

# 无损检测新技术在热防护系统检测中的应用

肖龙 吴斌斌 罗亚威

江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院

**摘要:** 在科学技术飞速发展的新时期下, 现代化技术水平不断提升, 无损检测新技术作为当前工程检测中较为先进的技术手段, 在多个领域中应用。针对热防护系统而言, 可以起到对设备有效保护的目, 让设备主体结构始终保持在合理温度范围内。近年来, 随着新型放热材料以及隔热技术水平的提高, 对无损检测技术提出了更高要求, 常规无损检测技术已经不能满足检测需求。因此为提升检测效果和精准度, 应该加强对无损检测新技术的利用, 深入分析与研究。

**关键词:** 无损检测新技术; 热防护系统检测; 应用

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.24.115

## 引言

近年来, 在新型放热技术和材料的深入发展下, 检测工作面临的挑战逐渐增多, 对无损检测技术提出更高标准与要求, 传统无损检测技术已经无法将遇到的新问题解决, 导致检测工作效率和质量不高。对此, 在热防护系统检测中, 应该对无损检测新技术灵活应用, 结合热防护系统检测特点、要求以及现状, 将红外成像、太赫兹以及激光错位散斑等技术合理运用其中, 提升检测结果准确性, 满足现代热防护系统检测要求。

## 一、无损检测新技术与热防护系统概述

### (一) 无损检测新技术

无损检测是将光磁、声、电等特点作为基础, 在对被检测对象性能不造成影响的前提下, 检测被检对象的缺陷情况, 同时提供缺陷的大小、位置以及性质等信息, 由此明确被检测对象的安全性、可靠性。无损检测技术在发展过程中, 由于经历阶段的不同, 研究重点存在较大差异。在初期检测中, 对被检测工件的缺陷检测较为关注。发展到20世纪80年代, 无损检测技术在应用过程中, 而原有功能的基础上, 要求检测出缺陷的具体位置、类型以及大小。现阶段, 无损检测技术得到整体创新, 包含的技术逐渐增多, 提升了检测的效率和水平。在外热防护系统检测中, 将无损检测新技术应用其中, 可以借助红外成像、太赫兹以及激光错位散斑等技术, 对系统展开精准、全方位检测, 优化了传统无损检测技术的弊端。

### (二) 热防护系统

热防护系统涵盖的功能较多, 可以保证设备使用环境正常, 维持设备正常气动外形等。针对不同类型的设

备, 诸如飞行器等, 在重复应用过程中, 始终处在高温环境加之, 运行的时间存在差异, 所以在设计环节, 要结合设备的性能参数、应用部位以及环境等, 灵活确定具体的热防护形式。从热量吸收和带走方式角度分析, 热防护系统主要可以分为三种类型, 具体如图1所示。

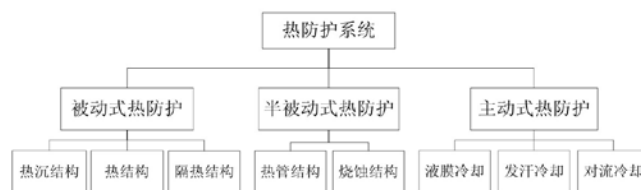


图1 热防护系统的分类

## 二、无损检测新技术特点

基于新时代背景下, 现代化技术发展速度飞快, 在各个领域中, 均强化了对先进技术的使用, 推动了行业的可持续发展进程。现阶段, 在热防护系统检测中, 对无损检测新技术科学且灵活应用, 不仅能保证检测的效率、精准度, 还能节约检测时间, 让检测过程更加连续。

### (一) 高效准确检测

在热防护系统检测中, 由于包含的零件较多, 应用的放热材料以及隔热技术更为先进, 加之系统运行环境特殊, 使得检测工作开展难度大, 传统无损检测技术暴露出的不足之处较多, 诸如效率低、检测不精准等。但将无损检测新技术应用其中, 能够将此类问题有效解决, 借助先进的技术手段, 以最快的速度检测出热防护系统缺陷。同时从技术层面分析, 准确找出热防护系统内部的问题, 明确缺陷的具体位置和大小, 整个过程高效且安全, 不仅能满足检测需求, 还能为热防护系统的平稳运行提供支持<sup>[1]</sup>。

