

微波显微镜检测金属/非金属裂缝的研究

王雪儿¹ 叶 鸣¹ 刘 菲¹ 白永江¹ 杨 放¹ 谢拥军²

(1. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院 西安 710055; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要: 裂缝检测对钢结构和混凝土建筑、核电、航空等领域具有重要实际意义。本文采用谐振式同轴探头构造微波显微镜开展了金属和非金属裂缝的无损检测方法研究。首先,通过电磁仿真研究了耦合间隙、提离高度和探头材质等关键参数对检测性能的影响。然后,以机加工黄铜、铝合金样品和3D打印非金属样品进行了实验验证。结果表明:同轴探头在谐振频率处的 S_{11} 幅度可用于材料表面裂缝的无损检测,耦合间隙、提离高度是影响检测灵敏度的主要设计参数;相比于传统的反射型同轴探头,谐振式探头检测灵敏度(有无裂缝时观测频点处的 S_{11} 幅度差)提高了约20~30倍;针对金属样品的宽3.9 mm裂缝的仿真与实测结果吻合良好,裂缝宽度检测的相对误差<7.7%,且对于裂缝宽度为1.7 mm的3D打印非金属裂缝样品,其裂缝宽度实测相对误差在6%内。本研究对金属和非金属裂缝的无损检测具有一定借鉴意义。

关键词: 微波显微镜;金属裂缝;非金属裂缝;无损检测;谐振式同轴探头;自动化检测

中图分类号: TP23;TN06

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.10

Research on the detection of metal/non-metallic cracks by microwave microscope

Wang Xueer¹ Ye Ming¹ Liu Fei¹ Bai Yongjiang¹ Yang Fang¹ Xie Yongjun²

(1. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Crack detection is of great practical significance for steel structures and concrete buildings, nuclear power, aviation and other fields. In this paper, a resonant coaxial probe is used to construct a microwave microscope to carry out the study of non-destructive testing methods for metal and non-metallic cracks. First of all, the influence of key parameters such as coupling gap, lifting height and probe material on the detection performance is studied through electromagnetic simulation. Then, the experimental verification was carried out with machined brass, aluminum alloy samples and 3D printed non-metallic samples. The results show that the S_{11} amplitude of the coaxial probe at the resonant frequency can be used for non-destructive detection of cracks on the surface of the material. The coupling gap and lifting height are the main design parameters that affect the detection sensitivity. Compared with the traditional reflective coaxial probe, the detection sensitivity of the resonant probe (S_{11} at the observation frequency point when there is a crack or not) The amplitude difference) has been increased by about 20~30 times; the simulation of the 3.9 mm crack in the width of the metal sample is in good agreement with the measured results. The relative error of the crack width detection is < 7.7%, and for 3D printed non-metallic crack samples with a crack width of 1.7 mm, the measured relative error of the crack width is Within 6%. This research has certain reference significance for the non-destructive detection of metal and non-metallic cracks.

Keywords: microwave microscopy; metal cracks; non-metal cracks; non-destructive testing; resonant coaxial probes; automated detection

0 引言

裂纹是金属和非金属材料的常见缺陷,如未能及时检测到裂纹并采取相应措施防止裂纹进一步扩展,服役条件下的材料可能逐渐退化甚至完全丧失其功能^[1]。因此,裂纹检测是防止结构失效的一种常规而重要的检测手段^[2]。例如,在建筑、航空等领域,疲劳裂纹检测^[3]是全面评价金属及非金属结构的一个重要方面。检测表面裂纹的常见方法有涡流法^[4-5]、射线法^[6]、图像识别法^[7-8]、激光超声法^[9]、磁记忆法^[10]、荧光法^[11]、超声导波法^[12]等。其中,周淑伊等^[8]采用图像识别法对生球进行裂纹检测,检测裂纹的准确率为 96%。Montes 等^[10]可检测由铁磁材料缺陷带来的磁场变化。这些检测方法在成本、精度和适用场景等方面各有所长。

近年来,因其在空间分辨率、亚表面探测能力、非接触性和精度等方面的潜在优势,基于微波的裂纹检测技术引起了广泛关注。目前,常见的裂纹检测微波探头主要分为传输/反射型和谐振型两大类,前者主要有开口波导^[13]、同轴传输线^[14-15]、圆波导^[16-19]等。后者主要有分裂谐振环^[20]、同轴谐振器^[21]、介质谐振器^[22]、平面谐振天线^[23-24]等。Yu 等^[13]基于开口波导实现了宽度大于 2 mm 的金属材质腐蚀裂纹的定量检测。Chen 等^[20]基于 4 个不同谐振频率的 SRR 对称分布结构实现了金属裂纹定位检测。Yang 等^[21]通过监测四分之一波长同轴谐振器的谐振频率偏移实现了缝宽 ≥ 0.6 mm 的金属表面裂纹的检测。Dvorsky 等^[25]基于 Ka 波段开口波导和 SAR 算法实现了 5 mm 长裂纹的检测。通常,谐振类微波探头相比于非谐振类微波探头具有更高的检测灵敏度。

本文研究了基于半波长同轴线谐振器的微波显微镜在裂纹无损检测方面的应用。相比于已有研究,本文结合仿真和实验,着重探讨了探头耦合度、提离高度等对检测灵敏度的影响,将裂缝材质从金属拓展到了非金属,探索了以反射系数幅度而非谐振频率偏移量为直接测试参量获取裂缝信息的可行性,并开发了可对裂缝成像的自动扫描系统。

1 微波显微镜检测裂缝原理及设计

1.1 微波显微镜裂缝检测原理

本文搭建的金属/非金属裂缝检测系统如图 1 所示。半波长同轴线谐振器^[26]通过 SMA 连接器(谐振器顶端与 SMA 连接器底端的间隙称为耦合间隙,是决定探头耦合状态的关键参数)与矢量网络分析仪(简称网分)相连,同轴线末端的内导体伸出一定长度,其产生的近场与探头正下方的裂缝样品发生互作用,进而影响探头的谐

