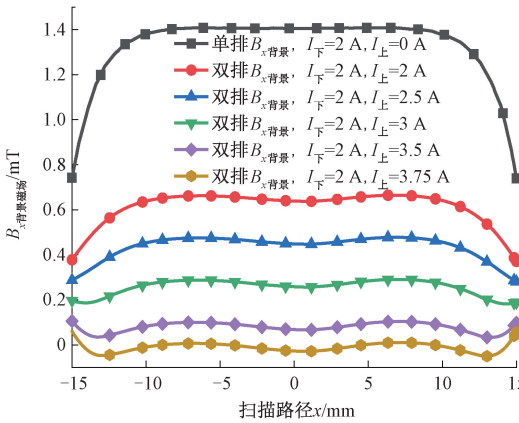
2.2 表征缺陷的磁场分量选择及背景磁场分析

漏磁检测中,缺陷附近的三轴磁场分量均可以提供一定程度的缺陷信息。本文在图 7(a) 的基础上设置了两个仿真组:1) 上下两组排线同时通入同频率、同幅值的电流;2) 只在下排线通入与第 1 组同频率、同幅值的电流。

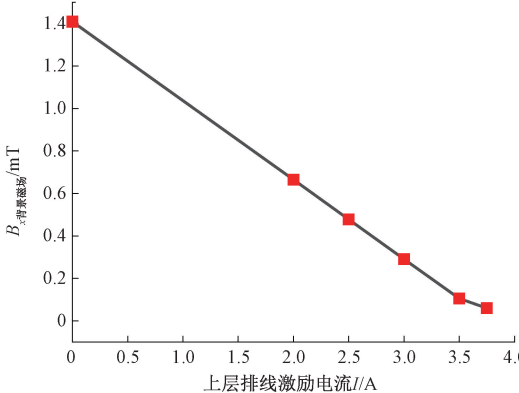
为了实现表面多向裂纹的检测,需要在整个缺陷范围内均有明显的信号扰动,而不是仅受到缺陷端部的干扰。将检测纵向裂纹的磁场三轴分量变化绘制如图 9(a) 所示, B_y 在缺陷扰动范围内没有明显变化, B_z 仅在缺陷端部出现了明显的扰动信号,两者的缺陷信号均只来源于缺陷端



(a) 单双层排线三轴分量对比
(a) Comparison of 3-axis components of single and double layer PCs



(b) B_x 背景磁场随上层排线激励电流分布情况
(b) The distribution of B_x background magnetic field with the excitation current of the upper layer PCs



(c) B_x 背景磁场随上层排线激励电流变化曲线
(c) B_x background magnetic field variation curve with the excitation current of the upper layer PCs

图 9 单双排线三轴磁场分量及 x 轴背景磁场对比
Fig. 9 Comparison of 3-axis magnetic field components and x -axis background magnetic field of single and double layer PCs

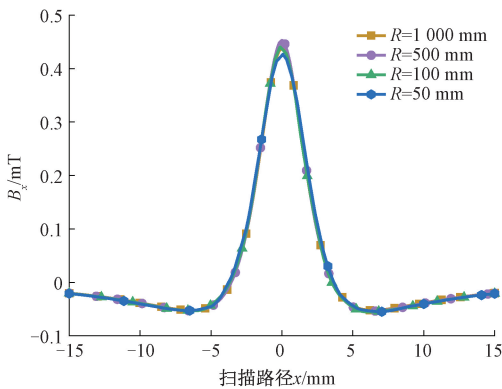
部的磁场扰动,而 B_x 分量在整个缺陷范围内均有明显的缺陷信号。

此外,保持下层排线激励电流不变,将上层排线电流从 0 A 变化至 3.75 A, x 轴背景磁场分布情况及变化曲线如图 9(b)、(c) 所示。无缺陷时单层排线的 x 轴背景磁场峰值达到 1.4 mT;而通过动态调控双层排线中上层排线激励电流的大小,随着其电流的逐渐增大, x 轴背景磁场越来越小。最终当上层排线电流达到 3.75 A 时, x 轴背景磁场接近于 0,从而实现了为 TMR 提供近零背景磁场、提高探头灵敏度的目的。

