

一种基于同轴谐振腔技术的非金属缺陷测量方法

徐 宇¹ 杨晓庆¹ 尚劲松¹

XU Yu YANG Xiaoqing SHANG Jinsong

摘 要

随着航空航天领域对非金属复合材料构件质量要求的不断提升,准确检测其内部缺陷对保障飞行安全与设备可靠性意义重大。为解决现有检测方法在分辨率和灵敏度上的不足,文章设计了一种新型的微波同轴谐振腔传感器,用于测量非金属缺陷,该复合材料广泛应用于航空航天。根据近场微波测试原理搭建了一套近场微波扫描系统,提出一种基于谐振频率偏移的提高距离测试方法,通过电磁仿真软件建模、实验加工与测试,对 $\lambda/4$ 同轴谐振腔进行了综合研究。采用S参数测量技术,对谐振腔的谐振点S11幅值及频率进行了精确测量,从而获得了覆盖非金属薄膜的裂纹缺陷的微波扫描图像,实现了 0.01λ 的超分辨率成像效果。

关键词

亚表面缺陷;非金属缺陷;超分辨率成像;近场微波扫描系统;微波同轴谐振腔传感器

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.046

0 引言

随着科学技术的飞速发展和工业生产的更新迭代,材料已然成为国家基础建设、国防建设和人民生产生活中不可或缺的一部分。同时,材料科学的研究也随之不断发展,相继发现高分子材料、有机材料和非金属复合材料等多种新型材料。其中,非金属复合材料是一种通过物理或者化学的加工方式,将多种具有不同性质的非金属材料在宏观上组合而成为具有新性能的材料^[1]。例如碳纤维、玻璃纤维和合成陶瓷均属于非金属复合材料的范畴。相比传统材料来讲,非金属复合材料在克服单一材料某些特性不足的同时,能够更好地利用材料各自的优势,达到更优性能。因其具有高强度、高刚度、重量轻、弹性优等特点,被广泛用于油井管道、航空航天、汽车制造等领域中替代金属构件^[2]。然而,非金属复合材料在成型过程和长期使用过程中,由于加工工艺、极端环境、疲劳累积、撞击等物理化学因素的影响,材料内部容易产生空洞、分层等缺陷。如果非金属复合材料构件中存在的缺陷不能被及时发现并处理,在未来的使用过程中,这些无法被直接观察到的缺陷将会影响复合材料的性能和强度,带来安全隐患和难以预料的损失^[3-4]。想要避免由于存在缺陷而带来的潜在安全隐患,就必须在材料制造和使用过程中进行严格的监测和评估,及时发现已经出现的缺陷或者提前预测可能出现的危害,这对保障系统的安全尤为重要。

一些检测技术已被研究并用于复合材料的缺陷检测,例

如超声波检测、X射线和红外热成像技术^[5-8]。尽管这些方法在当前应用中具有一些优点,但仍存在一些局限性。例如,超声波检测需要偶联剂,这会破坏被测材料的形状(MUT);X射线对人体有害,设备昂贵;热成像技术需要大量时间,导致检测速度慢。与上述方法相比,微波无损检测具有设备简单、操作方便、无需耦合剂、非接触式测量等特点,在无损检测领域发挥着重要作用。波导^[9]和平面谐振腔传感器^[10]主要研究用于非金属复合材料的检测,通过测量其反射系数或透射系数的偏移来判断缺陷。然而,它们的电磁场(EM)并不集中,因此主要用于检测较大尺寸的缺陷。为检测较小尺寸的缺陷,需要以更高的频率工作以获得更高的灵敏度,这增加了测试成本。通过设计微波近场传感器解决了这一限制。

微波近场显微镜是在微波频段利用近场探针与样品之间发生的相互作用,进而影响谐振腔的谐振频率与品质因数等微波参数,反演出样品的电磁信息。微波近场显微镜利用倏逝波突破了衍射极限,使分辨率提升至微米甚至纳米。1928年, Syngé^[11]首次提出近场微波显微镜的概念,后来人们利用同轴谐振腔高品质因数的特点搭建了具有很高分辨率的测试系统^[12-13],利用近场微波显微镜,开展了铁电材料测试以及无损检测等研究^[14-15]。

