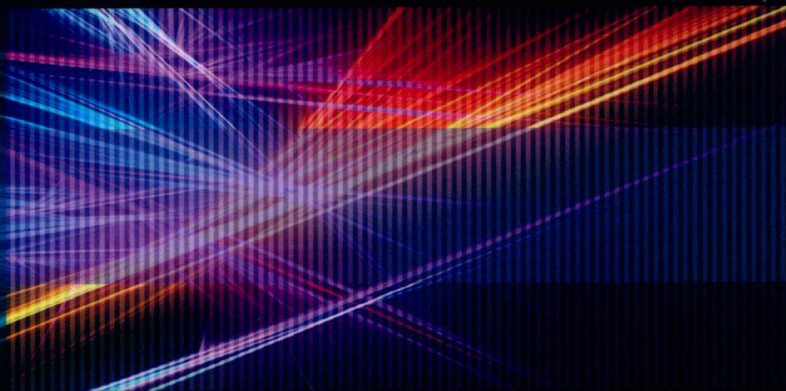


**Terahertz Nondestructive Testing of
Composite Materials**



复合材料太赫兹 无损检测技术

邢砾云 著



科学出版社

复合材料太赫兹无损检测技术

邢砾云 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从几种航空领域先进泡沫材料在太赫兹波段的光谱特性入手,结合泡沫内微结构直径对太赫兹波的衰减影响进行分析。基于 API T-Ray 5000 实验平台分别对泡沫-铝和玻璃纤维泡沫芯材夹层结构的太赫兹脉冲透射、反射模式人工预置缺陷检测结果进行数据分析,结合缺陷特征谱改进成像方法。本书基于太赫兹成像降质因素结合高光谱特性阐述多源信息融合超分辨率重建算法的设计,显著提高成像效果,为进一步实现准确的量化检测提供研究基础及新思路。

本书可供太赫兹、无损检测、复合材料、高分子化学等工程领域的科研人员或高等院校测量技术、电磁与微波技术等专业的本科生和研究生阅读参考,亦可供相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料太赫兹无损检测技术 / 邢砾云著. —北京: 科学出版社, 2019.5
ISBN 978-7-03-059971-1

I. ①复… II. ①邢… III. ①复合材料—无损检验 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 285195 号

责任编辑: 狄源硕 张培静 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月 第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 5 月 第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 192 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

先进泡沫芯材，如聚甲基丙烯酸酯亚胺（polymethacrylimide, PMI）泡沫、航空级聚氯乙烯（polyvinyl chloride, PVC）泡沫，具有全闭孔、比强度高、高延展性、易设计、稳定、兼容及阻燃性好等特点，在多个高科技领域的重要部件中得到应用。然而，在生产、服役过程中，泡沫芯材及夹层结构难免出现各种缺陷，造成安全隐患。因此，发展无损检测探伤技术对确保泡沫芯材及夹层结构的使用安全非常必要。经典的检测手段（如 X 射线检测方法）由于对泡沫和缺陷都是透明的，因此，对比度不佳，所以无法清晰成像。太赫兹辐射对泡沫材料的半透明性，使其在该类材料的无损检测方面潜力巨大，与传统技术形成互补。对于相关技术的研究，国内外各大研究机构均有开展，尤其是美国国家航空航天局，在航天飞机事故之后高度重视，但研究对象为聚氨酯（polyurethane, PU）泡沫的报道较多。先进泡沫芯材的制备与运用，给泡沫材料太赫兹波段的无损检测带来了新的研究课题。

本书首先基于对航空领域先进泡沫材料太赫兹波段的光谱特性分析、基本光学参数获取，分别研究航空泡沫复合材料对太赫兹脉冲能量损耗大的原因与泡沫内微结构之间的关系，并结合米氏散射理论通过数值模拟消光过程。以上研究成果为后期泡沫复合结构在太赫兹波段的研究分析提供了有利数据，奠定了基础。其次，基于 API T-Ray 5000 实验平台较系统地对不同结构、多种缺陷的泡沫及复合结构进行太赫兹脉冲透射、反射模式实验研究，结合缺陷特征谱改进成像方法。为改善成像效果及太赫兹时域光谱（terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS）成像对小缺陷及损伤的检测极限，设计基于太赫兹成像降质因素及高光谱特性的多源信息融合超分辨率重建算法，显著提高了成像效果，为进一步实现准确的量化检测提供了研究基础及新思路。

本书研究成果在实验平台、样本购置、加工以及技术指导方面得到了重庆市应用开发重大项目“太赫兹复合材料无损检测成像设备研制”（项目编号：cstc2013yykfc00007）的大力支持。同时，北华大学“青年提升项目”（项目编号：101416059）、北华大学博士启动基金项目“太赫兹无损检测技术的研究与应用”（项目编号：202117046）、吉林市科技创新发展计划项目“基于太赫兹时域光谱技

