

# 水冷包层模块钨表层裂纹的微波无损检测

任文彬, 李勇, 危洪波, 王若男, 陈振茂

(西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

**摘要:** 聚变堆真空室包层模块在服役过程中, 由于高热负荷钨层表面可能产生裂纹, 形成安全隐患, 严重影响聚变堆结构完整性及服役寿命, 因此, 针对水冷包层模块钨表层裂纹实施有效的无损检测手段至关重要; 通过数值仿真, 探究了 Ka 波段内微波检测信号对钨层表面无缺陷区域及裂纹处的响应特性; 基于仿真结果, 搭建了微波检测水冷包层模块钨表层裂纹试验平台, 采用所提 38~40 GHz 频段同轴探头对不同深度钨表层裂纹试件进行平面扫描; 在各扫描点处, 采用幅值倒频谱和基于奇异值分解的杂波抑制方法对检测信号进行处理, 实现了对裂纹的有效成像及定位, 定位误差不超过 0.5 mm; 同时, 利用检测时域信号特征, 建立信号特征与裂纹深度间的映射关系, 对裂纹深度的评估误差在 2% 以内; 研究表明, 基于微波反射法和所提方法对水冷包层模块钨表层裂纹进行成像及定量检测的有效性。

**关键词:** 电磁无损检测; 微波检测; 水冷包层模块; 裂纹; 可视化检测; 定量评估

## Microwave Nondestructive Detection of Tungsten Surface Cracks in Water-Cooled Blanket Modules

REN Wenbin, LI Yong, WEI Hongbo, WANG Ruonan, CHEN Zhenmao

(School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** During the service process of the fusion reactor vacuum chamber blanket module, it is possible to generate cracks may occur on the surface of the high heat load tungsten layer, resulting in potential safety hazards, and significantly affecting the structural integrity and service life of the fusion reactor. Therefore, it is of crucial to perform an effective non-destructive testing method for surface cracks in the tungsten layer of water-cooled blanket modules. Through numerical simulation, this paper investigates the response characteristics of Ka-band microwave detection signals in defect-free and cracked regions of the tungsten layer, and establishes an experimental platform for microwave detection on tungsten surface cracks in water-cooled blanket modules. Based on simulation results, a coaxial probe with a frequency band of 38~40 GHz is applied to conduct the planar scanning of tungsten specimens with cracks at different depths, and to detect signals at each scanning point by using amplitude cepstrum and singular value decomposition-based clutter suppression methods, effectively achieving the imaging and localization of cracks, with a localization error of within 0.5 mm. Furthermore, the features of time-domain signal are used to establish a mapping relationship between signal characteristics and crack depth, with an assessment error for crack depth within 2%. The results demonstrate the effectiveness of the microwave reflection and proposed methods in imaging and quantitatively detecting surface cracks in the tungsten layer of water-cooled blanket modules.

**Keywords:** electromagnetic nondestructive testing; microwave testing; water-cooled blanket module; crack; visual detection; quantitative assessment

## 0 引言

聚变反应堆中的包层模块是聚变堆关键堆内部件之

一, 位于等离子体真空室的外围, 承担着包括能量转换与热量移除、氦增殖反应实现以及中子与  $\gamma$  射线辐射屏蔽等重要功能<sup>[1]</sup>。水冷包层模块是中国聚变工程实验堆

收稿日期:2025-08-03; 修回日期:2025-09-10。

基金项目:国家科技部磁约束核聚变能发展研究专项项目(2019YFE03130003);国家自然科学基金资助项目(52177007, 52311540018)。

作者简介:任文彬(2001-),男,硕士。

李勇(1978-),男,博士,教授。

引用格式:任文彬,李勇,危洪波,等. 水冷包层模块钨表层裂纹的微波无损检测[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(2): 73-79.