2.3 双层排线多曲率表面仿真

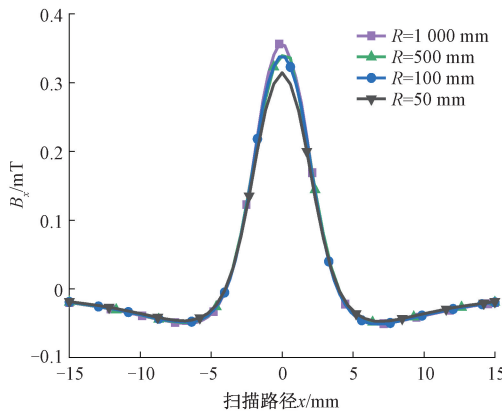
由于 FPCB 制作的探头具有较好柔性,可用于制作能贴合工件曲面的仿形探头,基于图 7(a)、(b) 的仿真模型验证双层排线在不同曲率下的检测能力,不同曲率下轧辊表面缺陷信号对比如图 10 所示。

由图 10 可知,随着轧辊半径逐渐增大,无论是柔性仿形探头还是平面探头,其缺陷信号峰值均未发生突变,即在一定范围内,曲率大小并不会直接影响缺陷峰值特征。同时可得,柔性仿形探头信号峰值比平面探头信号



(a) 双层排线柔性探头仿真信号

(a) Simulation signal of double-layer flexible profiling probe



(b) 双层排线平面探头仿真信号

(b) Simulation signal of double-layer plane probe

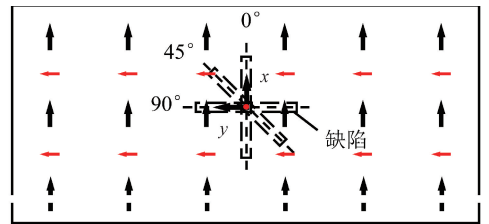
图 10 双层排线柔性探头和平面探头对比

Fig. 10 Comparison between double-layer PCs flexible profiling probe and plane probe

峰值增强了 20% 以上,约为 0.1 mT。并且,由于平面探头只有被布置在最靠近轧辊表面的排线中心位置时才会获取最大交流漏磁信号,而其他地方则会由于提离变化而导致信号快速衰减,针对轧辊这种表面积大且需要扫查的工件而言,平面探头无法布置 TMR 阵列,不仅会降低扫查效率,同时还会由于提离变化导致信号不稳定,因此,仿形探头优势更为明显。

