

西安交通大学无损检测实验室

2023 年度进展

1 概要

西安交通大学航天航空学院无损检测实验室于 2005 年创立，现由教授 3 名（陈振茂博士 / 东京大学、李勇博士 / 英国纽卡斯尔大学、解社娟博士 / 日本东北大学）、副教授 1 名（裴翠祥博士 / 东京大学）、高级工程师 1 名（陈洪恩博士）、助理研究员 1 名（方阳博士）和 50 余名博硕士研究生构成。团队具有鲜明的国际化特色，依托团队建成了陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心，是西安交通大学“复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室”和实验力学、工程力学学科的重要组成部分。陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心于 2021 年全面建成通过验收，实验室占地面积超 1 200 m²，具有涡流 - 脉冲涡流检测实验室、多维电磁检测实验室、微波 - 太赫兹检测实验室、红外检测实验室、先进超声检测实验室等综合无损检测平台，拥有微焦 CT、高精度红外检测、阵列涡流 / 脉冲涡流检测系统，大型水浸超声 / 电磁超声 / 激光超声相控阵系统、微波和太赫兹检测系统、磁力显微镜、动态磁特性测量系统等先进测试仪器和装备，设备原值 3 000 余万元。实验室对省内外全面开放，积极协同开展无损检测理论、方法研究及检测探头、仪器及系统和标准规范的研发。

2023 年度，实验室在持续开展国家自然科学基金重大科研仪器项目、优青项目、面上项目、联合基金重点项目，国家 ITER 专项、重点研发项目 / 课题、LJ 专项课题任务等在研项目研发的同时，新增国家重点研发计划青年科学家项目、国家自然科学基金国际合作交流项目及核电、航天部门揭榜挂帅等横向科研项目多项，新增科研经费 1 000 余万元。研究成果在 *MSSP*、*JAP*、*NDT&E Int*、*MST*、*Sensors & Actuators*

等国际国内相关重要学术期刊发表论文 40 余篇，授权和公开发明专利 10 余项（其中授权美国发明专利 1 项），开发了多种无损检测样机，持续进行了科研成果转化。在团队建设和人才培养方面，2023 年，解社娟获聘为日本东北大学客座教授，博士生 1 人获校博士生标兵称号，多人获国家级学科竞赛奖等学术奖励，10 余位硕博研究生毕业获得相应学位。

实验室国内外学术交流活跃，成员任 *NDT&E Int*、*IJAEM* 期刊副主编、陕西省无损检测学会副主委、全国无损检测学会常务委员及多个学会专委会副主任 / 委员等国际国内学术兼职 20 余项，担任 *Compumag2023* 技术委员会共同主席等，应邀在国际国内学术会议做大会报告和主题报告 6 项。2023 年度无损检测实验室在先进无损检测理论、技术、仪器探头开发与应用等方面持续开展了深入研究，取得了系列进展。

2 代表研究进展

2.1 新型涡流 - 脉冲涡流检测相关理论及应用研究

（1）CFRP 高频涡流检测数值模拟方法和检测机理

针对碳纤维复合材料（CFRP）和热障涂层高频涡流检测问题，建立了考虑位移电流的涡流场和检测信号数值模拟方法，开发了相应的三维有限元计算程序，明确了 CFRP 涡流检测中涡电流形成机制和热障涂层涡流检测信号特征。结果表明，对于低电导率的碳纤维复合材料涡流检测，需采用兆赫兹级高频涡流激励，此时涡电流回路由传导涡流和位移电流共同构成（见图 1）。针对重燃热端叶片热障涂层厚度评价和基体裂纹高效涡流检测，开发了可编程阵列涡流检测系统和高精度柔性阵列化探头，实现了热障涂层厚度的高精度定量评价和基体裂纹检测（见图 2）。

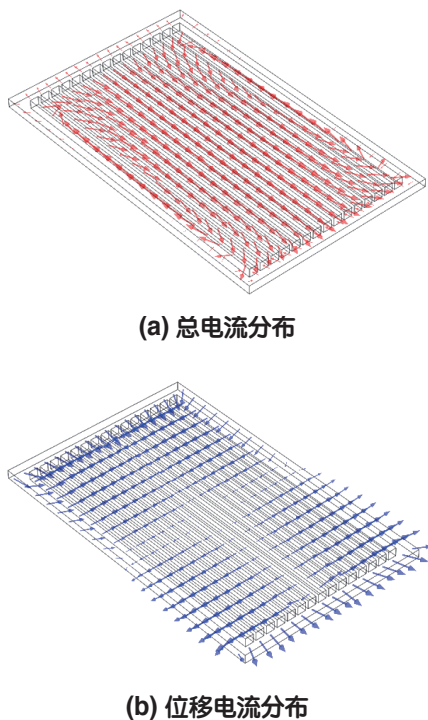
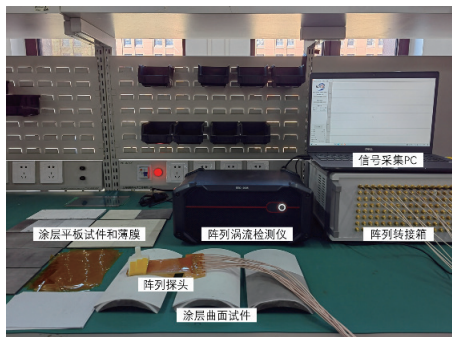
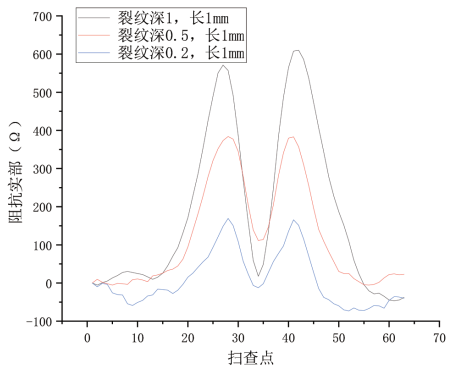