本文采用带有钨钢探针的 $\lambda/4$ 波长的同轴谐振腔的NSMM系统,以其微波能量在探针机场区域具有高灵敏度和空间分辨率的特点,利用带缺陷的非金属薄膜样品在探针场聚焦区域引起的电磁环绕,无损高效地表征 $100\mu\text{m}$ 薄膜下的裂纹缺陷,这种方法对于航空航天的非金属材料下缺陷检

1. 四川大学 四川成都 610021

测有重大意义。

1 NSMM 结构和工作原理

图 1 为本文设计的 $\lambda/4$ 同轴谐振腔, 是 NSMM 系统的核心组成部分。微波能量由矢量网络分析仪发出, 从其中一端输入, 激励谐振腔的谐振; 另一端为输出由矢量网络分析仪接收。当外界样品处于微波同轴探针的作用范围时, 腔体的传输系数发生改变, 可通过此变化实现对样品结构信息的反演。该设计采用了一种由外导体、内导体、SMA 接头以及电耦合探针构成的 $\lambda/4$ 同轴谐振腔。在此结构中, 内导体的长度被精确设定为腔体谐振频率对应的波长 λ 的四分之一。

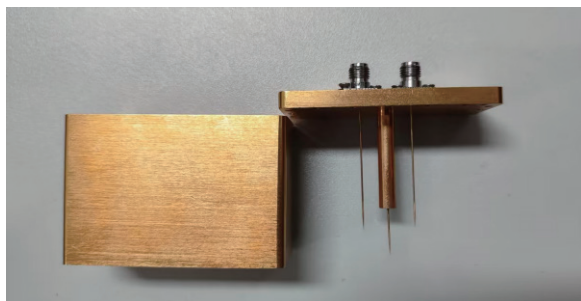


图 1 $\lambda/4$ 同轴谐振腔实物图

具体而言, 本文所设计的微波同轴谐振传感器工作在 1.818 2 GHz 的谐振频率, 据此推导得出其内导体长度。此外, 该谐振腔的其他尺寸参数如表 1 所示。

表 1 同轴谐振传感器理论评估结构参数

谐振腔结构	参数/mm	类别	参数/mm
腔体内半径	5	馈电端口半径	4.10
腔体高度	40	耦合探针半径	0.2
腔体长度	50	耦合探针长度	16
腔体内导体高度	28	探针半径	0.2
腔体尖锥高度	1.50	探针孔半径	0.5

前端探测的探针的作用是随谐振腔内电磁场变化产生隐失场作用于待测样品。隐失场的电场强度随着探针与物品的距离增大而迅速衰减, 当距离过大时将导致样品结构信息无法扰动腔内电场, 所以需要寻找探针与待测样品间的最佳提距离。

基于仿真模型, 本文实现了 $\lambda/4$ 同轴谐振腔的精密加工。该微波同轴谐振传感器包括电容加载的同轴谐振腔、探针、电偶和探针以及 SMA 转接头。为增强针尖处的隐失场强度, 对同轴谐振腔内导体的底部采用针尖直径约为 50 μm 的钨钢探针。

通过对图 2 的细致观察与分析, 可以观察到所加工的 $\lambda/4$ 同轴谐振腔在谐振频率方面展现出高度的一致性, 其相对误差维持在 0.07 GHz 以下。同时, S21 幅值的测量数据

与预期结果基本一致, 尽管存在一定偏差, 但该偏差可能归因于多个潜在的因素, 包括但不限于加工过程中的精度限制、SMA 转接头的性能波动, 以及材料特性本身的不确定性。这些因素均有可能对谐振频率和 S21 幅值的测量精度产生不利影响。