术的癌症辅助早期诊断应用研究”(项目编号: 201831713)和吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目“基于 THz-RTDS 成像退化机理的无掩模压缩感知三维重构研究”(项目编号: JJKH20190642KJ)也为本书出版提供了支持。上述科研项目的研究为航空泡沫及其复合材料的无损检测研究及应用提供了大量的数据支撑。

由于研究样本数量限制,加之本人水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者提出宝贵意见与建议。

邢砾云

2018年9月

目 录

前言

1 复合材料的无损检测技术	1
1.1 先进航空复合泡沫芯材及缺陷类型概述	1
1.1.1 先进航空复合泡沫芯材	1
1.1.2 缺陷类型概述	4
1.2 现有无损检测方法的优缺点	4
1.3 太赫兹应用于泡沫芯材无损检测中的优势	5
1.4 国内外研究现状	6
1.4.1 国外研究现状	7
1.4.2 国内研究现状	8
1.5 泡沫芯材及其复合结构的太赫兹无损检测难点	9
2 航空泡沫芯材的太赫兹光谱特性	11
2.1 相关技术概述	11
2.1.1 THz-TDS 技术理论分析基础	11
2.1.2 航空泡沫芯材太赫兹波段光学常数获取方法	14
2.1.3 THz-TDS 光谱成像基本方法	18
2.2 泡沫芯材的太赫兹波段透射特性分析	22
2.2.1 泡沫芯材的太赫兹波段透射实验平台搭建	22
2.2.2 国内外 PMI 泡沫芯材的太赫兹波段透射特性分析	23
2.3 泡沫芯材的太赫兹波段反射特性分析	28
2.3.1 泡沫芯材的太赫兹波段反射实验平台搭建	28
2.3.2 国内外 PMI 泡沫芯材的太赫兹波段反射特性分析	28
2.4 航空泡沫芯材太赫兹波段光学参数提取	29
2.4.1 PMI 泡沫芯材的太赫兹波段光学参数提取及分析	30
2.4.2 PVC 泡沫芯材的太赫兹波段光学参数提取及分析	34
2.5 散射模拟	36
2.5.1 米氏散射理论基础概述	37
2.5.2 PMI 泡沫样本内部微结构直径散射分析	40

2.5.3 数值模拟	42
2.6 本章小结	44
3 航空泡沫材料复合结构无损检测技术	46
3.1 航空泡沫-铝复合结构的无损检测实验研究	46
3.1.1 泡沫-铝复合结构的缺陷特征谱分析	46
3.1.2 反射成像结果及讨论	60
3.2 航空泡沫夹层结构的无损检测技术	66
3.2.1 PMI 泡沫芯材与蜂窝夹层结构性能比较	66
3.2.2 泡沫夹层结构缺陷的太赫兹无损检测缺陷预置	67
3.2.3 泡沫夹层结构的多缺陷检测特征谱及成像方法分析	72
3.3 与其他无损检测方法的检测结果比较	96
3.4 本章小结	98
4 多源信息融合的超分辨率算法设计	100
4.1 实验系统成像分辨率分析	100
4.2 常用超分辨率算法比较及其在 THz-NDT 中的应用	103
4.2.1 超分辨率图像重建综述	103
4.2.2 超分辨率图像重建的理论基础	104
4.2.3 常用超分辨率算法比较及其在 THz-NDT 中应用的比较	106
4.3 基于高光谱分析的多源信息融合超分辨率算法设计	108
4.3.1 太赫兹时域脉冲扫描成像特征分析	108
4.3.2 太赫兹时域脉冲扫描成像高光谱特征分析	109
4.3.3 多源信息融合的超分辨率重建算法设计	110
4.3.4 多源信息融合的超分辨率重建算法在 THz-NDT 中的应用	117
4.4 量化检测及误差分析	120
4.4.1 图像预处理	121
4.4.2 缺陷定量检测	126
4.4.3 数据分析	128
4.5 本章小结	134
5 总结	136
参考文献	139