图 1 单层碳纤维板总电流分布和位移电流分布



(a) 柔性阵列涡流检测系统



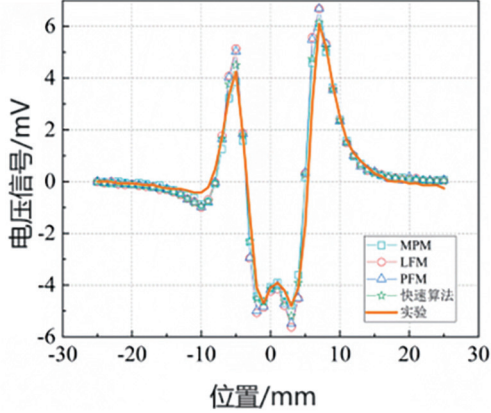
(b) 曲面热障涂层结构裂纹检测结果

图 2 柔性阵列涡流检测系统和曲面热障涂层结构裂纹检测结果

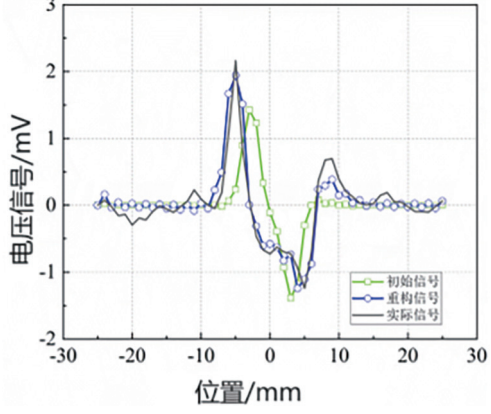
(2) 动生涡流检测正反问题数值模拟方法

针对铁磁和非磁性金属结构的动生涡流检测问题,开发了基于频域叠加和数据库方法的退化

向量位棱边有限元高效信号计算方法。对比全域有限元算法,所提快速正演算法在同等精度下可提高计算效率千倍以上。基于高效动生涡流正问题程序,开发了基于确定论优化方法的动生涡流裂纹反演算法和软件,导出了求解磁性材料涡流信号梯度的解析表达式,解决了磁性材料动生涡流信号梯度计算难题,基于实测信号验证了动生涡流检测复杂裂纹反演重构方法和梯度公式的有效性和鲁棒性。结果表明,所提信号梯度公式可大大提高反问题求解精度和效率,开发的正反演算法可采用实测动生涡流信号有效实现斜椭圆等复杂形状裂纹的定量重构(见图 3)。



(a) 正演计算结果



(b) 反演缺陷信号比较

图 3 动生涡流检测的信号正演计算结果和反演缺陷信号比较

(3) 多层金属结构选频带脉冲涡流层析成像

针对多层金属结构缺陷,提出了基于电磁能量管理思路的选频带脉冲涡流层析成像方法,实现了入射电磁能量透入深度和强度的有效调节和缺陷层析成像,提高了不同深度缺陷的检测灵敏度。其次,提出了一种脉冲涡流检测信号高频成分分离策略(见图 4),提高了对浅层缺陷的定

量检测能力，结合基于全频信号的中深层缺陷反演重构，实现了复合缺陷的脉冲涡流定量评价。同时，进一步优化了脉冲调制信号的载波调幅方式，通过波形错位实现了谐波 - 脉冲相结合的脉冲调制涡流检测，有效兼顾谐波调制对特定深度缺陷响应高和脉冲激励频谱广泛、覆盖深度范围大的特性，实现了对多层金属构件层间缺陷的高灵敏度、高信噪比检测。

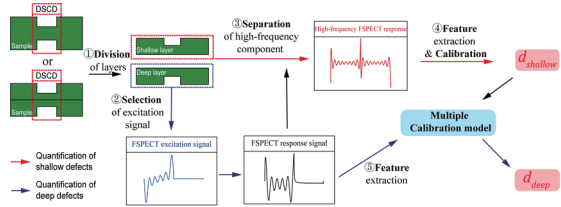
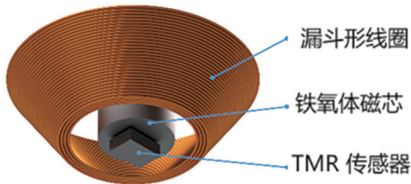


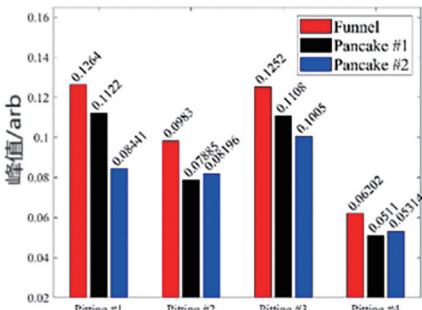
图4 基于能量管理的选频带脉冲涡流方法的多层结构缺陷重构策略

（4）高效脉冲涡流检测创新探头开发

针对高效脉冲涡流检测问题，实验室进一步开展了探头构型创新设计和优化。传统盘式涡流线圈通过增大内径作为提升渗透深度的手段之一，但其也会分散面内涡流，带来涡流面内强度下降的问题。基于此，实验室提出了漏斗形磁芯探头创新构型并验证了其有效性，发现新构型相比具有相同涡流渗透深度的盘式磁芯探头具有更高的涡流面内强度，相比具有相同涡流强度的盘式磁芯探头具有更深的渗透深度，实现了涡流渗透深度和强度的平衡，有效提高了多层金属构件缺陷的检测性能（见图5）。



