

航空金属套管结构脉冲远场涡流检测机制及探头优化

张超¹, 李勇^{1,2}, 刘正帅¹, 闫贝¹, 任淑廷¹, 陈振茂^{1,2}

(1. 西安交通大学航天航空学院, 西安, 710049; 2. 陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心, 西安, 710049)

摘要 航空金属套管结构凭借其套管管材可选择性组合的特点,有力提升了航空管道服役过程中的结构安全性与稳定性,因此广泛应用于航空、航天等领域的重要装备中。为进一步保障航空金属套管结构的服役安全,需采用有效的无损定量检测方法定期对其进行检测和损伤评估。围绕不锈钢-碳钢双层航空金属套管的无损定量检测,着力探究脉冲远场涡流检测机制及检测探头优化。通过快速有限元仿真研究,明晰磁场及坡印廷矢量在套管内外空气域中的分布规律、远场区识别手段等,并基于此,深入探索电磁屏蔽结构及其在检测探头优化中的有效性。结合仿真研究,对航空金属套管腐蚀减薄缺陷检测进行了实验探究,通过实验进一步验证所提航空金属套管结构脉冲远场涡流检测的远场区识别方法以及基于电磁屏蔽的探头优化成效。

关键词 航空金属套管;脉冲远场涡流;探头优化;坡印廷矢量;电磁屏蔽

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.01.003

中图分类号 TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)01-0016-06

Testing Mechanism and Probe Optimization of Remote Field Pulsed Eddy Current Evaluation of Aviation Metallic Casing Pipes

ZHANG Chao¹, LI Yong^{1,2}, LIU Zhengshuai¹, YAN Bei¹, REN Shuting¹, CHEN Zhenmao^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Engineering Research Centre of NDT and Structural Integrity Evaluation, Xi'an 710049, China)

Abstract Relying on its advantages of flexible combination of casing pipes, the structure of Aviation Metallic Casing Pipes (AMCPs) is widely applied to the important equipment in the field of aviation and spaceflight, enhancing the safety and stability of aviation pipeline service. In order to further guarantee the long-term safety and structural integrity, it is indispensable to periodically inspect AMCPs and evaluate defects via effective Nondestructive Evaluation (NDE) techniques. In light of this, this paper intensively explores the testing mechanism and probe optimization of Remote Field Pulsed Eddy Current (RFPEC) evaluation of a typical AMCPs structure which includes stainless-steel and carbon-steel casing pipes. The distributions of Poynting vectors and magnetic field within the internal and external regions of AMCPs are an-

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51777149, 11927801), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XJJ2018027), 国家重点研发项目(2017YFF0209703)

作者简介: 张超(1997—),男,陕西勉县人,硕士生,研究方向:电磁无损检测。E-mail:zc545319190@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 李勇(1978—),男,陕西西安人,副教授,博士生导师,研究方向:结构完整性和装备安全理论与技术。E-mail:yong.li@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 张超,李勇,刘正帅,等.航空金属套管结构脉冲远场涡流检测机制及探头优化[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(1):16-21. ZHANG Chao, LI Yong, LIU Zhengshuai, et al. Testing Mechanism and Probe Optimization of Remote Field Pulsed Eddy Current Evaluation of Aviation Metallic Casing Pipes[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 16-21.

alyzed by fast finite-element modeling. Based on this, a method for localization of remote field is proposed. Following this, the Electromagnetic Shielding Structure (EMSS) for probe optimization is intensively investigated. Parallel to the simulations, a series of experiments for evaluation of wall-thinning defects in ACMPs are carried out by using the built-up testing system. The recognition method is valid.

Key words aviation metallic casing pipes; remote field pulsed eddy current; probe optimization; Poynting vector; electromagnetic shielding