1 复合材料的无损检测技术

随着航空泡沫芯材制备技术的快速发展,新材料、新结构、新工艺不断出现,新型的泡沫芯材也不断被开发和应用。新型的泡沫芯材因其诸多特质,包括高比刚度、质量轻、弹性好、易成型、易安装、耐化学腐蚀、优异的热学性质等,已逐渐在多个领域替代了金属及木质材料等的地位。应用领域涉及航空航天、汽车制造、医疗仪器、电子工业、建筑行业等,备受航空航天领域的推崇,已成为航空技术发展应用中不可缺少的材料,近几年研究及应用进展更是迅猛^[1-3]。然而在新型泡沫芯材被广泛应用的过程中,也出现了很多问题。受生产工艺、环境控制等因素的影响,以及材料制备过程的工序操作不当,会引入一些不稳定因素,造成材料内部缺陷的产生。在泡沫复合结构的制备、服役过程中,缺陷和损伤也总是存在,这必将构成难以预料的安全隐患^[4]。2003年,美国哥伦比亚号航天飞机的失事、2005年STS-114 RTF事件均与外挂燃料箱隔热泡沫缺陷的存在有关^[5],这就使泡沫缺陷检测成为保障航空安全的关键。而无损检测发展研究作为航空部件缺陷检测的主要手段,更加成为该领域的研究重点。但泡沫复合材料松散的结构及隔热性,使得常规无损检测结果不能满足量化检测要求。

相比之下,太赫兹无损检测具有技术上的优势,在对事故原因进行排查的过程中,经多种无损检测技术比较后,美国国家航空航天局及外挂燃料箱生产商一致认为,对泡沫材料进行无损探测,太赫兹和X射线背向散射是最为有效的技术手段。而太赫兹技术在泡沫材料检测方面的种种优势特性,使得其在泡沫材料的无损检测方面潜力巨大^[4-6]。

1.1 先进航空复合泡沫芯材及缺陷类型概述

1.1.1 先进航空复合泡沫芯材

高性能泡沫芯材能提高其复合结构的刚度,且在比强度、承载力、抗蠕变及疲劳等方面性能优异,因此适用于各种高端领域。而普通泡沫芯材的耐热性能相对较差,温度高于130℃即会发生变形,严重影响其强度性能,不能用于航空航天、军事等领域。由此可见,欲将泡沫芯材应用于航空领域,性能优良的先进泡沫芯材的研究成为必然^[7-9]。

1. 德固赛 PMI

在先进复合材料领域,最常用的夹层结构的芯材是 PMI 泡沫,这是一种交联硬质结构。其主要原料以甲基丙烯酸、甲基丙烯腈为主,经过低温预聚、高温环化制备而成^[10]。2014 年 12 月,澳大利亚 GMS 复合材料公司在“Foam Core Impresses in Aircraft Study”一文中,通过飞机及航空器部件上使用的复合材料夹层的对比实验,总结称 ROHACELL® PMI 泡沫的特性在降低制造成本及重量等各个方面优于典型的蜂窝芯设计^[11]。

PMI 泡沫芯材的优良特性:①易于加工成型,无须特殊设备。②100%闭孔,各向同性。③与各类树脂兼容,适用于湿法及预浸料。与铝蜂窝结构相比能够保证更好的有效粘接。④高温变形温度较高(180~240℃),尺寸稳定性好。⑤比强度高,相同密度下,PMI 泡沫具有最高的比强度、比模量。⑥抗压缩蠕变性好^[12]。

PMI 泡沫的种种优良特性,使其具有广泛的应用前景,适用于多种环氧、树脂预浸料的中高温或共固化工艺,是高性能夹层结构的理想芯材^[13]。PMI 夹层结构质轻、强度高,已在美国、日本、欧洲等国家和地区的航空航天领域多个关键部件中得到应用^[14]。

综合以上分析,PMI 泡沫综合性能突出,在传统或高科技领域,尤其是航空航天方面有着重要应用价值,市场前景广阔^[15]。本书选择 PMI 泡沫芯材作为太赫兹无损检测(terahertz nondestructive testing, THz-NDT)的研究对象。

2. 戴铂 HT 系列 PVC

戴铂(Divinycell)HT 也是一款具有高比强度的航空级泡沫芯材^[16],与各类树脂兼容,适用于预浸料、湿法成型树脂体系及导流工艺,且符合 FAR25.853 自熄性,是高性能航空航天夹层结构的理想芯材。Divinycell HT 泡沫芯材由于其高工艺温度,已经成功应用于轻型飞机、私人喷气机和喷气公务机结构设计。贝尔直升机德事隆公司、波音公司、塞斯纳飞机公司及 MD 直升机公司均已使用该材料^[17]。

Divinycell HT 泡沫芯材的优良特性:①Divinycell HT 满足高性能、轻质需求,是闭孔、可热成型的泡沫芯材,具有高延展性和弹性,在受到冲击力和动态载荷时能提供卓越的动态性能;②与广泛的树脂基体材料兼容,它还具有低吸水率和自熄性;③Divinycell HT 适合各种预浸料体系并与高达 145℃的工艺温度兼容^[17]。

