

MLP 在热障涂层厚度及缺陷检测中的应用

尚劲松¹ 杨晓庆¹ 王鹏宇¹ 谢 意²

SHANG Jinsong YANG Xiaoqing WANG Pengyu XIE Yi

摘 要

随着现代工业和技术的发展,复合材料在航空、能源等领域的应用越来越广泛。然而,这些材料在制造和使用过程中不可避免会产生磨损缺陷,影响其性能和使用寿命。尤其对于航空发动机和燃气发动机涡轮叶片中的热障涂层(TBC),其磨损缺陷可能导致严重的安全隐患。因此,如何高效、准确地检测这些缺陷已经成为一个重要课题。针对这一问题,文章设计了一种基于微波同轴谐振式近场传感器和多层感知机(MLP)算法的无损检测系统,实现了同时对基底金属的缺陷检测以及对涡轮叶片热障涂层厚度的高分辨率和高准确率检测,为涡轮叶片热障涂层的无损检测提供了有效支撑。

关键词

微波无损检测;微波近场扫描显微镜;微波成像;热障涂层厚度;多层感知机

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.043

0 引言

随着现代工业和技术的飞速发展,复合材料在航空、能源等技术领域的应用变得越来越广泛。因其高强度、轻量化、耐高温和耐腐蚀等性能,在航空航天、风力发电机叶片、汽车制造等诸多领域得到了广泛应用。热障涂层(TBC)作为航空发动机和燃气发动机的热端部件,主要由以氧化铝(Al_2O_3)为主的陶瓷层(top coating, TC)和与高温合金基底相连的黏结层(bond coating, BC)构成^[1]。相比其他涂层,TBC具有结构复杂、服役环境恶劣等特点,其内部外部缺陷、损伤原因和寿命影响因素也更加多样。

目前,热障涂层的无损检测方法包括超声检测、涡流检测、X射线法及红外热成像技术等。超声检测法(ultrasonic testing, UT)可实现材料内部缺陷的检测^[2],但需使用耦合剂。由于涂层表面为多孔结构,故耦合剂的使用会填充涂层表面的孔隙,破坏涂层关键特征结构,因此不适用于热障涂层厚度及缺陷的表征。X射线计算机断层扫描法(X-ray computed tomography, CT)能够实现热障涂层三维结构的可视化^[3]。然而,由于基底合金中Ni原子序数较大,对X射线的吸收较多,应用CT法进行热障涂层内部结构的检测通常需要将涂层从基底上剥离,导致涂层无法二次利用,且X射线辐射对人体有较高危害。红外热成像法(infrared thermography, IRT)^[4-5]具有结果直观、检测效率高及非接

触等优点,但一般需要加热测试件,且涂层的厚度和导热系数会影响检测精度。

微波在空间传播过程中遇到异质界面时,会发生反射、透射和散射等现象,所形成的反射波和透射波等会随被测材料的介电常数以及缺陷尺寸的变化而发生显著变化。微波检测技术通过对这些变化特征进行检测与分析,能够有效提取待测物的介电特性及结构缺陷信息。该技术具有灵敏度高、无污染及电离辐射、非接触式检测等优势。故其适用于检测TBC的厚度以及基底金属的缺陷。

国外研究者Ye等人^[6]通过Monte Carlo方法建立了热障涂层孔隙率与太赫兹脉冲宽度之间的关系,用于确定孔隙率。Cao等人^[7]利用太赫兹无损检测和机器学习成功地识别了热障涂层中的缺陷。Waddie等人^[8]提出了一种基于THz波在TBCs中传播的广义Rouard方法,通过梯度下降算法来推断TC层的厚度。

在国内,何存富等人^[9]利用开口波导和同轴探头对热障涂层的孔隙率和脱粘状况进行了研究,发现利用微波信号的反射系数相位差可以在毫米波段实现对涂层系统中常见缺陷(裂缝、脱黏)的无损检测;王若男等人^[10]利用微波扫频波导实现对TBC减薄缺陷的定量检测;回沛林等人^[11]通过微波无损检测新技术并采用回波法测量回波损耗、相位等特征参数,实现了复合材料内部金属丝断裂缺陷的快速定位与测定。