脉冲远场涡流检测技术相比于常见的涡流、超声、射线和漏磁检测等无损检测方法,其独特的远场效应使之具有受提离效应影响小、内外管检测灵敏度相同等优点,在航空金属管道无损检测方面具有天然的技术优势^[1]。在脉冲远场涡流检测技术应用过程中,探头适用范围与其尺寸即探头长度紧密相关,因此,脉冲远场涡流检测探头的优化十分重要^[2],需在明晰脉冲远场涡流检测机制的基础上,优化探头结构以缩短探头尺寸并提高检测灵敏度,对被测构件存在的缺陷实施精确有效的识别与定量评估^[3]。目前国内外已有一些对脉冲远场涡流检测机制及探头优化方面的研究。一方面通过磁屏蔽技术抑制磁场直接耦合分量的传播,进而增强间接耦合分量,以提高探头对缺陷的响应能力;也可设置多层屏蔽结构,以增强探头对铁磁性材料的检测能力^[4]。另一方面以坡印廷矢量在导体域和空气域中的分布规律为基础,分析和解释多层屏蔽结构的作用原理,可以得出使用高磁导率和高电导率材料作为屏蔽结构,同时在探头中设置磁芯的情况下,不仅能够降低噪声影响,而且能够提高检测灵敏度的结论^[5-10],但是目前针对双层异质航空金属套管远场检测中的响应机理探究和技术优化尚存不足。基于此,本文针对不锈钢-碳钢双层航空金属套管,探究脉冲远场涡流检测机制及检测探头的优化。

1 脉冲远场涡流检测机制

本文所提脉冲远场涡流检测技术原理如图 1 所示。在对被测航空金属套管进行检测时,向激励线圈中通入一定频率和占空比的脉冲方波信号,激励线圈产生的线圈磁场以直接耦合和间接耦合分量的形式向外传播。线圈场的直接耦合分量在管内沿轴线方向传播,由于金属管壁对磁场的屏蔽作用,导致其以直接耦合方式传播的磁场大幅衰减,这一范围内为近场区;线圈场的间接耦合分量在激励线圈附近穿越管壁传到套管外部,在空气中传播 2~3 倍管径的距离后,此处管内磁场小于管外磁场,以间接耦合方式传播的磁场分量二次穿越管壁回到管内被磁场传感器拾取到检测信号,这一位置起为远场区。

以间接耦合方式传播的线圈场,在 2 次穿越管壁的过程中均在管壁表面激发感应涡流产生二次磁场,抑制原线圈场的变化,因此传感器所拾取的磁场检测信号中含有大量管壁厚度等信息,可对航空金属套管存在的缺陷进行分类识别以及定量评估,故采用脉冲远场涡流检测技术对航空金属套管结构进行检测。

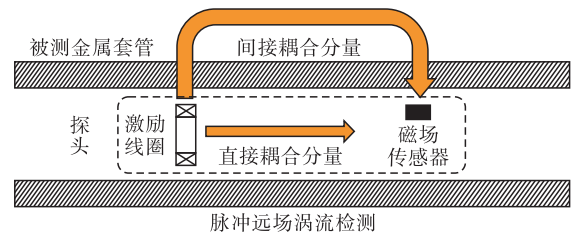


图 1 脉冲远场涡流检测原理

1.1 电磁场理论

在针对航空金属套管结构的脉冲远场涡流检测中,需要明晰激励电流加载与加载后的这一时间周期内,求解域内的磁场分布及变化规律。本研究中所涉及的区域分为导体域和空气域,其各自求解域内涡流问题的控制微分方程见式(1)~(3)。

导体域:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

空气域:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_0 \quad (3)$$

式中: μ 为磁导率; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位,单位 Wb/m; σ 为电导率,单位 S/m; φ 为标量电位, $\nabla \cdot \Phi$ 是标量电位 φ 的时域积分,由离散方程对称导入; $\mathbf{J}_0$ 为源电流密度,单位 A/m²。

根据矢量磁位 $\mathbf{A}$ 和标量电位 φ 的公式可得:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (5)$$

因此可求得任一点处的电场强度 $\mathbf{E}$ 、磁感应强度 $\mathbf{B}$,根据空间任一点处电磁场的能流密度 $\mathbf{S}$ 公式:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为坡印廷矢量,单位 W/m²。进一步获得求

解域中任一点处的坡印廷矢量 $\mathbf{S}$, 本文主要提取 $\mathbf{S}_r$ 和 $\mathbf{B}_z$ 进行研究。

1.2 快速有限元的建模

针对不锈钢-碳钢双层航空金属管道的脉冲远场涡流检测方法, 利用快速有限元进行建模计算^[11-12], 根据被测航空金属套管和检测探头在结构上的空间对称性, 将模型由三维简化为二维以减小计算量和提高运行效率。航空金属套管的脉冲远场涡流检测模型如图 2 所示, 模型各部参数如表 1 所列。探头中线圈匝数为 1 350 匝, 激励电流为频率 33 Hz、占空比 33% 的方波信号, 其周期内电流幅值为 1 A, 激励电流信号如图 3 所示。