(CFETR, Chinese fusion engineering test reactor) 的候选包层设计方案之一<sup>[2]</sup>, 其结构主要由第一壁、氦增殖区、中子倍增层和冷却系统构成<sup>[3]</sup>。在聚变堆极端运行环境之下 (典型工况包括 14.1 MeV 高能中子辐照、10 MW/m<sup>2</sup> 量级的热流负荷以及瞬态热冲击等<sup>[4]</sup>), 为其第一壁选择性能可靠的面向等离子体材料至关重要。经过系统的材料性能评估, 钨凭借优异的物理特性 (高熔点、低溅射率、强抗热负荷能力与抗等离子体侵蚀能力等) 被确定为最优的面向等离子体材料选择, 同时采用高热导率的铜合金作为热沉材料, 抗辐照性能良好的低活化马氏体钢作为结构材料<sup>[5]</sup>, 通过先进的连接工艺形成水冷包层模块的第一壁复合结构。然而, 在聚变堆实际运行工况下, 钨表层会受到来自等离子体放电的周期性高热负荷作用, 这种极端热机械载荷可能导致材料产生热疲劳裂纹, 裂纹的形成与扩展将引发包层结构的功能退化甚至失效<sup>[6]</sup>, 严重威胁聚变堆的安全稳定运行。因此, 对水冷包层模块钨表层裂纹实施高效无损定量检测可为保障堆内部件结构完整性及聚变堆运行安全起到重要支撑作用。目前, 常规无损检测方法 (如目视检测法<sup>[7]</sup>、红外热成像检测法<sup>[8]</sup>、涡流检测法<sup>[9]</sup>等) 对水冷包层模块钨表层裂纹实施检测时都有一定局限性, 如目视检测法受限于操作人员的主观经验判断, 对于微米级裂纹或位于狭窄间隙处的缺陷检出率显著降低; 红外热成像检测法需要预先在钨表面喷涂哑光黑色涂层以提高热辐射率, 这种处理可能会引入杂质元素污染等离子体环境, 在聚变堆包层模块检测中的应用受到制约; 涡流检测法在检测由几千个模块组成的包层结构时耗时长、效率低<sup>[10]</sup>。

微波检测是一种基于电磁波与材料相互作用机理的新型无损检测技术, 其物理基础在于微波在传播过程中遇到不同介质界面时, 会因材料电磁特性 (如介电常数  $\epsilon$ 、磁导率  $\mu$ ) 的差异而产生反射、透射、散射等波动现象<sup>[11]</sup>。具体而言, 当微波入射至空气—金属异质界面时, 由于金属的高电导率特性, 电磁波几乎发生全反射<sup>[12]</sup>; 而在空气—非金属介质界面, 电磁波则同时呈现反射、透射及散射的复合行为<sup>[13]</sup>。通过精确测量反射波与透射波的幅值、相位的变化, 并结合逆问题求解算法, 可反演推导出被测材料的电磁参数分布及内部缺陷特征 (如裂纹尺寸、取向及空间分布等)<sup>[14]</sup>。相较于传统无损检测技术, 微波检测具有宽频带可调谐性、空间分辨率高、非接触测量模式以及无电离辐射危害等显著优势<sup>[15]</sup>, 近年来在航空航天、新能源装备及核工业等领域获得了广泛研究与应用, 可为水冷包层模块钨表层裂纹定量检测提供进一步支撑。文献 [16] 采用频率调制连续波雷达系统, 通过监测金属基底与聚合物涂层界面处的反射系数相位偏移, 实现了对粘接层气孔缺陷

的实时在线监测, 检测灵敏度达到微米级。文献 [17] 采用双脊波导探头, 结合 Ka 波段矩形波导的窄波束特性, 对聚乙烯结构中的背面减薄缺陷和内部夹杂缺陷实现了高精度层析成像。文献 [18] 采用 Ka 波段喇叭天线, 对玻璃纤维增强复合材料局部损失缺陷进行了可视化定量检测。文献 [19] 使用矩形波导, 利用微波网络分析仪建立了碳纤维复合材料中间层纤维取向角与极化相关反射损耗的定量关系模型。此外, 更高频段的太赫兹波也被成功应用于聚乙烯构件减薄缺陷深度尺寸的定量评估<sup>[20]</sup>。目前微波检测主要应用于金属表面及非金属材料内部和背面的缺陷检测<sup>[21]</sup>, 对水冷包层模块钨表层裂纹检测的相关研究有待深入展开。微波无损检测技术凭借其独特优势, 在未来聚变反应堆有限的维修窗口期内, 具备实现快速高效检测的能力, 在聚变堆包层模块表面裂纹检测中展现出显著的应用潜力。

相较于传统微波传感器 (如矩形波导和喇叭天线), 微波同轴探头在水冷包层模块钨表层裂纹检测中展现出显著的技术优势<sup>[22]</sup>: 1) 采用横电磁波 (Transverse Electromagnetic Wave) 传播模式, 具有更低的传输损耗和更宽的可用频带; 2) 同轴探头的近场聚焦特性使其对表面微裂纹的检测灵敏度提升至微米量级; 3) 探头的小型化设计特别适用于水冷包层模块中狭窄空间 (如第一壁冷却通道间隙) 的检测需求。文献 [23] 利用同轴探头, 在 26.5~35 GHz 频段下实现了对航空发动机热障涂层厚度减薄缺陷的定量评估, 验证了同轴探头在高精度无损检测中的可行性。有鉴于此, 本文基于微波反射法, 通过数值仿真, 探究水冷包层模块钨表层裂纹在 Ka 波段微波检测中的信号响应特性。同时, 搭建微波检测试验平台, 进一步研究基于同轴探头的微波定量检测水冷包层模块钨表层裂纹的技术关键。