振特性,最终通过谐振特性测量实现裂缝的间接检测。

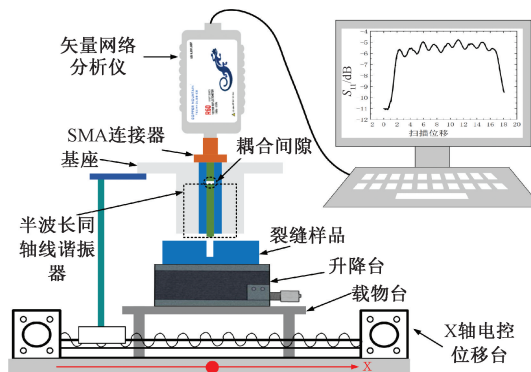


图 1 裂缝检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack detection system

当耦合间隙逐渐增大时,探头耦合状态由过耦合变为临界耦合,并进一步变为欠耦合。通过电控位移台带动探头或样品进行机械扫描运动,使探头沿着 X 轴横跨样品裂缝,并利用网分采集各扫描位置处的回波损耗(S_{11} 参数,表示信号反射性能的参数)。最终通过 S_{11} 参数变化规律获得裂缝信息。

利用同轴探头扫描裂缝样品的等效电路如图 2 所示,回波损耗计算公式如式(1)和(2)所示。

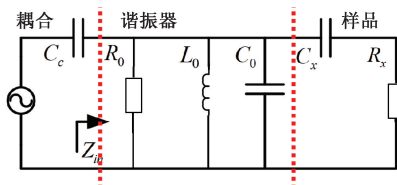


图 2 微波显微镜等效电路

Fig. 2 Microwave microscope equivalent circuit

$$S_{11, dB} = 20 \log \left| \frac{Z_{total} - Z_0}{Z_{total} + Z_0} \right| \quad (1)$$

式中: Z_0 为特征阻抗,总阻抗 $Z_{total} = Z_c + Z_{in}$ 、 Z_c 为耦合电容对应的阻抗,阻抗 Z_{in} 可表示为:

$$Z_{in} = \left(\frac{1}{R_0(1 + (\omega C_x R_x)^2)} + \frac{1}{j\omega L_0} + \frac{j\omega(C_0 + \frac{C_x}{1 + (\omega C_x R_x)^2})}{1 + (\omega C_x R_x)^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, C_0 、 R_0 和 L_0 为半波长开路同轴线谐振器等效电路参数,电容 C_x 与提离高度、探头末端形状/尺寸等因素有关,可近似为 $C_x = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ 、这里 S 为探头末端的横截面积, ϵ_0 为空气介电常数, d 为提离高度, ω 为角频率, R_x 与样品损耗有关。由此可知当谐振器扫描裂缝样品时可

近似为提高高度 d 变大,即 C_x 变小,使谐振峰右偏,导致 S_{11} 发生变化,进而可以根据 S_{11} 的变化提取裂缝信息。

1.2 微波显微镜裂缝检测设计

本文采用的微波显微镜模型如图 3 所示,沿 X 轴移动探头对样品进行位置扫描,以裂缝中点为原点,扫描步长为 0.05 mm,获取每个扫描位置对应的 S_{11} 频率响应曲线,并提取 S_{11} 幅度最小值(简称 S_{11_min})作为直接观测量用于获取裂缝信息。

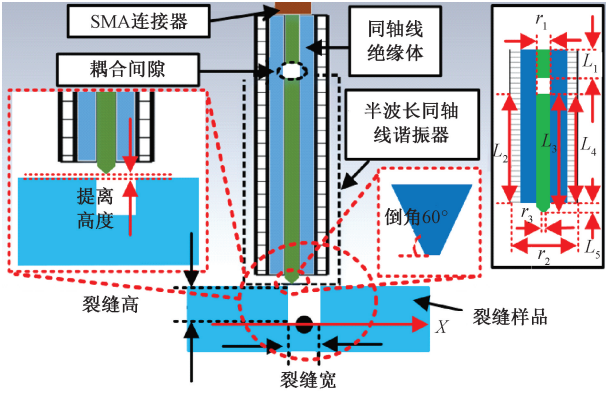


图 3 微波显微镜系统模型

Fig. 3 Microwave microscope system model

如无特别说明,仿真中同轴线谐振器的默认参数如表 1 所示,除介质填充材质为 PTFE,其他均为 PEC。半波长同轴线谐振器存在多个谐振模式,下文默认采用第 4 个模式。提高高度默认 0.1 mm。

表 1 微波显微镜的主要参数

Table 1 Main parameters of microwave microscopy			
几何参数符号	取值/mm	几何参数符号	取值/mm
L_1	10	r_1	0.64
L_2	38	r_2	2
L_3	40	r_3	0.01
L_4	38	L_5	2

同轴探头的谐振频率 f_0 计算公式如式(3)所示。

$$f_0 = n \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r \mu_r} L} \tag{3}$$

式中: n 为模式数($n = 1, 2, 3, \dots$), c 为真空中光速, ϵ_r 和 μ_r 分别为同轴线绝缘体(同轴线内外导体间填充介质)的相对介电常数和相对磁导率, L 为同轴线物理长度。

2 微波显微镜检测裂缝仿真分析

2.1 耦合间隙对裂缝检测的影响

为探究耦合间隙对金属裂缝检测性能的影响,在不同耦合间隙条件下仿真了无裂缝和有裂缝(裂缝深

6 mm、宽 1 mm)的两种待测样,结果如图 4 所示。由图 4(a)可见,仅当耦合间隙为 0.59、0.6 mm 时,有无裂缝引起的 S_{11_min} 变化量 >15 dB,表明此耦合间隙条件下的探头裂缝检测灵敏度高。实际上,通过观察 Smith 圆图可知,探头此时接近临界耦合状态,从而表明探头处于临界耦合时具有最佳的裂缝检测灵敏度。