凭借其优良的抗冲击性能、对碳氢化合物和其他飞机液体的低敏感性及卓越的介电性能,Divinycell HT 适用于结构、非结构的应用。Divinycell HT 在低温性能方面表现优异,使其成为航天发射应用的首选。Divinycell HT 目前主要应用于

商用雷达罩、机翼前缘、整流罩和襟翼、旋翼机部件、运输机、螺旋桨和风扇叶片、油箱、水箱、废物箱、通用飞机主结构等。

3. 测试样本

根据上述对几种航空泡沫芯材的性能分析,本书主要选择 10mm/35mm/60mm 厚德固赛 71WF、51WF 型号 PMI 泡沫^[18], 10mm 厚德固赛 71HF、51HF 型号 PMI 泡沫,国产的美沃 30mm 厚 SP1D80-P-30 型号 PMI 泡沫及 5mm 厚的 Divinycell HT 系列 PVC 芯材^[19]作为研究对象,具体参数如表 1.1 所示。表 1.1 中相关参数根据 Divinycell 公司网站提供的产品数据获得。

表 1.1 测试航空泡沫芯材相关参数^[18-19]

材料类型	型号	厂家	密度/(kg/m ³)	微结构直径/ μ m	厚度/mm
PMI	51HF	德固赛	52	约 120	10
PMI	71HF	德固赛	75	约 160	10
PMI	51WF	德固赛	52	约 460	10/35/60
PMI	71WF	德固赛	75	约 550	10/35/60
PMI	SP1D80-P-30	美沃(国产)	80	约 300	30
PVC	HT61	戴铂	65	—	5
PVC	HT81	戴铂	80	—	5
PVC	HT101	戴铂	100	—	5
PVC	HT131	戴铂	130	—	5

通过各生产厂商提供的数据,比较国内外两种可用于航空级夹层结构的泡沫芯材的力学性能,如表 1.2 所示。

表 1.2 测试航空 PMI 泡沫芯材样本相关参数^[18]

型号	密度/(kg/m ³)	压缩强度/MPa	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	剪切强度/MPa	剪切模量/MPa	断裂伸长率/%
71WF	75	1.7	2.2	2.9	1.3	42	3.0
SP1D80-P-30	80	1.6	2.6	2.3	1.4	40	12.22

通过压缩强度、剪切强度、拉伸强度、弯曲强度等力学性能的比较,两种型号的 PMI 泡沫耐疲劳性能均较高,在高动力载荷的夹层结构中使用,强度和模量等性能指标差异很小,最大承载力明显高于其他硬质泡沫。国产的美沃 SP1D80-P-30 型号的 PMI 泡沫表现出优异的综合力学性能,与德国产品相差无几,甚至有些指标稍好。可见,中国在用于航空领域的先进泡沫夹心材料生产方面已取得初步成果。

1.1.2 缺陷类型概述

目前, 航空工业的结构设计主要是由寿命周期、成本和减重所驱动。飞机设计的关键挑战之一是在不牺牲强度的同时使结构尽可能地轻。航空工业领域内的质量要求不允许有丝毫差错, 使得从设计到生产再到使用过程中的质量监控、安全检测任务变得更为艰巨。

常用的航空夹层结构泡沫芯材一般包括 PMI、PU、PVC 等, 其中以 PMI 泡沫材料的使用最为广泛^[20]。PMI 泡沫为固体发泡的全闭孔结构, 泡壁不易损坏, 抗蠕变性使其适合高温稳定成型。PMI 泡沫有着易加工成型、各向同性、低吸湿性、良好的介电性能及防火无毒性等特点, 使其成为 21 世纪很多领域研究的热门材料之一。

该材料在宇宙航空及航天等高科技领域运用较多^[21], 但应用成本较高, 且在生产及服役中会产生各种缺陷。缺陷类型可分为蒙皮缺陷、蒙皮与泡沫芯材的粘接缺陷、泡沫芯的缺损等, 如划痕、裂纹、空洞、掺杂物、脱粘等缺陷^[22]。相应的无损检测手段得以研究, 但从实际应用角度考虑, 航空部件、高速列车及运载火箭整流罩上应用的泡沫夹层结构通常检测面积较大、厚度较薄, 且较差的热导、电导性, 较大的声衰减性, 使常规复合材料无损检测方法不再适用^[23]。