## 1 钨表层裂纹微波检测原理及有限元仿真

水冷包层模块钨表层裂纹的微波无损检测原理如图 1 所示。检测时, 同轴探头在极小提离的工况下, 发射主方向垂直于钨层金属表面的电磁波, 电磁波传播到钨表面时, 入射波在空气—钨异质界面处发生反射, 反射波再由同轴探头拾取。通过矢量网络分析仪计算后输出微波检测信号, 即反射系数  $S_{11}$ , 其与金属钨表面状况紧密相关。

同轴探头对钨模块进行二维平面扫描, 当探头移动至裂纹上方时, 入射波在裂纹边缘处发生大量散射, 反射信号的幅值和相位均发生变化,  $S_{11}$  也随之改变。通过分析有无裂纹处  $S_{11}$  信号的变化即可获得钨层表面裂纹的信息。

基于以上原理, 建立水冷包层模块钨表层裂纹微波检测有限元三维仿真模型, 模型截面如图 2 所示, 该模

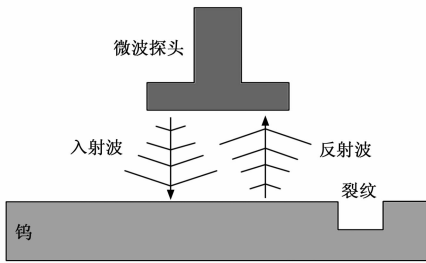


图 1 钨表层裂纹微波反射法检测原理示意图

型组成主要有: 同轴探头和含有表面裂纹缺陷的钨层试件。同轴探头的中心导体、内屏蔽层以及接口外壳均采用高导电材料, 在仿真中被理想化为完美电导体, 探头内部的电介质填充材料设定为低密度聚四氟乙烯, 与实际填充材料保持一致。在钨表面预设了一条贯穿裂纹, 裂纹的材料属性设置为空气。在仿真中, 同轴探头距试件表面的提高距离设置为 0.1 mm, 以模拟实际检测过程中极小提高的工况条件。探头发射的电磁波模式为 TEM 波, 工作频率在 26.5~40 GHz (Ka 波段), 共设置 1 351 个频率采样点, 频率间隔为 0.01 GHz。在 Ka 波段下, 电磁波在钨层中的趋肤深度仅为微米量级, 远小于钨层高度, 微波能量几乎无法穿透钨层, 因此仿真建模时无需构建完整的第一壁多层结构, 仅需建立钨层试件的简化模型即可。仿真模型的尺寸参数依据实际器件规格设定, 如表 1 所示, 材料的电磁参数如表 2 所示<sup>[24-25]</sup>。

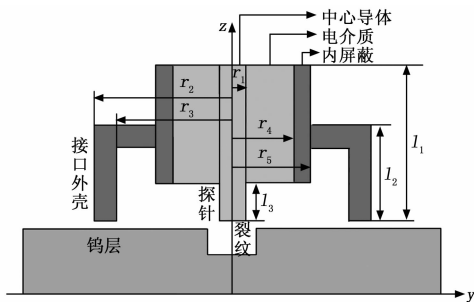


图 2 仿真模型截面示意图

表 1 仿真模型中尺寸参数设置

仿真参数	参数值/mm
中心导体半径 $r_1$	0.455
接口外壳外半径 $r_2$	3.940
接口外壳内半径 $r_3$	2.875
电介质半径 $r_4$	1.250
内屏蔽半径 $r_5$	1.330
同轴探头长度 $l_1$	1000
接口外壳长度 $l_2$	7.500
探针长度 $l_3$	5.500
钨层(长×宽×高)	45×12.5×2
裂纹(长×宽×深)	12.5×0.2×0.5

表 2 材料电磁参数设置

电磁参数	空气	钨	聚四氟乙烯
电导率 $\sigma/(S \cdot m^{-1})$	0	$1.8 \times 10^7$	0
相对磁导率 $\mu_r$	1	1	1
相对介电常数 $\epsilon_r$	1	/	2.1

仿真参数设置完成后, 对模型进行网格划分, 考虑到模型结构尺寸与电磁波波长的关系, 需要细化网格, 网格尺寸的最大值应该小于波长的 1/5, 最小值应远小于网格尺寸的最大值<sup>[26]</sup>。在仿真模型中, Ka 波段电磁波在电介质中传播的最小波长为 5.175 mm, 计算得到网格尺寸的最大值应小于该波长的 1/5, 即小于 1.035 mm, 因此, 在仿真中设置网格尺寸最大值为 1 mm, 最小值设置为 0.01 mm。还需要对裂纹部分进行额外的细化处理, 对于裂纹这部分长方体空气域, 网格尺寸的最大值小于裂纹最小特征尺寸的二分之一, 即小于 0.1 mm, 在仿真中设置为 0.09 mm, 最小值设置为 0.01 mm。同轴探头一端为入射端, 主要作用为输入微波激励, 另一端为发射端口, 主要负责将微波检测信号发射传输至钨层试件表面。