(a) 漏斗形磁芯探头构型

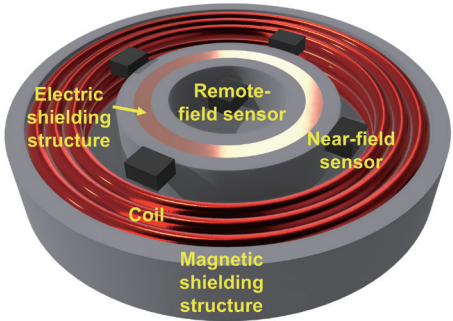


(b) 缺陷信号比较

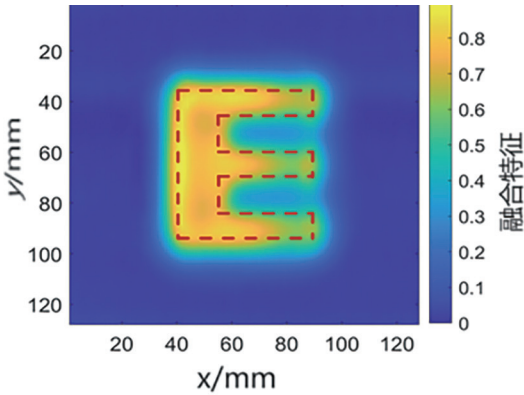
图5 漏斗形磁芯探头构型及其缺陷检测信号比较

（5）脉冲涡流 - 脉冲远场复合检测方法

脉冲涡流检测与脉冲涡流远场检测在探头构型、激励方式、信号拾取等方面存在类似性，集成这两种检测方法有望进一步提升金属构件定量涡流检测性能。为此，开发了脉冲涡流近 - 远场复合检测方法和探头，通过分析坡印廷矢量确定了探头的近场及远场特征区域，通过在两个区域分别设置检测传感器，实现了脉冲涡流与脉冲涡流远场信号的同步检测。基于所提探头构型和方法，搭建了脉冲涡流近 - 远场复合检测系统，分别提取近场检测信号峰值和远场检测差分信号峰值作为信号特征进行了缺陷成像，并利用二维离散小波变换对两种信号特征进行了融合处理，有效提升了脉冲涡流成像结果的信噪比（见图6）。



(a) 复合检测探头构型



(b) 融合信号特征典型成像结果

图6 脉冲涡流近远场复合检测探头构型和融合信号特征典型成像结果

（6）塑性变形 - 疲劳复合损伤脉冲涡流评价

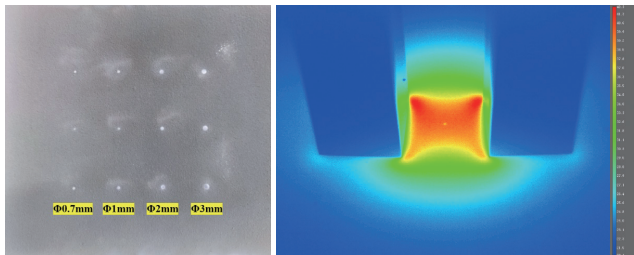
工程中塑性变形对材料疲劳性能的影响规律尚不明确，同时由于两者均会导致材料电磁特性变化，对塑性变形与疲劳复合损伤进行解耦评价较单一损伤评价更为困难。针对这一问题，实验室制备了塑性变形、疲劳损伤以及复合损伤试件，测量了核电典型材料的疲劳曲线并研究了塑性变

形对其影响的规律，开发了基于 **EMD** 的脉冲涡流信号降噪和特征提取方法，实现了塑性变形与疲劳复合损伤的解耦评价。研究结果发现，脉冲涡流信号峰值时间和过零时间特征几乎不受疲劳损伤量变化的影响，而塑性变形和疲劳损伤均会导致脉冲涡流信号峰值的显著变化，基于这些特征和规律建立了塑性变形 - 疲劳复合损伤的脉冲涡流解耦评价方法。

2.2 基于温度场和深度学习的定量红外检测方法 及热障涂层检测应用

(1) 基于涡流红外方法的重燃叶片热障涂层 微小脱黏缺陷检出和定量评价

重型燃气轮机叶片热障涂层脱黏缺陷的高效、高精度无损检测对重燃研发和应用非常重要。团队创新提出基于涡流内热源激励的热障涂层微小脱黏缺陷涡流红外检测方法，构建了可有效提升所关注区域涡流加热温升效率、加热均匀性、曲面适型性、视野非遮挡性等的检测系统和图像处理办法，提高了脱黏缺陷轮廓的温度梯度，实现了亚毫米直径微小脱黏缺陷的高效检出（见图 7）。同时，基于热成像原理，对拍摄视角带来的畸变图像进行校正，实现了脱黏缺陷轮廓复原和定量评价。