1.2 现有无损检测方法的优缺点

针对复合材料的多种常见缺陷, 多种无损检测手段得到发展。复合材料本质复杂, 使其疲劳、断裂的成因较金属结构更不好理解。因此, 相应的无损检测方法表征材料缺陷的能力显得至关重要。既要保证承重结构设计的作用, 又要能对制备、使用过程中的缺陷进行标定, 以有利于控制生产质量及维修^[24]。现有的复合材料检测方法, 一方面基于成熟经典金属材料无损检测与复合材料特性的结合发展而来, 如基于射线、超声、涡流等的检测技术, 其中很多方法对泡沫复合结构形式是失效的。另一方面, 一些新的针对各种复合材料不同特性的检测技术也应运而生, 如基于光纤传感器的嵌入式检测方法等。此外, 还出现了超声-红外、激光电子剪切散斑红外等多技术联合的应用形式^[25-26]。

泡沫夹层结构的检测面积一般较大, 由于泡沫芯材的特殊性, 很多检测手段失效。空气耦合超声法、超声脉冲回波法及激光错位散斑干涉无损检测是目前常用的检测手段^[27], 错位散斑方法虽相对其他检测手段效果好, 但检测结果往往受到人为操作因素的影响, 结果不稳定。2014 年 7 月, 法国国家航空航天研究中心 (Office National Experimental Research of Aerospace, ONERA) B. Lamboul 利用弯

曲波和剪切斑检测了泡沫复合组件的脱胶。从检测结果上看,检测结果并不理想,甚至部分未检出^[28]。

几种常用无损检测方法的比较如表 1.3 所示。

表 1.3 无损检测方法的比较

手段	原理	局限性	应用
超声检测	利用声学检测技术测量工程材料的反射及脉冲弹性波以实现缺陷信息的获取,对于大多数材料穿透性能力一般较好	对形状复杂或表面粗糙度较敏感	平面型缺陷探伤
X 射线背向散射检测	在被检测物体的单侧并于某特定的散射角处,依据散射光子数计算电子密度分布,经数据处理得出被检测物体的三维密度分布图,成像清晰	被检测物体深度扫描时间长,高速扫描成本高,不适合在线原位检测且存在辐射污染	适合大区域单边扫描金属材料及一些高分子材料、复合材料
振动检测	通过检测结构的自然振动模式,监测随时间推移,结构刚度变化而导致的特征共振移位	对于复合结构的应用,振动模式相对金属结构更复杂;振动弹性模量建模局限于平板;对于大多数材料相关测量只能针对局部;目前,只对薄层压板结构检测适用,随着厚度的增加使复合结构刚度提升而降低了合适的振动频率的检测能力	金属结构、大型复杂组件、薄层压板、局部检测、平板结构复合结构
压力传感器检测	将传感器永久安装或嵌入复合结构中,提供监控动能,可定期监测,通过表面或内部结构的应变映射,确定可能损伤位置,可原位检测	在结构设计时,需考虑内嵌对结构力学性能的影响,对某些强度要求高的结构不适用	复合材料夹层板、疲劳易损件

1.3 太赫兹应用于泡沫芯材无损检测中的优势

自 2004 年美国麻省理工学院提出太赫兹技术为“改变未来世界的十大技术之一”以来,欧洲、亚洲、大洋洲等地区的多个国家逐渐确立了太赫兹技术的支柱技术地位。目前,全世界约 130 多家研究机构开展了相关技术研究。太赫兹技术的研究在中国兴起较晚,在 2005 年以“太赫兹科学技术的新发展”为主题的香山科学会议之后,才逐渐确立了太赫兹技术的地位及相应的发展计划^[29-30]。

太赫兹波是介于电磁波谱和红外之间的一段特殊电磁波段,指光谱学的远红外和电子学的毫米、亚毫米波;频率范围在 0.1~10THz (1THz=10¹²Hz),某些场合特指 0.3~10THz^[30]。目前,基于 THz-TDS 成像技术已成为联系太赫兹技术与无损检测技术的关键环节。在实际应用中,太赫兹反射式时域光谱(terahertz

reflect time domain pluse system, THz-RTDS) 一直以来都被认为是更接近于实际应用的检测目标物体特性的方法, 也是最有可能在工业应用中采用的太赫兹技术^[31]。

美国罗彻斯特大学光学研究所所长张希成教授在《自然》《自然光子学》《科学》和英国广播公司等国际著名期刊和媒体的访谈中, 提出急需太赫兹的工业应用的领域是无损检测、质量控制和缺陷检查。他对 300 多家公司的调查结果显示, 80%以上的公司表示他们最需要无损检测^[30]。

对某些隔热、结构复杂的复合材料, 尤其是泡沫芯材的无损检测中, 该类材料质地疏松且绝热性较好, 造成了对超声波的强烈散射, 信号衰减大, 影响成像质量, 利用常规超声技术已难以满足检测要求, 射线法则很难实现原位探伤检测。

