

# 红外热成像技术在碳纤维复合材料缺陷检测中的应用研究

张帅

江苏航空职业技术学院, 江苏镇江, 212134;

**摘要:** 红外热成像技术是一种非接触式的无损检测手段, 实际工作常用它来检测碳纤维复合材料的内部缺陷, 核心就是利用不同部位热传导不一样的原理, 通过外部加热激励, 再用红外相机捕捉材料表面的温度分布, 就能精准找到脱层、孔隙等问题区域。在航空航天和汽车工业的实际应用中, 它能有效评估结构安全, 也为材料性能分析和质量管控, 提供了稳定可靠的技术支持。

**关键词:** 红外热成像技术; 碳纤维复合材料; 缺陷检测应用

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.05.001

## 引言

碳纤维复合材料凭着轻质又高强的特点, 在高端制造领域用得特别广泛; 但它在成型过程中, 很容易出现隐蔽性的缺陷, 传统检测方法往往有不少局限。红外热成像技术不一样, 它借助热波激励产生的瞬态响应, 能以非侵入的方式, 让材料内部结构的异变显现出来, 为工程上的缺陷识别、状态监测, 开辟了全新的技术路子。

## 1 红外热成像技术与碳纤维复合材料概述

### 1.1 红外热成像技术

在实际工业检测工作中, 红外热成像技术是常用的无损检测方法, 核心基于物体红外辐射的原理。它的工作过程很直观, 要么接收物体表面自身发出的红外辐射, 要么通过外部激励让物体产生红外辐射, 再把这些辐射转换成能直接看到的温度分布图像。我们利用材料内部热传导的不同特点, 要是材料里有缺陷, 局部的热流就会出现异常; 这样在热图像上就能明显看到温度分布不均匀的地方。这种技术不用接触被测物体, 还能快速实现全场成像, 适合大面积扫描和实时监测。

### 1.2 碳纤维复合材料特性

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强体、聚合物树脂为基体, 通过层叠与固化工艺制成的先进材料。该材料具有高比强度与高比模量的力学特性, 同时表现出良好的耐疲劳性与可设计性。其各向异性特征使得力学性能随纤维铺层方向而变化。在热学方面, 碳纤维复合材料具有较低的导热系数, 且不同方向的导热行为存在差异。这些特性使其在航空航天、汽车及体育器材等领域得到广泛应用。然而, 成型工艺中的参数波动易导致内部产生孔隙、纤维错位或层间脱粘等缺陷, 因此需借助可靠的无损检测手段进行质量验证。

## 2 碳纤维复合材料缺陷类型

### 2.1 裂纹缺陷

在实际工作中, 裂纹缺陷是碳纤维复合材料里很常见的损伤, 要么出现在基体内部, 要么发生在纤维和基体的结合面, 有微观的也有宏观的断裂。裂纹的产生, 大多是成型时残余应力集中、外部机械冲击, 或是长期承受疲劳载荷导致的。有裂纹会严重破坏材料的整体性和连续性, 让应力在裂纹尖端集中; 这会直接降低材料的静态强度和动态疲劳性能, 加速损伤扩大。

### 2.2 分层缺陷

实际工作中, 分层缺陷就是碳纤维复合材料层合结构里, 相邻铺层之间出现的界面分离。这种缺陷主要是成型时压力不均、固化不彻底, 或是受到外部冲击导致的; 它会破坏层合板的层间结合力, 让结构在面外载荷作用下发生剥离。分层的地方没法有效传递层间剪切应力, 会明显降低结构的抗弯刚度和压缩稳定性, 在动态载荷或振动环境中还会进一步扩展, 导致结构刚度退化。

### 2.3 气孔缺陷

实际生产中, 气孔缺陷是复合材料在树脂浸润和固化时, 因气体没及时排出滞留形成的微小空洞。它大多分布在纤维束之间或层间界面, 大小和分布都受工艺参数影响。气孔会减小材料的有效承载面积, 还会在孔洞边缘造成局部应力集中; 不仅会降低复合材料的层间剪切强度和抗压性能, 还可能成为裂纹的起始点。在湿热、腐蚀环境中, 气孔会成为介质渗透的通道, 加速材料老化退化。

### 2.4 纤维错位与褶皱缺陷

实际生产中, 纤维错位与褶皱缺陷很常见, 就是铺层或成型时, 纤维束没按设计方向排列, 出现了局部取向偏差或起伏。这种缺陷主要是铺贴工艺不到位、模具配合不好导致的; 它会破坏复合材料原本的力学性能, 造成局部刚度和强度分布不均。受力时, 缺陷部位容易出现应力集中, 成为早期损伤的源头, 还会影响结构尺寸稳定性和外观, 降低构件性能一致性。

## 2.5 树脂富集与贫胶缺陷

实际生产中,树脂富集与贫胶缺陷,就是复合材料里树脂分布不均匀的情况,具体表现为局部树脂过多或过少。树脂多的区域,纤维体积会减少,导致材料刚度下降;树脂少的区域,纤维没法被充分浸润,会削弱纤维和基体的结合力。这两种缺陷都会让材料外观和内部性能不一致,影响整体力学表现;而且树脂分布不均还会造成固化时收缩不一样,产生内部应力和微裂纹。