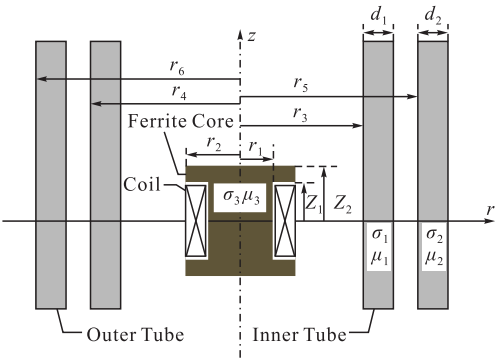


图 2 脉冲远场涡流检测模型示意图

表 1 脉冲远场涡流检测探头及被测航空金属套管参数						
r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm	r_5/mm	r_6/mm	
8.9	14	15	19	20	24	
$\sigma_1/(\text{MS/m})$		$\sigma_2/(\text{MS/m})$		$\sigma_3/(\text{MS/m})$		
1.1		6		0		
z_1/mm	z_2/mm	μ_1	μ_2	μ_3	d_1/mm	d_2/mm
9	12.5	1	150	1 800	4	4

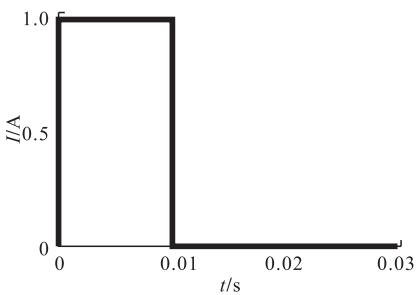


图 3 激励电流信号

1.3 屏蔽效应

电磁屏蔽材料优先选择高导电率与高导磁率的材料^[4,6], 本文选取铜质与铁质材料分别进行研究。为明晰屏蔽材料对远场区范围的影响, 在仿真中设置 2 组模型, 第 1 组为不同材料的单层屏蔽模型, 第 2 组为不同排列方式的双层组合屏蔽模型, 将 2 组模型的屏蔽效果与无磁芯无屏蔽(no magnetic core and no shield, NMC&NS)模型和有磁芯无屏蔽(magnetic core and no shield, MC&NS)模型的屏

蔽效果作对比, 以探究屏蔽结构是否有利于远场区的提前, 同时为脉冲远场涡流检测探头的结构优化提供理论支撑。

提取各组模型中求解域内的坡印廷矢量, 获取其在内管内壁($r=15\text{ mm}$)上的坡印廷矢量 r 分量过零点(zero crossing point, ZCP)位置, 该位置即为远场区开始位置, 由此位置对比可知各组屏蔽结构对远场区的影响。图 4 为无磁芯无屏蔽时求解域内的坡印廷矢量 r 分量分布图, 由图 4 可知, 坡印廷矢量 r 分量在线圈附近穿出管壁, 在管外传播一段距离后再次穿越管壁回到管内, 该现象与远场效应一致, 即磁场穿出管壁后二次穿透管壁回到管内。图 5 为无磁芯无屏蔽模型中坡印廷矢量 r 分量过零点截面上沿径向的坡印廷矢量 r 分量值, 由图 5 可知该截面上功率流 r 分量在管内为正, 管外为负, 再次表明管壁上该点即为坡印廷矢量 r 分量过零点, 即磁场的二次穿透位置, 可用于表示远场区开始位置。