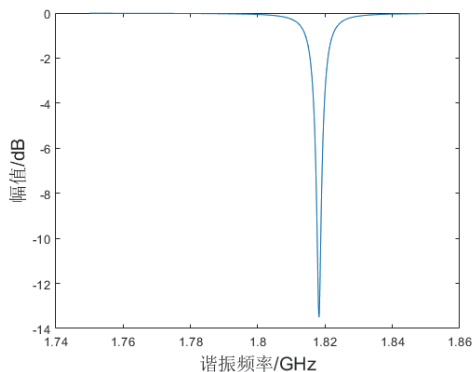


图 2 $\lambda/4$ 同轴谐振腔实测 S 参数曲线

2 NSMM 探测系统组成及设置

微波近场探测系统由多个关键组件构成, 主要包括 $\lambda/4$ 同轴谐振腔、金属探针、矢量网络分析仪、三维步进电机位移台、CCD 光学相机、光源以及一台由上位机软件控制的计算机。为确保实验的稳定性与精确性, 除计算机与矢量网络分析仪外, 所有其他组件均安装于抗震性能卓越的大理石平台上。图 3 详细展示了微波近场显微测试系统的实体配置。

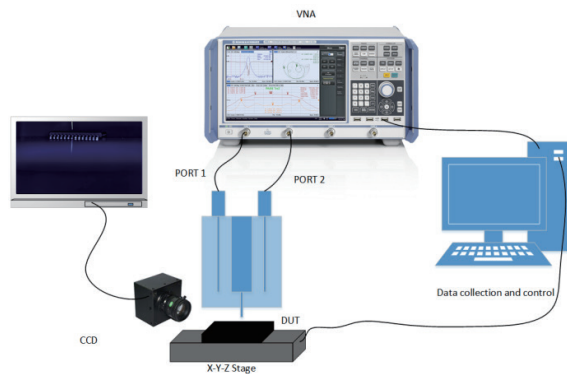


图 3 NSMM 系统图

在一侧安装的 CCD 相机与一组可变焦镜头组合, 构成了一套高精度放大镜系统, 该系统通过连接至液晶显示器 (LCD) 作为监视器, 用于实时监控针尖相对于样品的位置关系。热光源确保了对针尖与样品相互作用区域的有效照明, 从而提升了 CCD 放大镜在 LCD 上显示探针尖端的清晰度。此外, 一台计算机通过接口与三维步进电机位移台相连, 采用 C# 编程环境实现对位移系统的精确控制, 并同步从矢量网络分析仪 (VNA) 收集数据, 将数据记录于文件中, 方便后续计算或成像分析使用。

在传统矢量网络分析仪（VNA）的接收器架构中，普遍采用基于调谐接收机的设计原理。该设计通过本振器（LO）将接收到的微波信号进行混频处理，从而将其转换至较低的中频（IF）信号。经过带通滤波器处理后的中频信号，能够有效缩小接收机的带宽，从而显著提升系统的灵敏度、动态范围及测量精度。通过减小中频带宽（IFBW），可以有效地降低系统本底噪声，进而提高 VNA 的测量精度。然而，较低 IFBW 将导致采集时间的延长，从而增加整体的检测周期。相反，较高的 IFBW 虽然可以缩短采集时间，但会牺牲测量精度，影响检测结果的准确性。因此，合理选择 IFBW 的设定值对于确保整个系统能够高效且精确地进行检测至关重要。本文选取的 IFBW 为 3 kHz。

3 微波近场检测结果分析

在近场扫描微波显微术（NSMM）中，微波谐振腔设计用于将隐失场集中于探针尖端。当探针尖端与样品之间的距离处于隐失场区域内，探针尖端的高场强会辐射到样品表面，同时样品探针尖端与样品之间的相互作用，对谐振腔产生微扰。该相互作用不仅受样品电磁特性的影响，而且探针与样品间的间距亦为关键影响因素。为消除探针与样品间距对测试结果的影响，本文采纳软接触模式进行样品测量。软接触模式定义为探针尖端与样品之间的临界接触状态，即接触距离 $H=0$ 。研究者通常利用 CCD 相机监控探针与样品间的距离，以实现软接触。然而，在实际操作中，由于人眼观测误差及滑台控制不准确，软接触的实现面临挑战。针对此问题，本文提出了一种最小化探针损害的软接触方法。