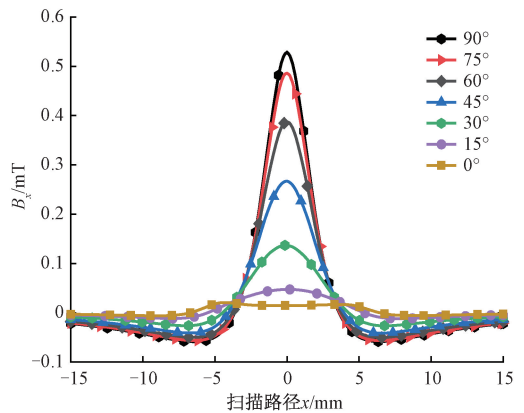
2.4 双层排线多向裂纹仿真

基于图 7(a) 的仿真模型研究双层排线探头对于多向裂纹的检测效果,双层排线不同角度下 B_x 的变化趋势如图 11 所示,角度定义如图 11(a) 所示。



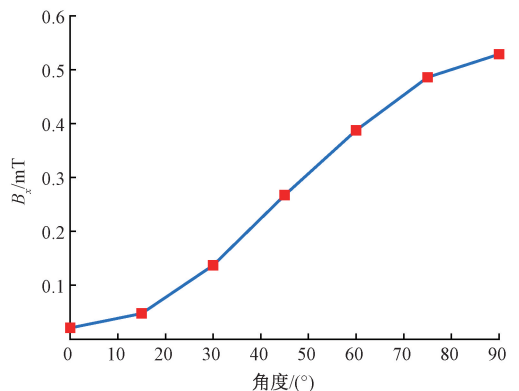
(a) 缺陷角度示意图

(a) Diagram of defect angles



(b) 不同角度 B_x 分布情况

(b) Distribution of B_x at different angles



(c) B_x 随缺陷角度的变化曲线

(c) B_x variation curve with defect angles

图 11 双层排线不同角度的裂纹信号对比

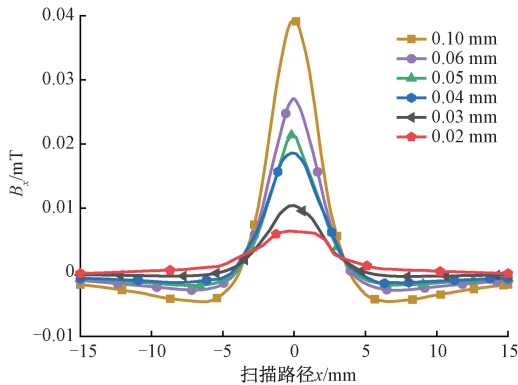
Fig. 11 Comparison of crack signals at different angles for double-layer PCs

对于排线激励的交流漏磁检测方法,随着缺陷与磁感线方向之间的夹角减小, B_x 幅值减小,如图 11(b)、(c) 所示。在角度为 0° 时,缺陷信号幅值最小,此时信号特征与其他角度的裂纹信号特征不同,此种情况下缺陷信号特征由原有的单峰值转变为双峰值,这是由于裂纹两端存在局部漏磁场从而对缺陷信号进行了重构,这种横向裂纹与纵向裂纹的信号差异也可作为区分两者的重要条件。

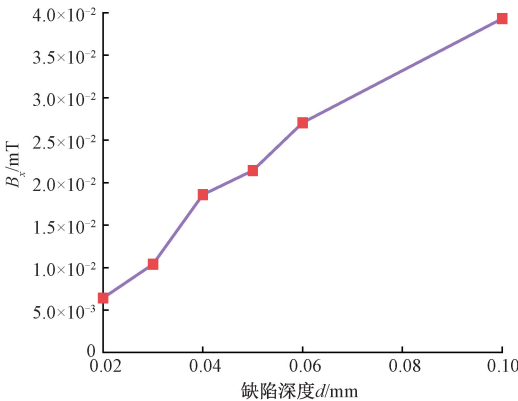
2.5 双层排线微细裂纹仿真

基于图 7(a) 的仿真模型探究不同裂纹深度对交流漏磁场的影响,不同裂纹深度下 x 轴磁场分量的分布情况如图 12 所示,其中裂纹长宽尺寸为 $10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。

从图 12 可以看出,随着裂纹深度的减小,信号幅值也在急剧减小,符合常规漏磁理论。其中裂纹深度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时, x 轴磁场分量的变化量只有 $6.5\times 10^{-3}\text{ mT}$,仅为 1 mm 裂纹深度信号幅值的 $1/60$ 。



(a) Distribution of B_x with different defect sizes



(b) B_x variation curve with defect sizes

图 12 微细裂纹仿真信号

Fig. 12 Micro-cracks simulation signal

30 匝,两层排线间距 1.0 mm ,在排线中间布置了 12 个 TMR(江苏多维科技有限公司制造)磁敏元件构成的阵列。

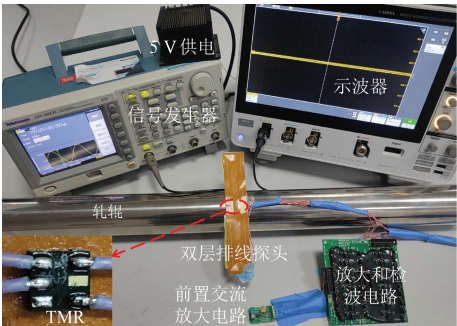


图 13 实验平台

Fig. 13 Experiment platform

首先,为了验证大曲率表面对双层排线探头的影响,本文利用该探头检测半径为 30.0 、 50.0 和 100.0 mm 的轧辊表面刻伤缺陷,尺寸为 $10.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$,采用两级直流放大和两级交流放大,检测结果如图 14 所示。