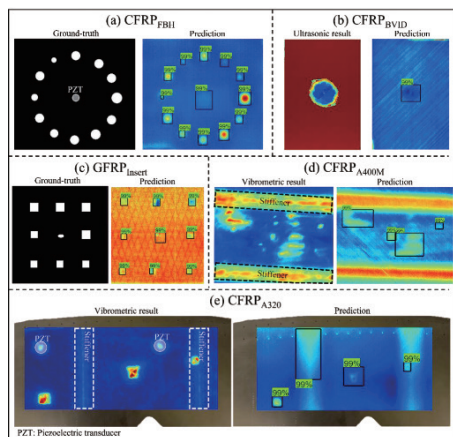
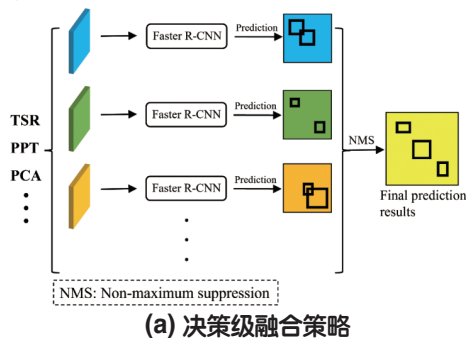
(a) 涂层脱黏试件制备 (b) $\phi 0.7\text{ mm}$ 脱黏缺陷检出结果

图 7 涂层脱黏试件制备及 $\phi 0.7\text{ mm}$ 脱黏缺陷检出结果

(2) 基于红外热成像大规模虚拟数据集的 红外智能缺陷识别算法

监督式深度学习算法需要大规模数据集进行训练和验证。为此，团队首先开发了基于界面单元的红外高效数值模拟器，提出了基于数值模拟的虚拟数据集生成方法，计算获取了含不同形状、大小、位置缺陷的信号，并考虑了激励热源的非均匀性和噪声，显著提升了数据集的多样性。其次，在深度学习智能缺陷识别算法方面，提出了一种灵活的决策级融合策略对红外图像序列的预测结果进行融合处理，包括将 **TSR** 系数图像序列逐帧

进行 **Faster R-CNN** 训练，及通过非极大值抑制算法对预测结果进行融合。该灵活决策级融合策略能从多种后处理图像中获取缺陷信息，已在系列实际工业样品上实现了缺陷的精确预测和评估。图 8 为该深度学习算法的流程和典型缺陷识别结果示例。



(b) 缺陷识别结果示例

图 8 决策级融合策略及其缺陷识别结果示例

2.3 新型激光、电磁超声检测方法及应用

(1) 弧形激光双光栅聚焦表面波表面微裂纹 检测与成像方法

针对金属结构和材料早期微裂纹检测和识别难题，提出了一种利用圆弧形激光双光栅产生的聚焦表面波进行表面微裂纹检测和成像的方法。弧形激光双光栅聚焦表面波金属表面微裂纹检测示意如图 9 所示，该方法通过特殊设计的光学掩模板在试件表面上产生不同间距的圆弧形激光双光栅，同时产生两个焦点相同但频率不同、传播方向相反的表面波。对所测表面波进行频谱分析并提取反透射系数，即可实现裂纹识别，进一步对试件表面进行二维扫描成像还可进行裂纹定位。仿真和试验结果表明，与前期提出的线形激光双光栅检测方法相比，弧形激光光栅激发的表面波由于具有聚焦特性，对金属表面小长度裂纹更加

敏感，能大大提高表面微裂纹的检测灵敏度，可有效检出长度小于 **0.3 mm** 的表面微裂纹。

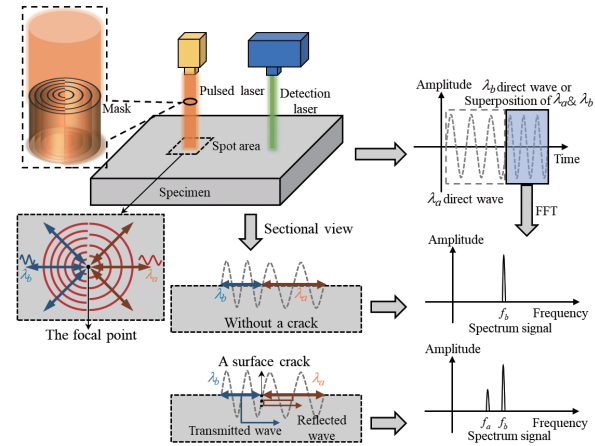
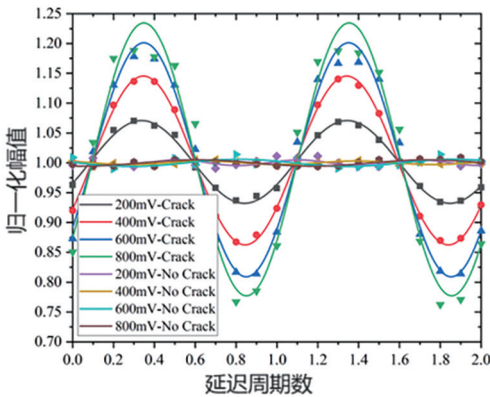


