

ICS:19.100

CCS:H26

团 体 标 准

T/CAMAC 0007—2020

民用航空无损检测 复合材料构件红外热像检测

Civil Aviation Nondestructive Testing

Infrared Thermography Testing for Composite Component

2020年5月12日 发布

2020年5月18日 实施

中国民用航空维修协会 发布

目 次

前 言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 概述	1
5 一般要求	2
6 详细要求	3
7 质量控制	6

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准代替MH/T 3022-2011《航空器复合材料构件红外热像检测》。

本标准与MH/T 3022-2011相比主要变化如下：

——统一了标准中的用语，将检验程序修改为作业指导书，除检验程序外，将检验统一修改为检测；

——本标准由中国民用航空维修协会无损检测人员资格鉴定委员会提出。

——本标准由中国民用航空维修协会批准立项。

——本标准由中国民用航空维修协会归口。

本标准起草单位：北京飞机维修工程有限公司成都分公司、南京航空航天大学、中国民航科学技术研究院、广州飞机维修工程有限公司。

本标准主要起草人：许万忠、田裕鹏、周克印、张循、郑勇、姚红宇。

引 言

红外热像检测是基于红外辐射原理，通过红外热像仪记录和观察被检测物表面的温度变化来检测物体缺陷和损伤的无损检测方法。红外热像检测集光电成像、计算机、图像处理等技术于一体，将检测物表面温度分布以图像的形式显示出来，可用于飞机复合材料构件使用或修理过程中形成的缺陷（如分层、脱粘、空洞、异物、积水等）的检测。复合材料中的很多缺陷，其导热特性与材料本身存在明显差异。当采用特定模式的热激励时，缺陷会影响热传导，导致表面温度分布异常，采用红外热像仪等传感装置测量被检复合材料构件表面温度变化，通过专门的信号处理方法，借助于参考试块，可以对缺陷大小、埋深及性质做出评价。

红外热像检测是无损检测方法之一，具有直观、快速、无污染、一次检测面积大等优点。1993年，美国无损检测学会（ASNT）将红外热像检测方法正式纳入无损检测人员认证体系。2008年，美国宇航标准NAS410修改时，在常规无损检测方法中增加了热像和错位散斑干涉检测方法。

本标准参考了ASTM E2582—19《航空应用中复合材料板及其维修区脉冲红外无损检测实施标准》（英文版）、BS EN 16714-1:2016《无损检测 - 红外热像检测 第一部分 通用理论》（英文版）和波音公司及空中客车公司的无损检测手册 (NTM) 手册。

民用航空无损检测

复合材料构件红外热像检测

1 范围

本标准规定了用红外热像法检测（以下简称热像检测）民用航空复合材料构件近表面缺陷的要求及质量控制。

本标准适用于用红外热像法对民用航空器中复合材料构件（包括层压板、蜂窝结构及夹芯结构）及板与支撑结构结合部位的分层、脱粘、空洞、异物和液体侵入等缺陷的检测。

本标准不适用于夹芯层损坏、夹芯层与另一面层板（远离检测设备）结合部位缺陷的检测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12604.9 无损检测 术语 红外检测

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义（GB/T 20737-2006，ISO/TS 18173：2005，IDT）

T/CAMAC 0001—2020 民用航空无损检测人员资格鉴定与认证

3 术语和定义

GB/T 20737和GB/T 12604.9中界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 认可的工程机构 cognizant engineering organization

主承包商、制造商或最终用户授权负责有关 NDT 决定和批准相关 NDT 事项的工程机构或 NDT 机构。

3.2 等效矩形 equivalent rectangle

对一定的热异常区域，其四边与该区域相切且面积最小的矩形，其参数用以反映该区域的特征。

3.3 作业指导书 Technique Sheet

详细说明如何完成无损检测的书面说明书。

4 概述

4.1 本标准的热像检测主要指采用闪光（脉冲）激励的主动热像检测，采用其他热激励方式或被动热像检测可参照本标准执行。

4.2 在热像检测中，对复合材料构件进行热激励，构件表面温度发生变化。如果内部存在缺陷，其热不连续使表面局部温度变化产生异常，通过红外热像仪检测构件表面的温度变化，分析出构件内部的缺陷。