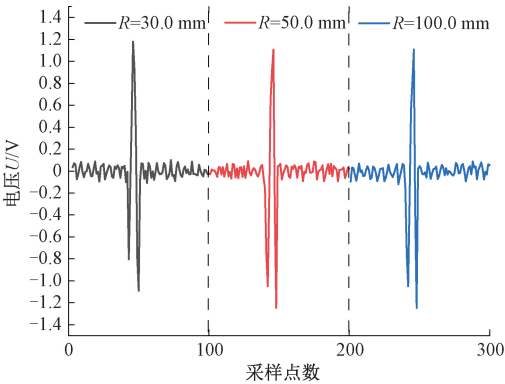


图 14 不同曲率轧辊表面裂纹检测实验

Fig. 14 Crack detection experiments on the surface of rolls with different curvatures

图 10(a) 与图 14 的信号特征有所不同,具体表现为双峰侧产生了突变,这是因为多级放大和检波电路使得信号发生畸变,但基本特征保持一致,即一侧单峰一侧双峰。

从表 2 可以得出,不同轧辊半径下,信噪比没有明显变化。实验结果表明,该探头可以检测出半径为 30.0 mm 的轧辊表面裂纹,从而证明柔性排线探头适应大曲率轧辊表面的裂纹检测。

表 2 多曲率实验信噪比

Table 2 Signal-to-noise ratio of multi curvature experiments

轧辊半径 R/mm	30.0	50.0	100.0
信噪比/ dB	21.83	22.54	22.23

3 实 验

为了验证双层排线对多曲率轧辊表面微细裂纹、多向裂纹的检测能力,本文搭建了实验平台如图 13 所示。采用由 FPCB 制作的电路板作为排线,单层排线匝数为

其次是针对半径为 50.0 mm, 轧辊表面 20.0 mm×1.0 mm×1.0 mm 的缺陷, 通过改变对缺陷的扫查方向以获取不同角度的缺陷信号。由于电路处理改变了信号的特征, 因此需要将不同角度下的实验数据进行变换, 以获取原始信号特征, 将处理后的数据绘制如图 15 所示。

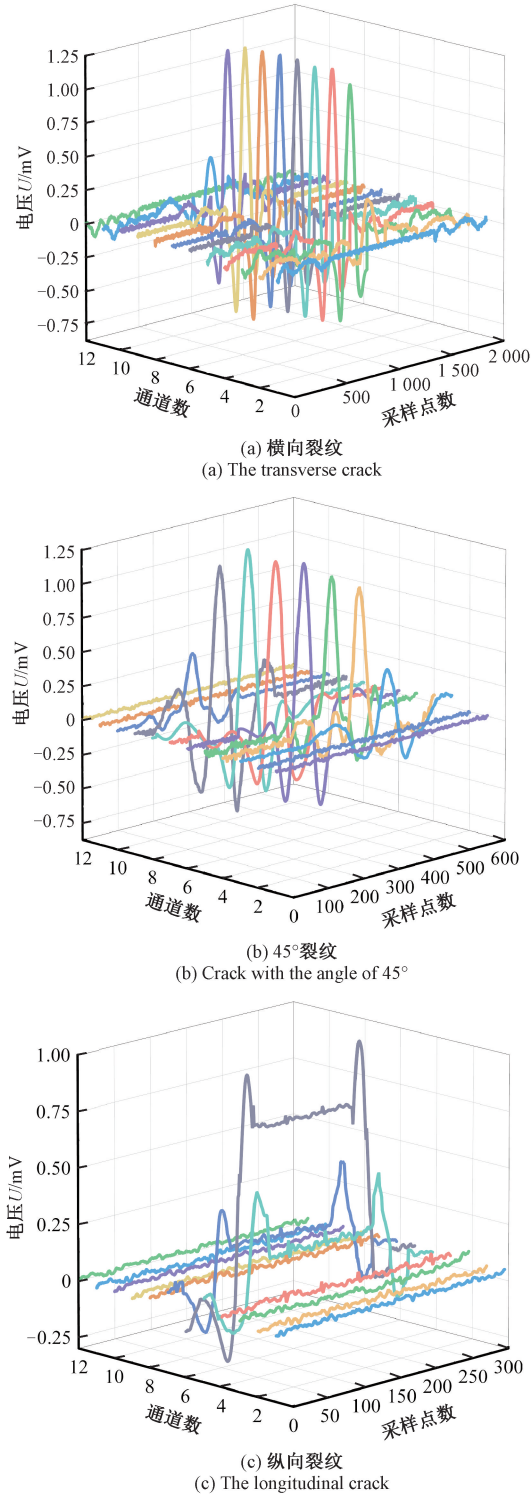


图 15 不同类型缺陷实验结果

Fig. 15 Experimental results of different types of defects

从图 15 可以看出, 横向裂纹、45°斜向裂纹和纵向裂纹三者的信号幅值略有差异, 并且由于扫查角度的差异, 单通道信号特征以及不同通道之间的信号偏移均有所不同。至此, 实验表明: 在单一扫查方向下, 双层排线探头能够有效检出并区分多向裂纹。