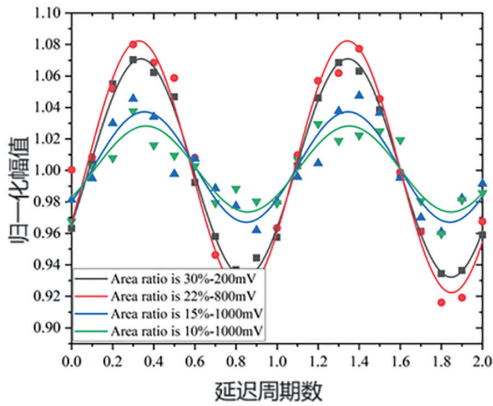
图9 弧形激光双光栅聚焦表面波金属表面微裂纹检测示意

(2) 基于振动声调制的管道焊缝裂纹非线性导波检测方法

对含有焊缝裂纹的管道，传统超声导波检测方法在时域上难以分离焊缝回波中的裂纹反射回波，在频域上也易受焊缝本身非线性的影响。针对这些问题，实验室提出了一种基于振动声调制的管道焊缝裂纹非线性导波检测方法。该方法通过对管道施加振动来改变焊缝裂纹的开合状态，并进行相应状态的超声导波检测，通过在时域上分析焊缝回波信号幅值变化来提高焊缝裂纹导波检测性能。结果表明，含裂纹焊缝回波幅值变化曲线的峰峰值会随着管道振动幅度增加，同时焊缝回波幅值变化曲线的相位也会随着管道振动频率变化，但无焊缝裂纹管道的焊缝回波变化曲线的峰峰值或相位均不受管道振动影响。结果显示该方法能够实现裂纹面积占比 **10%** 的焊缝裂纹检测，还可实现焊缝裂纹的周向定位（见图10）。



(a) 有无裂纹管道焊缝回波变化曲线



(b) 不同裂纹面积回波信号变化曲线

图10 管道焊缝裂纹非线性导波检测结果

(3) 复杂管路长距离电磁超声导波增强检测方法及其在核电螺旋换热管中的应用

为实现复杂管路的电磁超声导波长距离、高灵敏度缺陷检测，提出了在管道轴向进行局域扫描并基于 **f-k** 域进行二维信号处理的导波增强检测方法，实现了高温气冷堆螺旋换热管全管原位高效检测。通过电磁超声导波探头在管路入口进行局域轴向扫描，采集多点超声导波检测信号，利用 **f-k** 域高斯型窄带滤波提取单向、单模态、低频散的导波信号，可显著提高信噪比和缺陷检测灵敏度。基于这一原理开发了适用于现场检测的检测系统和信号处理软件，实现了局域扫描螺旋换热管全管焊缝和腐蚀缺陷检测。现场检测应用试验表明，所开发检测方法和系统具有较强的抗环境干扰能力，能够识别管壁中直径 **2.0 mm** 的点蚀缺陷（见图11）。

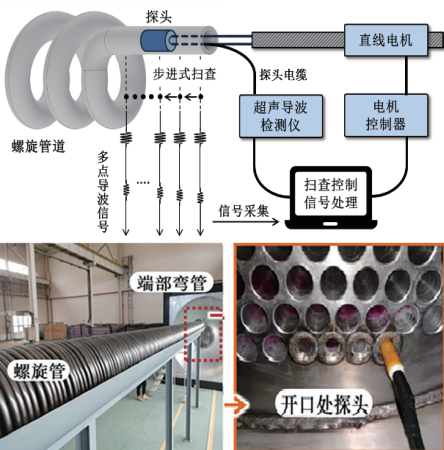


图11 基于局域扫描的复杂管路长距离超声导波增强检测方法及其现场应用

2.4 微磁、微波定量检测

(1) 应力诱发 MBN 信号形貌转变现象及其机理

磁巴克豪森信号 (MBN) 被广泛用于揭示宏观力磁现象的微观机制, 但拉伸应力对 MBN 信号形态的影响机制尚不明确。通过大量试验和理论研究, 实验室发现预应变 (拉伸应力) 会引起 MBN 信号的形态发生转变 (见图 12), 且形态转变发生所需的临界应力与引入的预应变程度之间呈幂律关系, 强调了塑性变形与 MBN 响应之间的强相关性。通过进行系统的微观损伤 MBN 检测数值模拟, 发现不同位错密度区域会引起不同的 MBN 信号变化, 从而导致 MBN 信号呈现双峰形态。在重新加载应力时, 应力引入的有效变形能量场会促进磁畴重新排列, 从而使得 MBN 信号的形态向单峰转变。

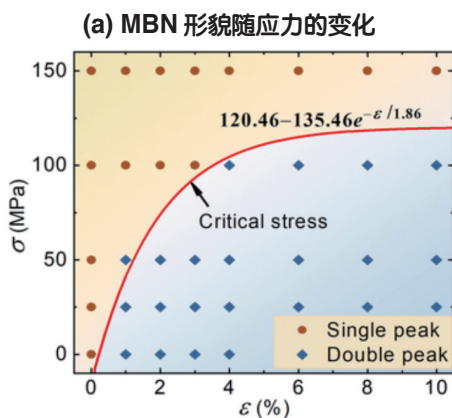
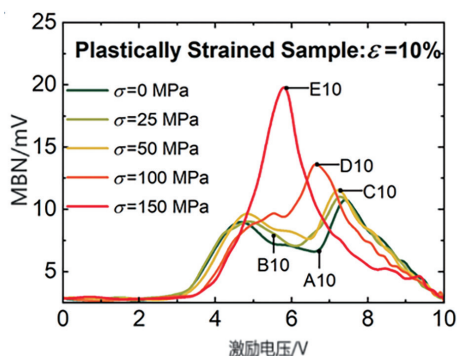