相比之下, 太赫兹无损检测对上述材料的缺陷探测优势明显: ①半透明性——传统的射线检测法, 对某些检测对象和缺陷的成像对比度不理想, 检测结果难以用于无损检测的缺陷准确识别, 而太赫兹波在缺陷处折射率发生变化, 成像清晰, 能够很好地实现对泡沫芯材缺损、蒙皮脱粘状况的检测及涂层厚度评测; ②散射相对小——太赫兹波 $300\mu\text{m}$ 的典型波长, 使其对尘埃和烟尘颗粒具有良好的穿透性, 受米氏散射的影响远小于可见光和近中红外光; ③安全性——光子能量 4.1meV ^[30], 远低于 X 射线的光子能量千电子伏级, 辐射能量小, 因而不存在光致电离危害; ④波谱分辨能力强——太赫兹在测试对象的形貌及组成辨别方面的分辨能力较强, 原因在于, 太赫兹波与物质内的自由载流子相互作用, 而在太赫兹作用下大量分子能级跃迁, 表现出明显的吸收和色散特性, 该特性可用于物质鉴定; ⑤成像比微波分辨率高——由于时间分辨率高, 明显好于微波波段的分辨能力, 因此可以获得相对较高的亚毫米级成像空间分辨率; ⑥光学常数提取方便——太赫兹波时域脉冲信号携带信息丰富, 据此可直接提取被检测物质的吸收、透射谱及介电常数^[32]。

综上所述, 太赫兹探测的特点显示了其无与伦比的优势, 必将使其具有广阔的应用前景, 并成为现有无损检测手段的有力补充^[33]。

1.4 国内外研究现状

近年来, 国外学者采用太赫兹手段, 以航空飞机外挂燃料箱泡沫芯材缺陷为主要研究对象进行了无损检测的部分研究, 在检测方法、数据分析、成像方法等多方面取得了一定研究成果, 但研究对象较单一, 主要集中在 PU、PVC 等泡沫芯材。国内对泡沫材料 THz-NDT 的研究才逐渐兴起, 研究成果相对较少。

1.4.1 国外研究现状

1996 年,美国伦斯勒理工学院的张希成等研制出可实时成像的太赫兹系统^[34]。1997 年,贝尔实验室的 D. M. Mittleman 小组首次提出了基于飞行时间的太赫兹波成像方法^[35],实现了 THz-RTDS 对样本不同深度折射率的层析成像,实现了样本表面或不同层面形貌的三维描述。虽然不是真正意义的三维成像,却为层析成像成为可能提供了依据。2004 年,日本筑波大学的 Hattori 等首次搭建了基于光学外差探测技术的太赫兹成像,但成像像素点比较少,很难真正实现实时成像^[36]。2005 年,荷兰的 van der Valk 等实现了太赫兹偏振成像,为太赫兹成像技术开辟了新方向^[37]。2003~2005 年,美国国家航空航天局在航天飞机的外挂燃料箱绝热泡沫无损检测中使用了太赫兹技术。张希成的科研团队开发了一款连续波太赫兹便携式成像系统,该系统基于电光晶体和电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机实现实时成像,美国国家航空航天局已批准并使用在航天飞机泡沫的实际检测中。与扫描成像相比,成像速度虽有改善但仍有待提升^[38-39]。2006 年, Banks 等基于二维麦克斯韦方程组,以 PU 泡沫为研究对象,建立了法向入射的太赫兹平面波脉冲传播模型。对带有熔合线的 PU 泡沫板检测研究发现,应用经典电磁学理论可描述并区分熔合线及周围泡沫材料^[40]。2007 年, Chiou 等应用太赫兹成像技术分析了航天飞机外部燃料箱泡沫的多种缺陷,给出了一些信号处理及建模方法改进^[41]。Nair 等针对 PU 泡沫-金属结构脱粘及分层缺陷的检测结果,提出了基于小波变换的信号处理方法,提高了成像对比度,使得缺陷更易辨识^[42]。Melapudi 等基于光纤追踪模型的近似法,以 PU 泡沫、空气、金属结构作为实验样本,进行了 THz-TDS 检测实验^[43]。2008 年, Stoik 等应用 THz-TDS 技术对飞机上使用的玻璃纤维复合材料的损伤包括空洞、分层、机械损伤及热损伤进行了无损检测。结果表明,局部热损伤未明显改变玻璃纤维的折射率及吸收系数。应用幅度、相位信息成像获得了空洞缺陷的定位。通过主脉冲后的反射效应可获得分层深度信息,同时检测出了弯曲应力损伤和模拟隐藏裂纹^[44]。2009 年, White 等应用 THz-TDS 成像技术对航空发动机涡轮叶片的热障涂层厚度进行了检测,通过成像结果可以清晰反应涂层厚度的均匀性^[45]。2010 年, Wiegand 等分别对太赫兹发射、探测光束进行了线聚焦,结合两个互补金属氧化物半导体阵列的差分探测技术实现了太赫兹差分实时成像系统^[46]。同年, Quast 等基于 Synview 公司的连续太赫兹波成像系统平台,在 230~320GHz 频段对玻璃纤维泡沫结构进行分析,检测出了人工缺陷^[47]。2011 年, Roth 等基于太赫兹计算机断层扫描技术对航天飞机热保护系统的泡沫材料的扫描检测与 X 射线微聚焦断层扫描结果对比发现,前者可实现对泡沫内部空洞缺陷的良好检测,效果更佳且更安全^[48]。同年, Rahani 等应用太赫兹技术对聚合物泡沫砖的热损伤进行了检测,实验发现高分子