1 建模与数据采集

本文首先采用Ansys Electronics Desktop进行传感器的建模和数据采集,然后将传感器扫描采集的数据在Visu-

1. 四川大学 四川成都 610065

2. 成都信息工程大学 四川成都 610225

[基金项目] 四川省重大科技专项(2023ZDZX0014);成都市科技厅项目(2023-JB00-00019-GX)

al Studio Code 的 Python 环境下编程进行成像以及膜厚的检测。

待测样品由长宽 6 mm，高度 1 mm 的矩形金属镍板以及长宽 6 mm，高度 0.1 mm 的 Al_2O_3 薄膜叠加组成，并在金属镍板上扣除一个长宽 3 mm，高度 0.4 mm 的矩形块。用于模拟热胀涂层的结构以及金属基底缺陷，如图 1 所示。

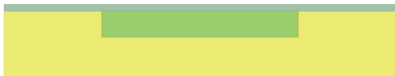


图 1 待测样品示意图

用于数据采集的传感器采用图 2 所设计的 1/4 波长微波同轴谐振传感器，其使用了磁耦合方式，并用图 2 所示的方式将其置于待测样品之上。

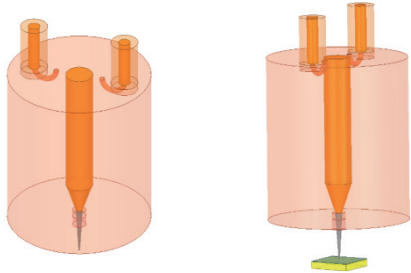


图 2 微波同轴谐振传感器模型示意图

扫描过程采用图 3 所示的线性扫描方式，同轴传感器的探针从待测物的左上角逐行逐点扫描到右下角，采集谐振频率以及 S11 和 S21 的幅值信息。扫描步进设为 $200\text{ }\mu\text{m}$ ，即 x 方向与 y 方向均 $200\text{ }\mu\text{m}$ 采集一个点，总共扫描点数为 961。改变 Al_2O_3 薄膜的厚度为 60、80、100、120、 $140\text{ }\mu\text{m}$ 进行 5 次采集，来模拟热胀涂层厚度的改变。

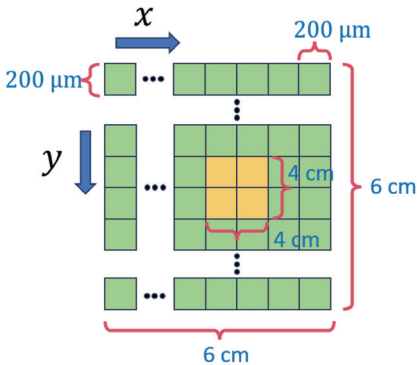


图 3 扫描方式示意图

2 金属基底缺陷检测

将采集到的 S 参数进行处理，取出传感器谐振时的频率以及该点对应的 S11 以及 S21 的幅值进行归一化成像，图 4、图 5 展示了 $60\text{ }\mu\text{m}$ 和 $140\text{ }\mu\text{m}$ 膜厚时的金属基底缺陷成像情况。从图中可以明显区分出金属基底的有缺陷和无缺陷区域。