为研究裂纹对微波信号的扰动特性, 将同轴探头分别布置在无裂纹区域和裂纹正上方, 计算得到这两种情况下不同频率点的微波反射系数  $S_{11}$  进行对比分析。基于  $S_{11}$  频域信号的幅值特性, 进一步计算其绝对值差分曲线 ( $|\Delta S_{11}|$ ), 用于表征裂纹引起的微波信号扰动强度, 仿真结果如图 3 所示。

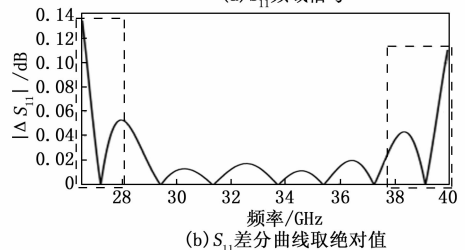
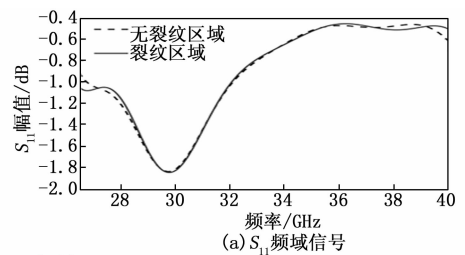


图 3 仿真得到的  $S_{11}$  信号曲线

仿真结果表明, 在 26.5~28 GHz 和 38~40 GHz 两个频段范围内, 裂纹区域与无裂纹区域的  $S_{11}$  信号幅值差异明显, 体现了微波检测钨表层裂纹的可行性。进一步比较这两个频段内信号的响应灵敏度, 计算公式为:

$$S = \frac{|\Delta S_{11}|_{\max}}{|S_{11}^{\text{no crack}}|_{\max}} \quad (1)$$

式中,  $S$  为灵敏度,  $|\Delta S_{11}|_{\max}$  为所选频段内  $S_{11}$  差分信号绝对值的最大值,  $|S_{11}^{\text{no crack}}|_{\max}$  为所选频段内无裂纹区域  $S_{11}$  幅值绝对值的最大值。根据公式, 可以计算出在 26.5~28 GHz 频段内检测灵敏度为 0.112, 与之相比, 在 38~40 GHz 频段内检测灵敏度为 0.180, 因此最终选择 Ka 波段中 38~40 GHz 这一频段作为最优工作频段。

## 2 钨表层裂纹微波检测试验研究

### 2.1 试验平台搭建

如图 4 所示, 搭建的水冷包层模块钨表层裂纹微波检测系统由矢量网络分析仪 (Keysight N5224A)、扫描台及其控制器、计算机、同轴探头和钨铜片试件组成。其中, 同轴探头的尺寸参数与仿真设置一致。矢量网络分析仪端口与同轴探头相连, 同轴探头通过夹具固定在扫描台上, 计算机通过扫描台控制器来实现探头对钨铜片试件的二维平面扫描。矢量网络分析仪在计算机的控制下, 产生能量为 5 dBm, 工作频段为 38~40 GHz (扫描步长为 0.01 GHz, 扫频点数为 201) 的电磁波激励信号, 驱动同轴探头向外辐射微波。微波经空气域后垂直入射到钨铜片试件的钨层金属表面, 同轴探头接收反射回来的微波信号, 经矢量网络分析仪计算分析后得到探头位置处的微波反射信号  $S_{11}$ , 即微波检测信号, 并传输给计算机进行储存。

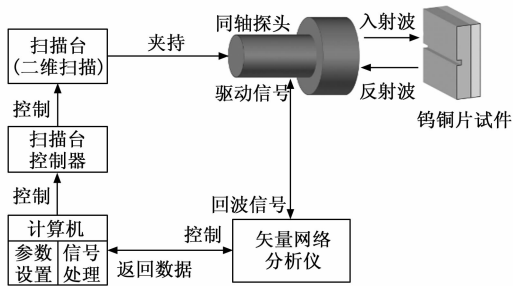


图 4 水冷包层模块钨表层裂纹微波检测系统框架图

试验制备了两组钨铜片试件, 长为 45 mm, 宽为 12.5 mm。试件上层为钨, 厚度为 2 mm, 在其表面预置了三条宽度为 0.2 mm、深度不同的贯穿裂纹; 下层为铜, 厚度为 1 mm, 与钨层连接在一起。两组钨铜片试件表面裂纹的深度分别为 0.3、0.5、0.6 mm 和 0.7、0.9、1.0 mm。探头紧贴试件进行二维平面扫查, 扫查区域为如图 5 所示的矩形区域, 同轴探头从坐标原点  $O$  点出发, 以  $y$  轴为扫查轴,  $x$  轴为步进轴, 进行二维扫查。试验搭建的微波检测系统中所使用扫描台的最小步进长度为 0.5 mm, 从电磁场理论角度考虑, 试验中使用的同轴探头其中心导体直径为 0.91 mm, 外壳直径为

