

绞合型碳纤维复合材料芯导线压接缺陷的漏磁场仿真

俸波^{1,2}, 张炜², 廖永力³, 夏小飞^{1,2}, 龚博³, 赵林杰³, 李锐海³

(1. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室(广西电网有限责任公司电力科学研究院), 南宁 530023; 2. 广西电网设备监测及诊断技术创新中心(广西电网有限责任公司电力科学研究院), 南宁 530023; 3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 碳纤维复合材料芯软铝导线具有容量大、弧垂小、导电率高、节能效果明显等优点, 是提高输电走廊容量的理想方案之一。然而, 碳纤维复合材料芯抗弯曲性能弱, 安装施工过程易受损断裂, 缺乏有效的检测技术手段。为了解决上述问题, 基于漏磁检测理论设计了一种碳纤维复合材料芯的漏磁检测方法。通过构建磁膜包覆碳纤维芯、压接金具和励磁装置的三维有限元仿真模型, 分析了永磁体尺寸、磁极间距和径向气隙距离等关键参数对漏磁信号的影响, 得到了优化设计参数为: 永磁体尺寸 L_1 为 15 mm, 磁极距离 L_2 为 50 mm, 气隙距离 M 为 2 mm。最后, 分析了碳纤维复合材料芯断裂尺度对漏磁信号的影响, 证实了碳纤维复合材料芯局部断裂缺陷漏磁检测的技术可行性。发现磁感应强度轴向分量先增大后减小, 当断裂尺度 $d=4$ mm 时达到最大值, 而磁感应强度径向分量则随断裂尺度的增加而增加。
关键词: 漏磁检测; 复合材料芯导体; 励磁参数; 有限元分析

Simulation on Leakage Magnetic Field of Crimping Defects in Twisted Carbon Fiber Composite Core Conductors

FENG Bo^{1,2}, ZHANG Wei², LIAO Yongli³, XIA Xiaofei^{1,2}, GONG Bo³, ZHAO Linjie³, LI Ruihai³

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi Power Grid Equipment Monitoring and Diagnosis Technology Innovation Center, Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Carbon fiber composite core soft aluminum conductors have the advantages of large capacity, small sag, high conductivity, and obvious energy-saving effects, making them one of the ideal solutions to improve the capacity of transmission corridors. However, the bending resistance of carbon fiber composite cores is weak, and they are prone to damage and fracture during installation and construction process, lacking effective detection techniques. In order to solve the above problems, a magnetic leakage detection method of is designed based on the theory of carbon fiber composite core magnetic leakage detection theory. Based on a three-dimensional finite element simulation model of magnetic film coated carbon fiber core, crimping fittings, and excitation device, the influences of key parameters such as permanent magnet size, magnetic pole spacing, and radial air gap distance on magnetic leakage signals are analyzed. The optimized design parameters are: permanent magnet size L_1 is 15 mm, the pole distance L_2 is 50 mm, and the gap distance M is 2 mm. Finally, the influence of the fracture scale of carbon fiber composite material cores on magnetic flux leakage signals is analyzed, confirming the technical feasibility of magnetic leakage detection for local fracture defects in carbon fiber composite cores. The axial component of magnetic induction intensity first increases and then decreases, reaching its maximum value when the fracture scale $d=4$ mm, while the radial component of magnetic induction intensity increases with the increase of fracture scale.

Key words: magnetic leakage detection; composite core conductor; excitation parameters; finite element analysis

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177147); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20220077)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177147); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GXKJXM20220077).

0 引言

在国家“双碳”战略目标达成和新型电力系统建设的背景下电力需求和电网规模也在不断增加, 在一些电力需求大、缺乏输电走廊、新能源送出线路的地区, 碳纤维复合材料芯导线^[1-5]由于具有输电容量大、导电性高、耐高温、强度大等优点, 使得输电线路容量倍增且弧垂非常小, 更适用于输电线路增容改造工程, 在大跨越、特高压、新能源线路上也有广阔的应用前景^[6-10]。

在架空输电线路架设过程中需要对碳纤维复合材料芯导线进行压接并使用耐张线夹。由于高空作业施工环境不稳定加上人为因素导致施工器具压接容易对复合材料芯导线造成损坏^[11-17]。因此, 为了避免因压接质量导致的碳纤维复合材料芯导线断线故障, 确保输电线路的安全运行, 迫切需要一种准确、快速的无损检测方法。

目前检测输电线路导线压接质量主要采用X射线检测方法。该方法对钢芯铝绞线导线比较有效, 但对碳纤维复合材料芯导线检测的实际工程应用效果有限, 尤其是针对压接段区域, 较厚的压接金具阻碍了X光的渗透, 另外碳纤维材料的密度远远低于压接金具材料, 在X光结果中无法有效体现^[18-22]。漏磁检测技术在国内外的发展已经非常成熟^[23-24]。该技术为碳纤维复合材料芯导线提供了一种可行的思路, 且该检测手段对环境要求低, 检测的灵敏度和可靠性较高。绞合型碳纤维复合材料芯绞线和钢芯铝绞线在结构上是相似的, 且施工工艺与钢芯铝绞线类似, 均采用压接工艺^[25-26]。漏磁检测技术最常用于钢芯^[27], 因此, 漏磁检测技术应用于绞合型碳纤维复合材料芯导线的压接质量检测具有可行性。目前, 许多学者在漏磁理论模型研究^[28-29]、励磁结构研究^[30-31]和漏磁信号分析方面取得了显著成果。然而, 由于碳纤维复合材料芯本身不具有磁性, 需要提出针对性的改进方法。