### (二) 远距离检测

当前, 信息技术得到良好发展, 技术水平不断提升。与此同时, 无损检测新技术也迎来更多发展机遇。相比于传统无损检测技术, 无损检测新技术能与信息技术深度融合, 满足热防护系统远距离检测需求, 促进检测水平与效率的提高, 让检测结果更为精准。通过远距离检测, 可以将因为环境、检测条件、检测地点等方面的因素彻底清楚, 及时获取被检部位的真实信息。同时利用相关采集设施, 将采集的数据信息上传到接收设备上, 根据设备接收的信息, 工作人员能借助计算机系统进行分析和统计, 对数据快速整理与归纳, 简化以往繁

琐的工作流程，减轻检测压力<sup>[2]</sup>。

### （三）连续性检测

在以往热防护系统检测中，应用的无损检测技术存在滞后性，不能及时对技术更新与升级，习惯性先采样后检测。若想确保检测结果精准，需要利用技术反复检测，时效性和连续性不强，检测过程需要投入大量时间、精力、财力，甚至不能在短时间内获取检测结果。如果检测面小，产生的影响不大。但如果对热防护系统展开全面检测，传统无损检测技术很难满足系统的快速检测要求，消耗周期长，影响检测效率的同时，热防护系统的运行稳定性也会受到干扰。无损检测新技术的应用，能够保证检测过程的持久性和连续性，在检测中不需要人为中断，整个检测过程可靠且效率高<sup>[3]</sup>。

## 三、无损检测新技术在热防护系统检测中的应用

### （一）错位散斑无损检测技术的应用

现阶段，随着无损检测技术水平的不断提升，研究的领域也逐渐增多，泡沫绝热层便是研究的重点之一。发泡材料具有绝热、刚度小等特征，在检测过程中，常见的红外、超声波等检测技术的适用性不强。但结合相关文献以及实践得知，在绝热泡沫材料粘接质量检测过程中，错位散斑无损检测技术的应用效果良好。该技术是在多种技术优势的基础上发展而来，诸如光电技术、激光散斑干涉技术等，是目前比较先进的无损检测新技术。将该技术应用在热防护系统检测中，呈现出的优势较多，能够对粘接结构积极的脱粘缺陷快速检测，操作便利，效率高，检测精准度高<sup>[4]</sup>。

（1）技术应用原理。错位散斑无损检测技术是借助激光散斑干涉原理，利用经过扩束的激光照射需要被检测的物体，从面上反射的子波会出现相互干涉的情况，使之形成激光散斑场，保证明暗交叠且随机分布。在错位系统的支持下，基于CCD靶面，形成自错位方向上有一错位的两个散斑场，施加给需要检测物体相应载荷，包括热、振动、压力等，让缺陷区域产生微小的离面位移。针对变形前以及变形后的数字散斑场，采取相加减的办法，让缺陷区域形成条纹，形状与“蝴蝶”类似，由此判断热防护系统是否存在脱粘缺陷。

（2）技术的具体应用。错位散斑无损检测技术在对热防护系统检测过程中，缺陷的检测是基于对物体两个形变状态的比较得出的，可以利用真空加载的方式完成。通过高分辨率的CCD摄像系统、精准的相移技术、相位同步算法，对热防护系统运行变化过程中的应变信息、相位图形式实时记录，同时运用光电转换技术，将光信号转变为数字信号，之后采用图像处理以及分析软件，快速分析和计算，最终获得描述热防护系统形变一阶导数相位图。对热防护系统畸变位置面积自动计算，