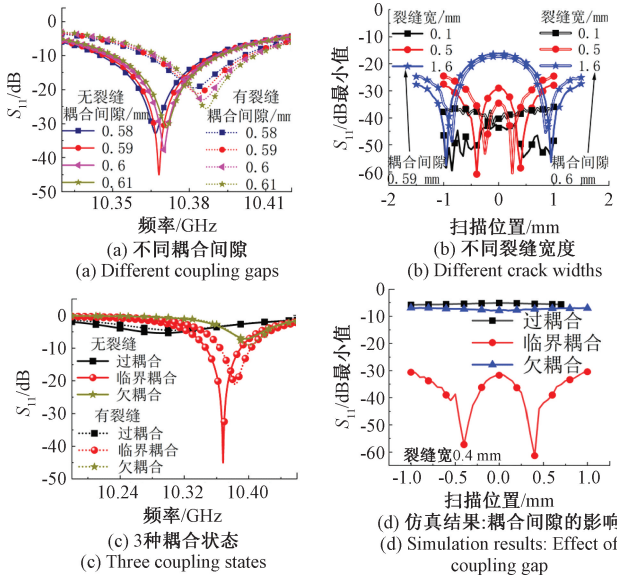


图 4 耦合间隙对深 6 mm 裂缝仿真影响

Fig. 4 Effect of coupling gap on simulation of 6 mm deep cracks

根据得到的最佳耦合间隙,对不同宽度的裂缝进行了扫描仿真,结果如图 4(b) 所示,可以看到 S_{11_min} 的变化规律与裂缝宽度具有良好的对应关系。进一步地,图 4(c) 给出了过耦合、临界耦合、欠耦合 3 种耦合状态(对应的耦合间隙依次为 0.3、0.59、0.9 mm)下的对比仿真结果(裂缝深 6 mm、宽 0.4 mm),由图 4(d) 可知,仅在临界耦合时, S_{11_min} 随扫描位置发生了明显的规律性变化,进一步表明临界耦合是裂缝检测的最优选耦合状态。

2.2 提高高度对裂缝检测的影响

不同场景对裂缝检测的空间分辨率要求不同,而已有研究结果又表明,微波显微镜的空间分辨率随提高高度减小而改善。因此,针对前文图 4(b) 中辨识 0.1 mm 宽金属裂缝效果欠佳的问题,将提高高度从 0.1 mm 减小为 0.01 mm,同时将耦合间隙优化调整为 0.55 mm,对深 6 mm、宽 0.1 mm 的裂缝样品进行仿真,结果如图 5 所示。可发现,当提高高度降至 0.01 mm 时,可清晰地识别出 0.1 mm 宽的裂缝。这一“空间分辨率随提高高度减小而提升”的规律与文献中已报道结果一致。

2.3 谐振器导体材质对裂缝检测的影响

为探究组成微波显微镜的导体材质对裂缝检测性能

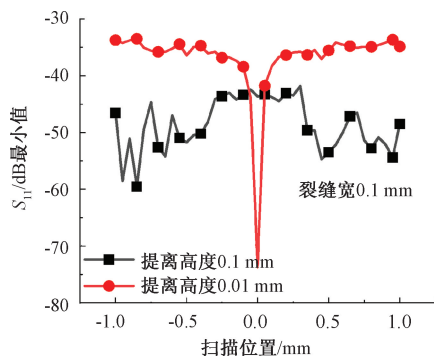


图 5 两种提高高度下对裂缝的仿真

Fig. 5 Simulation of cracks under two lift-off heights

影响,针对以下情形开展了仿真研究:1)同轴线内、外导体材质同时设置为银或黄铜(对应的最佳耦合间隙分别为 0.57、0.56 mm),得到的 S 参数仿真结果如图 6(a)、(b)所示;2)在 1)的基础上,将 SMA 连接器内导体材质也分别设置为银、黄铜,且耦合间隙与 1)相同,相应的仿真结果如图 6(c)所示。从图 6 结果来看,在常见导体材质范围内,探头材质对裂缝检测性能的影响较小。

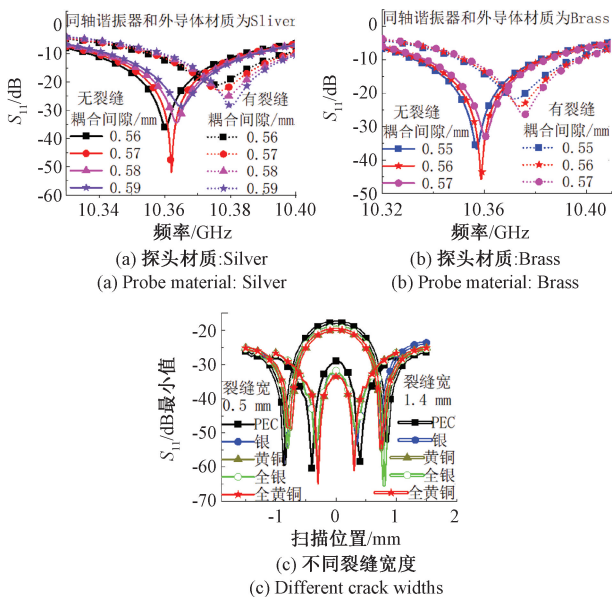


图 6 材质对深 6 mm 裂缝仿真影响

Fig. 6 Effect of material on simulation of cracks with a depth of 6 mm

2.4 同轴线绝缘体尺寸对裂缝检测的影响

为探究同轴线绝缘体尺寸对裂缝检测性能的影响,对比仿真了如下两种情形:1)介质长度为 38 mm(全填充);2)分别在同轴线谐振器的顶端、底端各填充 2 mm 长介质环,其示意图如图 7(a)和(b)所示。

情形 1)对应的最佳耦合间隙为 0.59 mm;情形 2)对

应的最佳耦合间隙为 0.39 mm,其不同耦合间隙下的 S_{11} 仿真结果如图 7(c)所示。在两种填充方式的情况下分别对裂缝深 6 mm、裂缝宽度依次为 0.1、0.5、1.8、2.0 mm 的待测样进行扫描仿真,结果如图 7(d)所示,可知介质填充尺寸减少后,对较窄裂缝(如 0.1 mm)的检测灵敏度变高,有关介质填充对裂缝检测性能影响更系统的研究有待后续进一步开展。

