

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CASME

团 体 标 准

T/CASME XXXX—XXXX

低空飞行器用碳纤维复合材料 多模态无损检测技术规范

Specification of Multimodal Non-destructive Testing for Carbon Fiber
Composites of Low-Altitude Vehicles

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国中小商业企业协会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 多模态检测方法选择 1

5 一般要求 2

6 检测步骤 3

7 无损检测结果陷评定 5

8 检测记录及报告 5

9 质量控制 6

附录 A（资料性） 多模态检测对比试块 7

参考文献 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国航空制造技术研究院提出。

本文件由中国中小商业企业协会归口。

本文件起草单位：中国航空制造技术研究院、××××、××××、××××。

本文件主要起草人：李乐刚、白金鹏、王文贵、傅天航、陈芸、韩宏帅、××××、××××、××××。

低空飞行器用碳纤维复合材料多模态无损检测技术规范

1 范围

本文件规定了低空飞行器用碳纤维复合材料多模态无损检测方法的一般要求、检测步骤、检测结果评定及质量控制等。

本文件适用于低空飞行器用碳纤维复合材料结构固化后及装配阶段的多模态无损检测,其他类型复合材料结构无损检测也可参考本文件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 12604.9 无损检测 术语 红外热成像

GB/T 12604.11 无损检测 术语 X 射线检测

GB/T 12604.12 无损检测 术语 第12部分 工业射线计算机层析成像检测

GB/T 36439 无损检测 航空无损检测人员资格鉴定与认证

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 12604.9、GB/T 12604.11、GB/T 12604.12界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

多模态无损检测方法 *multimodal nondestructive testing method*

多模态无损检测方法是指采用多种不同物理原理的检测技术(如超声、X 射线数字成像、计算机断层成像、红外热成像及激光散斑干涉检测等),对制件进行单一技术的多种模式或多方法协同开展无损检测,以获取制件内部缺陷信息的检测方法。对不同方法检测结果进行融合,进行综合分析评判,弥补单一方法的局限性,实现复合材料制件的内部质量高可靠性无损检测。

3.2

多模态检测装置

根据所检测复合材料制件的结构特点及检测要求,将不同物理场原理的检测技术集成在一起,可实施多方法无损检测的装置。

4 多模态检测方法选择

低空飞行器不同的碳纤维复合材料结构适用的无损检测方法不同,推荐的多模态检测方法如表1所示,检测方也可根据复合材料制件的具体结构特征及具体检测要求选用不同检测方法进行多模态检测。

表 1 推荐的复合材料结构多模态检测方法

复合材料制件类型	厚度	推荐多模态方法
复合材料层压结构	$\leq 5\text{mm}$	超声、红外、激光散斑
	$> 5\text{mm}$	超声、数字射线
复合材料板板胶接结构	$\leq 5\text{mm}$	超声、红外、激光散斑
	$> 5\text{mm}$	超声、数字射线
复合材料蜂窝及泡沫夹芯结构	/	超声、红外、数字射线、激光散斑
复合材料三维编织结构	/	超声、数字射线、工业 CT

5 一般要求

5.1 环境条件

5.1.1 检测场地具备检测方法所需的稳定供电电源。

5.1.2 多模态无损检测实施场地应根据选用的检测方法，满足所选择不同检测方法对场地要求，各方法环境要求分别参见 GB/T 37166、GB/T 38883、GB/T 35388、GJB 1038.2A 等标准中的规定。

5.2 检测人员要求

5.2.1 检测人员应根据 GB/T 36439 或者其他等同标准获得 II 级检测资质。

5.2.2 应根据所采用的多模态无损检测方法，掌握相应的复合材料无损检测技术原理，并至少具有一年以上的相应复合材料无损检测方法操作实践经验。

5.3 多模态检测技术要求

5.3.1 超声检测系统应满足下列技术要求：

- 超声检测仪器基本性能参见 GJB 1038.1A 要求；
- 超声检测仪器增益调节范围不小于 0 dB~100 dB，最小增益步进不大于 0.5 dB；
- 仪器信号带宽不小于 0.5 MHz~20 MHz；
- 超声检测仪器与探头组合后的复合材料检测盲区不大于 0.2 mm（或两个复合材料铺层厚度）；
- 超声自动扫描检测设备的超声单元部分除满足上述要求外，应具有扫描机构驱动超声探头进行自动扫描，探头角度相对于复合材料表面能在两个垂直方向上进行角度调节以保持超声有效入射和可靠接收；
- 超声自动扫描检测系统应耦合稳定，能获得良好稳定的超声信号；
- 超声自动扫描检测系统具有检测结果存储、测量、分析功能。