4.3 缺陷的可检测性与其大小、埋深以及缺陷与周围基体材料热性质的差异有关。缺陷越大，越靠近试块表面，与基体材料的热性质差别越大，越容易检测。

4.4 影响缺陷可检测性的主要因素有表面发射率和反射率，数据采集频率，热激励，热像仪波长范围、帧频、灵敏度、空间分辨率等。

4.5 本标准适用于宽深比大于1的缺陷。

5 一般要求

5.1 人员资格

从事热像检测的人员应按T/CAMAC 0001要求通过相应的资格鉴定与认证，或符合合同或采购单中的规定。

5.2 检测环境

5.2.1 应避免热激励对检测区中人员的伤害。

5.2.2 应减少检测区中空气扰动和其他热辐射源等环境因素对热像检测的干扰。

5.2.3 不应在易燃环境中操作加热装置。

5.3 作业指导书

要求红外热像检测的材料及零部件应按指定的作业指导书进行检验。作业指导书可以是航空器或零部件制造商提供的维修手册、通告或其他有关资料。作业指导书应满足本标准的要求。应能够检测出验收标准中所规定的拒收不连续。如果作业指导书适用于所有的被检材料及零部件，并且符合本标准的要求，则可作为通用程序。制造商未提供作业指导书或提供的作业指导书不满足本标准的要求时，应按本标准的要求编写详细的作业指导书。作业指导书应经红外检测3级人员批准，如果需要，应提交认可的工程机构审核和（或）批准。作业指导书应至少包括以下内容：

- (a) 作业指导书的编号、版次；
- (b) 受检零件的名称、材料；
- (c) 适用的技术文件；
- (d) 设备及型号；
- (e) 参考试块图样；
- (f) 检测参数；
- (g) 参考试块的检测结果；
- (h) 被检件的验收要求；
- (i) 检测的部位或区域，必要时确定分区方法；
- (j) 缺陷评定；
- (k) 检测后的记录方式和标记方法。

5.4 检测记录

红外热像检测的结果均应记录，记录应具有可追溯性。

5.5 红外热像检测系统

5.5.1 系统构成

红外热像检测系统应至少包括红外热像仪和热激励装置。如果需要，可采用计算机分析软件对采集的数据进行分析处理。

5.5.2 红外热像仪

5.5.2.1 显示

应能在整个检测期间对被检构件表面温度变化进行实时图像监测。亮度和对比度应可调节。显示屏尺寸应不小于89 mm(3.5 in)，图像分辨率应不低于320×240像素。

5.5.2.2 工作波段

工作波段应为2 μm~5 μm或8 μm~14 μm。

5.5.2.3 空间分辨率

空间分辨率应小于1.5 mrad。

5.5.2.4 噪声等效温度差

噪声等效温度差在室温时应不大于0.2℃。

5.5.2.5 采集频率

采集频率应高于25帧。

5.5.2.6 测温范围

测温范围应覆盖实际检测过程中的温度变化范围，至少应包含 $-18^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