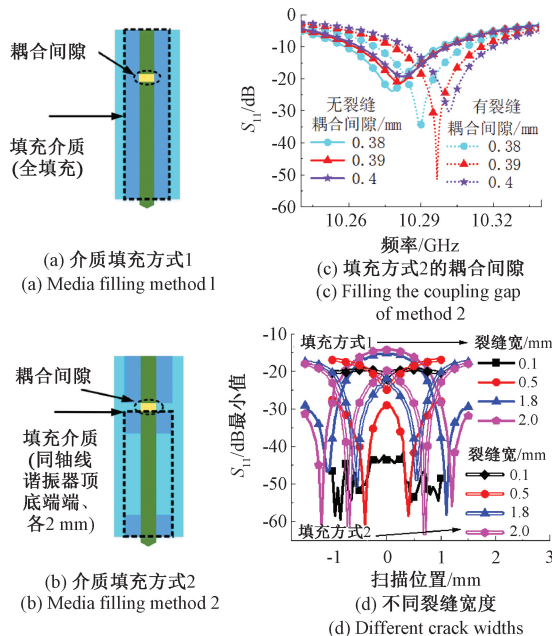


图 7 介质的两种填充方式、不同裂缝宽仿真结果

Fig. 7 Simulation results of two filling methods of media and different crack widths

2.5 非谐振式探头和谐振式探头对比

非谐振式探头可视作前述谐振式探头耦合间隙为 0 的特殊情形,这类探头即是电磁材料参数表征中常用的开路同轴传输线。仿真中的默认参数如下:同轴线特征阻抗设为 50Ω ,同轴线绝缘体为全填充 PTFE,内导体长为 85.96 mm,半径为 0.145 mm;外导体长 83.96 mm,内半径 0.5 mm,外半径 0.595 mm。内、外导体材质均为 PEC。仿真中考虑两种非谐振式探头:1)电耦合探头、2)磁耦合探头,如图 8(a)和(b)所示,此时磁耦合探头同轴内导体正对裂缝中心,探头末端均伸出 2 mm。

对深 6 mm、宽 0.1 mm 的矩形裂缝进行扫描仿真,结果如图 8(c)所示,提高高度为 0.01 mm 时,电耦合探头与谐振式探头均能实现 0.1 mm 裂缝的识别,但后者的灵敏度显著提高(此处灵敏度定义 $S = S_{11,0} - S_{11,1}$, $S_{11,0}$ 表示无裂缝时观测频点处的 S_{11} 幅度, $S_{11,1}$ 为探头扫描至裂缝中央位置时观测频点处的 S_{11} 幅度,对于谐振探头观测频点选取探头扫描至裂缝中心处的谐振频率,由于电耦合探头的灵敏度受观测频点的影响较小,故选取与谐振探

头相近的频点。如图 8(d) 所示,可以看到定频模式下谐振探头的 S_{11} 可比电耦合探头提高了约 20~30 倍);同时,对比发现电耦合探头灵敏度优于磁耦合探头。

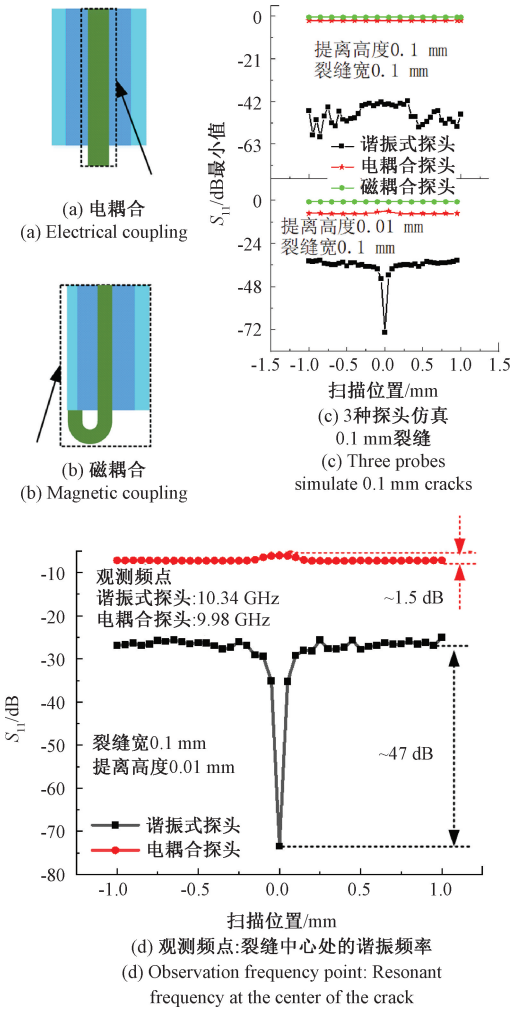


图 8 3 种探头对深 6 mm 裂缝的仿真结果
Fig. 8 Simulation results of three probes for cracks with a depth of 6 mm

2.6 裂缝形状/尺寸的影响

以深 4 mm 矩形裂缝(如图 9(a)所示)和深 5.5 mm 且底部为圆弧形的矩形裂缝(如图 9(b))为例初步探究裂缝形状的影响,仿真结果如图 9(c)所示。由图可知,探头对宽 0.1 mm 以上的裂缝均可识别,且仿真结果显示矩形裂缝底部形状对探头电磁响应的影响可忽略。考虑到实际复杂场景中,裂缝形状、尺寸多种多样,更系统性的研究有待后续开展。

2.7 不同谐振频率/模式数对裂缝检测的影响

前述默认探头设计方案的第 1 个模式谐振频率约 2.59 GHz,第 4 个模式约 10.36 GHz,相应的最佳耦合间隙分别为 0.42、0.59 mm。下面通过模式数选取,观察同