本文基于漏磁检测原理设计了一种磁膜包覆绞合型碳纤维复合材料芯的方法, 建立了磁膜包覆碳纤维复合材料芯导线金具压接安装的三维仿真模型。研究比较了不同尺寸永磁体在碳纤维复合材料芯正常和断裂缺陷条件下的漏磁信号。在优化的永磁体尺寸参数下比较了磁极间距、径向气隙距离和碳纤维复合材料芯缺陷断裂尺度对漏磁信号的影响。

本文的研究结果可以为碳纤维复合材料芯导线压接缺陷的漏磁检测提供一个更好的励磁器设计尺寸。采用该优化设计参数的励磁器对断裂碳纤维复合材料芯进行检测, 可以根据其漏磁信号规律判断其断裂程度。基于以上仿真技术结果证明了漏磁检测碳纤维复合材料芯断裂缺陷的技术可行性。

1 漏磁检测的有限元分析方法

1.1 漏磁检测原理

漏磁检测的原理是通过添加外部磁场源将物体局部磁化到饱和状态, 然后由磁敏元件获得漏磁场信号, 判断是否有损伤。由于碳纤维导线芯本身不具备磁性, 为了能够使用漏磁检测的方法判断其在压接过程中是否存在缺陷, 首要工作是对其进行磁性制备。基于此本文提出了一种磁性包覆方法, 将具有高渗透性的柔性薄膜材料包覆在碳纤维复合材料芯的表面上。该工艺兼容现有金具压接施工, 在剥离碳纤维芯导线外的铝线后将磁性薄膜完整地环绕碳芯缠绕一圈, 之后再与碳纤维导线一并套上铝衬管, 余下操作与现有金具压接施工流程一致。由于薄膜本身厚度很小(在0.1 mm及以内), 铝衬管与碳纤维芯之间可以容下薄膜的尺寸。薄膜具备一定的柔性且便于裁剪, 可以适配不同导线截面, 具有普遍性。压接后该磁性薄膜可以与碳纤维芯完全地贴合, 由于其具有良好的跟随性, 当碳纤维复合材料芯出现缺陷时相应位置磁膜的状态也会发生变化, 并被漏磁检测装置捕获, 进而间接地实现了碳纤维芯压接缺陷的漏磁检测。

该压接缺陷漏磁检测原理如图1所示。当磁性碳纤维复合材料芯没有缺陷时大部分磁力线都会穿过磁性薄膜。当磁性碳纤维复合材料芯断裂时由于空气的磁阻大于磁性碳纤维组合芯的磁阻, 因此磁力线在断裂处会发生扭曲, 磁敏元件会在这里拾取空气中的漏磁信号, 实现对碳纤维复合材料芯受损缺陷的检测和定位。

在实际工程应用中漏磁检测装置的便携性和可靠性是其在不同复杂环境中应用的关键因素。由于其具有矫顽力高、无需电源的优点, 永磁体被用作该漏磁检测模型的磁场源。所选的永磁体材料为NdFe35。

本文对绞合型碳纤维复合材料芯开展了压接缺陷检测, 与棒型碳纤维复合材料芯的压接相比, 在

碳纤维复合材料芯和压接金具间用铝内衬管隔离。因此,本文研究的闭合磁路由电枢(衔铁)、永磁体、空气、钢锚、铝内衬管和磁性碳纤维复合材料芯组成。

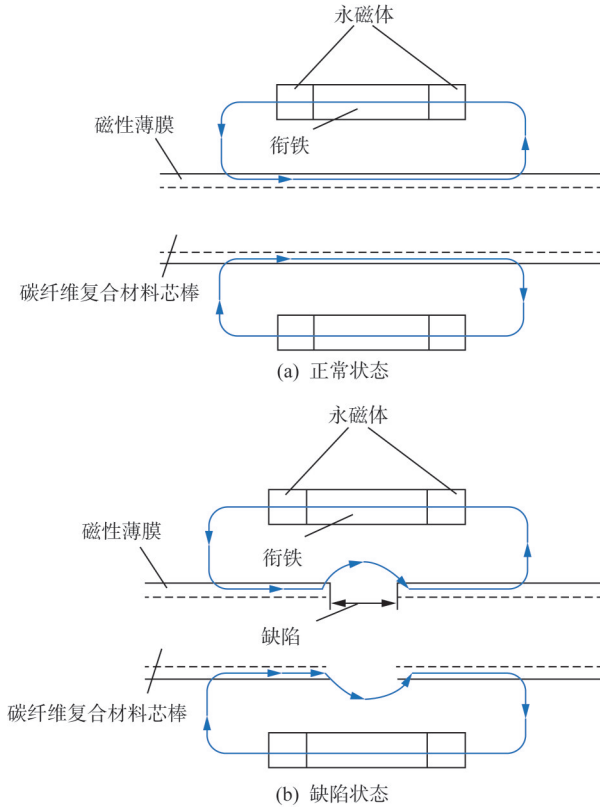


图1 碳纤维复合材料芯漏磁检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic leakage detection principle for carbon fiber composite cores