多孔浮石材料的介电性能随热暴露温度升高而升高^[49]。加拿大滑铁卢大学的 Houshmand 等提出了棒滤波器的方法,实现了连续太赫兹波复合材料缺陷振幅、相位成像结果的滤波处理,然后进行融合检测。该方法在噪声特性难以确定的情况下,提高了 THz-NDT 的有效性^[50]。2012 年, Pastorelli 等基于尼康公司的 THz-TDS 系统,在 0.15~4.2THz 范围内检测了从纤维素衍生物到聚乙烯的多种复合材料,发现非极性聚烯丙烯烃和聚苯乙烯聚合物没有明显的可用于聚合物鉴别的特征;并对增塑剂等添加物及化学结构的太赫兹特征进行了检测,证明了 THz 光谱的鉴别能力;应用三维太赫兹脉冲成像,对 PU 泡沫的内部空隙、裂纹等缺陷进行了检测识别,检验了太赫兹技术对多种复杂结构的复合物的成像能力^[51]。2014 年, Angrisani 等针对航空复合材料出现的早期亚毫米裂纹的无损检测,开发了一套基于压缩采样的太赫兹检测系统,大大提高了检测速度^[52]。2016 年, Abina 等对热建筑保温材料聚合物泡沫进行了基于太赫兹光谱及成像技术进行了研究,计算了其吸收系数,并得出导热系数与吸收系数成反比关系。此外,他们还应用太赫兹振幅成像使预置缺陷和泡沫材料内部结构清楚可见,证明了 THz-NDT 技术对材料内部结构检测的能力^[53]。

1.4.2 国内研究现状

2005 年,沈京玲等以太赫兹技术在航天飞机燃料箱泡沫材料[喷涂式绝缘泡沫(spray-on foam insulation, SOFI)]的成功应用为例,详细阐述了太赫兹波无损检测技术在航空航天领域的应用特点、适用条件^[54]。2007 年,首都师范大学张存林领导的科研团队基于一种小型便携式 0.2THz 连续太赫兹波成像系统,探测出燃料箱绝热泡沫中最小为 2.6mm 的人工预埋缺陷^[55]。周燕以聚氨酯泡沫为研究对象,对比得出,连续太赫兹系统 0.38THz 图像对比度相对较好,0.2THz 在透射性上相对好,能够检测的泡沫厚度稍大。周燕还对在 0.2THz 和 0.38THz 获取的信号提取了更多信息特征,结合 8 种处理方法,增强了对缺陷的辨别度,提高了连续波成像技术的应用能力^[56]。2008 年,焦月英以两个由航天材料与工艺研究所提供的模拟脱粘的燃料箱泡沫板为研究对象,获得了太赫兹连续波反射式成像结果,将反向传输(back propagation, BP)神经网络技术应用于缺陷位置、大小和形状的自动识别^[57]。2009 年,袁宏阳同样基于 0.2THz 连续系统对自己加工的航天绝热泡沫材料的缺陷进行了探测实验,获得了反射式连续波成像结果,分析了不同缺陷尺寸对成像结果的影响^[58]。邓朝利用反射成像模式,精确地模拟了实际应用中的测量模式,对燃料箱泡沫面板模拟脱粘缺陷进行了连续 THz-NDT 实验^[59]。邹园园等同样基于 0.2THz 连续太赫兹系统,分析了航天所用的燃料箱泡沫板隔离层的黏合效果检测结果中的条纹噪声,应用噪声频率自动确定与 Butterworth 带阻滤波器相结合的方法,成功滤除了 THz 图像条纹噪声。实验结果表明,该方法对