最后, 为了进一步探究双层排线探头的极限检测能力, 本文利用双层排线探头对轧辊表面微细裂纹进行检测。实验采用磁粉试片作为标准缺陷, 磁粉试片深度分别为 60、30 和 15 μm。同时, 由于缺陷尺寸大幅度减小, 为了拾取到有效的缺陷信号, 在原有基础上对 TMR 的检测信号先进行一次前置交流放大处理, 检测结果如图 16 所示。

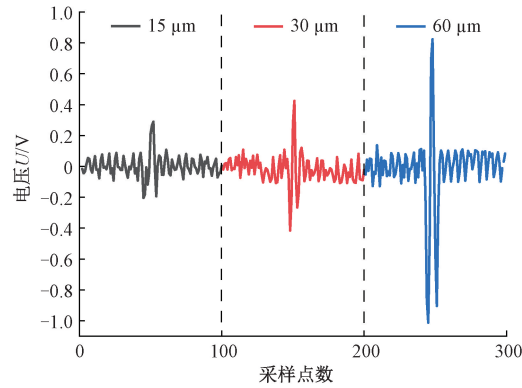


图 16 磁粉试片微细裂纹检测实验

Fig. 16 Micro-crack detection experiments on magnetic particle test shims

从检测结果来看, 双层排线与 TMR 的结合能够有效检测出磁粉试片上 15 μm 深的微细裂纹, 从表 3 可以得出, 随着裂纹深度的增加, 信噪比逐步提升。实验结果表明, 双层排线能够检测出磁粉试片上 15 μm 深的微细裂纹, 信噪比为 9.99 dB。

表 3 磁粉试片实验信噪比

Table 3 Signal-to-noise ratio of magnetic particle test shims experiments

裂纹深度/μm	15	30	60
信噪比/dB	9.99	11.88	17.38

4 结 论

本文提出了一种双层排线磁化的轧辊表面微裂纹交流漏磁检测方法, 通过有限元仿真系统地分析了曲率变化对双层排线探头的影响以及双层排线探头对多向裂纹、微细裂纹的检测能力。实验结果表明, 通过调控双层排线的激励电流可消除切向背景磁场、提高激励强度; 双

层排线能够有效磁化大曲率表面,适应多规格轧辊检测工作。同时利用 TMR 阵列探头可检出与区分多向裂纹,极限检测能力是能够检测出磁粉试片上 15 μm 深的微细裂纹。下一步的工作应集中在如何提高微细裂纹的信噪比。