考虑到检测时漏磁检测装置的移动速度较低,可忽略涡流影响,因此可通过在每个时刻下(不同运动位置)的静磁场仿真来模拟这一过程,麦克斯韦方程组解耦后的静磁方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁通密度。

整个求解场域可以分为3个部分,分别为永磁体区域、磁性薄膜区域和剩余区域。上述不同区域之间满足磁场的自然边界条件,而整个求解场域的尺寸足够大,因此设置边界条件为磁绝缘边界条件。

在永磁体区域激励源的控制方程为:

$$\nabla \times (\mathbf{H}_c - \frac{1}{\mu_p} \nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{H}_c$ 为矫顽力; μ_p 为永磁体的磁导率; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位。

在其他区域激励源的控制方程为:

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (4)$$

式中: μ 为除永磁体外其他剩余材料的磁导率,不同的材料 μ 值都有所不同; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位。

1.2 仿真模型

根据碳纤维复合材料芯压接金具的尺寸参数建立了仿真模型,漏磁检测三维仿真模型结构如图2所示。其中碳纤维芯的外表面覆有磁性薄膜,整体套在铝衬管中,铝衬管又位于钢锚的压接管中,这形成了一个最小的压接结构。测量时永磁体与衔铁组成的漏磁检测装置会在压接管的外表面滑动,用来判断缺陷的具体位置与缺陷程度。

钢锚压接后为正六边形,其外圆半径为11 mm,厚度为1.475 mm,长度为180 mm。铝内衬管外径为6.3 mm,壁厚为4.1 mm。磁膜厚度为0.1 mm;碳纤维复合材料芯的直径为8.3 mm。考虑到可以获得更好的漏磁信号,在励磁装置电枢的中心挖出了探靴槽。同时,为了避免漏磁检测装置在运动过程中发送磁传感器与压接装置碰撞损坏,将磁传感器放置在引导槽内,距离磁膜上表面7.5 mm。有限元模型的参数如表1所示。特别地,为了实现磁性碳纤维复合材料芯的漏磁场检测,钢锚需要采用不锈钢材质。

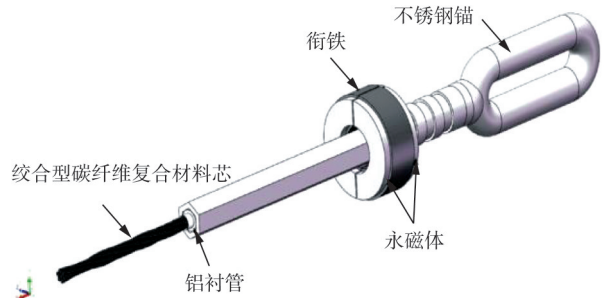


图2 仿真模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of the simulation model

为了保证磁性碳纤维复合材料芯在漏磁检测区域能够均匀磁化,励磁装置采用双回路结构。励磁装置由永磁体和电枢组成,其中4个永磁体参数相同,外径为29 mm,厚度为15 mm。电枢外径为30.5 mm,厚度为18 mm。电枢内探靴槽外径为16.5 mm,深度为4 mm,长度为8 mm。压接金具

表 1 仿真模型参数表

Tab. 1 Parameters table of the simulation model

器件或部件名称	材料	材料属性
钢锚	不锈钢	相对磁导率: 1 电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$): 1.4×10^6
铝内衬管	铝	相对磁导率: 1.000 021 电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$): 3.8×10^7
磁性薄膜	铁镍合金	近饱和位置相对磁导率: 8 000 电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$): 9.93×10^6
碳纤维复合材料芯	复合材料	相对磁导率: 1 电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$): 1000
永磁体	钕铁硼 NdFe35	相对磁导率: 1.099 8 电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$): 6.25×10^5 矫顽力/($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$): -850 000 剩磁/T: 1.23

模型的侧视图如图 3 所示。

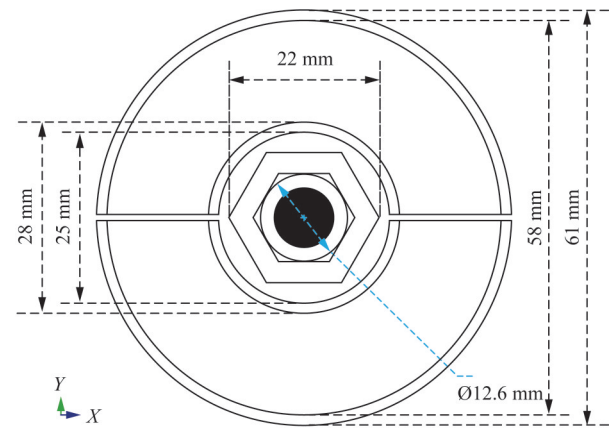


图 3 压接金具的侧视图

Fig. 3 Side view of crimping fittings

该仿真模型使用永磁体作为励磁, 因此有必要设置永磁体的励磁方向。在该模拟模型中永磁体的磁化方向为 X 轴的负方向, 磁性碳纤维复合材料芯的磁化方向沿 X 轴的正方向。模拟的边界条件是磁绝缘。将此参数设置为半径为 50 mm、长度为 200 mm 的空气分区。