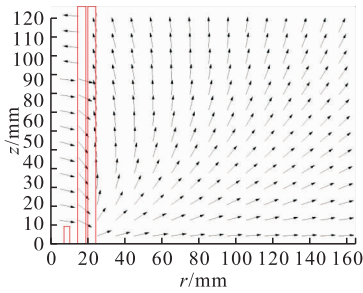


图 4 无磁芯无屏蔽模型坡印廷矢量 r 分量分布

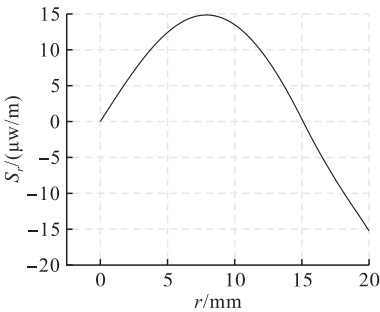


图 5 过零点截面坡印廷矢量 r 分量

从各组模型计算结果中提取相对应坡印廷矢量 r 分量过零点处的磁通密度 Z 分量进行比对, 其不同屏蔽类型过零点处磁通密度 Z 分量曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 无磁芯无屏蔽模型的磁通密度 Z 分量整体数值远小于其他类别, 在此基础上设置单层与双层屏蔽片, 由图 6 可知, 屏蔽结构由一层增加为双层, 最终为铜和铁均 2.5 mm 且铁质屏蔽片靠近线圈(Cu 2.5 mm & Fe 2.5 mm)时, 在以上模型中有最大的磁通密度 Z 分量, 表明屏蔽装置起到抑制磁场直接耦合分量作用的同时, 通过聚磁作

用增强了远场磁场强度,证明所提屏蔽装置对远场磁场强度增强的有效性。

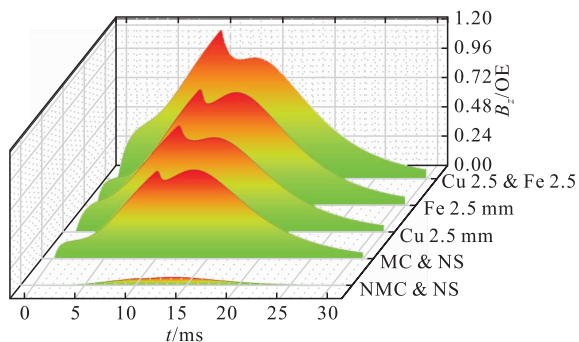


图6 不同屏蔽类型过零点处磁通密度 Z 分量

各屏蔽结构模型中内管内壁上过零点位置与磁通密度 Z 分量如图7所示,相比于无磁芯无屏蔽模型,同一模型在添加磁芯以后其坡印廷矢量 r 分量在内管内壁上的过零点位置由 89.85 mm 缩短到 80.30 mm,表明探头可缩短 10.6%,对应磁通密度 Z 分量从 7.6×10^{-6} T 提升到 7.3×10^{-5} T,得到大幅提升,分析其原因在于磁芯起聚磁作用,收拢了整体分散的磁场,使得远场区管外的磁场得到增强,进而远场区管外磁场大于管内磁场的位置提前,即磁场二次穿透位置提前。

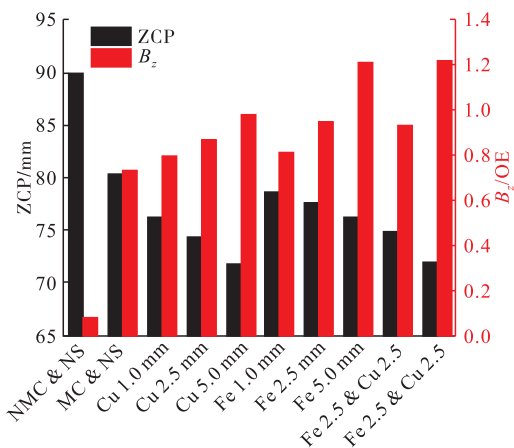


图7 各模型中过零点位置与磁通密度 Z 分量

在添加磁芯的基础上设置屏蔽结构,第一组带屏蔽结构的模型为单层铜片和单层铁片模型,相比于无磁芯无屏蔽模型,两种材料屏蔽片模型所对应坡印廷矢量 r 分量在内管内壁上的过零点位置均得到提前,在单层屏蔽片下远场区的提前效果中铜片(74.27 mm)的作用大于铁片(77.54 mm),此为铜质屏蔽材料的高电导率特性所起抑制磁场直接耦合分量的屏蔽作用;但观察磁通密度 Z 分量的变化时可知,设置铁质屏蔽时的磁通密度 Z 分量大于设置铜质屏蔽时的磁通密度 Z 分量,其原因在于铁材料的磁导率远大于铜材料,铁质屏蔽结构在此处起聚磁作用,增强远场区管外的磁场强度使得二次穿透