7.88 mm, 电磁波能量在空间中主要集中在中心导体和外壳之间的区域, 越靠近中心导体, 电场和磁场强度越大。扫描台最小步进长度 0.5 mm 小于外壳和中心导体的直径, 以 0.5 mm 为步长在对试件进行扫查时同轴探头有能力拾取到含有缺陷信息的反射信号。同时, 为获得尽可能多的采样数据, 提高成像分辨率, 探头在  $x$  轴和  $y$  轴的扫查步长均设定为系统机械允许的最小值, 即 0.5 mm。

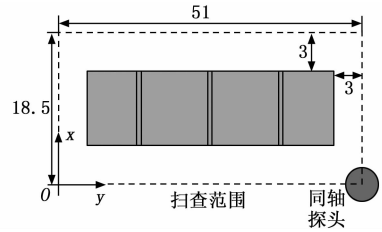


图 5 扫描区域示意图 (单位: mm)

### 2.2 试验结果与讨论

根据仿真结果, 提取同轴探头在各扫查点处对应的  $S_{11}$  幅值均值作为信号特征, 绘制钨铜片试件基于  $S_{11}$  幅值均值的平面扫描成像图, 结果如图 6 所示。

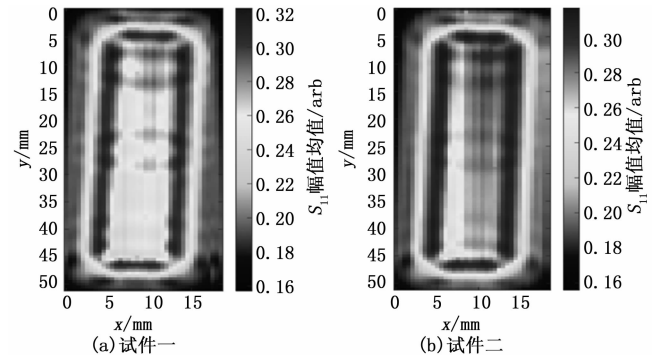


图 6 试件基于  $S_{11}$  幅值均值的平面扫描成像图

当入射波传播至钨模块边界和裂纹边缘时, 由于介质特性的突变, 电磁波发生了显著的散射现象, 导致同轴探头接收到的反射波能量降低,  $S_{11}$  平均幅值相应减小。由图可以看到, 裂纹深度与散射的强度呈正相关关系, 裂纹越深, 其边缘处的散射效应越强, 在成像图中的对比度越高, 成像效果越理想。然而, 对于试件一中深度最浅 (0.3 mm) 的裂纹, 其成像效果较差, 并且图像所获信息有限, 无法提供准确的裂纹位置与深度信息。基于此, 对实验数据的处理主要包括以下步骤: 1) 采用幅值倒频谱处理对同轴探头平面扫描成像结果进行优化, 以提升图像分辨率并增强对浅裂纹的检测能力; 2) 对实验数据实施杂波抑制处理, 依据  $S_{11}$  幅值均值随  $y$  轴坐标变化的扫查曲线, 实现裂纹的精准定位; 3) 提取新的信号特征, 建立信号特征和裂纹深度之间的映射关系, 从而实现对裂纹深

度的准确评估。数据处理流程如图 7 所示。

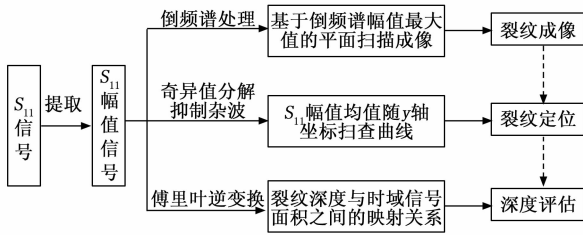


图 7 数据处理流程图

### 2.3 基于 $S_{11}$ 频域信号幅值倒频谱处理的裂纹成像

为了获得更好的成像效果,对  $S_{11}$  频域信号进行倒频谱处理,选择幅值倒频谱分析,具体计算公式为:

$$S_{cep} = \int_{-\infty}^{+\infty} |\log S_{11}(f)| e^{i2\pi f} df \quad (2)$$

式中,  $S_{cep}$  为倒频谱幅值;  $S_{11}(f)$  为频率为  $f$  时  $S_{11}$  信号的幅值。

通过对每个扫描点的  $S_{11}$  信号幅值进行倒频谱处理后得到每个扫描点的幅值倒频谱曲线,当同轴探头位于裂纹正上方时,幅值倒频谱曲线如图 8 所示,图中横坐标为光学深度,其步长的计算公式为:

$$\Delta d = \frac{c}{2\Delta f} \quad (3)$$

式中,  $c$  为真空中的光速,取  $3 \times 10^8$  m/s;  $\Delta f$  为扫描带宽,为 2 GHz;  $\Delta d$  为光学深度步长,根据公式计算出为 75 mm。