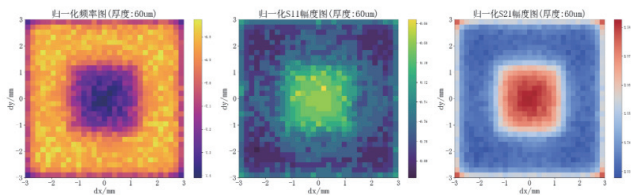


图 4 $60\text{ }\mu\text{m}$ 膜厚归一化频率 / 幅度

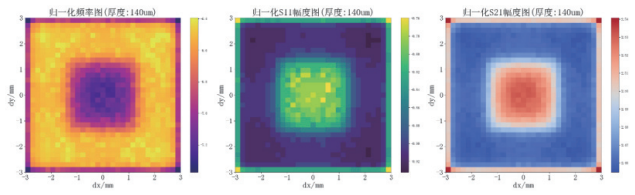


图 5 $140\text{ }\mu\text{m}$ 膜厚归一化频率 / 幅度图

3 MLP 用于热障涂层厚度检测

将采集到的数据分成金属基底有缺陷区域和无缺陷区域分别进行 MLP 模型的构建。根据基底金属缺陷的有无分别构建有缺陷和无缺陷的数据集。每个数据集均包含 $60\sim 140\text{ }\mu\text{m}$ 不同膜厚（步进为 $20\text{ }\mu\text{m}$ ）下的 4 805 条数据，每条数据包含 3 个输入特征（谐振频率、S11 的幅值以及 S21 的幅值）和 1 个标签（ $60\sim 140\text{ }\mu\text{m}$ 的不同膜厚值）。

对模型进行训练之前，需对原始数据进行预处理。首先将原始数据采用孤立森林算法去除异常值（异常值的比率设定为默认的 5%），然后使用高斯滤波器对去除异常值之后的数据进行平滑处理。

由于数据维数较低（三维），采用复杂模型容易导致过拟合现象的发生，故选用了多层感知机（MLP）模型，模型架构如图 6 所示。模型共有 3 层，分别是 128、64、32 个神经元的全连接层（Dense），层与层之间分别采用 LeakyReLU、PreLU 激活函数进行激活，并且在 Dense1 和 Dense2 之间使用了 20% 的 Dropout 正则化。

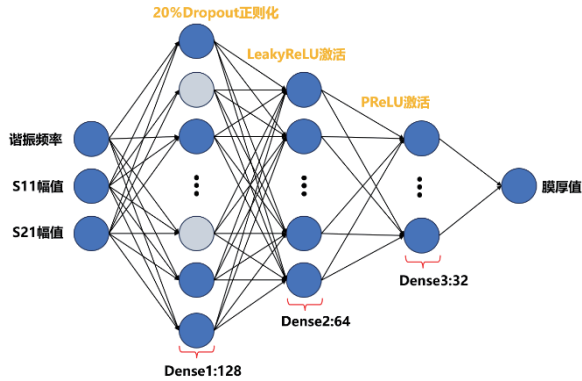


图 6 多层感知机模型架构

多层感知机模型构建好以后，就可以将预处理好的数据送入多层感知机模型进行训练。数据集按照 7:3 分为训练

集和验证集两部分，训练轮数（epochs）设定为 8 000 轮，批次大小（batch size）设为 16，并设置早停策略（early stopping）为 200 以防止模型过拟合现象的发生。优化器选用 Adam 优化器，初始学习率（learning rate）设定为 5×10^{-5} ，采用均方误差（MSE）作为损失函数。