图 12 MBN 形貌随应力的变化和形貌转变临界应力与预应变尺度关系曲线

(2) 高精度微波 / 太赫兹检测成像与评估

提出了基于波谱重构和压缩感知的快速稀疏成像方法, 结合图像分割和图像统计建立了自动缺陷定量方法和远场中反射信号随缺陷深度和厚度变化规律的理论模型, 实现了对玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 分层缺陷的高精度成像, 分层

缺陷面积误差为 8%, 深度误差为 0.048 mm。同时, 利用矩形波导的极化特性研究了微波极化方向与纤维铺层方向夹角对缺陷检测的影响, 结合微波近场扫频和奇异值分解杂波抑制技术实现了高精度缺陷成像 (见图 13)。为提高 GFRP 内部分层缺陷的检测效率, 进一步提出了基于多通道发射多通道接收 (MIMO) 体制的微波可视化定量缺陷检测技术, 搭建了微波扫描检测试验系统, 开发了 MIMO 体制下基于波谱重构的成像算法及缺陷定量表征方法, 通过三发四收多通道采集, 将扫描时间缩短了近 10 倍, 实现了高速自动化微波成像定量检测。

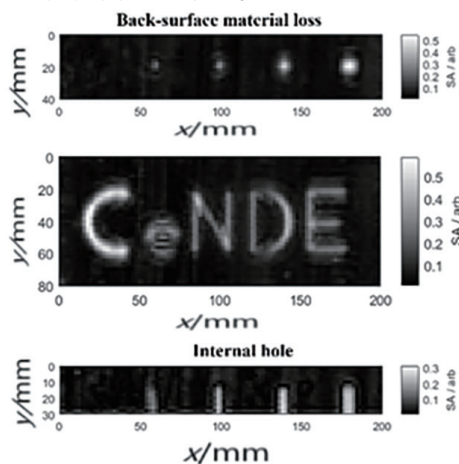
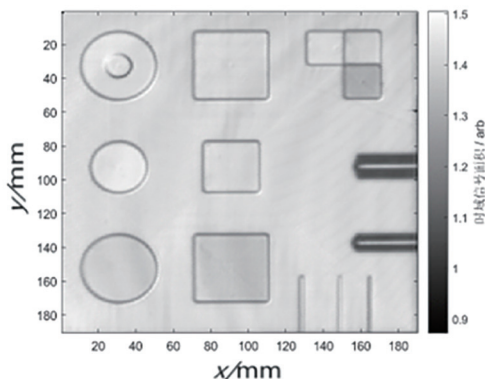
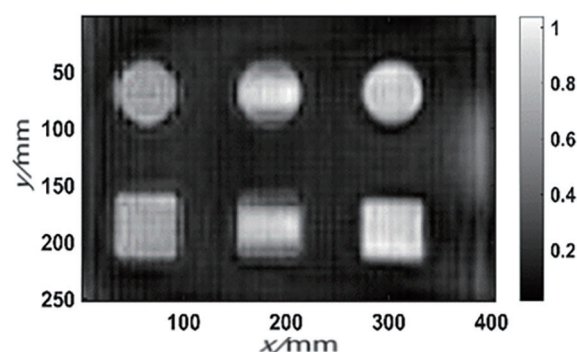


图 13 GFRP 埋深缺陷成像

对于聚乙烯 (PE) 结构的亚表面减薄缺陷和内部孔洞埋深缺陷, 研究了近场扫频微波检测方法的有效性, 同时开展了 0.22 ~ 0.33 THz 频段的太赫兹检测, 结合 Laplace 算子、矩阵二值化以及一维距离像对缺陷的面内及深度尺寸实施了缺陷定量评估。对于 PE 管道外壁减薄缺陷, 确定了不同尺寸缺陷所对应的最佳检测频段, 结合杂波抑制技术、波谱重构及无穷范数图像融合, 获得了高精度的缺陷成像结果 (见图 14)。



(a) PE 平板埋深缺陷的太赫兹成像



(b) PE 管道外壁减薄缺陷的微波内检成像

图 14 PE 板管结构内部缺陷微波和太赫兹成像结果

3 年度代表成果

3.1 期刊论文

[1] L Qiao, H-E Chen, K Deng, Z Wang, Y Zhao, S Xie, Z Chen, T Uchimoto, T Takagi. An inversion scheme for sizing crack from signals of the motion-induced eddy current testing method based on a new formula of signal gradient of ferromagnetic materials. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023,198: 110453,.

[2] L Qiao, H-E Chen, W Guo, Z Wang, Y Yang, S Xie, Z Chen. A numerical scheme for fast and high accuracy simulation of motion-induced eddy current testing signals. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023,39: 1-18.

[3] Z Wang, P Shi, H-E Chen, T Liang, K Deng, Z Chen. Tension-induced magnetic Barkhausen noise morphology transition caused by pre-introduced strain. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134:065103.

[4] S Xie, G Lu, L Zhang, Z Chen, Q Wan, T Uchimoto, T Takagi. Quantitative evaluation of deep-shallow compound defects using frequency-band-selecting pulsed eddy current testing. *NDT&E International*, 2023, 133: 102750.

[5] S Xie, S Yang, M Tian, R Zhao, Z Chen, Y Zheng, T Uchimoto, T Takagi. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and

electromagnetic acoustic transducer techniques based on wavelet analysis. *NDT&E International*, 2023, 138:102900.