2 仿真分析

2.1 永磁体尺寸影响

考虑到实际压接模型的尺寸较小, 因此漏磁检测装置中的永磁体尺寸不宜过大, 否则漏磁检测装置无法检测压接金具的头部和末端。本文首先构造了 3 种不同尺寸的励磁机, 其中 L_1 为永磁体尺寸,

L_2 为磁极距离, M 为径向气隙距离; d 为碳纤维复合材料芯断裂尺度, 如图 4 所示。然后, 通过有限元模拟计算在碳纤维复合材料芯正常和断裂两种工况条件下电枢中心的磁感应强度。

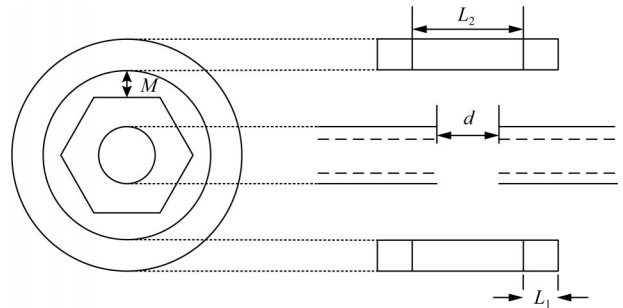


图 4 励磁机参数图

Fig. 4 Exciter parameters diagram

在磁极距离同为 30 mm 的情况下设计了 3 种励磁机尺寸, 如表 2 所示。

表 2 励磁机参数列表

Tab. 2 Exciter parameters list

励磁机编号	L_1/mm	L_2/mm	M/mm
1	5	30	3
2	10	30	3
3	15	30	3

为了探索不同尺寸激励器对磁性薄膜的磁化效应规律, 提取了碳纤维复合材料芯正常和断裂两种工况下电枢中心部分磁感应强度的幅值 B_{mag} , 绘制了两种工况下 B_{mag} 随激励器尺寸的变化图如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着励磁机尺寸的增大, 在正常和断裂条件下电枢中心的磁感应 B_{mag} 都会增加。但是, 与断裂情况相比, 碳纤维复合材料芯正常情况下磁感应强度的增加趋势相对平缓, 磁感应强度振幅的变化不超过 0.004 5 T, 断裂情况下电枢中心的磁感应明显增大。相比其他励磁机尺寸, 励磁机 3 电枢中心部分的磁感应强度最大, 正常工况下 B_{mag} 为 0.009 1 T, 可认为励磁机 3 是最适合的励磁机尺寸, 其永磁体尺寸 L_1 为 15 mm。

2.2 磁极间距和径向气隙的影响

通过以上对励磁机尺寸的分析, 确定 L_1 为 15 mm 时的最大漏磁信号。在此基础上进一步探索了两个永磁体的磁极之间的距离 L_2 以及永磁体与正六边形的外圆之间的气隙径向距离 M 。仿真计算碳纤维复合材料芯正常和断裂两种工况下电枢中心磁感

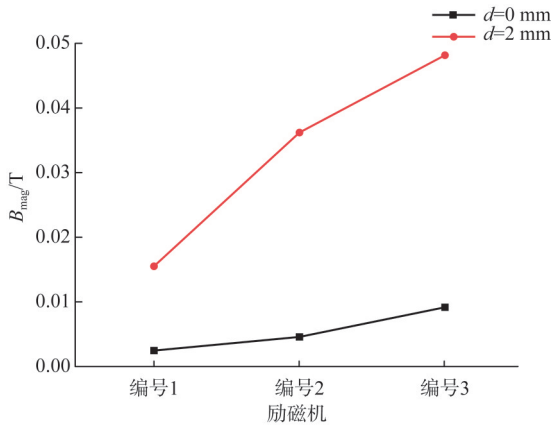


图5 不同工况下磁感应强度随励磁机尺寸的变化

Fig. 5 Variation of magnetic induction intensities with exciter sizes under different working conditions