5.3.2 X-射线检测系统应满足下列技术要求：

- X 射线源的管电压及调节范围应与被检测物体的材质和厚度范围相适应；
- 图像处理装置包含计算机处理单元、显示单元、图像分析处理软件等部分，图像数据经过处理后可在显示单元上进行显示；
- 应根据检测分辨率和成像清晰度要求，选择合适的管电流和焦点尺寸；
- 在检测图像质量满足产品检验要求的前提下优先选用像素尺寸相对较大的探测器；
- 动态检测时选用高速探测器。

5.3.3 工业 CT 系统应满足下列技术要求

- 系统空间分辨率应优于 1.51 p/mm；
- 系统密度分辨率应优于 1.0%；
- 工业 CT 系统图像矩阵及像素尺寸应满足复合材料检测分辨率要求；
- 工业 CT 系统的放大倍数根据实际检测对象放大要求确定，通常在 100 倍以内；

- e) 工业 CT 系统断层厚度可调；
 - f) 图像处理软件应具有尺寸测量、密度测量、图像增强、直方图分析等分析处理功能。
- 5.3.4 红外检测系统应满足下列技术要求：
- a) 具有脉冲及锁相检测模式；
 - b) 工作波长范围在中波红外或者长波红外之间；
 - c) 能对零件表面的热辐射强度/温度场变化进行不间断采集，并实时输出采集图像；
 - d) 具有热图序列和热图存储、连续查看功能；
 - e) 系统热灵敏度 (NETD) : $\leq 50 \text{ mK}$ ；
 - f) 测温范围：不小于 $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。
- 5.3.5 激光错位散斑检测系统应满足下列技术要求：
- a) 系统的激光器应具有良好的相干性，通常相干长度不小于 40 m ；
 - b) 具有相互垂直的双向错位调节装置；
 - c) 图像采集相机分辨率不低于 1024×1024 ；
 - d) 计算机能够针对获取的图像进行尺寸测量；
 - e) 系统在激光发射或接收光路上具有光强调节装置。

5.4 对比试块

5.4.1 试块应能代表待检复合材料结构的特征、外形和复杂性，试块材料应与被检测复合材料制件具有相同的材料、工艺特征。在不能获取相同的材料时，可采用特性相近的材料，且需经 3 级人员批准。也可以选用含自然缺陷的实际试样作为试块，但应对自然缺陷进行确认。

5.4.2 复合材料试块中预埋聚四氟或其他与复合材料具有较大物理特性差异的异质薄膜模拟缺陷。

5.4.3 对比试块中至少含有工程图纸或验收技术要求中规定的应检测出的最小缺陷，参见附录 A。

5.4.4 对比试块应进行编号，粘贴标识，标记人工缺陷的位置和轮廓。

5.4.5 对比试块制作后应采用超声 C-扫描或者 X-射线对试块缺陷进行检测验证，并保留验证结果。

5.5 检测文件资料

5.5.1 委托方应提供复合材料制件的工艺、材料及结构信息。

5.5.2 委托方应提供复合材料制件无损检测验收技术文件、验收等级。

5.5.3 针对复合材料制件的无损检测，应制定相应的检测规程或工艺卡（图表）。

6 检测步骤

6.1 检测前的准备

6.1.1 检查复合材料制件与委托信息是否一致。

6.1.2 检查零件表面是否存在影响检测的灰尘、杂质、污物，若有则进行清除。

6.2 多模态检测参数设置

6.2.1 根据所采用的多模态检测方法，对相应仪器或系统检测参数进行设置。

6.2.2 超声检测参数设置应符合下列要求：

- a) 超声检测时，超声信号应处于仪器屏幕宽度的 10%~90% 之间；
- b) 所要求检测出最小缺陷区与优区超声信号幅值差异不低于仪器屏幕的 20%；
- c) 扫查速度设置应能有效检出验收技术文件规定的最小缺陷；
- d) 扫描间距应能保证至少两次检出最小缺陷。