准静态模型揭示了谐振腔谐振频率 f_r 与提离距离 H 以及样品介电常数 ϵ_r 之间的定量关系，具体表现为：

$$\frac{f_r - f_0}{f_r} = -A \left(\frac{\ln(1-b)}{b} + 1 \right) \quad (1)$$

$$b = (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 1) \quad (2)$$

式中： f_r 为谐振腔的谐振频率； f_0 为谐振腔的空载谐振频率； A 为一个与谐振腔的腔体结构及波长有关的常数； ϵ_r 为介质的相对介电常数。

根据准静态模型理论的推导，针尖与样品的间隙 H 缩小时，谐振频率 f_r 变化速率显著增加。设任意一个测试点 a_n 的谐振频率为 $f(a_n)$ ，相邻两个点之间的谐振频率差值 $\Delta f_r = f(a_n) - f(a_{n-1})$ 。在实际检测过程中，由于待测物品表面可能存在不规则性，探针针尖需与待测物保持一定距离，以避免对探针造成损坏；同时，若探针针尖与待测物距离过远，同轴谐振腔通过探针辐射的能量将无法有效作用于待测物，从而影响谐振频率的变化。

为规避上述两种不利情形，本文设定谐振频率变化阈值

Δf_r 为 500 kHz。在实验操作中，通过控制三维步进电机位移台，使探针从待测物正上方约 500 μm 处开始，以 10 μm 的步进逐渐向下移动。当监测到的谐振频率变化超过 500 kHz 时，即可认为实现了软接触状态。具体提离距离确定曲线如图 4 所示。

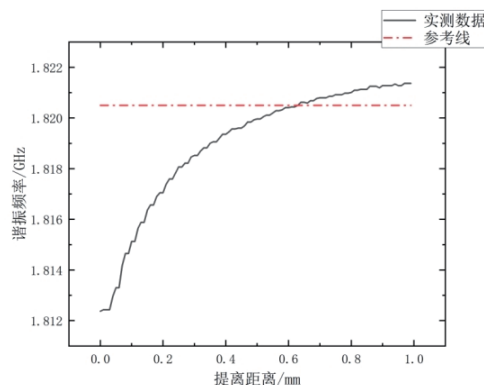


图4 谐振频率随提离变化关系

为实现探针针尖与待测样品之间的软接触模式，本研究采纳了上述判定准则。随后，设定三维步进电机位移台沿 x 轴的移动范围介于 0~7 mm 之间，并规定扫描间隔为 10 μm 。所选待测样品为 100 μm 厚的非金属薄膜，该薄膜沉积在带有三道划痕的金属基底上，每道划痕的宽度 100 μm ，且相邻划痕之间的距离相差 1 mm。扫描方向如图 5 所示。

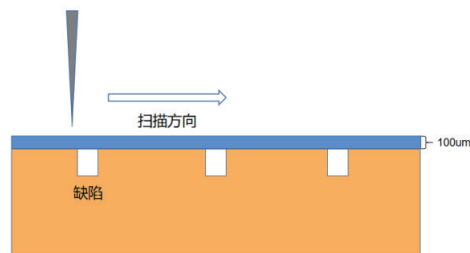


图5 非金属薄膜下金属缺陷检测示意图

扫描结果如图 6 所示，可以看出在 2~5 mm 范围内有 3 处谐振频率发生明显变化，位置分别为 2.42 mm、3.4 mm、4.32 mm，检测结果与实际相符。