应强度的幅值 B_{mag} , 分析 L_2 和 M 对漏磁信号的影响。

在不同工况下 L_2 和 M 的参数如表 3 所示。

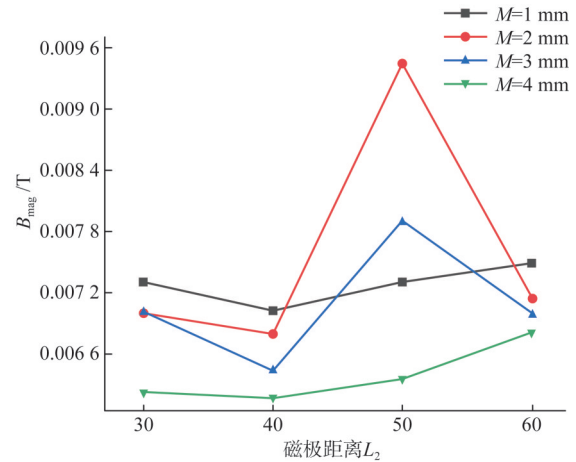
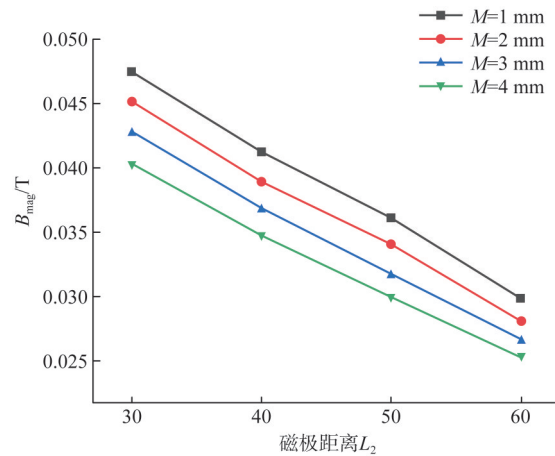
表 3 L_2 和 M 参数表Tab. 3 Parameter tables of L_2 and M

编号	L_2/mm	M/mm	编号	L_2/mm	M/mm
1	30	1	9	50	1
2	30	2	10	50	2
3	30	3	11	50	3
4	30	4	12	50	4
5	40	1	13	60	1
6	40	2	14	60	2
7	40	3	15	60	3
8	40	4	16	60	4

为了进一步优化励磁机的关键参数, 绘制了在正常和断裂两种工况下、不同气隙距离 M 下断裂尺度 $d=2$ mm 时 B_{mag} 随磁极距离 L_2 的变化图, 如图 6—7 所示。可以看出在正常情况相同气隙距离下, 随着磁极间距离的增加电枢中心磁感应强度的幅值 B_{mag} 总体呈上升趋势。然而, 当磁极间距为 50 mm 时 B_{mag} 随着气隙 M 的增大先增大后减小。在选定的参数范围内不同磁极间距的磁感应强度变化小于 0.002 66 T。

当磁性碳纤维复合材料芯断裂尺度 $d=2$ mm 时, 在相同磁极距离处电枢中心的磁感应强度幅度 B_{mag} 随着气隙距离 M 的增加而减小。在气隙距离相同的情况下 B_{mag} 随着磁极距离 L_2 的增加而减小。

虽然磁极间距 L_2 的增大会降低对磁性材料的磁

图6 正常工况下不同 M 值的磁场强度随极距变化Fig. 6 Magnetic intensities variation with pole spacings at different M values under normal conditions图7 断裂工况下, 不同 M 值磁场强度随极距的变化Fig. 7 Magnetic intensities variation with pole spacings at different M values at fracture conditions

化效果, 但仍可以保证磁性材料处于磁化饱和或近磁化饱和状态。在此前提下, 适当增大磁极间距不会导致漏磁场中缺陷信号的明显减弱, 但却可以降低背景磁场强度, 有利于信噪比的提高。基于上述分析, 本研究选定的漏磁检测装置的磁极距离 L_2 和气隙距离 M 的优化设计值分别为 50 mm 和 2 mm。

2.3 漏磁检测可行性分析

通过以上研究和分析, 在确定了漏磁检测装置的尺寸和关键参数后开展有限元仿真研究。正常工况和断裂尺度 $d=4$ mm 时磁薄包覆碳纤维复合材料芯表面磁感应强度分布如图 8—9 所示。

可以看到, 在图 8—9 中, 永磁体所处位置上磁性薄膜表面的磁场强度比较大, 这是因为永磁体

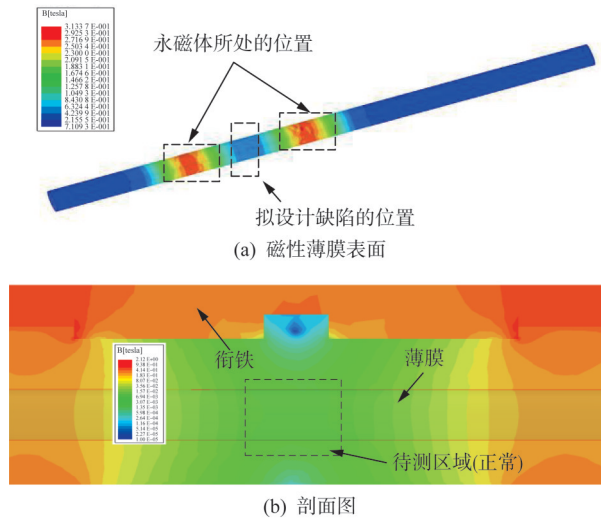
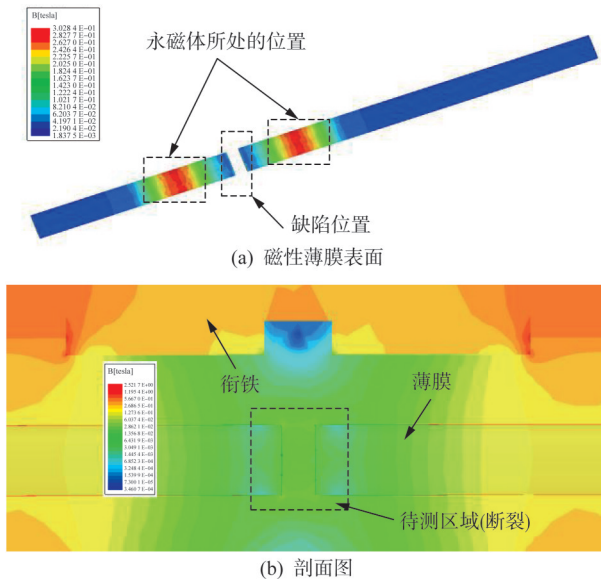