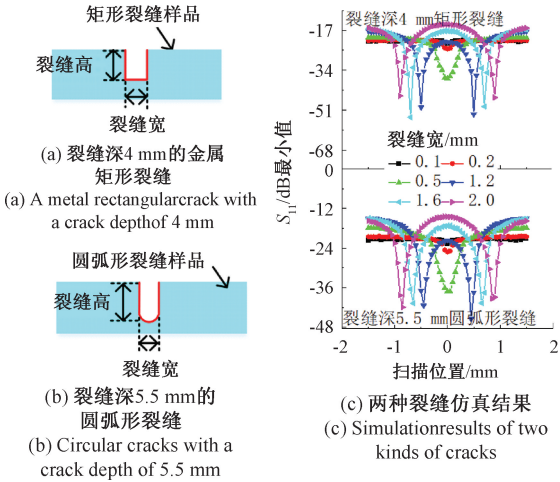


图 9 两种裂缝情况仿真结果
Fig. 9 Simulation results of two fracture situations

一探头工作在不同频点的裂缝检测性能。仿真中提高高度为 0.1、0.01 mm,裂缝深 6 mm、宽 0.1、0.5 mm。仿真结果如图 10 所示,模式数一也可检测裂缝,但其空间分辨率低于模式数四(提高高度为 0.1 mm 时,后者可识别 0.1 mm 宽的裂缝,而前者无法识别)。这与普遍认同的“电磁波长越长,空间分辨率越低”的基本规律吻合。

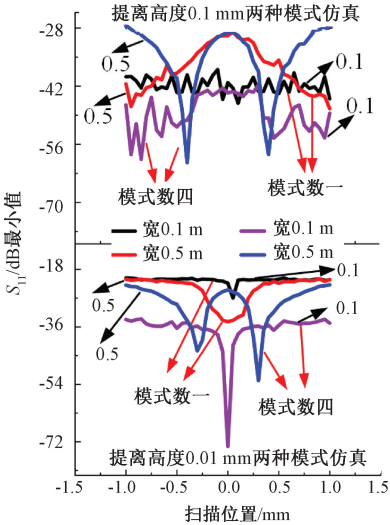


图 10 两种模式下的不同提高高度的两组裂缝宽度仿真结果

Fig. 10 Simulation results of two groups of fracture widths with different lift-off heights under two modes

2.8 同轴线不同长度对裂缝检测性能的影响

在 2.7 小节中,通过模式数选取观察了探头工作频率对空间分辨率的影响。这里进一步通过同轴线谐振器长度的变化来探究空间分辨率与谐振频率的关系。对比仿真的 3 款同轴线设计参数如下:1)同轴线外导体长为

28.2 mm、内导体长为 30.2 mm,选取该探头的第 3 个模式(谐振频率约 10.36 GHz),最佳耦合间隙为 0.65 mm(如图 11(a)所示);2)同轴线外导体长为 48 mm、内导体长为 50 mm,选取该探头的第 5 个模式(谐振频率约 10.36 GHz),最佳耦合间隙为 0.73 mm(如图 11(b)所示);3)探头参数如表 1 所示,耦合间隙为 0.59 mm(如图 4(a)所示)。提高高度为 0.1 mm,裂缝深 6 mm。由图 11(c)可知,同轴线长 50、40 mm 的裂缝检测灵敏度更高。换言之,谐振式探头模式数亦可作为裂缝检测探头优化设计的变量之一。

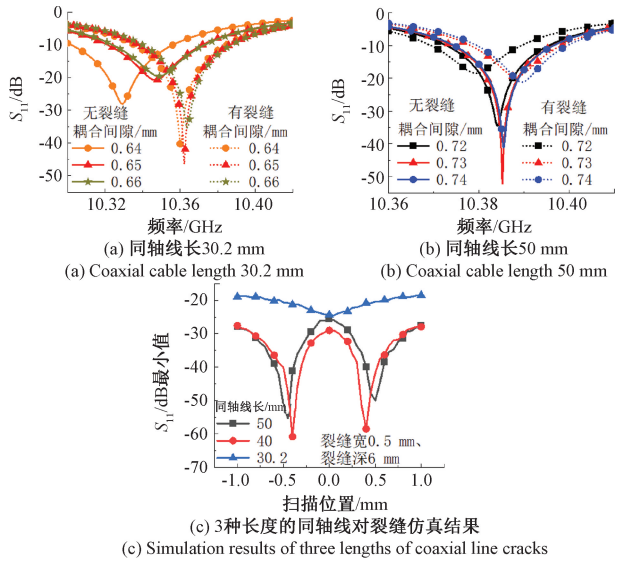


图 11 不同长度同轴线、裂缝宽 0.5 mm 仿真结果

Fig. 11 Simulation results of coaxial lines of different lengths and crack width 0.5 mm

3 实验测量及结果分析

3.1 检测系统设计

本文搭建了如图 12 所示的微波显微镜裂缝检测系统,并开发了自动化扫描程序。用部分介质填充和全介质填充两种同轴探头分别对金属和非金属两类裂缝样品开展了实验验证。利用自开发的程序实现自动化机械扫描和网络分析仪的数据采集(时域模式),最后通过对 S_{11} 幅度随探头扫描位置的变化规律执行求导数处理得到裂缝宽度信息。

3.2 部分介质填充探头检测裂缝

采用如图 13 所示的部分介质填充的同轴探头(下文简称为 1.8 GHz 探头)分别对机加工金属材质和 3 D 打印非金属材质的矩形裂缝开展了实验验证。1.8 GHz 探头的主要参数如表 2 所示,半波长谐振器内导体通过顶部和底部的两个聚四氟乙烯环固定。



图 12 自动化扫描裂缝实验装置

Fig. 12 Automated scanning crack experimental device

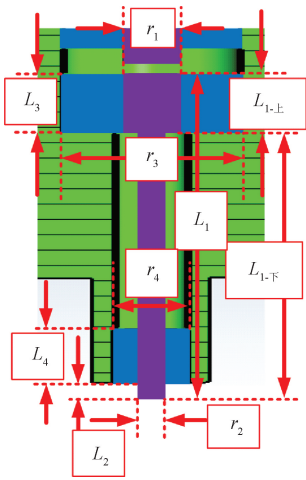


图 13 部分填充探头理论模型

Fig. 13 Partially filled probe theoretical model

表 2 1.8 GHz 探头的主要参数

Table 2 Main parameters of 1.8 GHz probe

几何参数符号	取值/mm	几何参数符号	取值/mm
L_1	61.82	L_4	10
$L_{1-上}$	10.7	r_1	2.35
$L_{1-下}$	51.12	r_2	0.85
L_2	3.12	r_3	8
L_3	10	r_4	3.5