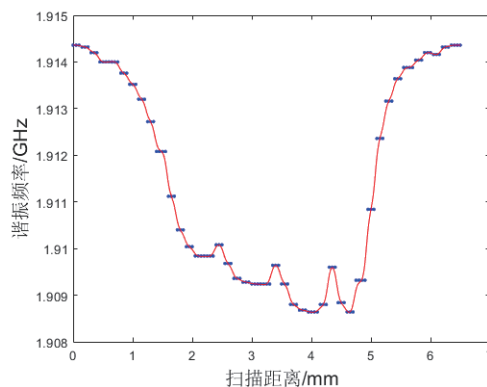


图6 非金属薄膜下金属缺陷检测示意图

整体扫描结果如图 7 所示。

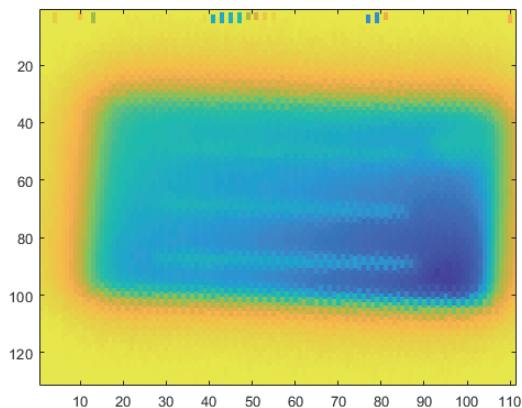


图 7 非金属薄膜下金属缺陷检测示意图

在实际应用中,表面非金属薄膜可以为非透明,实现了不透明物体内部隐藏结构的无损透视探测,是光学显微镜所观测不到的。

4 结语

本文提出了一种新型的微波同轴传感器,旨在实现对非金属基材内部缺陷的高灵敏度检测。该传感器的设计独具匠心,有效提升了缺陷检测的灵敏度。通过电磁场的仿真分析,证实了当传感器探针遭遇非金属基材内缺陷时,其谐振频率将出现上升的趋势。此外,还构建了一套基于矢量网络分析仪(VNA)与计算机的微波近场扫描测量系统(NSMM),展示了该系统在航空航天领域测量应用中的巨大潜力。综上所述,凭借其高分辨率成像与测量能力,NSMM技术在缺陷检测与成像领域已呈现出广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 张彭涛. 碳纤维复合材料分层损伤的超声波无损检测研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [2] 刘莹, 孙璐. 先进复合材料在航空航天的现状与应用[C]//中国空间技术研究院. 第三届空间材料及其应用技术学术交流会议论文集. 北京: 北京卫星制造厂宇航材料与制造技术试验检测中心, 2011:72-76.
- [3] 王秋霞. 世界复合材料强国与我国的复合材料现状及发展动向[J]. 玻璃钢/复合材料, 1999(1):40-44.
- [4] 嘉文, 周华丽. 教育区块链[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [5] 张贺斌. 超声检测技术在复合材料构件上的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [6] 刘怀喜, 张恒, 闰耀辰. 声发射技术在复合材料中的应用及研究进展[J]. 纤维复合材料, 2002(4):50-52.
- [7] 张晓燕, 金万平. 红外热波检测技术在美军装备维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2006(5):41-43.
- [8] 罗盼. 基于X射线图像焊缝缺陷检测系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [9] 张蒙蒙. 基于微波成像的非金属管道无损检测方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [10] ZHANG J, HU W L, CHEN Z B, et al. Reliable crack monitoring based on guided wave through periodically loaded transmission line[J]. IEEE sensors journal, 2023 23(7):6799-6809.
- [11] SYNGE E H. XXXVI. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region[J]. The london, edinburgh, and dublin philosophical magazine and journal of science, 1928,6(35):356-362.
- [12] ANLAGE S M, TALANOV V V, SCHWARTZ A R. Principles of near-field microwave microscopy[J]. Scanning probe microscopy, 2007:215-253.
- [13] IMTIAZ A, WALLIS T M, KABOS P. Near-field scanning microwave microscopy: an emerging research tool for nanoscale metrology[J]. IEEE microwave magazine, 2014, 15(1): 52-64.
- [14] BIAGI M C, FABREGAS R, GRAMSE G, et al. Nanoscale electric permittivity of single bacterial cells at gigahertz frequencies by scanning microwave microscopy[J]. ACS nano, 2015, 10(1):280-288.
- [15] FARINA M, DONATO A D, MONTI T, et al. Tomographic effects of near-field microwave microscopy in the investigation of muscle cells interacting with multi walled carbon nanotubes[J]. Applied physics letters, 2012, 101(20): 203101.

【作者简介】

徐宇(1999—), 男, 四川攀枝花人, 硕士, 研究方向: 微波传感器设计、微波无损检测。

杨晓庆(1978—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向: 电磁超材料、微波无损检测和多物理场分析。

尚劲松(2001—), 男, 山东泰安人, 硕士, 研究方向: 微波传感器设计、微波无损检测、深度学习。

(收稿日期: 2024-12-12)