参考文献

- [1] 肖艳军, 齐浩, 周围, 等. 锂电池极片轧机轧辊表面缺陷检测与识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 148-156.
- XIAO Y J, QI H, ZHOU W, et al. Detection and recognition of roll surface defects in lithium battery pole rolling mill[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 148-156.
- [2] WANG Z D, GU Y, WANG Y S. A review of three magnetic NDT technologies[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(4): 382-388.
- [3] LIU S, SUN Y, GU M, et al. Review and analysis of three representative electromagnetic NDT methods[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(4): 176-183.
- [4] DEEPAK J R, BUPESH RAJA V K, SRIKANTH D, et al. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 3732-3737.
- [5] WU J, WU W, LI E, et al. Magnetic flux leakage course of inner defects and its detectable depth[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-11.
- [6] XU Z, WU J, LIU Z, et al. Detection, distinction, and quantification of pipeline surface and subsurface defects by DC magnetization scanning induction thermography[J]. NDT & E International, 2023, 135: 102786.
- [7] WU J, ZHU J, XIA H, et al. DC-biased magnetization based eddy current thermography for subsurface defect detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6252-6259.
- [8] 王荣彪, 康宜华, 邓永乐, 等. 钻杆内壁腐蚀的交直流复合磁化漏磁检测方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(2): 127-131, 140.
- WANG R B, KANG Y H, DENG Y L, et al. Detection method for internal wall corrosion of drill pipes based on MFL testing under AC and DC magnetization[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(2): 127-131, 140.
- [9] DURAI M, LAN C W, CHANG H. In-line detection of defects in steel pipes using flexible GMR sensor array[J]. Journal of King Saud University-Science, 2022, 34(2): 101761.
- [10] WANG S, FENG B, QIU G, et al. AC-MFL testing of orthogonal cracks detection of square billet based on the flexible-printed parallel cable magnetizer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 347: 113897.
- [11] JIA Y, LIANG K, WANG P, et al. Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(6): 711-717.
- [12] 于霞, 张卫民, 邱忠超, 等. 飞机发动机叶片缺陷的差激励涡流传感器检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1582-1588.
- YU X, ZHANG W M, QIU ZH CH, et al. Differential excitation eddy current sensor testing for aircraft engine blades defect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1582-1588.
- [13] CHEN Y, KANG Y, FENG B, et al. Automatic defect identification in magnetic particle testing using a digital model aided De-noising method[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2022, 198: 111427.
- [14] JIA Y, LU Y, XIONG L, et al. A filtering method for suppressing the lift-off interference in magnetic flux leakage detection of rail head surface defect[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1740.
- [15] HOSSEINGHOLIZADEH S, FILLETTER T, SINCLAIR A N. Evaluation of a magnetic dipole model in a DC magnetic flux leakage system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(4): 1-7.
- [16] OKOLO C K, MEYDAN T. Pulsed magnetic flux leakage method for hairline crack detection and characterization[J]. AIP Advances, 2018, 8(4): 047207.
- [17] WANG G, XIAO Q, GUO M, et al. Optimal frequency of AC magnetic flux leakage testing for detecting defect Size and orientation in thick steel plates[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(9): 1-8.

- [18] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 327-336.
- WU D H, YOU D H, LIU ZH L, et al. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 327-336.
- [19] 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 study of AC-MFL method using U-shape inducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [20] SOPHIAN A, TIAN G Y, ZAIRI S. Pulsed magnetic flux leakage techniques for crack detection and characterisation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 125(2): 186-191.
- [21] 宋凯, 康宜华, 孙燕华, 等. 基于 U 型探头的 ACFM 和 AC-MFL 法的机理辨析[J]. 测试技术学报, 2010, 24(1): 67-72.
- SONG K, KANG Y H, SUN Y H, et al. Signal mechanism of ACFM and AC-MFL method based on U-shape inducer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(1): 67-72.
- [22] WANG S, FENG B, TANG J, et al. A novel AC-MFL probe based on the parallel cables magnetizing technique[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(2): 1-8.

作者简介



姜春, 2021 年于四川大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术和电磁无损检测。

E-mail: chunj@hust.edu.cn

Jiang Chun received his B.Sc. degree from Sichuan University in 2021. He is currently a M.Sc. candidate at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensor technology and electromagnetic non-destructive testing.



汪圣涵, 2016 年于合肥工业大学获得学士学位, 2018 年于 Northeastern University (Boston) 获得硕士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 主要研究方向为传感器技术和信号处理技术。

E-mail: shenghan@hust.edu.cn

Wang Shenghan received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2016, and M.Sc. degree from Northeastern University (Boston) in 2018. He is currently a Ph.D. candidate at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensor technology and signal processing technique.



唐健, 2016 年于四川大学获得学士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: tangj@hust.edu.cn

Tang Jian received his B.Sc. degree from Sichuan University in 2016. He is currently a Ph.D. candidate at Huazhong University of Science and Technology. His main research interest is electromagnetic non-destructive testing.



康宜华(通信作者), 现为华中科技大学教授、博士研究生导师, 主要研究方向为无损检测新技术和数字化无损检测装备。

E-mail: yihuakang@hust.edu.cn

Kang Yihua (Corresponding author) is currently a professor and a Ph.D. advisor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include non-destructive testing and digital non-destructive testing equipment.