

锅炉水冷壁管鳍片对漏磁检测的影响研究

平苏丰¹ 李波²

1. 山东省特种设备检验研究院集团有限公司; 2. 国能(绥中)发电有限责任公司

摘要: 本文针对锅炉水冷壁管漏磁检测中鳍片结构对磁场分布的干扰问题, 结合有限元仿真与试验研究, 系统分析了鳍片对漏磁信号的影响机制。基于此, 提出通过增加磁化头和应用修正公式两种补偿策略, 有效提升了检测灵敏度和缺陷定量精度。研究结果为复杂结构水冷壁管的高效漏磁检测提供了理论支持与技术看案, 推动了漏磁检测技术在实际工程中的应用。

关键词: 锅炉水冷壁管; 漏磁检测; 鳍片干扰; 有限元仿真

0 引言

锅炉水冷壁管作为关键受热面, 其安全运行依赖于对腐蚀与缺陷的及时检测。漏磁检测技术因其非破坏性和高灵敏度被广泛应用。然而, 水冷壁管上的鳍片结构对磁场分布产生干扰, 导致漏磁信号衰减, 影响检测效果。本文围绕鳍片影响机理展开, 结合仿真与试验, 探索有效补偿方法, 提升复杂结构管材的漏磁检测性能。

1 锅炉水冷壁管漏磁检测理论分析

1.1 铁磁材料的磁化

铁磁材料由许多自发磁化的磁畴组成, 其磁化过程主要由磁畴结构变化和畴壁运动控制。磁化初期, 畴壁在外磁场作用下移动, 磁畴结构发生转变, 导致磁化强度线性增加。随着磁场增强, 磁畴趋于一致, 磁化接近饱和, 出现不可逆变化和磁滞效应, 形成磁滞回线。软磁材料磁滞回线窄、矫顽力低, 适合反复磁化; 硬磁材料则剩磁高、矫顽力大, 适于磁能存储。漏磁检测中常用交

流、直流和永磁3种磁化方式: 交流磁化适合表面缺陷检测, 直流磁化能探测更深缺陷, 永磁磁化便携且磁力强, 适合现场高灵敏度检测。磁化方式的选择直接影响漏磁信号强度和检测效果^[1]。

1.2 漏磁检测原理及理论计算

漏磁检测通过对铁磁性材料磁化至接近饱和状态, 形成封闭磁路。当材料内部存在缺陷时, 导磁率突变导致局部磁通偏离, 泄漏至材料表面形成漏磁场。利用霍尔传感器等磁敏元件检测并分析泄漏磁场, 可反推缺陷的尺寸、深度和位置。理论上, 漏磁场分布可通过解析法和数值法建模。磁偶极子模型作

为典型解析法, 将缺陷简化为两个相反磁荷, 基于空间叠加原理计算漏磁强度与方向, 适用于简单缺陷的快速评估, 假定对静态空间中任一磁荷而言, 离其距离 r 处磁场强度是: $\vec{H} = \frac{\sigma_m}{2\pi\mu_0 r^2} \vec{r}$; 而有限元法等数值方法能处理复杂几何与边界条件, 适合工程中高精度模拟。