图8 正常工况磁感应强度云图

Fig. 8 Cloud map of the magnetic induction intensity B under normal working conditions图9 断裂尺度 $d=4$ mm 时磁膜表面磁感应强度 B 云图Fig. 9 Cloud map of magnetic induction intensity B of magnetic film surface at a fracture scale of $d=4$ mm

的强磁化所致。针对正常工况,拟设计缺陷位置上的磁场较为均匀,没有突变产生。而针对缺陷工况,断裂口两端明显出现了磁场突变,与正常状态对比明显。以上磁性薄膜上的磁场强度与磁感应强度的分布合理,符合预期,表明了本次仿真的正确性。

进一步地,本文探讨了磁性碳纤维复合材料芯的断裂尺度对漏磁信号的影响规律,并且从轴向分

量 B_x (沿着碳纤维复合材料芯的轴线) 和径向分量 B_y (从碳纤维复合材料芯芯的中心向外指向) 进行分析。漏磁检测装置的提离值设置为 7.5 mm, 如图 10—11 所示。

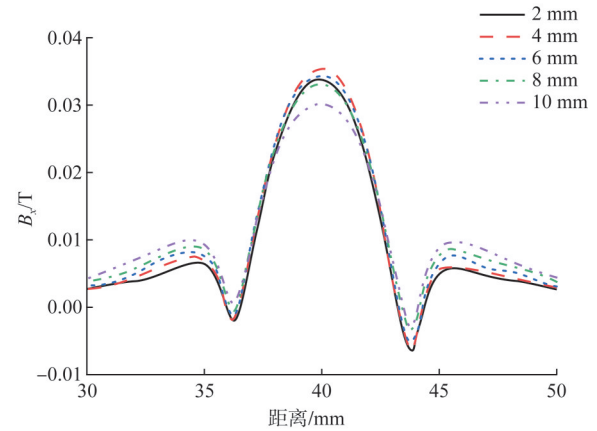


图10 不同断裂尺度的漏磁信号轴向分量

Fig. 10 Axial components of magnetic leakage signal with different fracture widths

如图 10 所示, 轴向分量 B_x 曲线在磁性碳纤维复合材料芯的断裂中心呈现近似对称。在漏磁信号的轴向分量中, 电枢中心的磁感应强度随着磁性碳纤维复合材料芯的断裂宽度的增加先增大后减小。其中, 当 $d=4$ mm 时漏磁信号值最大。原因是在碳纤维复合材料芯刚开始断裂时, 由于空气和磁膜的磁导率差异巨大导致磁力线严重畸变。然而, 随着断裂宽度的不断增加, 缺陷处的空气比例越来越大, 材料参数变得更加均匀, 降低了轴向畸变的程度, 最终导致轴向信号呈先增大后减小的趋势。

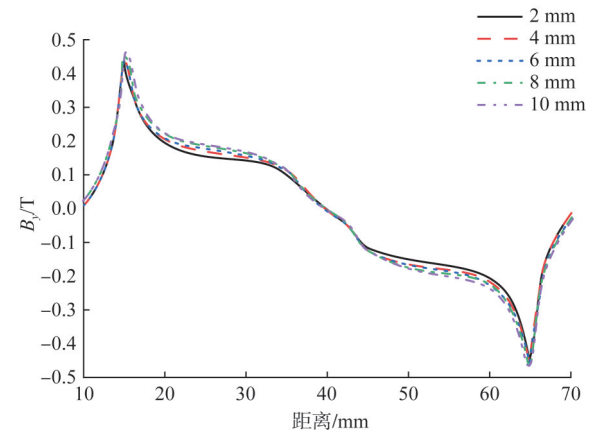


图11 不同断裂尺度的漏磁信号径向分量

Fig. 11 Radial component of magnetic leakage signals with different fracture widths

在图 11 中, 在漏磁信号的径向分量 B_y 上随着断裂尺度的增加电枢中心的磁感应强度相应增加, 但变化的差异相对较小。 B_y 曲线围绕碳纤维复合材料芯的断裂中心位置表现出对称性。

不论是缺陷处漏磁信号的轴向分量还是径向分量, 正常与缺陷下的信号区分特征都较为明显。其中又以轴向信号为主, 不同缺陷情况间也有较好的区分, 验证了本文所提出的漏磁检测方法的可行性。

3 结论

本文将具有高磁导率的柔性薄膜材料涂覆在绞合型碳纤维复合材料芯的表面, 采用有限元模拟方法研究了适用于绞合型碳纤维复合材料芯压接缺陷的漏磁检测装置的参数, 探讨了激励器永磁体尺寸和漏磁检测设备的关键设计参数对漏磁信号的影响。得出结论如下。