[6] W Guo, Y Zhao, L Qiao, K Deng, Y Yang, X Chen, S Xie, Z Chen. High precision thickness evaluation of thermal barrier coating with high frequency eddy current testing method. *NDT & E International*, 2023, 140: 102963.

[7] Y Fang, Y Qu, X Zeng, H-E Chen, S Xie, Q Wan, T Uchimoto, Z Chen. Distinguishing evaluation of plastic deformation and fatigue damage using pulsed eddy current testing. *NDT&E International*, 2023, 140:102972.

[8] Z Tong, S Hedayatrasa, L Cheng, C Pei, Z Chen, S Xie, M Kersemans. An efficient parametrized optical infrared thermography 3D finite element framework for computer vision applications. *NDT&E International*, 2023, 135: 102787.

[9] Z Tong, L Cheng, S Xie, M Kersemans. A flexible deep learning framework for thermographic inspection of composites. *NDT&E International*, 2023, 139: 102926.

[10] Y Li, Y Qiao, Z Tong, J Tang, S Xie, Z Chen. Nondestructive inspection and imaging of magnetic hydrogel using the alternating magnetic field infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104681.

[11] X Li, L Xue, R Chen, H Dong, Y Li, S Wang, Y Pan, Z Chen. Numerical method and experimental validation of the magneto-thermal-mechanical coupling problem with application to tokamak structures. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 118: 474-501.

[12] X Yang, Y Fang, R Wang, Y Li, Z Chen. Visual quantitative detection of delamination defects in GFRP via

microwave. *Sensors*, 2023, 23: 6386.

[13] X Gao, H-E Chen, Y Li, S Li, H Chen, M Wang, S Yang, S Tian, Z Chen. Reconstruction schemes of load and constraint for global vibration evaluation of pipeline structures. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2023, 71: 589–597.

[14] Y Zhang, C Pei, J Deng, T Liu, P Jiang, H-E Chen, Z Chen. Development of a flexible phased array Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer for pipe inspection. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2023, 71:541-549.

[15] J Deng, C Pei, Y Zhang, T Liu, H-E Chen, Z Chen. Development of an array pickup electromagnetic acoustic transducer and application to visualization of surface wave. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2023, 71: 521-530.

[16] Y Yang, Y Fang, B Liu, J Qiu, Z Tong, Q Yang, H Liu, C Pei, S Xie, Z Chen. Studies on the infrared thermography technique for quantitative nondestructive evaluation of surface crack and delamination of multilayer structures. *Proc. SPIE*, 2023, 12550:1-10.

[17] R Wang, Y Fang, Q Gao, Y Li, X Yang, Z Chen. Quantitative visualization of buried defects in GFRP via microwave reflectometry. *Sensors*, 2023, 23: 6629.

[18] Z Liu, Y Li, B Su, S Ren, Y Ren, Z Chen. Feature fusion for pulse-modulation eddy current imaging and evaluation of defects in layered conductors. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2023, 71:283-293.

[19] D Liu, J Hu, C Pei, T Liu, Z Chen. Development of a torsional guided wave EMAT for internal inspection of

ferromagnetic pipes. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23:26154.

[20] T Liu, C Pei, L Wang, C Xie, Z Chen. An enhanced long-range guided-wave pipe inspection method based on local axial 2D signal acquisition and processing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 9600607.

[21] C Xie, T Liu, C Pei, Z Chen. Study of curved structures health monitoring with flexible omnidirectional guided-wave transducers. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2023, 349:114011.

[22] Y Fang, Z Chen, X Yang, R Wang, Y Li, S Xie. Visualization and quantitative evaluation of delamination defects in GFRPs via sparse millimeter-wave imaging and image processing. *NDT&E International*, 2023, 141: 102975.

[23] Y Fang, P Hui, Z Chen, Y Li, S Xie, H-E Chen. A miniaturized spot-focusing microwave sensor for broad-band reflectivity measurements. *Measurement Science and Technology*, 2023, 35:0356902.

[24] Y Fang, X Wei, J Ma. High-precision DOA estimation based on synthetic aperture and sparse reconstruction. *Sensors*, 2023, 23:8690.

[25] Y Zhang, S Xie, W Guo, J Ding, L H Poh, Z-D Sha. Multi-objective optimization for high-performance Fe-based metallic glasses via machine learning approach. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960:170793.

[26] 朱玉龙, 赵迎松, 方阳, 陈洪恩, 陈振茂. 孔边裂纹的旋转涡流检测. *中国机械工程*, 2023, 34(8): 883-891.

[27] 石翰林, 王猛, 蔡文路, 陈洪恩, 陈辉, 陈振茂. 磁芯探头涡流检测信号数值模拟方法研究. *应用力学学报*, 2023, 40: 1324-1334.

[28] 陈文彰, 杨茜, 解社娟, 朱东彬, 胡宁, 白雪, 陈振茂. 涡流无损检测温度影响研究. *实*

验力学, 2023, 38(3):296-306.

[29] 高乾祥, 李勇, 王若男, 方阳, 杨西含, 陈振茂. 聚乙烯构件减薄缺陷的太赫兹扫频可视化定量检测. 传感器与微系统, 2023, 42:114-117.

[30] 任延钊, 李勇, 王瑾, 向异, 苏冰洁, 陈振茂. 异质金属构件埋深缺陷的正交激励脉冲涡流检测. 传感器与微系统, 2023, 42(9): 81-84.