清晰且直观显示出来，让热防护系统内部缺陷被精准检测出来，为后续缺陷的处理提供可靠依据<sup>[5]</sup>。

针对材料、大小以及形状存在差异的检测而言，共振频率明显不同，即便是在缺陷相同，所处的简正频率不同，振动模式也自然不同。对于现阶段应用广泛的宽音频扫描加载手段，如果音频信号从低频朝着高频变化，并且呈现出连续性特点，在物体表面上作用，一旦某一个频率和缺陷所处的共振频率一致，或者共振频率类似，在缺陷位置，出现共振的概率会增大，振幅也会达到最大化。基于此种情况，散斑图会对缺陷位置的信息精准、清晰记录。对于泡沫类热防护材料，需要配备相应的加载装置，在工业现场监测中利用。

（3）技术应用趋势。相比于传统无损检测技术，错位散斑无损检测技术呈现出的优势较多，特点更为独特，可以将光学干涉条纹作为材料表面，或者内部不连续表征，通过精准识别图文，快速将检测工作完成，整个过程不需要花费太长时间。通常情况下，若想形成特征条纹，需要借助加载实现。因为技术独有的特征，其在泡沫、软木类热防护系统检测中适用性强，能够获得良好的检测效果。

### （二）红外成像无损检测技术的应用

现阶段，新型隔热材料的高效应用，为相关新型设备的研发和利用提供很大支持，在今后发展中，热防护系统展现出来的优势会越来越多，诸如强度大、耐高温、质量轻、运行稳定、韧性好等。在热防护系统检测过程中，随着各类新材料的使用，如C/SiC材料等，对无损检测提出了更高要求。为提升检测效果和精准性，在对这类材料检测过程中，可以对红外成像无损检测技术合理应用，准确检测出热防护系统存在的缺陷<sup>[6]</sup>。

（1）技术应用原理。红外成像无损检测技术在应用过程中，主要是将传热传导理论以及热辐射普朗克定律作为基础，对需要检测的试件主动加热。现阶段，红外成像无损检测技术主要包含两种类型，其一为红外脉冲法热像技术；其二为红外锁相法热像技术。

（2）技术的具体应用。红外脉冲法热像技术在应用过程中，通过对脉冲热源的有效利用，激励材料或者构件，借助瞬时高能量脉冲流，对热防护系统中出现的缺陷材料或者构件进行检测，了解内部传递不均匀性而导致的表面温度差异特点。对于热防护系统存在的这一缺陷，与材料以及构件表面辐射发射率、环境条件等会有一定联系，需要表面有较强的光滑性、完整性。如果不能达到这一目标，很容易导致表面加热不均匀问题，无法了解热防护系统缺陷特点，更不能获取准确的检测信息。

在应用红外锁相法热像技术检测热防护系统期间，

可以利用外激励热源的方式，对试件的热流量进行激励，同时结合正弦规律变化，如果热流在试件内部传递，因为试件内部的热特性缺乏均匀性，或者有缺陷试件有热波信号产生，且信号的变化幅度大。加之激励的热流在试件内部有衰竭现象，致使热波信号的幅值发生变化，同时相位也会有延迟或者超前现象出现。在这种情况下，可以运用试件表面的热波信号幅值、相应信息，对试件内部的缺陷特点展开深入分析。

在热防护系统检测过程中，通过对红外成像无损检测技术的利用，可以快速对热图像进行处理，检测效率、结果准确度较高。在热图像处理过程中，可以采取二值化方法以及RGB调节方法。针对二值化方法，主要利用二值化图像，将目标区域筛选出来，先将红外热像图导入，之后借助相关软件进行灰度比的处理，对灰度比的图像平滑去噪，采取的方式方法有邻域滤波、值滤波等。结合处理效果，选择合理地去噪方式。同时人工指定裂缝处一点，将其灰度值提取出来，以此作为阈值，最后将图像二值化，让其形成黑色以及白色。在应用RGB调节方法过程中，是基于色彩模式下对红外摄像机进行三种色彩元素的调节及处理，直到将目标区域显现出来，以便人工筛选裂缝能更为便利。在此方法运用期间。首先要导入红外热像图，之后对RGB元素分别调节，调整算法为原图各像素点RGB数值，依照相应比例对元素进行调整，最小值调到零，最大值调到基准值的二倍。在调整过程中，可以采取两种方式，一种为滑动条调整，另一种为直接数值输入调整。