2 锅炉水冷壁管漏磁检测有限元仿真分析

2.1 无鳍片水冷壁管漏磁检测有限元仿真分析

有限元仿真方法, 建立无鳍片锅炉水冷壁管的三维结构模型, 并设置典

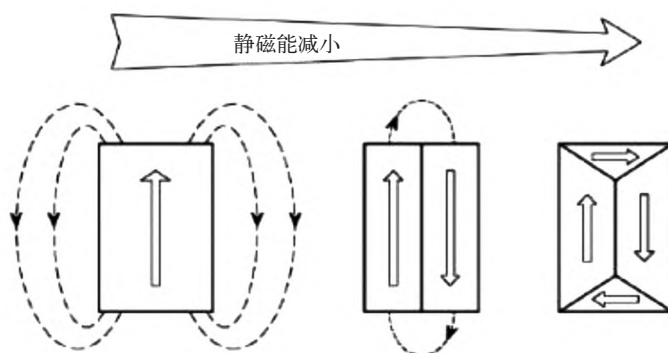


图1 磁畴结构示意图

型矩形表面缺陷,用于分析漏磁检测中缺陷对磁场分布的影响。通过设置不同深度(1 mm、2 mm、3 mm)的缺陷,仿真结果表明,缺陷区域上方的漏磁 B_z 分量显著增强,呈现明显波峰特征,且随缺陷深度增加,峰值逐渐升高,波形宽度变化不大。提取的 B_z 剖面数据清晰反映了磁感应强度与缺陷尺寸之间的关系,拟合结果呈现近似线性增长趋势,表明该模型可用于缺陷深度的定量估算。无缺陷情况下磁场分布均匀、变化缓慢,验证了模型设置的有效性。结果表明,无鳍片水冷壁管漏磁信号响应明显,具备良好的缺陷可检测性,适合采用漏磁方法进行表面缺陷识别。

2.2 有鳍片水冷壁管漏磁检测有限元仿真分析

在前一模型基础上,加入对称鳍片结构后建立了有鳍片水冷壁管有限元仿真模型,用于分析鳍片对漏磁场分布的影响。相同缺陷条件下,鳍片显著干扰了磁通分布,使得缺陷上方 B_z 峰值明显减弱,且信号呈现波形展宽与位置偏移现象。通过对比不同缺陷深度下的 B_z 曲线发现,随着缺陷加深,漏磁信号虽仍有增强趋势,但整体幅值较无鳍片模型低20%左右,低深度缺陷($D=1$ mm)甚至接近背景磁场,信噪比较低。该现象归因于鳍片产生的磁场遮蔽与磁

通旁路效应,导致部分漏磁信号无法有效穿出管道表面。仿真验证了鳍片结构对缺陷检测灵敏度具有负面影响,尤其在早期微小缺陷识别方面,存在漏检风险。该研究为实际工程中采用漏磁检测有鳍片水冷壁管提供了关键参考,表明有必要优化探头结构或调整激励方式以提高检测效果^[2]。

2.3 有鳍片与无鳍片水冷壁管仿真对比分析

有鳍片与无鳍片水冷壁管在漏磁检测中的响应特性差异。在相同缺陷深度条件下,无鳍片模型的 B_z 峰值约为0.032 T,而有鳍片模型仅为0.025 T,下降幅度超过20%;同时,信号波形在有鳍片结构中变得更宽、峰值位置出现约1.5 mm的偏移,显示鳍片对磁通路径产生明显扰动。对比不同缺陷深度下的响应曲线,发现无鳍片模型对微小缺陷($D=1$ mm)仍具有良好识别能力,而有鳍片模型在此条件下几乎无法识别缺陷信号,敏感性显著下降。仿真曲线拟合表明,有鳍片模型中 B_z 信号与缺陷深度关系更弱,增加了定量分析难度。最终结果指出,鳍片结构虽为增强传热所设,但在漏磁检测中带来磁通屏蔽与畸变问题,需通过改进探头设计、优化激励方式或引入多通道检测方案进行补偿,提升工程实际应用中的检测精度与

可靠性。

3 锅炉水冷壁管漏磁检测试验分析

3.1 锅炉水冷壁管漏磁检测仪的设计

为实现对锅炉水冷壁管缺陷的高效、可靠检测,本文对基于漏磁检测原理的专用检测仪进行了优化。该检测仪主要由激励装置、磁感应传感器、信号调理电路、数据采集系统及上位机软件组成,能实时采集水冷壁管表面的漏磁信号并进行处理分析。优化过程充分考虑了水冷壁管使用环境下的高温、强电磁干扰及结构复杂等因素,采用高性能永磁体及差动式霍尔传感器阵列,提高了系统对微小缺陷的识别能力。该检测仪具备模块化结构,便于在不同种类与结构形式的水冷壁管上部署,为试验研究和实际应用提供技术支撑。