位置提前,此为高磁导率材料所起的聚磁作用。第二组模型设置了组合铜和铁质材料的屏蔽模型,不同之处在于两种材料相对于线圈的位置,由图7可知,对比铜质和铁质材料不同位置下的二次穿透位置与磁通密度 Z 分量,铁质材料更靠近线圈时有更小的二次穿透位置和远场区磁场强度,原因在于铁越靠近线圈时其聚磁作用越强,对远场区磁场的增强作用越大,同时考虑到铜对原磁场直接耦合分量的抑制作用,共同使得该模型中有更近的二次穿透位置和更大的远场区磁通密度 Z 分量。

1.4 探头灵敏度

由图7可知,双层屏蔽中铁质材料靠近线圈的组合有更近的二次穿透位置和更大的远场区磁场强度,故在实际探头设置中需考虑将高电导率与高磁导率材料组合使用,以获得最佳的屏蔽效果,以此为基础设计了带有双层屏蔽结构的探头,在快速有限元仿真中对被测航空金属套管进行检测,以探究设置屏蔽结构是否提高探头检测灵敏度。在被测航空金属套管的外管外壁设置了深度 0.5、1.0、1.5、2.0 mm(12.5%、25.0%、37.5%、50.0%)的全周外壁减薄腐蚀缺陷,该金属套管结构中不锈钢内管的内径 30 mm、外径 38 mm、壁厚为 4 mm,其碳钢外管的内径 40 mm、外径 48 mm、壁厚为 4 mm。在该模型对应的磁场二次穿透位置处取磁通密度 Z 分量为检测信号,保证激励信号不变的条件下,以外管和内管壁厚均为 4 mm 即未发生腐蚀减薄时的金属套管作为标准试件,其检测信号为参考信号。

将不同深度缺陷下对应检测信号与参考信号作差分处理,提取差分信号峰值,与减薄量 d 关联后作图,差分信号峰值与减薄量关联规律如图8所示。

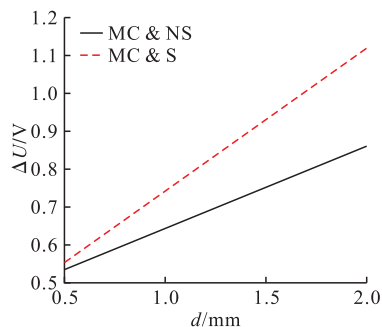


图8 差分信号峰值与减薄量关联规律

由图8可知,具有双层屏蔽结构的探头对不同深度缺陷的响应均大于无屏蔽结构时的探头,且具有双层屏蔽结构的探头对应关联曲线的斜率大于无屏蔽结构的探头,此斜率为探头检测灵敏度,表明设置双层屏蔽结构的探头对全周外壁减薄腐蚀缺陷的检测灵敏度优于无屏蔽结构探头。

2 脉冲远场涡流检测机制及探头优化

2.1 脉冲远场涡流检测实验平台

图 9 所示为搭建的脉冲远场涡流检测实验平台,包括信号发生器、功率放大器、带有磁芯和双层屏蔽结构的脉冲远场涡流检测专用探头、滤波放大器、数据采集卡和计算机组成整体的检测系统。图 10 所示为脉冲远场涡流检测专用探头结构示意图,由探头骨架、激励线圈、铁芯、组合屏蔽装置和磁场传感器组成,探头中磁场传感器位置可调,可根据不同屏蔽结构下的二次穿透位置进行适当位置调整。检测时将探头居中放置于被测航空金属套管中,激励线圈通入预设的方波信号,磁场传感器拾取到检测信号后经过滤波放大输入到计算机中成像。