5.5.3 热激励装置

可采用加热毯、红外灯、热空气源、闪光灯、调制辐射源等作为热激励装置。制冷是热激励的一种特殊形式，冷气体、制冷机械、液氮等也可作为热激励装置。

5.6 参考试块

5.6.1 参考试块可用于设定热像检测系统的参数，确定系统在具体应用条件下的检测能力，检查系统的工作状态。

5.6.2 参考试块的材料、结构和工艺应与被检件相同并带有要求检测的缺陷。缺陷可以是实际缺陷，或者是人工制作缺陷。

5.6.3 参考试块上每一类型缺陷的数量应覆盖缺陷可能的宽深比范围，包括检测中可能的最小可检测缺陷。

注：对于不规则形状的缺陷，其宽度是指缺陷近似等效矩形的短边长度。

5.6.4 参考试块上缺陷分布应满足以下要求：

- 两个相邻缺陷边缘间的距离至少为一个缺陷（较大的）直径；
- 缺陷边缘距试块边缘的距离至少为一个缺陷直径。

5.7 系统性能测试试块

5.7.1 用于验证闪光（脉冲）红外检测系统的操作性能、一致性和重复性。

5.7.2 由至少3mm厚的均匀材料（如铝，钢，碳纤维等）制成，可以是独立的，也可以附在芯材上（如铝或玻璃纤维蜂窝，泡沫），测试表面应充满设备的视场。

5.7.3 应具有均匀的高发射率（如涂上均匀的黑漆），在未施加热激励的条件下，用红外成像设备检测是均匀的。

6 详细要求

6.1 被检件的准备

6.1.1 检测表面应无剥落的漆层、污物、油脂和水迹等可能影响热像检测的杂质，并注意其他目视可见的表面特征对热像检测的影响。

6.1.2 大部分复合材料表面不需特别的处理。对于低发射率的被检测表面，可涂易水洗高发射率黑漆，但应证明黑漆对被检测表面无不良影响。

6.1.3 必要时应对检测面进行分区检测，分区尺寸应小于检测系统的有效检测面积，并保证检测热图之间有重叠区域，避免漏检。

6.2 红外热像检测系统的准备

6.2.1 应根据被检件的厚度、表面状况和结构组成以及规定的不合格缺陷尺寸和热物理性质确定红外热像检测系统的相关参数。

6.2.2 除非另有规定，检测前应按确定的作业指导书在参考试块上对系统进行验证。应以参考试块上检测到的最小宽深比作为该类缺陷的最小可检测宽深比。

6.2.3 在工作距离下，在试块上放置一个已知尺寸的目标，测量目标在水平、垂直方向的像素个数，以确定单像素视场尺寸，计算公式如下：

$$S = \frac{h}{n}$$

式中：

S —单像素视场尺寸；

h —目标实际尺寸；

n —像素个数。

6.3 检测

6.3.1 应按作业指导书或技术文件的规定进行检测。

6.3.2 布置检测系统和被检件时，应使被检表面处于红外热像仪视场及热激励范围内，尽量减小被检件与支撑部件之间的热传导。

6.3.3 热激励区域应大于检测区域，并且其高度和宽度应远大于被检件厚度或缺陷的埋深，为使边缘效应最小化，热激励区域的高度和宽度尺寸应至少比检测区域的高度和宽度尺寸大 5%。

6.3.4 数据采集时间应足够长，使热扩散过程完整；检测到的温度信号应足够强，可与背景噪声有效区分。

6.3.5 最小被测缺陷面积在图像上应至少占 15 个相邻像素。

6.3.6 除非另有规定，激励前至少采集一帧热图，激励后采集帧数根据具体检测需要设定。对于闪光灯激励红外热像法，如果被测件的热扩散系数和厚度已知，最小采样时间计算公式如下：