6.2.3 X 射线检测参数设置应符合下列要求：

- a) 选用较小的焦点尺寸通过几何放大来提高图像分辨率；
- b) 固定管电压时通过提高管电流增加图像信噪比提高检测灵敏度；
- c) X 射线管电压应尽可能低，以获得良好的缺陷检出率；
- d) X 射线束中心应垂直指向检测区域中心，当工件形状及结构限制时 X 射线束中心与检测区域中心倾角不超过 30° 。

6.2.4 工业 CT 检测参数设置应符合下列要求：

- 根据复合材料制件的尺寸、材料密度等特性,选择射线源能量(管电压)、强度(管电流)、焦点尺寸等射线源参数；
- 根据复合材料制件尺寸,通过选择视场直径使复合材料件图像与整幅 CT 图像占比在 2/3 左右；
- 根据复合材料制件大小、材质成分、检测要求决定扫描采样时间；
- 对于密度差异小的材料组成的复合材料,应选择偏低的射线能量,以增加对比度；
- 检测 CT 图像应具有较好的空间分辨率、对比度和信噪比,且不存在影响评判的伪像。

6.2.5 红外检测参数设置应符合下列要求：

- 确定视场与检测距离后对热像仪进行对焦,使热像仪图像清晰；改变检测距离后,应重新对焦；
- 根据被复合材料制件特点选择合适的加载方式、加热时间；
- 热像仪与复合材料制件法线方向夹角不大于 60° ；
- 参考复合材料制件热传导速度,设置图像采集时间。

6.2.6 激光错位散斑检测参数设置应符合下列要求：

- 调整焦距使得采集的图像清晰；
- 设置双向错位调节量约为需检测缺陷的 50%以上；
- 根据检测对象特点确定加热方式、加热时间；
- 真空加载下选择合适的负压；
- 适当调节光强,使得采集图像亮度不过饱和。

6.3 零件多模态扫查

6.3.1 超声扫查应符合下列要求：

- 根据复合材料制件特点选择手动或自动检测,手动检测进行“N”字形扫查；自动扫描检测根据零件的几何特征,设置相应扫查路径。
- 手动扫查检测前、检测过程中每间隔 2 小时及检测结束时均应进行检测灵敏度校准；自动扫描检测在检测前及结束后均需进行灵敏度校验。
- 检测完毕后清理复合材料制件表面,并对检测结果进行记录。

6.3.2 X-射线扫查应符合下列要求：

- 针对复合材料制件采用数字射线扫查,扫查可以采用垂直透射法、平行透射法、切线透射法、斜线透射法,根据复合材料制件特征选用不同的方法。
- 像质计放置在零件或者同种结构的试块上射线源侧同时照射检测。
- 采用数字射线自动扫查,应保证每行扫查有足够的搭接区域,或对系统进行校准保证无漏检区。

6.3.3 工业 CT 扫查应符合下列要求：

- 根据复合材料构件尺寸、检测精度确定扫描方式；
- 根据复合材料件的检测需求,考虑检测密度分布/材质均匀性、缺陷、重建效率等因素,选择合适的重建参数进行图像重建；
- CT 图像应具有较好的空间分辨率、对比度和信噪比,且不存在影响评判的伪像；
- 根据需求采用尺寸测量、密度测量等方法进行结果分析。

6.3.4 红外扫查应符合下列要求：

- 参照选择的激励方法和激励参数对复合材料表面进行热激励；
- 热图像采集过程中,避免检测环境出现热源扰动,保持复合材料制件和热像仪相对静止；
- 对检测数据同步采集、记录与储存；
- 对采集的热图像进行傅里叶变换等方法处理,得到清晰反映缺陷的最佳图像并保存结果。