(3) 技术应用趋势。红外成像无损检测技术涉及的领域较多，包含多种学科，是一项通用性、综合性的检测技术，更是当前一种较为创新的无损检测技术。将其应用在热防护系统检测中，具有较强的适用性，展现出来的优点较多，诸如：面积大、非接触检测等。现阶段，国内外最该技术的研究愈发深入，技术整体实现创新与优化，未来前景广阔，具有较高的应用价值。

### (三) 太赫兹无损检测技术的应用

部分设备在运行过程中，所处的运行环境温度较高，甚至部分结构会利用大面积的防热材料。传统大面积防热材料在使用过程中，主要利用陶瓷瓦以及柔性隔热垫。针对这种隔热结构，采取何种方式对热防护系统进行检测，一直是检测人员开展相关工作的难点，检测难度大，效率不高，检测结果的准确性无法保证。通过对太赫兹无损检测技术的应用，可以将此类问题有效解决，有助于检测效果和水平的提升。

(1) 技术应用原理。太赫兹主要指的是频率从0.1到10赫兹，介于毫米波与红外光波之间相关宽范围的电磁辐射。一直以来，因为缺乏有效的THz辐射产生以及

检测方式，人们对此波段电磁辐射性质的了解不深入，导致此波段无法被精准检测。近年来，因为超快激光技术水平的提高，为THz辐射脉冲产生提供了稳定、可靠地激发光源，让THz辐射检测技术在各个领域中得到广泛应用。

(2) 技术的具体应用。太赫兹无损检测技术是将探测技术作为基础，快速获取太赫兹脉冲的振幅信息、相位信息，通过对时间波形进行傅立叶变换，直接获得样品的吸收系数、折射率等各类参数。该技术在使用过程中，激光脉冲入射到光导天线上，对出载流子进行激发，在外加电场的作用下，载流子会出现定向移动的情况，同时从中辐射出太赫兹波。太赫兹波的材料中会发生色散，相位也会随之改变。当前，德国SynView公司生产的SynViewScan300连续太赫兹成像系统应用广泛，该系统利用电子器件发射的波长在中心波长附近小范围可调的连续太赫兹波，在二维平面上对试块或者成像探头进行移动，获得二维图像。

(3) 技术应用趋势。太赫兹无损检测技术分辨率目前已经达到波长以下的尺度，在未来很长一段时间内，该技术水平会持续提升。

### 结束语

综合而言，在热防护系统检测中，合理应用无损检测新技术，诸如红外成像、太赫兹以及激光错位散斑等，不仅可以提升检测的效率和精准性，还能满足热防护系统高标准检测需求，对检测工作的深入开展有促进作用。因此在今后发展中，应该加强对该技术的研究与革新，做好技术的升级和改进，与热防护系统检测需求契合，从而发挥技术的最大价值。

### 参考文献

- [1] 王新梅. 压力容器无损检测技术的合理选择与应用分析[J]. 中国高新技术企业(中旬刊). 2016, (6). 2016. 17. 023.
- [2] 宋月娥, 吴东涛, 姜硕. 组合动力运载器结构与热防护系统概述[J]. 中国航天, 2022(01): 29-36.
- [3] 刘丽东, 钱承, 倪培君, 潘锋, 郭森. 无损检测新技术能力实验室认可现状与展望[J]. 无损检测, 2021, 43(09): 39-44.
- [4] 李志强, 吴振强, 魏龙, 刘宝瑞, 刘建中. 热防护系统结构完整性试验评估技术研究进展[J]. 强度与环境, 2020, 47(05): 19-27.
- [5] 张巍, 柳怡, 李华锋, 李炜, 张显鹏, 李连波, 于夕荣, 夏春冬. SRRS型伽玛射线头部立体定向治疗系统辐射防护检测与评价[J]. 中国辐射卫生, 2020(01): 39-40.
- [6] 赵明, 宁滨, 汪希时. 列车超速防护系统的容错设计[J]. 铁道学报, 2020(S2): 14-19.