1) 通过建立绞合型碳纤维复合材料芯导线的压接仿真模型, 计算比较了正常和断裂两种工况下漏磁信号的幅值, 优化选取的激励器永磁体尺寸为 15 mm。

2) 在上述永磁体尺寸的基础上进一步分析了漏磁检测装置磁极间距和径向气隙距离对漏磁信号的影响。结合不同工况、不同参数变化的仿真计算结果优化选取了磁极间距为 50 mm 和径向气隙距离为 2 mm, 此时漏磁信号精度较高。

3) 根据漏磁检测装置的优化设计参数分析了不同碳纤维复合材料芯断裂尺度下漏磁信号的影响规律, 证明了碳纤维复合材料芯局部断裂缺陷漏磁检测的技术可行性。研究发现, 随着断裂尺度的增加碳纤维复合材料芯磁膜表面磁感应强度轴向分量先增大后减小, 当 $d=4$ mm 时达到最大值。碳纤维复合材料芯磁膜表面磁感应强度径向分量随着断裂尺度的增加而增加。

参考文献

- [1] 程时杰, 周敏. 先进电工材料发展战略[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3573 - 3583.
CHENG Shijie, ZHOU Min. Development strategy for advanced electrical materials [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3573 - 3583.
- [2] 潘春平, 廖民传, 麻闽政. 输电线路增容改造工程导线选型的技术经济性分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(3): 109 - 113.
- [3] PAN Chunping, LIAO Minchuan, MA Minzheng. Technical and economic analysis of wire selection for transmission line capacity expansion and renovation projects [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(3): 109 - 113.
- [4] 张春雷, 胡平, 何凤生. 架空导线碳纤维复合材料芯棒的结构、组织和性能分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 104 - 107.
- [5] ZHANG Chunlei, HU Ping, HE Fengsheng. Structure, microstructure, and performance analysis of carbon fiber composite core rods for overhead conductors [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 104 - 107.
- [6] 易智婷, 李愷, 肖晋宇, 等. 提高西电东送通道输送容量的技术研究及建议[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 36 - 39.
- [7] YI Zhiting, LI Gui, XIAO Jinyu, et al. Research & advice on the technology to enhance the power transmission capability of the west to east channel [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 36 - 39.
- [8] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等. 国内碳纤维复合材料芯导线的研究和应用综述[J]. 电力建设, 2010, 31(4): 90 - 93.
- [9] HE Zhouwen, CHEN Xin, WANG Qiuling, et al. Research and application overview of ACCC conductor in china [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 90 - 93.
- [10] AHMAD A, ERIC J B, STEVEN R N. A composite core conductor for low sag at high temperatures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2193 - 2199.
- [11] 姚建华, 魏静, 徐静, 等. 复合材料芯架空导线发展现状及展望[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(6): 10 - 13.
- [12] YAO Jianhua, WEI Jing, XU Jing, et al. Development status and prospect of overhead electrical stranded conductors composite core supported/reinforced [J]. Fiber Optic and Cable and Its Application Technology, 2021(6): 10 - 13.
- [13] 王煦, 秦凯, 黄国飞. 架空导线用纤维增强复合材料芯现状及未来[J]. 标准科学, 2023(S1): 183 - 189.
- [14] WANG Xu, QIN Kai, HUANG Guofei. Development status and future of fiber reinforced composite core for overhead conductor [J]. Standard Science, 2023(S1): 183 - 189.
- [15] 成楠, 朱兰, 潘文联, 等. 新材料在电气工程领域的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(34): 19 - 23.
- [16] CHENG Nan, ZHU Lan, PAN Wenlian, et al. Application of new materials in the field of electrical engineering [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2021, 11(34): 19 - 23.
- [17] 赵玉顺, 白金辉, 罗子民, 等. 酸酐固化剂复配环氧树脂复合材料性能分散度的影响[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 221 - 229.
- [18] ZHAO Yushun, BAI Jinhui, LUO Zimin, et al. Effect of anhydride curing agent compound on dispersion of epoxy resin composite material [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 221 - 229.
- [19] 于广辉, 邓云坤. 碳纤维复合导线发展综述[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 1 - 5, 9.
- [20] YU Guanghui, DENG Yunkun. Review on development of carbon fiber composite conductor [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 1 - 5, 9.
- [21] 高任, 程秀楷, 范伯儒. 浅谈应用 X 射线检测输电线路耐张线缺陷的必要性[J]. 中国设备工程, 2020(21): 181 - 182.
- [22] GAO Ren, CHENG Xiukai, FAN Boru. Discuss the necessity of applying X-ray to detect the defects of tensile lines in transmission lines [J]. China Plant Engineering, 2021(21): 181