6.3.5 激光错位散斑扫查应符合下列要求：

- 调节视场使得被检测件处于视场中间区域；
- 调节光圈使得图像亮度适中；
- 调节图像错位量使得两幅图像在两个方向均衡错位；
- 对零件进行分区标记检测；
- 对零件进行热或真空等方式加载；
- 采集加载前后的图像并记录；

g) 对图像进行运算处理, 获得反映内部质量分布的图像。

6.4 结果记录

检测人员记录复合材料制件检出缺陷位置、分布、大小及参考深度, 在被检测零件表面进行标记。

7 无损检测结果评定

7.1 超声检测结果评定

7.1.1 采用手动检测时根据 6 dB 法进行缺陷边界判定和缺陷轮廓标记。

7.1.2 利用超声反射法进行缺陷深度判别。

7.1.3 超声自动扫描检测时, 根据检测结果图像进行缺陷尺寸判定, 可采用超声手动方法进行辅助判别。

7.1.4 超声自动扫描检测设备若有全数据存储功能, 则根据缺陷区域原始信号数据进行缺陷深度判别, 否则采用超声手动反射法进行判别。

7.2 X 射线检测结果评定

7.2.1 可采用人工或者计算机自动评定。

7.2.2 图像质量满足规定的要求后, 方可对检测图像进行评定。

7.2.3 宜在固定的图像缩放模式下进行检测, 根据评定区的特征确定图像缩放比例。

7.2.4 使用系统提供的辅助评定工具对缺陷进行定量分析, 包括评缺陷长度和面积。

7.3 工业 CT 检测结果评定

7.3.1 利用试块作为依据对 CT 图像进行密度、材质均匀性及缺陷评判的参考。

7.3.2 根据检测结果对夹杂、分层及褶皱等缺陷的进行定性、定量分析。

7.3.3 根据相应技术文或相关检验标准进行评判。

7.4 红外检测结果评定

7.4.1 针对检测结果图像关注区域进行处理分析, 获得更加清晰的结果。

7.4.2 根据图像上细节特征的灰度、形状和尺寸等情况对图像进行进分析。

7.4.3 热图序列是判断和测量不连续的主要手段, 主要通过不连续区域和正常区域的灰度差异(对比度)进行缺陷判别。

7.4.4 利用温度—时间变化曲线进行缺陷深度的评估。

7.5 激光错位散斑检测结果评定

7.5.1 结合检测对象结构及图像灰度特征进行缺陷判别。

7.5.2 利用标定物进行缺陷尺寸评判。

7.6 多模态检测数据融合评判

针对复合材料制件可采用多模态检测数据融合, 数据融合具有图像融合、特征融合及决策融合。图像融合是将不同检测结果数据图像对齐到同一坐标系, 融合原始信号或像素位置信息, 进行检测结果的多模态检测数据进行评判; 特征融合是由不同检测结果数据中提取缺陷特征参数(如缺陷尺寸、位置、形状等), 将特征参数进行融合; 决策融合是将各检测方法输出检测决策结果, 根据决策结果进行融合。针对复合材料制件多模态检测结果, 可根据需求进行不同层次的融合后进行综合评判。

8 检测记录及报告

8.1 检测结果记录

多模态检测结果记录至少应包括以下内容:

- a) 委托/送检单位名称、送检日期;
- b) 被检件名称、图号、质量编号、检测部位;

- c) 检测方法/依据的标准；
- d) 验收工艺文件/标准；
- e) 多模态检测系统与/或检测设备名称、型号、编号；
- f) 检测工艺参数；
- g) 缺陷位置及轮廓示意图、缺陷尺寸、深度及类型等；
- h) 检测人签字、检测日期。

8.2 检测报告

检测报告至少应包括以下内容：

- a) 委托/送检单位名称、送检日期；
- b) 检测报告编号；
- c) 被检件名称、图号、质量编号、检测部位；
- d) 检测方法/依据的标准或标准；
- e) 验收工艺文件/标准/标准；
- f) 多模态检测系统与/或检测设备名称、型号、编号；
- g) 缺陷位置及轮廓示意图、缺陷尺寸、深度及类型等；
- h) 依据验收要求形成的检测结论；
- i) 检测人签字、检测日期。