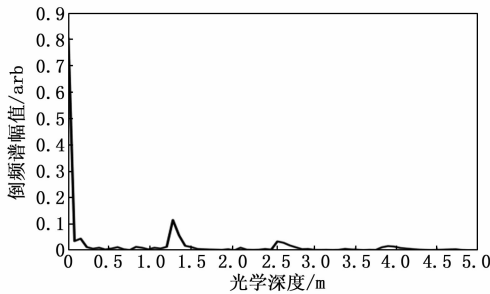


图 8  $S_{11}$  频域信号幅值倒频谱曲线

由图 8 可以看出,回波能量主要集中在倒频谱曲线的最大值处,因此,提取每个扫描点幅值倒频谱曲线的最大值作为信号特征用于缺陷成像。试件基于倒频谱幅值最大值的平面扫描成像如图 9 所示,由图可见,同轴探头对浅裂纹的检测效果有所改善。采用同轴探头结合幅值倒频谱处理可实现对钨铜片试件钨层裂纹的检出和成像,并且裂纹越深,裂纹边缘的图像区域颜色越深,裂纹越明显。在完成对裂纹的成像后,需进一步对其位置进行精确定位。

### 2.4 基于奇异值分解的裂纹定位

由于环境噪声的影响,为实现对裂纹的精确定位,



图 9 试件基于倒频谱幅值最大值的平面扫描成像图

需对采集到的  $S_{11}$  信号进行杂波抑制处理。基于奇异值分解 (SVD, singular value decomposition) 的微波近场检测杂波抑制方法属于一种子空间算法,主要用于消除近场成像或探测中强直达波对目标信号的干扰,其基本原理是将信号矩阵分解为正交矩阵和对角矩阵的乘积,对角矩阵的元素是信号矩阵的奇异值,按从大到小的顺序排列。由于直达波信号能量远高于目标反射信号,在奇异值谱中通常对应最大的前两个或前三个奇异值。通过将这些主导奇异值置零,并利用剩余奇异值重构信号矩阵,即可有效抑制直达波干扰,同时保留包含目标信息的弱信号成分。经过 SVD 处理后,绘制试件  $x$  轴中心位置处 ( $x=9.25$  mm)  $S_{11}$  平均幅值随  $y$  轴坐标的变化曲线,如图 10 所示。在直达波抑制后,钨模块与周围环境的边界特征更加突出,模块内部的幅值均值要高于外围。对于裂纹定位,由于微波在裂纹边缘处发生明显的散射,裂纹边缘的幅值均值低于裂纹中心,因此裂纹中心位置恰好对应幅值均值曲线的局部极大值点,从而实现了裂纹的定位。通过对扫描曲线的分析,并结合裂纹的实际位置信息,得到裂纹的定位结果如表 3 所示,定位误差不超过 0.5 mm。在完成裂纹定位后,需进一步开展裂纹深度的定量评估。

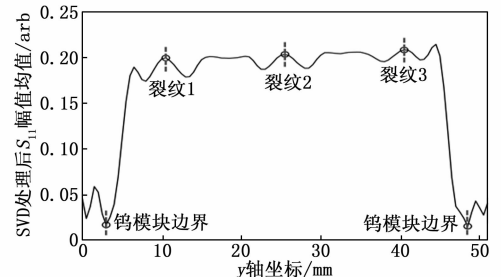


图 10  $S_{11}$  幅值均值随  $y$  轴坐标扫描曲线

表 3 裂纹定位结果

裂纹编号	实际位置/mm	评估位置/mm	评估误差/mm
1#,4#	10.5	10,10.5	0.5,0
2#,5#	25.5	25,25.5	0.5,0
3#,6#	40.5	40,41	0.5,0.5

### 2.5 裂纹深度定量评估

为了定量评估裂纹的深度，提取同轴探头在不同深度裂纹正上方位置处对应的  $S_{11}$  频域信号，对其进行傅里叶逆变换，获得微波检测时域信号，如图 11 (a) 所示。