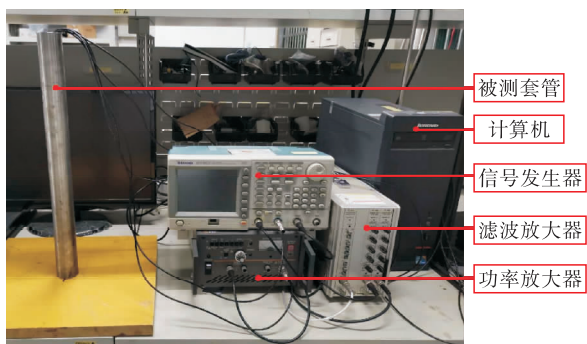


图 9 脉冲远场涡流检测实验平台

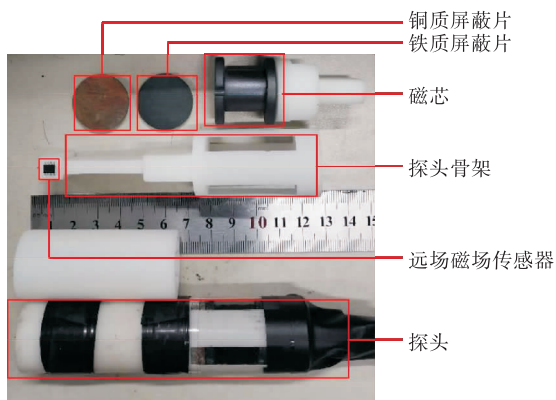


图 10 脉冲远场涡流检测专用探头结构示意图

2.2 实验及讨论

实验时,首先使用有磁芯有屏蔽结构(MC&S)且尺寸参数与仿真一致的脉冲远场涡流检测探头,屏蔽结构为仿真最优屏蔽结构即铜和铁均 2.5 mm 且铁质屏蔽片靠近线圈(Cu 2.5 mm & Fe 2.5 mm),对航空金属套管的外管外壁全周减薄腐蚀缺陷进行检测。被测金属套管中不锈钢内管内径 30 mm、外径 38 mm、壁厚为 4 mm,其碳钢外管内径 40 mm、外径 50 mm、壁厚为 5 mm。在其外管外壁上设置深度 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mm 的全周外壁减

薄腐蚀缺陷,获取无缺陷与不同深度缺陷下的远场检测信号。其次将探头中屏蔽装置去除,对上述同样的全周外壁减薄腐蚀缺陷进行检测,获取无屏蔽装置下的远场检测信号。在两组远场脉冲涡流检测中,保证激励信号不变,以外管壁厚 5 mm、内管壁厚 4 mm 即未发生腐蚀减薄时的金属套管作为标准试件,其检测信号为参考信号(REF)。

作有无屏蔽装置时的远场区检测信号如图 11 所示,由图 11 可知,在外管外壁的不同减薄量缺陷检测信号中,有屏蔽结构探头的检测信号幅值均高于无屏蔽结构探头对应检测信号,表明设置屏蔽结构有利于提高远场区磁场强度。

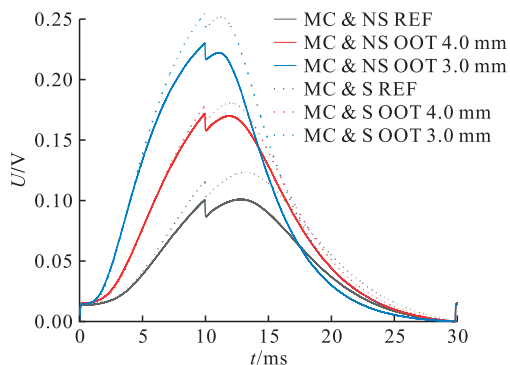


图 11 有无屏蔽装置时的远场区检测信号

为明晰不同深度缺陷对检测信号的影响程度,将各检测信号作差分处理,获得有无屏蔽装置时的远场区检测差分信号如图 12 所示。

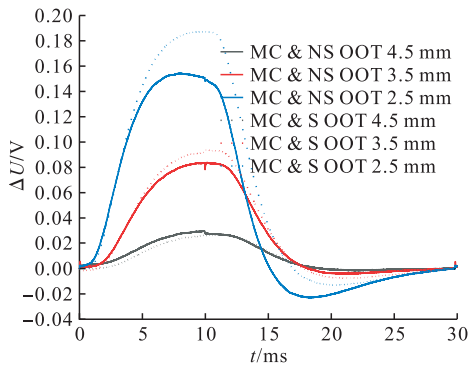


图 12 有无屏蔽装置时的远场区检测差分信号

由图 12 可知,不同探头检测信号中相同深度缺陷对远场检测信号的影响中,有屏蔽结构时的信号响应幅度均大于无屏蔽结构时,表明屏蔽结构的设置,能够提高探头对缺陷的响应能力。即双层屏蔽结构的使用,有利于对线圈磁场以直接耦合方式传播分量的抑制,同时能够通过聚磁效应提高远场区磁场强度,进而将磁场二次穿透位置提前且增强远场区磁场强度。