## 3 碳纤维复合材料缺陷检测中的红外热成像检测方法

### 3.1 脉冲热成像法

实际检测时,用周期性调制的热源对被测物体进行激励。常用的热源是卤素灯或激光器,它们会输出正弦波或方波形式的热流,按特定频率照射在材料表面。热波在材料内部传播时,会出现衰减和相位延迟,其传播情况会受材料自身热物性和内部结构的影响。要是材料内部有缺陷,缺陷界面就会把热波反射回去,改变局部热响应,进而让表面对应区域的温度变化幅度、相位,和完好区域不一样。我们用红外热像仪同步采集材料表面的热响应信号,通过锁相放大器或数字信号处理技术,提取出和激励频率同频的温度变化幅度与相位信息,生成幅值图和相位图。相位图不易受表面发射率不均匀的影响,能更清晰地找出深层缺陷;选择不同的调制频率,还能实现对材料不同深度层缺陷的检测。

### 3.2 锁相热成像法

实际检测时,用周期性调制的热源对被测物体进行激励。常用的热源是卤素灯或激光器,它们会输出正弦波或方波形式的热流,按特定频率照射在材料表面。热波在材料内部传播时,会出现衰减和相位延迟,其传播情况会受材料自身热物性和内部结构的影响。要是材料内部有缺陷,缺陷界面就会把热波反射回去,改变局部热响应,进而让表面对应区域的温度变化幅度、相位,和完好区域不一样。我们用红外热像仪同步采集材料表面的热响应信号,通过锁相放大器或数字信号处理技术,提取出和激励频率同频的温度变化幅度与相位信息,生成幅值图和相位图。相位图不易受表面发射率不均匀的影响,能更清晰地找出深层缺陷;选择不同的调制频率,还能实现对材料不同深度层缺陷的检测。

### 3.3 超声红外热成像法

实操中,超声红外热成像法是将超声激励和红外热成像结合起来的无损检测技术。用超声换能器,把高频机械振动传递到被测复合材料内部。当超声波在材料中传播,遇到裂纹、分层等界面型缺陷时,缺陷界面会在超声能量作用下发生摩擦或碰撞,将部分机械能转化为

热能,导致缺陷局部温度升高。这种温升会被高灵敏度红外热像仪实时捕捉记录,通过分析热像图中的异常热点及分布形态,就能判断缺陷的存在、位置和大致形态。该方法对闭合裂纹等传统热激励难以检测的缺陷特别敏感,因其直接利用缺陷自身机械耗散产热,具有激励能量集中、检测灵敏度高的特点。

### 3.4 长脉冲热成像法

长脉冲热成像法采用持续时间相对较长的热流对被测物体加热。不同于瞬态脉冲激励,热源会对被检区域持续加热数秒甚至数十秒,让热流有充足时间渗透到材料更深部位。加热阶段和后续冷却阶段,红外热像仪会连续监测材料表面的温度变化过程。由于内部缺陷会阻碍或改变热流的正常传导路径,表面温度场会出现不均匀分布,表现为过热区或低温区。通过分析加热和冷却全过程的热图像,尤其是观察温度上升与下降速率的空间差异,可评估缺陷的深度和横向尺寸。该方法激励能量较高,适合检测导热系数较低或厚度较大的复合材料构件中的较深层缺陷。

### 3.5 阶跃加热热成像法

阶跃加热热成像是基于热阶跃响应的主动式热检测方法。实操中,控制热源使施加到材料表面的热流功率,在短时间内升至较高水平并保持稳定,形成热功率的阶跃输入。阶跃加热开始后,材料表面温度随时间上升,其温升曲线和材料内部热扩散过程密切相关;红外热像仪会记录这一非稳态传热过程中的表面温度场变化。材料内部的分层、脱粘等不连续界面,会改变热扩散路径,导致其上方表面的温升曲线与完好区域出现偏差。通过分析不同像素点温升曲线的时间常数,或进行对数时间微分处理,可增强缺陷与背景的对比度,实现对缺陷的定性和定量评估。该方法检测平面型缺陷效果较好,且数据处理方法相对成熟。

## 4 红外热成像技术在碳纤维复合材料缺陷检测中的应用

### 4.1 航空航天领域应用

红外热成像技术在航空航天领域碳纤维复合材料检测中,作用十分关键。飞机、航天器的机体结构,比如机翼、尾翼、机身蒙皮和整流罩,多采用碳纤维复合材料,以此减轻重量、提升结构效率。为保障飞行安全和结构可靠,需对这些部件开展严格的无损检测;脉冲热成像、锁相热成像等方法,广泛用于生产线在役检查和定期维护。这些技术可快速扫描大面积曲面结构,非接触识别内部分层、脱粘、冲击损伤及水分侵入等缺陷。检测时,热激励源向构件表面施加能量,红外热像仪同步记录表面温度场的瞬态或周期性变化;通过分析热图