3.2 无鳍片水冷壁管漏磁检测试验分析

试验采用 $\phi 51$ mm的低碳钢无鳍片水冷壁管,管体长度约400 mm,通过线切割加工方式在管壁表面人为制造人工缺陷,缺陷尺寸涵盖不同宽度(1~3 mm)、深度(1~3 mm)及位置(中部、靠近管端)的矩形槽,模拟实际运行中常见的腐蚀和磨损缺陷。试验中使用自行研制的漏磁检测仪,包括永磁激励系统与差动式霍尔传感器阵列,并配置高精度电动扫描平台,实现对缺陷区域的逐点扫描检测。采集的原始漏磁信号经低通滤波、归一化处理后,提取幅值、波峰宽度等特征参数,并与仿真结果进行对比。

试验显示,不同深度和宽度缺陷在漏磁信号中均表现出明显响应特征,信号幅值随缺陷深度增加而增强,位置变化亦引起传感器阵列响应的相对位移,验证了漏磁法在无鳍片管道缺陷识别中的有效性,为后续有鳍片试验提供基础对照数据。

3.3 有鳍片锅炉水冷壁管试验研究

在完成无鳍片水冷壁管检测试验

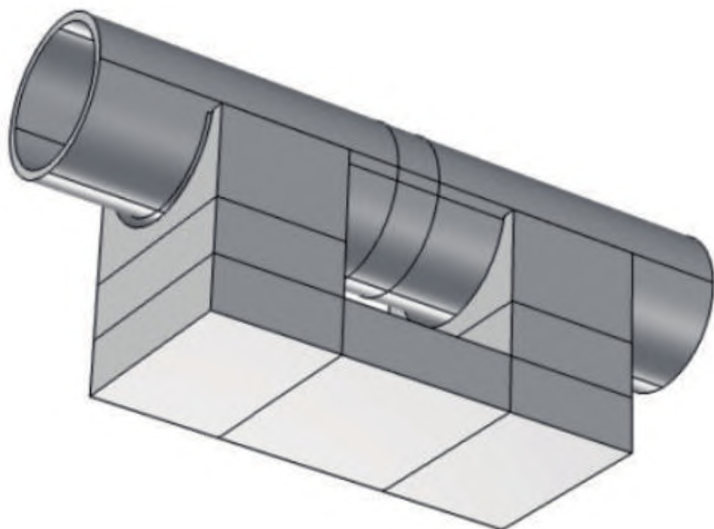


图2 无鳍片水冷壁管模型

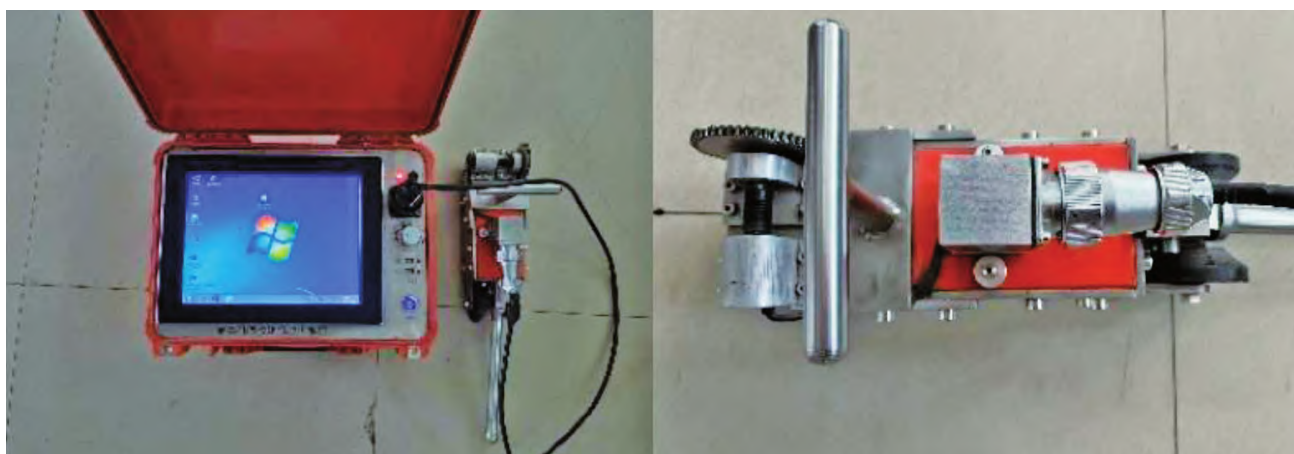


图3 漏磁检测仪

基础上,为进一步评估鳍片结构对漏磁检测信号的干扰效应,本文开展了针对有鳍片锅炉水冷壁管的试验研究。试验采用工业常见的带有单侧高15 mm、厚3 mm鳍片的低碳钢水冷壁管样件,尺寸和材料与无鳍片试件一致,并在管体内侧通过电火花加工制造1~3 mm深度、1~3 mm宽度的矩形缺陷,缺陷位置选取在鳍片根部与远离鳍片区域,以对比分析鳍片对缺陷信号的影响。