- 182.
- [13] BURKS B, ARMENTROUT D L, KUMOSA M. Failure prediction analysis of an ACCC conductor subjected to thermal and mechanical stresses [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 1 - 10.
- [14] HAKANSSON E, PREDECKI P, KUMOSA M S. Galvanic corrosion of high temperature low sag aluminum conductor composite core and conventional aluminum conductor steel reinforced overhead high voltage conductors [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(3): 1 - 8.
- [15] 万建成, 刘晨, 江明, 等. 架空导线碳纤维复合材料芯棒径向耐压试验及仿真 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 21 - 26, 32. WAN Jiancheng, LIU Chen, JIANG Ming, et al. Radial withstand voltage test and simulation of carbon fiber composite core rods for overhead conductors [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 21 - 26, 32.
- [16] 王妍心, 徐静, 钟力生, 等. 碳纤维复合材料芯棒加速热氧老化特性研究 [J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 29 - 33. WANG Yanxin, XU Jing, ZHONG Lisheng, et al. Study on the accelerated thermal oxygen aging characteristics of carbon fiber composite core rods [J]. Insulation Materials, 2023, 56(1): 29 - 33.
- [17] 宋泽明, 万建成, 朱波, 等. 碳纤维复合材料芯导线芯棒压接不同心问题研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2022(1): 79 - 85. SONG Zeming, WAN Jiancheng, ZHU Bo, et al. Research on the problem of non concentric compression of carbon fiber composite core wire core rods [J]. Composite Materials Science and Engineering, 2022(1): 79 - 85.
- [18] GAO Yuan, SONG Guangming, LI Songtao, et al. LineSpyX: a power line inspection robot based on digital radiography [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4759 - 4765.
- [19] 万建成, 宋泽明, 黄强, 等. X射线无损检测技术在碳纤维芯导线压接中的应用研究 [J]. 中国体视学与图像分析, 2020, 25(3): 242 - 251. WAN Jiancheng, SONG Zeming, HUANG Qiang, et al. Application of X-ray nondestructive testing in crimping carbon fiber conductor [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2020, 25(3): 242 - 251.
- [20] 张志猛, 贾伯岩, 吴宏亮, 等. X射线检测装置在架空输电线路压接金具质量检测中的应用 [J]. 河北电力技术, 2016, 35(4): 43 - 46. ZHANG Zhimeng, JIA Boyan, WU Hongliang, et al. Application of X-ray detection device in overhead transmission line compression type-fitting quality inspection [J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(4): 43 - 46.
- [21] 王永伟, 朱波, 曹伟伟, 等. 碳纤维复合材料导线X射线无损检测技术开发及应用 [J]. 化学分析计量, 2014, 23(5): 72 - 74. WANG Yongwei, ZHU Bo, CAO Weiwei, et al. Development and application of non-destructive testing technology on ACCC [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2014, 23(5): 72 - 74.
- [22] 徐志伟, 陆桂来, 朱波, 等. X射线探测在输电线路碳纤维导线中的应用 [J]. 黑龙江电力, 2020, 42(3): 215 - 217. XU Zhiwei, LU Guilai, ZHU Bo, et al. Application of X-ray detection in carbon fiber conductor of transmission line [J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(3): 215 - 217.
- [23] WU J, HU F, HUANG X, et al. An online MFL sensing method for steel pipe based on the magnetic guiding effect [J]. Sensors, 17(12): 2911 - 2920.
- [24] ZHAO H, LIU J, TANG J, et al. A MFL mechanism-based self-supervised method for defect detection with limited labeled samples [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72): 1 - 10.
- [25] DONG Xuzhu, LI Ruihai, LIAO Yongli, et al. Technical and economic analysis of aluminum conductor with multi-stranded composite core and its application [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, May 21 - 24, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE, 2019: 2634 - 2638.
- [26] 安利强, 罗益鑫, 李渊, 等. 输电线路压缩型耐张线夹工程失效研究进展 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 152 - 161. AN Liqiang, LUO Yixin, LI Yuan, et al. Progress in engineering failure research of hydraulic strain clamp for transmission line [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 152 - 161.
- [27] JIANG X, SUN C, XIA Y, et al. Optimal design of MFL sensor for detecting broken steel strands in overhead power line [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2011(121): 301 - 315.
- [28] ALEXANDER N, VORONTSOV D A, SLESAREV V V, et al. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems [J]. Materials Evaluation, 2014, 72(8): 1019 - 1027.
- [29] RAO G A, KANG Y H, YANG S Z. Inspection of high-voltage transmission lines using eddy current and magnetic flux leakage methods [J]. Insign-non-destructive testing and condition monitoring, 2001, 43(5): 307 - 309.
- [30] CHEN J, FENG Q, WANG F, et al. Research on burst tests of pipeline with spiral weld defects [C]// 2012 Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, September 29 - October 3, 2012, Calgary, AB, Canada. Calgary: BIPC, 2012: 53 - 60.
- [31] KEN M. MFL inspection of small diameter, previously unpigable, pipelines-lessons learned [C]// 34th Pipeline Pigging and Integrity Management, February 21 - 24, Paris, France. Paris: PPIM, 2022: 489 - 508.

收稿日期: 2024-01-02; 网络首发日期: 2025-02-06

作者简介:

俸波(1986), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为输电及过电压专业技术, feng_b.sy@gx.csg.cn;

张炜(1983), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力设备状态监测评价技术, zhang_w.sy@gx.csg.cn;

廖永力(1984), 男, 通信作者, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为架空输电线路新材料及装备技术, liaoyl02@163.com。