像序列中的异常温度分布,工程师能精准定位缺陷、评估严重程度,进而做出维修或更换决策,大幅提升检测效率与覆盖范围,为复合材料结构状态监测和寿命管理提供有效技术支撑。

#### 4.2 汽车工业应用

汽车工业向轻量化发展,碳纤维复合材料已广泛用于制造车身面板、底盘组件、驱动轴及高压储氢罐等关键部件。红外热成像技术,成为此类部件质量控制和在线检测的高效手段。生产线末端或工艺研发阶段,会采用主动热成像方法,对成型后的部件进行快速筛查;比如采用闪光灯脉冲激励,可检测树脂传递模塑、热压罐成型部件中的孔隙率、纤维浸润不均及层间结合不良等问题。针对几何形状复杂的汽车部件,该技术非接触、全场成像的特点优势明显,能适配自动化检测流程。将热成像系统集成到机械臂或传送带系统,可自动扫描部件关键区域、识别缺陷,再将结果与预设质量标准比对,实现生产过程的闭环质量控制和工艺优化。

#### 4.3 体育器材应用

碳纤维复合材料凭借高比强度和良好的可设计性,广泛用于生产高端体育器材,比如自行车车架、网球拍、高尔夫球杆、赛艇桨叶及冰雪运动装备。这类器材对性能和安全性要求极高,还常承受复杂动态载荷;红外热成像技术,成为其研发测试、出厂检验及职业运动员装备日常维护的无损评估工具。研发阶段,通过热成像分析可验证不同铺层设计、胶接工艺或冲击后的内部损伤;成品检测可采用超声红外、锁相热成像等方法,检出使用中可能出现的微观裂纹、分层或胶层老化。该技术不破坏器材完整性,能直观呈现缺陷位置与范围,帮助制造商提升产品一致性,为使用者提供安全依据,兼顾性能与安全。

#### 4.4 风力发电领域应用

风力发电机组的大型叶片,是碳纤维复合材料的重要应用场景,其长度可达数十米,长期工作在复杂风载和交变应力环境中。红外热成像技术,为这类巨型叶片的制造质量控制和在役健康监测提供了实用方法。叶片生产时,热成像可检测蒙皮与腹板胶接、主梁帽灌注、壳体合模等关键工艺中可能出现的粘接缺陷、干纤维区域或固化不均。已安装运行的叶片,可通过地面或无人机搭载的热成像系统远程巡检;借助太阳辐射自然加热或辅助热源激励,检测表面温度场分布,识别内部因雷击、冰雹或疲劳产生的分层、裂纹等损伤。这种大范围、非接触检测方式,能有效评估叶片结构完整性,为维护

计划制定和故障预防提供关键数据支持。

#### 4.5 轨道交通领域应用

轨道交通领域中,碳纤维复合材料常用于制造高速列车车头、车体模块、内饰板及受电弓等部件,以此实现减重、降噪,提升动力学性能。红外热成像技术在该领域的应用,主要集中在部件出厂验收、装车前质量复查及运营期间的周期性检修。比如大型复合材料车体侧墙、顶板,采用长脉冲热成像法,可检测其内部蜂窝夹芯结构是否存在脱粘、积水或芯材压溃等缺陷。维护车间内,可使用便携式热成像设备,对关键承载部件、受冲击区域快速检查,筛查隐性损伤。该技术有助于建立部件全生命周期质量档案,保障装备长期高速运行的安全性与可靠性,同时为状态修取代定期修提供技术支撑。

#### 5 结束语

红外热成像技术在碳纤维复合材料缺陷检测中,展现出突出的实操优势。它不仅大幅提高了缺陷识别的效率和准确性,还为材料安全使用、寿命评估提供了关键依据。随着技术应用不断深化,其在工程质量控制与日常维护中的实用性会进一步增强,推动复合材料检测领域朝着更高效、更可靠的方向稳步发展。

#### 参考文献

- [1] 钟昕,刘凯新,陈平. 基于引导滤波慢特征热成像的复合材料缺陷检测[J]. 测试技术学报, 2025, 39(02): 172-179.
- [2] 常皓亮. 基于红外热波成像技术的机翼蒙皮复合材料缺陷检测[D]. 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [3] 周志彦. 基于 IRT 和 PECT 的碳纤维复合材料缺陷检测方法研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2024.
- [4] 王禄祥. 碳纤维复合材料线激光扫描热成像缺陷检测研究[D]. 中北大学, 2023.
- [5] 洪康. 基于红外热成像的碳纤维复合材料缺陷表征方法研究[D]. 南昌航空大学, 2023.
- [6] ABDILLAHIDH. 基于 PCA 和 U-net 的碳纤维增强复合材料热成像缺陷检测[D]. 湖南大学, 2022.
- [7] 汪权. 基于连续线激光热成像的单向碳纤维复合材料缺陷检测研究[D]. 中北大学, 2022.

基金项目: 2024 年度镇江市社会发展指导性科技计划项目(FZ2024125); 2025 年度镇江市社科应用研究课题(2025YBL074); 2025 年度江苏航空职业技术学院院级课题资助项目(JATC250123)。