图 7、图 8 分别展示了基底金属有缺陷和无缺陷时的训练和验证损失曲线图，可以看出均方误差损失随着训练轮数的增加收敛到了理想值，未出现过拟合的现象。

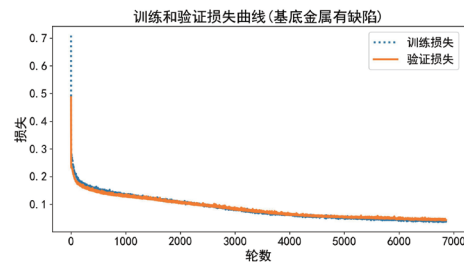


图 7 基底金属有缺陷时的损失曲线

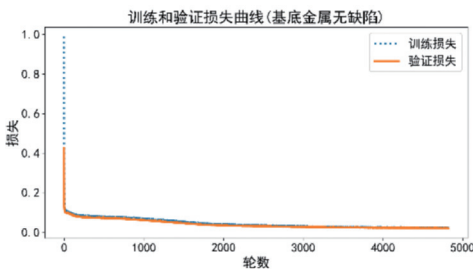


图 8 基底金属无缺陷时的损失曲线

模型的任务是对热障涂层的厚度进行预测，本质上是一个回归问题。回归问题的常见评价指标有均方误差（MSE）、平均绝对误差（MAE）以及决定系数（ R^2 ）等。

均方误差（MSE）通过计算预测值与实际值之间差异的平方，然后求其平均值来衡量模型的性能。平均绝对误差（MAE）计算预测值与实际值之间绝对差异的平均值。 R^2 是一个无量纲的指标，表示模型解释的方差比例，值在 0~1 之间，提供了模型在解释数据变异方面的直观度量而不受数据单位影响。本文采用 3 种作为模型的评价指标，如表 1 所示。

表 1 MLP 与传统反演方法的对比

方法	缺陷情况	MSE	MAE	R^2
MLP	有缺陷	35.741 6	3.260 3	0.951 6
	无缺陷	15.566 9	1.485 1	0.979 1
谐振频率反演	有缺陷	257.692 8	13.436 7	0.669 4
	无缺陷	184.488 9	9.321 9	0.760 6
S11 幅值反演	有缺陷	269.003 8	13.615 7	0.654 9
	无缺陷	172.725 5	9.287 0	0.775 8

从表 1 可以看出，相比于直接采用谐振频率反演和 S11 幅值反演的传统方法，采用 MLP 模型极大地提高了热胀涂层膜厚检测的准确度。

为了更直观地观察所构建的无损检测系统的效果，将测试集的数据输入到模型中（此时已经不含实际膜厚的标签值），让模型给出预测的膜厚值，整理了部分预测膜厚值与实际膜厚值的对比，如表 2、表 3 所示。

表 2 基底金属有缺陷时的部分检测结果

谐振频率 /GHz	S11 幅值 /dB	S21 幅值 /dB	实际膜厚 / μm	预测膜厚 / μm
2.388	7.476 3	4.715 4	60	60.677 6
2.384	7.196 2	4.941 2	80	81.990 0
2.383	7.273 5	4.938 2	100	100.856 6
2.385	7.368 3	4.849 8	120	119.066 0
2.381	7.181 7	5.008 0	140	140.378 2

表 3 基底金属无缺陷时的部分检测结果

谐振频率 /GHz	S11 幅值 /dB	S21 幅值 /dB	实际膜厚 / μm	预测膜厚 / μm
2.384	7.207 0	4.989 2	60	59.991 4
2.381	7.087 3	5.074 7	80	80.452 0
2.379	6.955 1	5.172 4	100	100.11
2.376	6.811 4	5.303 0	120	120.27
2.371	6.469 3	5.583 1	140	140.361 9

表 2、表 3 直观地展示了部分预测的膜厚与实际膜厚值的对比，可以看出所构建的基于微波同轴谐振式近场传感器和多层感知机（MLP）算法的无损检测系统能以非常小的误差值检测出热胀涂层的膜厚值。

为进一步探究所构建系统的稳定性，如图 9、图 10 分别绘制了无缺陷处和有缺陷处厚度值的 3σ 置信区间，落在 3σ 区间的分别有 97.24% 和 97.51%，说明系统具有良好的检测稳定性。