由图 11 (a) 可以发现，随着裂纹深度的增加，时域信号曲线与时间轴所围成的面积（即时域信号面积）呈现明显的增大趋势。这一现象可以从电磁波传播机理进行解释：当微波入射至金属表面裂纹时，会在裂纹开口处产生初始反射，同时部分电磁能量会进入裂纹腔内并经历多次反射过程。随着裂纹深度的增加，电磁波在裂纹腔内的传播路径延长，导致多次反射信号的时延增大，从而在时域信号中形成幅值更高的回波峰，这些增强的回波分量直接导致时域信号积分面积的增加。基于这一物理机制，提取同轴探头在每条裂纹处检测的时域信号面积作为信号特征，任选其中 4 条不同深度裂纹的数据，绘制时域信号面积与裂纹深度的拟合曲线，采用样条插值函数拟合，剩余两条裂纹的数据用来检验，结果如图 11 (b) 所示。由图可见，时域信号面积随裂纹深度的增加而增大，利用该拟合曲线对余下两条裂纹的深度进行评估，评估结果如表 4 所示。表 4 显示利用所提方法对裂纹深度进行评估的相对误差不超过 2%，说明时域信号可以对裂纹的深度进行定量评估。仿真和试验研究均表明，基于微波反射法，在 38~40 GHz 频段内可以对水冷包层模块第一壁的钨表层裂纹实现有效成像及定位，利用时域信号特征（即时域信号面积）可对

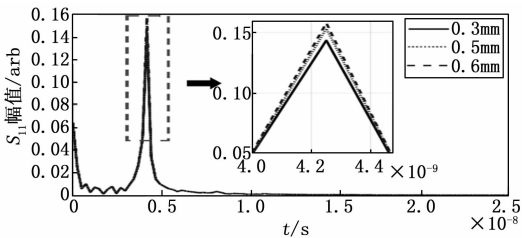
裂纹深度进行定量评估。

### 3 结束语

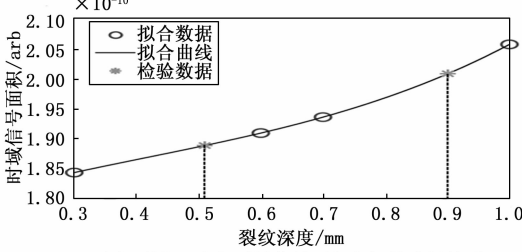
本文通过有限元仿真及试验研究，探究了微波检测水冷包层模块钨表层裂纹的可行性。仿真研究证明了在 Ka 波段中 38 ~ 40 GHz 频段内  $S_{11}$  信号对钨层金属表面无缺陷区域和裂纹处的响应存在明显差异。基于此，搭建了微波检测试验平台，在 38~40 GHz 频段内对所制备的钨铜片试件进行二维平面扫描。对  $S_{11}$  信号进行幅值倒频谱处理，提取倒频谱幅值最大值作为信号特征实现对试件的扫描成像。采用奇异值分解抑制杂波后，基于  $S_{11}$  平均幅值随 y 轴坐标变化的扫描曲线对裂纹进行定位，定位误差不超过 0.5 mm。根据  $S_{11}$  时域信号面积随裂纹深度的增加而增大的映射关系，对裂纹深度进行定量评估，评估误差小于 2%。

#### 参考文献：

- [1] 李 杰. CFETR 固态水冷包层中子学设计及氚增殖影响因素研究 [D]. 合肥：中国科学技术大学，2022.
- [2] 高 俊. 聚变堆水冷包层第一壁倾斜超汽化结构强化换热研究 [D]. 合肥：安徽大学，2023.
- [3] 于向滨. 托卡马克装置水冷固态包层实验模块的结构设计及仿真分析 [D]. 烟台：烟台大学，2024.
- [4] 凌启鑫, 马学斌, 刘松林. CFETR 水冷包层模块热工水力学分析与优化 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, 42 (3): 301 - 307.
- [5] 韩帅宇. 聚变堆水冷固态包层破口事故物理热工耦合研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2024.
- [6] 王文嘉, 成晓曼, 马学斌, 等. CFETR 水冷包层模块真空室内破口事故安全分析 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, 42 (4): 433 - 439.
- [7] DIEZ M, CORRE Y, DELMAS E, et al. In situ observation of tungsten plasma-facing components after the first phase of operation of the WEST tokamak [J]. Nuclear Fusion, 2021, 61 (10): 106 - 116.
- [8] SEKI Y, EZATO K, SUZUKI S, et al. Non-destructive examination with infrared thermography system for ITER divertor components [J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85 (7/8/9): 1451 - 1454.
- [9] YU F, TOMIZAWA T, YUSA N, et al. Signal-distribution-based crack detection for divertor monoblock inspection using eddy current testing [J]. Fusion Engineering and Design, 2024, 203: 114 - 124.
- [10] YU F, YUSA N, TOKITANI M. Probabilistic detection capability evaluation of eddy current testing to detect cracks on the divertor monoblock surface [J]. Fusion Engineering and Design, 2025, 215: 102 - 115.
- [11] 李易阳, 邓作炜, 王 瑜, 等. 微波无损检测非金属材料缺陷原理及应用研究进展 [J]. 无损探伤, 2024, 48