9 质量控制

9.1 人员控制

从事检测的工作人员应符合本文件5.2要求。

9.2 设施控制

9.2.1 检测仪器/系统每年应进行性能校验，校验合格后贴合格证。

9.2.2 使用的多模态检测仪器/系统必须在有效期内，出现故障应及时修理并再检定或校准，合格者方可重新投入使用。

附录 A
(资料性)
多模态检测对比试块

A.1 复合材料对比试块基本要求如下：

- a) 试块的材料、工艺及结构特征与所检测的复合材料制件一致或者相近；
- b) 试块厚度应与所检测复合材料层压结构制件厚度相等或相近；
- c) 采用单层或双层厚度不大于 0.15mm 的聚四氟乙烯薄膜或其他与复材物理特性差异较大的异质薄膜来模拟缺陷；
- d) 模拟缺陷至少包含验收技术条件规定所需检出的最小尺寸缺陷，根据具体检测需求再包含其他尺寸缺陷。

A.2 复合材料层压结构对比试块基本要求如下：

- a) 如图A.1所示，推荐试块尺寸长200 mm×宽150 mm；
- b) 缺陷深度至少包含上表面第 1-2 层之间，中间深度，下表面第 1-2 层之间，对于较厚试块可适当增加其他埋深缺陷。

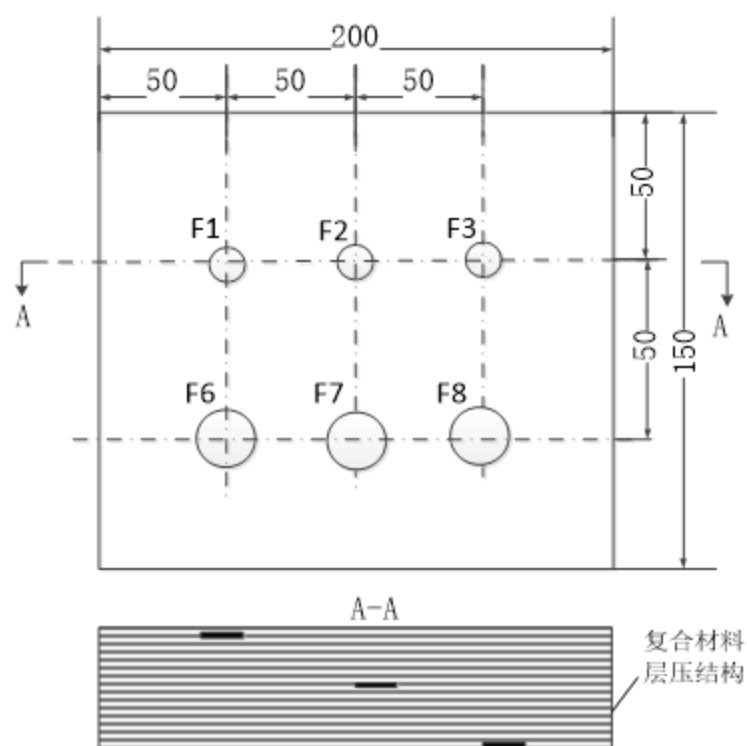


图 A.1 复合材料层压结构对比试块

A.3 复合材料板板胶接对比试块基本要求如下：

- a) 如图 A.2 所示，推荐试块尺寸长 200 mm×宽 150 mm；
- b) 缺陷深度至少包含上下复材板各自的表面第 1-2 层之间，中间深度，下表面第 1-2 层之间缺陷以及板板胶接界面缺陷。