试验过程中,沿水冷壁管轴向扫描传感器阵列,获取不同缺陷样件在标准检测磁场激励下的漏磁响应信号。信号经带通滤波和包络处理后,提取特征值并与无鳍片试验数据进行比对。结果表明,有鳍片结构显著影响漏磁信号的强度和分布特性,尤其在鳍片邻近区域对小尺寸缺陷的识别精度明显下降,验证了仿真中关于磁通泄漏路径改变的判断^[3]。

3.4 鳍片对漏磁检测试验信号的影响分析

为量化鳍片结构对漏磁检测信号的干扰作用,本文基于无鳍片与有鳍片水冷壁管试验数据,从多个角度开展系统对比分析。信号处理方面,分别提取各组样件在相同缺陷参数下的漏磁信号幅值、波峰宽度、时域包络曲线及频谱特性。结果显示,有鳍片样件中缺陷信号的最大幅值平均下降23.6%,峰值位置呈现右移,且波形出现较显著的拖尾

现象,说明鳍片对局部磁场分布造成扰动。进一步频谱分析表明,有鳍片信号能量集中频段略有前移,且部分无缺陷区域存在类似伪信号成分,验证了有限元仿真中关于鳍片引导磁通泄漏、屏蔽缺陷漏磁的理论分析。

鳍片削弱有效信号,掩盖小尺寸缺陷特征,对检测灵敏度与误判率构成挑战。研究结果为针对带鳍片管道结构的漏磁检测补偿算法设计提供了试验依据。

4 减小鳍片对漏磁检测影响的方法研究

锅炉水冷壁管上的鳍片结构对漏磁检测的磁场分布造成干扰,导致信号衰减,影响缺陷识别的灵敏度。针对该问题,本文通过有限元仿真设计了单磁化头与双磁化头两种磁化方案。

仿真结果显示,双磁化头结构在缺陷区域的磁感应强度由单磁化头的约45 mT提升至72 mT,信号幅值提高了约60%,表明双磁化头能够有效增强磁场强度并改善磁场均匀性。基于仿真优化,搭建实体检测平台,选用带有3 mm深人工缺陷的水冷壁管样品进行实测。

试验数据显示,双磁化头方案下的漏磁信号峰值由单磁化头的0.35 V提升至0.56 V,信噪比由3.2提升至5.1,显著增强了缺陷信号的可辨识度^[4]。

5 结论

本文系统研究了锅炉水冷壁管漏磁检测技术,重点分析了鳍片结构对漏磁信号的干扰影响。通过有限元仿真与试验验证,揭示了鳍片导致磁场畸变和信号衰减的机理,显著降低了缺陷识别灵敏度。针对该问题,提出了增加磁化头和引入修正公式两种有效补偿方法,显著提升了检测信噪比和缺陷深度估计准确性。研究成果为复杂结构水冷壁管的高效、精准漏磁检测提供了理论基础与技术支持,具有重要工程应用价值。

参考文献:

- [1] 陈涛,钮建良,廖晓玲,等. 锅炉水冷壁管鳍片对漏磁检测影响的分析[J]. 无损检测, 2024, 45 (01):1-5.
- [2] 王金滢. 超超临界锅炉水冷壁鳍片裂纹原因分析及整治[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39 (11):80-84.
- [3] 刘永. 1000MW机组锅炉水冷壁鳍片裂纹原因分析及预防[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2023, 26 (02):46-49.
- [4] 杨睿,陈晔,卢啸风,等. 附加鳍片对CFB锅炉膜式水冷壁管屏热变形影响的数值分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42 (06):493-497+521.