1) 黄铜材质矩形裂缝

黄铜材质的矩形裂缝长、宽、深分别为~76.2、~4.0、~4.0 mm。探头提高高度~2.4 mm,探头移动步长为 0.2 mm。测试频点~1.774 6 GHz。电磁仿真与实测得到的探头空载及机械扫描时的 S_{11} 幅度变化规律分别如图 14(a)、(b)所示,二者吻合良好。需要指出的是,耦合间隙的理论设计值为 1.2 mm,图 13 中的仿真模型对应的耦合间隙为 2.03 mm,该差别是由加工及装配公差所致。

2) 3D 打印非金属材质矩形裂缝

以 3D 打印制备的 PLA 材质矩形裂缝为待测样,开展了非金属材质的裂缝检测。实验装置与图 12 相似。

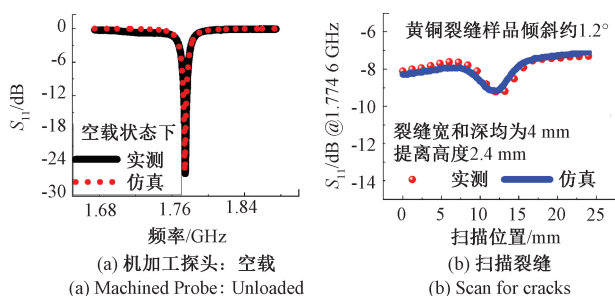


图14 实验结果

Fig. 14 Experimental results

裂缝长、宽、深设计值分别约为12、2、3 mm,其三维模型及实物如图15所示。由于打印机误差,实际裂缝宽度~1.7 mm。当探头处于裂缝中心位置时,通过调节耦合间隙使探头达到临界耦合。

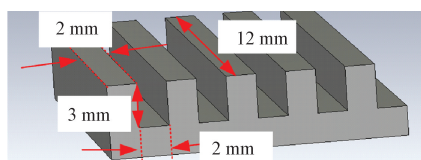


图15 样品3D模型图

Fig. 15 Sample 3D model diagram

探头扫描方式与图17(a)相似,探头提高高度为0.1 mm,扫描区域为12×12 mm²,横向和纵向扫描步长均为0.2 mm。二维扫描结果如图16所示,以~1.746 GHz处的S₁₁幅度为直接观测量时,沿垂直于裂缝长度方向得到的波形周期为~4 mm,与实际值吻合。

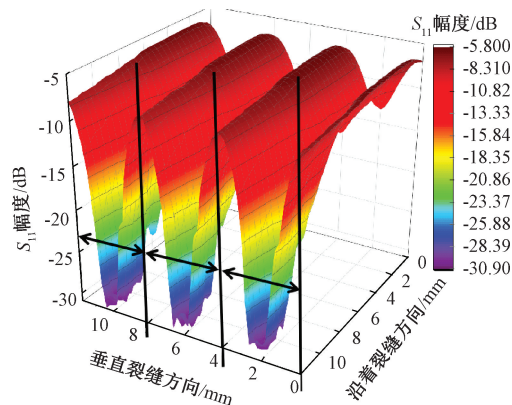


图16 机加工探头扫描3D打印裂缝样品实验结果

Fig. 16 Experimental results of machining probe scanning 3D printed crack sample

3.3 全介质填充同轴探头裂缝检测实验

1) 矩形金属裂缝阵列的二维成像实验

矩形铝合金裂缝阵列的方形柱状单元的长、宽分别

为12、5.6 mm,样品俯视图如图17(a)所示。搭建的实验装置如图17(b)所示,采用同轴线作为半波长谐振器形成了全介质填充型探头。同轴线总长58.95 mm(包含探头底端的伸出长度),探头底端伸出长度为1.5 mm,提高高度~0.5 mm。二维扫描成像检测中,探头横向和纵向移动步长均为0.4 mm。

依据前述仿真研究得到的结论,在二维扫描成像前对探头耦合间隙进行了优化:探头空载(即无样品)时,通过调整半波长谐振器在竖直方向上的位置使探头接近临界耦合。扫描过程中,样品按图17(a)中所示的路径移动,探头保持静止,矢量网络分析仪采集3.61 GHz(对应的谐振模式数为2)处的S₁₁幅度。实验结果如图17(c)所示,裂缝阵列的二维成像结果与实际裂缝位置/尺寸基本一致,表明搭建的微波显微镜裂缝检测系统具有较好的实用性。同时,可以看到二维成像结果在纵向上存在波纹、在横向上存在裂缝宽度从右至左逐渐变窄的现象,这主要是实验系统的机械装置精度有限以及样品存在一定倾斜所致,后续可通过改进机械设计解决。

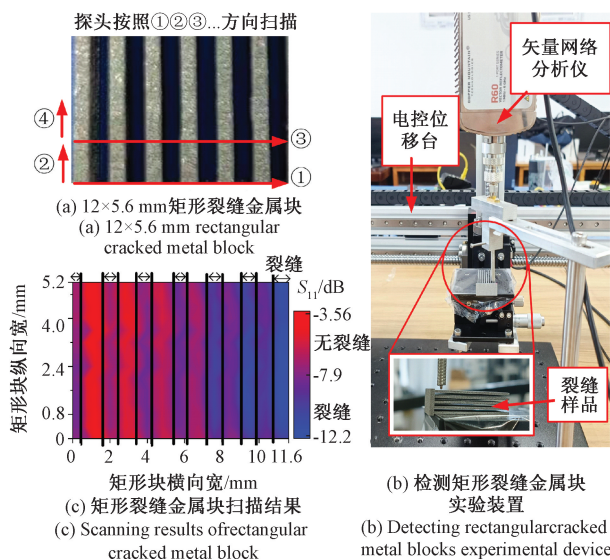


图17 检测矩形金属裂缝装置及实验结果

Fig. 17 Detection device and experimental results of rectangular metal crack

2) 亚表面金属缺陷检测实验

与基于视觉的裂缝检测方法相比,能进行亚表面裂缝缺陷探测是微波法的重要优势。使用与3.2小节中1)相似的探头开展了亚表面金属缺陷检测:待测对象为直径10 mm的黄铜材质圆孔,并在其表面覆盖了一层复印纸模拟遮挡,如图18(a)所示。实验装置如图18(b)所示。同轴线总长43.85 mm,探头末端伸出1.5 mm,提高高度1 mm,探头一维扫描步长~0.36 mm。