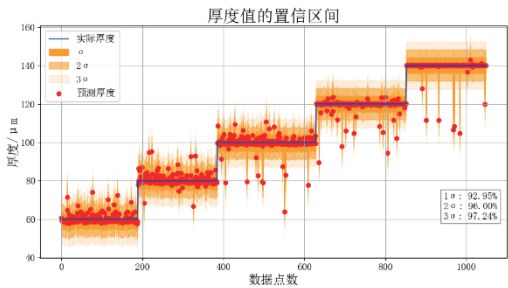


图 9 无缺陷处厚度值的置信区间

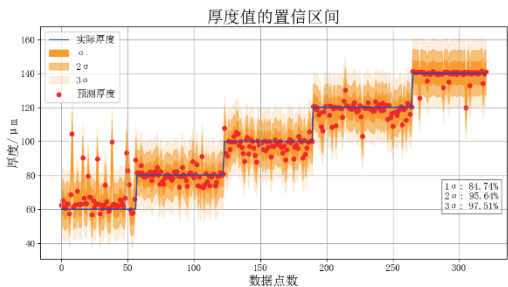


图 10 有缺陷处厚度值的置信区间

4 总结与展望

针对航空发动机和燃气发动机涡轮叶片中的热障涂层(TBC)磨损缺陷的检测需求,设计了一种基于微波同轴谐振式近场传感器和多层感知机(MLP)算法的无损检测系统。本文首先采用 Ansys Electronics Desktop 进行传感器的建模,利用电磁仿真得到待测样品入射波和反射波的谐振频率以及幅值信息,完成数据采集。将采集的数据经过一系列预处理(剔除异常值、数据平滑、归一化)后送入构建的多层感知机(MLP)模型进行模型的训练。将训练好的模型对部分未用来训练的数据进行膜厚值的预测,得到了比较准确的预测结果。相比于其他非微波检测系统,通过分析反射和透射波变化,灵敏度高、穿透力强、非接触、无污染,无电离辐射且不会损坏待测样品。而且相比于常规的微波检测膜厚反演方法,检测准确率更高。

然而,本文工作仍存在不足之处。在传感器方面,成像与数据采集所使用的微波同轴谐振传感器 Q 值较低,每次数据采集会受噪声影响。未来可以在同轴谐振传感器前端加入低噪声功率放大器(LNA)来提高信号的信噪比,减小因信号较弱导致的噪声对测量结果的影响,以提升测量的精确度。在算法方面,经过多次实验进行参数以及超参数的调整,所构建模型的性能无法进一步地提升,已达到极限值。后续考虑采用更为先进的神经网络架构和数据预处理方法,在现有的基础上进一步提升检测准确率。

参考文献:

- [1] BAI Y, HAN Z H, LI H Q, et al. High performance nanostructured ZrO_2 based thermal barrier coatings deposited by high efficiency supersonic plasma spraying[J]. Applied surface science, 2011, 257(16): 7210-7216.
- [2] ZHAO R Y, LI J, CHEN Y, et al. Defects detection of high voltage insulation pull rod based on ultrasonic wave method[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.
- [3] ZHU W, CAI X N, YANG L, et al. The evolution of pores in thermal barrier coatings under volcanic ash corrosion using X-ray computed tomography[J]. Surface and coatings technology, 2019, 357: 372-378.
- [4] BAGAVATHIAPPAN S, LAHIRI B B, SARAVANAN T, et al. Infrared thermography for condition monitoring—A review[J]. Infrared physics & technology, 2013, 60: 35-55.
- [5] KYLILI A, FOKAIDES P A, CHRISTOU P, et al. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: a review[J]. Applied energy, 2014, 134: 531-549.
- [6] YE D D, WANG W Z, ZHOU H T, et al. In-situ evaluation of porosity in thermal barrier coatings based on the broadening of terahertz time-domain pulses: simulation and experimental investigations[J]. Opt express, 2019, 27(20): 28150-28165.
- [7] CAO B H, CAI E Z, FAN M B. NDE of discontinuities in thermal barrier coatings with terahertz time-domain spectroscopy and machine learning classifiers[J]. Materials evaluation, 2021, 79(2): 125-135.
- [8] WADDIE A J, SCHEMMEL P J, CHALK C, et al. Terahertz optical thickness and birefringence measurement for thermal barrier coating defect location[J]. Opt express, 2020, 28(21): 31535-31552.
- [9] 何存富, 杨玉娥, 吴斌. 反射系数法微波检测热障涂层厚度的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2590-2595.
- [10] 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.
- [11] 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.

【作者简介】

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。

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。

王鹏宇(2000—), 男, 山东莒县人, 硕士, 研究方向: 天线设计、微波传感器设计、微波全息成像算法。

谢意(1985—), 女, 四川成都人, 博士, 讲师, 研究方向: 微波无损检测、信号处理。

(收稿日期: 2024-12-03)