由于远场检测中磁场二次穿透管壁的特性,使得远场检测信号中含有丰富的管壁厚度信息,故仅

需提取远场检测信号峰值,将该峰值与航空金属套管外管外壁全周减薄量关联以探究检测效果。有无屏蔽结构时检测信号峰值与减薄量关联规律如图13所示,由图13可知,在探头设置屏蔽结构以后,相同深度的减薄量对应应有更大的检测信号峰值,更有利于提高缺陷的检出率。

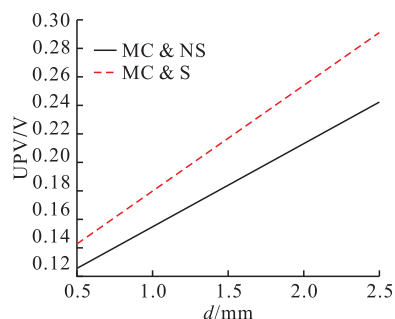


图13 有无屏蔽结构时检测信号峰值与减薄量关联规律

综合考虑有无屏蔽结构时对远场磁场强度和探头对缺陷响应能力的影响,可知本文所提双层屏蔽结构相比于其他结构,有最优的远场区磁通密度 Z 分量,且该情况下探头中远场区磁场传感器放置位置最靠近线圈,即探头长度最短。表明使用本文双层屏蔽结构可获得幅值更大的检测信号以及对缺陷更强的响应能力,确保无损检测顺利进行。

3 结语

本文围绕不锈钢-碳钢双层航空金属套管的无损定量检测,以探究脉冲远场涡流检测的机制及检测探头的优化。通过快速有限元仿真研究,明晰坡印廷矢量在求解域中的分布规律,并通过坡印廷矢量 r 分量过零点识别远场区开始位置,探究电磁屏蔽结构在检测中的有效性。通过实验平台对航空金属套管腐蚀减薄缺陷检测进行了实验研究,以对屏蔽结构能力进行进一步验证,获取有无屏蔽结构下的检测信号进行对比,结果表明,屏蔽结构的使用有利于提高探头对缺陷的响应能力,同时提高远场区磁场强度,并缩短探头尺寸。实验结果与仿真结论一致,表明所提航空金属套管脉冲远场涡流检测远场区识别方法的有效性,以及基于电磁屏蔽的探头结构优化手段的可行性。

参考文献

- [1] YANG B F, XU J M, WU H, et al. Magnetic Field Shielding Technique for Pulsed Remote Field Eddy Current Inspection of Planar Conductors[J]. NDT and E International, 2017, 90: 48-54.
- [2] 孙杰,付跃文,李绪丰,等. 带包覆层管道弯头局部壁厚减薄的脉冲涡流检测方法研究[J]. 无损探伤, 2018, 42(4): 10-13.
- [3] ANG B F, LI X C. Pulsed Remote Field Technique Used for Nondestructive Inspection of Ferromagnetic Tube[J]. NDT and E International, 2013, 53: 47-52.
- [4] ZHOU D Q, WANG J, HE Y Z, et al. Influence of Metallic Shields on Pulsed Eddy Current Sensor for Ferromagnetic Materials Defect Detection[J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2016, 248: 162-172.
- [5] YANG C, GAO B, MAQ, et al. Multi-Layer Magnetic Focusing Sensor Structure for Pulsed Remote Field Eddy Current[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, (7): 1-1.
- [6] 周辉. 磁屏蔽技术的仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [7] 张超,李勇,闫贝,等. 金属套管腐蚀缺陷的脉冲涡流近-远场复合检测[J]. 无损检测, 2019, 41(10): 37-43.
- [8] 张超,李勇,闫贝,等. 双层异质金属套管缺陷的脉冲涡流检测研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(11): 8-10.
- [9] 张曦郁,李勇,敬好青,等. 铁磁性套管脉冲远场涡流检测激励参数优化[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(8): 7-10.
- [10] CHEN Z M, REBICAN M, MIYA K, et al. Three-Dimensional Simulation of Remote Field ECT Using the AR Method and a New Formula for Signal Calculation[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2005, 16(1): 35-53.
- [11] XIE S J, CHEN Z M, TAKAGI T, et al. Efficient Numerical Solver for Simulation of Pulsed Eddy-Current Testing Signals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(11): 4582-4591.
- [12] CHEN Z M, TAKASHIMA H, MIYA K. A Hybrid Database Approach for Simulating Signals of Remote Field Eddy Current Testing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2004, 19(1/2/3/4): 219-223.

(编辑:姚树峰)