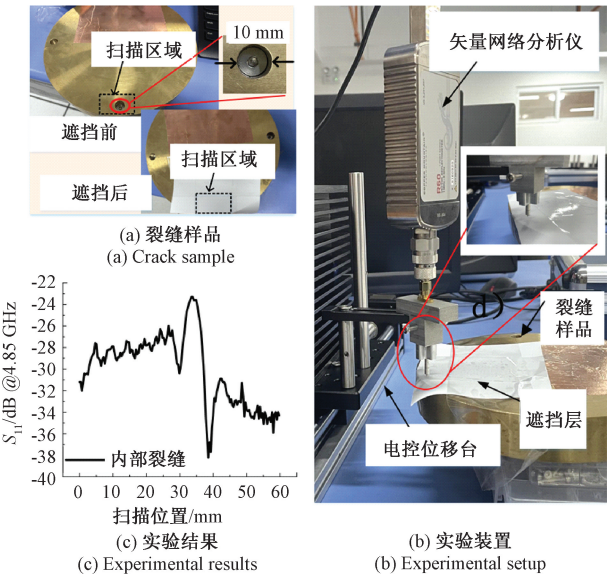


图 18 检测金属内部裂缝装置及实验结果
Fig. 18 Setup and experimental results for detecting internal cracks in metal

扫描测试前,通过调节耦合间隙使探头位于无裂缝区域时接近临界耦合状态,此时谐振频率~4.85 GHz(第 2 个谐振模式)。扫描过程中,探头随电控位移台移动,待测样品保持静止,使用网络分析仪的时域模式,采集 4.85 GHz 处的 S_{11} 幅度。结果如图 18(c) 所示,当探头经过圆孔缺陷时, S_{11} 幅度呈现明显变化,表明搭建的微波裂缝检测系统具有亚表面缺陷检测潜力。需要指出的是,只有表面覆盖层为非金属材质时才能实现亚表面探测。

3.4 实验结果与分析

对 3.2 小节黄铜材质样品进行裂缝宽度提取,其提取方法如下:首先对 S_{11} 幅度随探头扫描位置的变化数据进行拟合,再对其进行一阶求导,得到如图 19 所示波形,该波形最低点和最高点的间距即为裂缝宽度检测结果。裂缝宽度真实值与检测值的对比如表 3 第一行所示,裂缝宽度真实值为 3.9 mm,检测值为 3.6 mm,计算裂缝检测相对误差为 7.69%,表明该裂缝检测系统具有一定的实用价值。

按照与图 19 相同的方法对 3.2 小节 3D 打印非金属材质样品进行数据处理,得到的波形如图 20 所示(覆盖了 3 个裂缝),裂缝宽度真实值与实测值对比结果如表 3 所示,相对误差~±6%。需要指出的是,如果将扫描步长降至 0.2 mm 以下,有望进一步减小裂缝检测的相对误差。

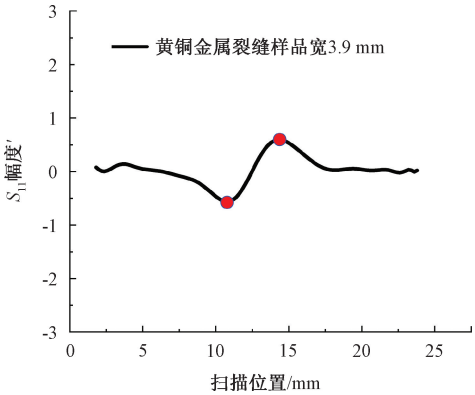


图 19 提取金属裂缝宽度
Fig. 19 Extract metal crack width

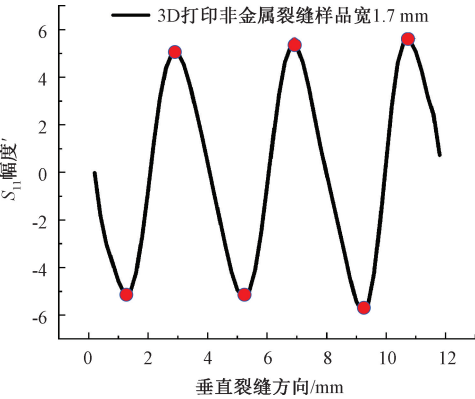


图 20 提取非金属裂缝宽度
Fig. 20 Extract non-metallic crack width

表 3 金属/非金属裂缝提取结果
Table 3 Metal/non-metal crack extraction results

裂缝样品	裂缝真实值/ 测量值/		相对误差/%
	mm	mm	
黄铜板材	3.9	3.6	7.69
3D 打印非金属第 1 条裂缝	1.7	1.8	5.88
3D 打印非金属第 2 条裂缝	1.7	1.6	-5.88
3D 打印非金属第 3 条裂缝	1.7	1.6	-5.88

4 结 论

本文基于微波显微镜开展了金属/非金属裂缝检测的仿真和实验研究。系统性地研究了耦合状态、提高高度、模式数、谐振频率等因素对裂缝检测性能的影响。仿真结果表明:耦合间隙、提高高度、谐振频率对金属裂缝检测灵敏度、空间分辨率有显著影响,探头材质、同轴线绝缘体等因素对裂缝检测性能影响相对较小;和非谐振式同轴探头相比,谐振式探头显著提高了检测精度和灵敏度。利用搭建的自动化测试系统对金属(黄铜、铝合金)裂缝样品和 3D 打印非金属裂缝样品开展了一维和

二维扫描实验,获得了与仿真结果吻合良好的实测结果,并且该系统对黄铜板材裂缝样品检测误差为7.69%,3D打印非金属裂缝样品的检测误差为 $\pm 5.88\%$,验证了本文裂缝检测方法的可行性。机械装置设计的进一步优化、非金属材质的细小裂缝检测和减小扫描步长等将在后续研究中进一步开展。