[31] 王若男, 李勇, 回沛林, 方阳, 陈振茂. PE 结构埋深缺陷的微波无损可视化检测. 无损检测, 2023, 45(9): 22-27.

[32] 任延钊, 李勇, 苏冰洁, 向异, 刘正帅, 任淑廷, 陈振茂. 双层异质金属构件界面损伤的暂态涡流定量检测. 无损检测, 2023, 45(9): 54-60.

[33] 苏冰洁, 李勇, 任延钊, 刘正帅, 任淑廷, 陈振茂. 金属构件缺陷的脉冲涡流近 - 远场复合定量检测. 无损检测, 2023, 45(10): 1-8.

3.2 发明专利

[1] Shejuan Xie, Yue Li, Panpan Xu, Zhenmao Chen, Jingda Tang, Hang Yang. Wireless flexible magnetic sensor based on magnetothermal effect, and preparation method and detection method thereof, Patent No: US11846686B2, Date of Patent: 2023.12.19.

[2] 陈振茂, 朱玉龙, 赵迎松, 方阳, 蔡文路, 解社娟, 杨茜. 针对叶片气膜孔边裂纹检测的柔性阵列涡流探头及方法, 授权号 ZL202110751680.0, 授权日 2023.02.28.

[3] 李勇, 刘正帅, 任淑廷, 陈振茂, 李孟奇. 一种柔性螺旋形瞬变涡流匀场激励探头及缺陷检测方法, 授权号 ZL 202110426686.0, 授权日 2023.05.30.

[4] 解社娟, 杨茜, 张小垒, 李鹏, 赵迎松, 朱玉龙, 陈振茂. 抗干扰强的均匀场激励方向性涡流探头及检测方法, 授权号 ZL202110706287.X, 授权日 2023.08.01.

[5] 陈洪恩, 乔亮, 陈振茂, 解社娟, 赵迎松, 王志军. 基于差分线圈的高速轮毂在线电磁检测系统及检测方法, 授权号 ZL202110149628.8, 授权日 2023.08.15.

[6] 方阳, 杨西含, 陈振茂, 陈洪恩. 一种非接触式 CFRP 结构损伤监测系统及方法, 授权号 ZL202310919166.2, 授权日 2023.10.10.

[7] 方阳, 杨西含, 陈振茂, 李勇, 王若男. GFRP 内部分层缺陷的毫米波成像可视化定量检测方法, 授权号 ZL202310927766.3, 授权日 2023.10.10.

[8] 方阳, 杨西含, 王若男, 陈振茂, 陈洪恩, 李勇. 一种基于新型天线的材料反射率测试方法, 授权号 ZL202310912760.9, 授权日 2023.10.10.

[9] 陈振茂, 杨懿帆, 陈洪恩, 乔亮, 高轩. 针对微小孔周裂纹高精度检测的柔性旋转涡流检测探头及方法, 申请号 CN202310359982.2, 申请日 2023.04.06.

[10] 解社娟, 鲁国航, 张继洲, 陈振茂, 陈洪恩. 基于新型信号处理的大提离下管道壁厚脉冲涡流检测方法, 申请号 CN202310185218.8, 申请日 2023.03.01.

[11] 陈洪恩, 杨懿帆, 陈振茂, 乔亮, 郭威. 一种针对孔结构内部及背面缺陷的涡流检测探头及方法, 申请号 CN202311202581.2, 申请日 2023.09.18.

3.3 大会报告和邀请报告

[1] 陈振茂, 解社娟. An introduction of long term joint researches on ENDE with Prof. Takagi's laboratory. 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 大会报告, 东京, 2023/11/12-15, 2023.

[2] 陈振茂. 定量无损检测理论和技术研究的一些新进展. 重大装备结构健康监测中的实验力学方法研讨会, 特邀报告, 厦门, 2023/10/28.

[3] 陈振茂. 电磁超声检测新技术研究进展. 海峡两岸无损检测技术研讨会, 特邀报告, 厦门, 2023/5/20.

[4] 解社娟. Electromagnetic thermal testing of typical defects in thermal barrier coating of heavy-duty gas turbine blades. 东北大学客座教授特别讲座, 特邀报告, 仙台, 2023/8/25.

[5] 解社娟. 电磁热检测理论及其对涂层系统

典型缺陷的应用。第四届中国航空强度技术发展青年论坛，特邀报告，西安，2023/9/9。

[6] 裴翠祥 .PBX 材料的复杂式载荷损伤演化表征及无损检测。第九届含能材料与安全弹药技术研讨会，特邀报告，海口，2023/6/13-17。

4 结语

2023 年西安交通大学无损检测团队在无损检测基础理论、方法开发、检测新技术、新探头、仪器研发及应用等方面继续开展了深入研究，取得了系列进展。所取得的研究成果得益于国家项目、国内外同行和学校学院的大力支持和合作，值此表示诚挚的感谢和敬意。2024 年，实验室将继续在无损检测领域发光发热，真诚期望与国内外专家同行深入开展更为密切的交流合作，合力解决无损检测前沿问题、行业共性难题，突破核

心技术和瓶颈，为推进我国成为无损检测理论、技术和应用强国贡献力量。

陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术
研究中心
复杂服役环境重大装备结构强度与寿命
全国重点实验室
西安交通大学航天航空学院
解社娟，李 勇，裴翠祥，陈洪恩，
方 阳，陈振茂 供稿
2024 年 2 月