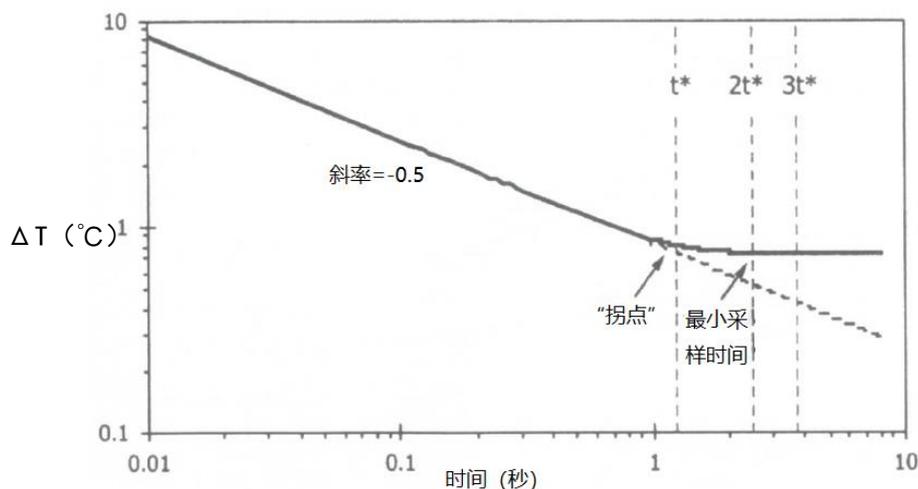
$$t^* = \frac{2L^2}{\pi\alpha}$$

式中：

t^* —采样时间，单位为秒(s)，其物理意义见图 1；

L —被检件厚度，单位为米(m)；

α —材料热扩散系数，单位为平方米每秒(m^2/s)。



注：T表示温度，t表示时间。温度—时间对数曲线斜率约为-0.5，背表面使曲线出现拐点，缺陷也会使曲线出现拐点。

图1 采样时间

6.3.7 应对有异常显示的被检区域进行重复检测，观察异常显示的重复性。必要时可采用其他无损检测方法进行验证。

6.4 评定

6.4.1 验收要求

被检件应按规定的验收要求进行评定，确定验收或拒收。

6.4.2 数据

采集的热图、热图序列及其一阶、二阶对数微分数据可用于分析评定。

6.4.3 热图分析

对于有异常显示的热图、热图序列，应对异常显示区域与正常区域进行对比分析。可采用图像处理算法对热图进行增强处理，以利于缺陷的检测评定。

6.4.4 温度-时间对数曲线分析

分析温度-时间对数曲线，若观测点的曲线与参考试块上无缺陷区的曲线不同即表示可能有缺陷。

6.4.5 缺陷尺寸

通过测量热图上缺陷半高宽（见图2）确定缺陷的边界，利用单像素视场尺寸计算缺陷实际尺寸。

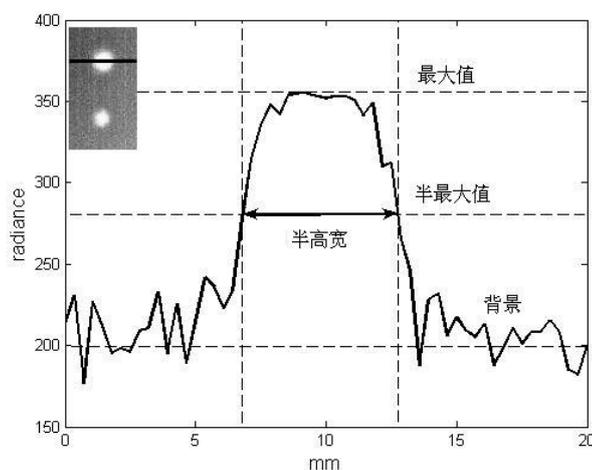


图2 缺陷中心扫描线上的辐射量分布

注：在热图中，半高宽为通过缺陷中心的扫描线上，以正常区域为基准，辐射（或温度）差是最大辐射（或温度）差一半的两点间的距离。

6.5 缺陷显示记录

用文字、图像、图表或其他方式记录缺陷的位置、尺寸和数量。

6.6 合格零部件的标记

当作业指导书或技术文件有要求时，经红外热像检测合格的零部件应进行标记，标记应醒目，能经受经常拆装。标记应置于组装后可见的位置，若后道工序会去掉标记，则应有适当的标记加盖在伴随成品件的记录单上。标记方式和位置应不影响零部件的使用和以后的检测。对于不便作出标记的零部件，应填写检测报告或有关工作单卡，详细说明被检零部件的质量状况。

6.7 检测记录

按作业指导书或客户要求记录检测结果，检测记录应包括下列内容：

- a) 送检单位和日期；
- b) 被检件名称或件号（序号）、检测部位、数量；
- c) 红外热像仪型号及校准号、热激励装置的名称和型号及校准号（如有）、参考试块件号及校准号（若需要）、可水洗黑漆（若需要）的件号及有效日期；
- d) 检测参数；
- e) 作业指导书的编号和验收要求；

- f) 检测结果;
- g) 检测日期;
- h) 检测人员签字或盖章;
- j) 检测单位名称和地址 (如需要)。

6.8 检测报告

按需签发检测报告, 检测报告应至少包括6.7的内容。

6.9 记录和报告的保存期限

检测记录和检测报告的保存期限按有关规定执行。

7 质量控制

7.1 红外热像仪

7.1.1 除非另有规定, 红外热像仪应每年进行校准或按生产厂商的规定进行校验或维护。不合格的红外热像仪不应继续使用。

7.1.2 以下情况下, 红外热像仪应及时进行校准:

- 首次使用的红外热像仪;
- 红外热像仪经过可能影响其性能的修理后;
- 怀疑红外热像仪工作不正常时。

7.1.3 红外热像仪应送指定机构或仪器制造厂家进行校准。

7.2 热激励装置

属于计量器具的热激励装置或其上安装的计量器具应按计量器具管理程序定期检定或按生产厂商的规定进行校准。

7.3 试块

7.3.1 除非另有规定, 参考试块初始使用前应经过校验。经校验合格的参考试块应有证书, 证书应注明:

- 参考试块的材料结构特性和尺寸;
- 人工缺陷的类型、形状、尺寸、埋深。

7.3.2 在每次使用前, 检验人员应对参考试块进行检查, 若发现损伤, 应由红外热像检测 3 级人员进行评定, 确定是否可用。

7.4 系统功能测试

7.4.1 闪光 (脉冲) 红外热像检测系统在每次检测前应按生产厂商的规定进行系统功能测试, 测试不合格则不能继续使用。