参考文献

- [1] AI D H, JIANG G Y, LAM S K, et al. Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure—a review [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117: 105478.
- [2] ABOU-KHOUSA M A, RAHMAN M S U, DONNELL K M, et al. Detection of surface cracks in metals using microwave and millimeter-wave nondestructive testing techniques—a review [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-18.
- [3] MUHAMMAD M, SUNGJOON L. Review of electromagnetic-based crack sensors for metallic materials (Recent Research and Future Perspectives) [J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2016, 6(172): 1-22.
- [4] GE J, HU B, YANG C, et al. Surface profile reconstruction of complex cracks using the signals of rotating eddy current testing through the eddy current imaging method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 70(9): 9632-9641.
- [5] 牛国钰,潘巧生,万澳德,等.一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 123-133.
NIU G Y, PAN Q SH, WAN AO D, et al. Micro-hole diameter and depth measurement method utilizing eddy current effect[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 123-133.
- [6] 刘金海,赵真,付明芮,等.基于主动小样本学习的管道焊缝缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(11): 252-261.
LIU J H, ZHAO ZH, FU M R, et al. Active small sample learning based the pipe weld defect detection method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(11): 252-261.
- [7] CHEN Z, LIN X Q, YAN Y H, et al. Noncontact group-delay-based sensor for metal deformation and crack detection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 7613-7619.
- [8] 周淑伊,刘小燕,陈玉如,等.基于可调证明滤波器的球团矿生球图像裂缝检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(7): 125-135.
ZHOU S Y, LIU X Y, CHEN Y R, et al. Research on microwave detection of slits in medium to long distance pressure pipes [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(7): 125-135.
- [9] 颜江涛,赵纪元,訾艳阳,等.激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(1): 223-230.
YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variational mode decomposition of laser ultrasonic signals and quantitative detection of cracks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(1): 223-230.
- [10] MONTES J N M O D, M. R G W, A. V S, et al. Simulation and detection of rectangular magnetic cracks in metallic plates[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42(1).
- [11] 孙晓雪,高晓,刘先亮,等.小螺距螺栓裂纹的荧光渗透检测检出率[J]. *无损检测*, 2023, 45(2): 56-59.
SUN X X, GAO X, LIU X L, et al. Detection rate of fluorescence penetration detection of cracks of small helix bolts[J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(2): 56-59.
- [12] 周文涛,王平,杨元,等.基于编解码的超声导波轨底裂纹识别方法研究[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(2): 130-135.
ZHOU W T, WANG P, YANG Y, et al. Research on identification method of ultrasonic guide rail bottom cracks based on encoding and decoding [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(2): 130-135.
- [13] YU Y T, LI Y B, QIN H, et al. Microwave measurement and imaging for multiple corrosion cracks in planar metals[J]. *Materials & Design*, 2020, 196: 109151.
- [14] YANG S H, KIM K B, KANG J S. Detection of surface crack in film-coated metals using an open-ended coaxial line sensor and dual microwave frequencies[J]. *NDT & E International*, 2013, 54: 91-95.
- [15] DONNELL K M, MCCLANAHAN A, ZOUGHI R. On the crack characteristic signal from an open-ended coaxial probe [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(7): 1877-1879.
- [16] CHEN G, KATAGIRI T, SONG H C, et al. Detection of cracks with arbitrary orientations in a metal pipe using linearly-polarized circular TE_{11} mode microwaves [J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102125.
- [17] UOSHITA S, SASAKI K, KATAGIRI T, et al. Long-range inspection of a pipe with a bend using microwaves [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, 59(4): 1519-1526.
- [18] CHEN G, KATAGIRI T, YUSA N, et al. Experimental investigation on bend-region crack detection using TE_{11} mode microwaves [J]. *Nondestructive Testing and*

- Evaluation, 2022, 37(1): 71-80.
- [19] KATAGIRI T, SASAKI K, SONG H C, et al. Proposal of a TEM to TE₀₁ mode converter for a microwave nondestructive inspection of axial flaws appearing on the inner surface of a pipe with an arbitrary diameter [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1527-1534.
- [20] CHEN Z, LIN X Q, YAN Y H, et al. Noncontact group-delay-based sensor for metal deformation and crack detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(8): 7613-7619.
- [21] YANG X, WANG Z, SU P, et al. A method for detecting metal surface cracks based on coaxial resonator [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16644-16650.
- [22] ZHANG J, HUANG H, HUANG C, et al. A configurable dielectric resonator-based passive wireless sensor for crack monitoring [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5746-5749.
- [23] ZHANG J, HU W, CHEN Z, et al. Reliable crack monitoring based on guided wave through periodically loaded transmission line [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 6799-6809.
- [24] NOROUZI M, MASOUMI N, JAHED H. Nondestructive phase variation-based chipless sensing methodology for metal crack monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [25] DVORSKY M, QASEER M T AI, ZOUGHI R. Crack sizing using dual-polarized microwave SAR imaging [J]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2020: 1-6, DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129478.
- [26] 王雪儿, 叶鸣, 杨放, 等. 基于微波显微镜的金属裂缝检测仿真研究 [C]. 中国电子学会, 2023: 176-178.
- WANG X E, YE M, YANG F, et al. Simulation research on metal crack detection based on microwave microscope [C]. China Electronics Society, 2023: 176-178.

作者简介



王雪儿, 2022 年于蚌埠学院获得学士学位, 现为西安建筑科技大学硕士研究生, 主要研究方向为微波无损检测。

E-mail: 1074991782@qq.com

Wang Xueer received her B. Sc. degree from Bengbu University in 2022. She is now a M. Sc. candidate at Xi'an University of Architecture and Technology. Her main research interest includes microwave non-destructive testing.



叶鸣(通信作者), 2014 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安建筑科技大学信息与控制工程学院教授, 主要研究方向为微波无损检测技术。

E-mail: yeming@xauat.edu.cn

Ye Ming (Corresponding author) received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2014. He is now a professor at the School of Information and Control Engineering at Xi'an University of Architecture and Technology. His main research interest includes microwave non-destructive testing technology.