太赫兹图像细节保持的同时,对不同频率条纹噪声抑制作用良好^[60-61]。同年,郑州大学的缙俊培基于 MATLAB 软件将几种常规的数字图像处理技术应用于金属刀具、导线和坦克模型的太赫兹图像处理,提取了有效特征参数,实现了目标物体是快速准确识别^[62]。2011 年,邸志刚等提出了一种基于连续扫描的新型太赫兹成像系统。实验结果表明,该系统对隐藏的金属样本的鉴别能力,其空间分辨率低于 0.5mm,可以应用于无损检测^[63]。2013 年,杨振刚等基于德国 Syn View Scan 3000 连续太赫兹成像系统实现了对多层蜂窝样本的检测,获取样本不同纵深处的二维图像。实验结果表明,该系统能够实现对测试样本内部每一层夹杂物位置、分布及轮廓的检测,并能对异物的基本属性做出判断^[64]。2014 年,杨振刚等同样利用该系统进行了压制成的六面体白色高分子复合材料与钢板的黏合面检测实验,检验了对黏合面质量的太赫兹技术无损检测能力。实验结果表明,通过样本与钢板黏合面的二维太赫兹图像,可实现黏合的质量评估,推动了复合材料黏合质量及脱粘状况的测试技术发展^[65]。2015 年,东北林业大学的马欣然基于透射型 THz-TDS 系统研究了提取木材的光学参数(折射率和吸收系数)的原理和方法,并对木材的双折射特性进行了探讨,为木材表征提供了基础数据^[66]。2015 年,赵毕强等通过德国 Syn View Scan 3000 连续太赫兹波成像系统对基于隔热板预置的多种特征人工缺陷进行了检测。对特定深度下正常黏合点和缺陷点的成像结果对比,以及特定位置下反射信号随深度变化的曲线的分析,诠释了缺陷和正常点对应的信号特点,展现了太赫兹波成像技术在质量监测和无损检测领域的应用潜力^[67]。

基于上述国内外研究成果分析可见,目前太赫兹技术的泡沫材料及其复合结构缺陷检测在成像器件开发、成像速度、对采样信号的数据处理、成像效果改善以及研究检测对象的性质对检测结果的影响等方面均有一定进展。但研究结果不够系统,相应的数据支撑匮乏,对不同类别的缺陷检测方法缺乏总结,未将缺陷特征与成像效果改善联系在一起,且泡沫材料的研究很少涉及新型航空泡沫芯材及其复合结构的太赫兹特性分析及相应缺陷检测结果的讨论。太赫兹技术在该领域的应用,尤其在由新型泡沫材料组成的大型航空构件的无损检测实时性、成像效果对比度及量化检测实验方面仍有待提升,仍需大量实验数据及有效的成像方法、算法的开发。

1.5 泡沫芯材及其复合结构的太赫兹无损检测难点

根据太赫兹无损检测在泡沫芯材及其复合结构缺陷检测中的应用现状,主要难点总结如下:

(1) 泡沫材料的结构特点对检测数据分析及理论研究造成一定程度的困难。

当材料内部微结构与太赫兹波长数量级接近时,强烈的散射效应将造成太赫兹脉冲能量的损失,降低传输特性。此外,泡沫材料层间熔合线往往会影响相位变化的检测,甚至使相位消除现象消失,一定程度上增加了分析的难度。同时,较厚的泡沫材料增加了对以其为芯材的夹层结构内部缺陷的检测难度。目前,上述问题的解决方法尚未成熟,仍需在模型建立及数据解析上进一步研究^[33]。

(2) 蒙皮脱粘缺陷的量化检测是泡沫复合结构 THz-NDT 中难以克服的问题之一。

根据目前的检测方法,脱粘缺陷边缘散射未产生良好的对比度^[68],在无缺陷处与脱粘位置吸收也没有明显区别,从而无法直观辨别。

(3) 基于目前的 THz-TDS 成像系统,太赫兹图像质量很难保证。

基于硬件改进的方法在成本、开发周期上投入较大,效果却不理想。软件手段上,大多数图像处理技术未考虑太赫兹成像特有机理与图像的特征,在提高清晰度和可辨识性方面收效甚微^[69],且与成像实验过程及降质因素相脱节的图像处理算法设计也缺乏通用性。

(4) 扫描形式的成像方式成为提高大型航空部件的检测速度的障碍。

连续太赫兹成像方式虽然速度较快但获取信息有限^[70];而 THz-TDS 技术可以获取扫描点的相位、幅度等多信息,但直接扫描及成像结果不够理想,还需后数据处理。由于泡沫芯材及夹层结构部件的体积一般较大,因此,成像速度也是 THz-NDT 的关键问题之一。