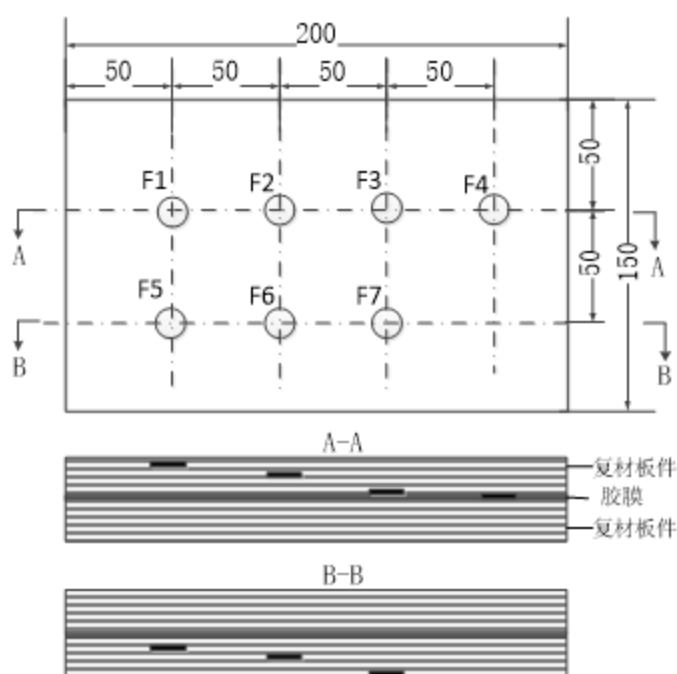


图 A.2 复合材料板板胶接对比试块

A.4 复合材料夹芯结构试块基本要求如下：

- 如图A.3所示，推荐试块尺寸长200 mm×宽100 mm，夹芯材料建议与实际检测构件相同；
- 缺陷深度分布至少包含蒙皮上表面第1-2层之间，中间深度，下表面第1-2层之间，蒙皮与胶膜、胶膜-芯材界面缺陷；
- 芯材区缺陷可根据实际情况进行制备，如芯格开裂、节点脱开、夹杂等。

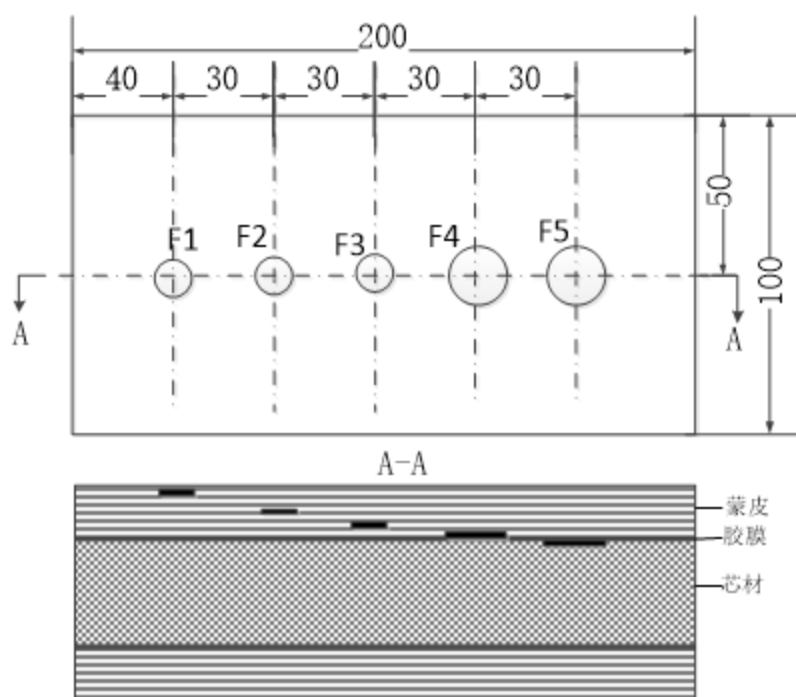


图 A.3 复合材料夹芯结构对比试块

参 考 文 献

- [1] GB/T 35388 无损检测 x射线数字成像检测 检测方法
 - [2] GB/T 37166 无损检测 复合材料工业计算机层析成像（CT）检测方法
 - [3] GB/T 38883 无损检测 主动式红外热成像检测方法
 - [4] GJB 1038.1A 纤维增强复合材料无损检测方法 第1部分 超声波检验
 - [5] GJB 1038.2A 纤维增强复合材料无损检验方法 第2部分 x射线照相检验
-