(a) 不同深度裂纹的微波检测时域信号



(b) 裂纹深度与时域信号面积之间的映射关系

图 11 时域信号及信号特征与裂纹深度的关联规律

表 4 裂纹深度评估结果

裂纹编号	时域信号面积	实际深度 /mm	评估深度 /mm	评估误差 /%
2#	$1.89 \times 10^{-10}$	0.5	0.509 8	1.96
5#	$2.01 \times 10^{-10}$	0.9	0.901 9	0.21

- (6): 1-7.
- [12] 杨晨, 段滋华, 马海桃, 等. 金属管道表面缺陷微波无损检测 [J]. 无损检测, 2013, 35 (3): 34-37.
- [13] 胡金花, 李勇, 谭建国, 等. 玻璃纤维增强复合材料局部减薄损伤的微波无损定量检测 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39 (3): 113-116.
- [14] 李旭东, 杨晓庆, 田 珊. 基于电磁时间反演算法的复合材料无损检测成像 [J]. 信息技术与信息化, 2023 (11): 69-72.
- [15] 潘金平, 王震, 朱潮明, 等. 介电材料的微波无损检测 [J]. 中国特种设备安全, 2024, 40 (10): 1-9.
- [16] MAZZINGHI A, FRENI A, CAPINERI L. A microwave non-destructive testing method for controlling polymeric coating of metal layers in industrial products [J]. NDT & E International, 2019, 102: 207-217.
- [17] 王若男, 李勇, 回沛林, 等. PE 结构埋深缺陷的微波无损可视化检测 [J]. 无损检测, 2023, 45 (9): 22-27.
- [18] 回沛林, 李勇, 王若男, 等. GFRP 材料损失缺陷的微波反射定量检测 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (7): 110-113.
- [19] 杨玉娥, 安延涛, 赵 东. 中间层碳纤维方向的微波无损检测实验研究 [J]. 功能材料, 2017, 48 (5): 5061-5064.
- [20] 高乾祥, 李勇, 王若男, 等. 聚乙烯构件减薄缺陷的太赫兹扫频可视化定量检测 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42 (10): 114-117.
- [21] 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.
- [22] 杨玉娥, 何存富, 吴 斌. 同轴探头微波检测热障涂层的参数敏感性研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (2): 36-41.
- [23] 王若男, 李勇, 回沛林, 等. 涡轮叶片热障涂层减薄缺陷的微波扫频定量检测 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41 (8): 104-107.
- [24] BRIANT C L. Tungsten: properties, processing, and applications [J]. Advanced Materials & Processes, 1998, 154 (5): 29.
- [25] DHANUMALAYAN E, JOSHI G M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2018, 1 (2): 247-268.
- [26] 胡金花. GFRP 材料减薄缺陷的微波无损检测及可视化定量评估 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- ics/yolov5.
- [17] LAW H, DENG J. Cornernet: detecting objects as paired keypoints [C] //Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), Cham: Springer, 2018: 734-750.
- [18] NARAYANAN M. SENetV2: Aggregated dense layer for channelwise and global representations [J/OL]. Arxiv Preprint Arxiv: 2311.10807, 2023.
- [19] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York: IEEE, 2018: 7132-7141.
- [20] TAN M, PANG R, LE Q V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection [C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York: IEEE, 2020: 10781-10790.
- [21] JIAO J, TANG Y M, LIN K Y, et al. Dilateformer: Multi-scale dilated transformer for visual recognition [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2023, 25: 8906-8919.
- [22] TONG Z J. Wise-IoU: Bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism [J]. Arxiv Preprint Arxiv: 2301.10051, 2023.
- [23] 陈鹏宇, 王 烈, 梁钰曼, 等. AFL-YOLO: 基于 YOLOv8 改进的小目标检测算法 [J/OL]. 电讯技术, 1-15 [2025-03-05]. <https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.241024002>.
- (上接第 45 页)
- [10] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.
- [11] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection [J]. Arxiv Preprint Arxiv: 2004.10934, 2020.
- [12] CHEN X, AN Z, HUANG L, et al. Surface defect detection of electric power equipment in substation based on improved YOLOv4 algorithm [C] //2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), New York: IEEE, 2020: 256-261.
- [13] 张铭泉, 邢福德, 刘 冬. 基于改进 Faster R-CNN 的变电站设备外部缺陷检测 [J]. 智能系统学报, 2024, 19 (2): 290-298.
- [14] JOCHER G, CHAURASIA A, QIU J. Ultralytics YOLOv8 [Z/OL]. Ultralytics, (2023-01-10) [2025-01-22]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
- [15] WANG C Y, LIAO H Y M, WU Y H, et al. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN [C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2020: 390-391.
- [16] GLENN J. Ultralytics YOLOv5 [Z/OL]. (2020-06-10) [2025-01-22] Ultralytics, [投稿网址: www.jsjclkyz.com](https://github.com/ultralyt-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)