

《低空飞行器用碳纤维复合材料多模态无损检测技术规范》

团体标准编制说明（征求意见稿）

一、工作简况

1.1 工作任务来源

随着低空经济被纳入国家“新质生产力”战略框架，低空飞行器(如 eVTOL、无人机等)的规模化应用成为推动产业升级的关键方向。碳纤维复合材料凭借其轻量化、高强度、耐腐蚀等特性已成为低空飞行器机身结构的核心材料，但其制造缺陷(如分层孔隙、裂纹)直接影响飞行安全与寿命。当前，我国低空飞行器产业处于高速发展期，2024 年市场规模预计突破 5000 亿元，2030 年有望达到 2 万亿元，但针对碳纤维复合材料的多模态无损检测技术规范仍为空白，企业依赖单一检测方法(如超声波或磁粉检测)，导致检测效率低、漏检率高，难以满足规模化生产需求。

国内已具备多模态无损检测技术的研究基础与应用经验。例如，超声波-红外热成像复合检测技术，可同步识别碳纤维复材的内部孔隙与表面裂纹；中航复合材料有限公司基于 GJB1038.1A-2004《纤维增强复合材料无损检验方法》优化了磁粉-液体渗透联合检测流程，已在无人机部件检测中验证了其可靠性。此外，现有国家标准如 GB/T3854-2005《纤维增强塑料巴氏硬度试验方法》、GB/T 3365-2008《碳纤维增强塑料孔隙含量检验方法》为多模态检测提供了方法学支撑。产业链层面，中复神鹰、吉林化纤等企业已实现航空航天级碳纤维的国产化，并积累了大量检测数据，为标准的制定与验证提供了充足样本。

经标准起草组及专家组多次调研论证，根据《团体标准管理规定》有关规定，特立项本系列标准。标准项目计划编号为 T/CASME-XXX-2025。

1.2 主要工作过程

1.2.1 主要参加单位

本标准主要起草单位：中国航空制造技术研究院、南昌航空大学、辽宁中科力勒检测技术服务有限公司、山东大学、广州多浦乐电子科技股份有限公司、南通航宇检测科技有限公司、河南华唐新材料股份有限公司、兵器工业集团第五三研究所、河南华探检测技术有限公司、连云港纤维新材料研究院有限公司、青岛纵横仪器有限公司、山东省惠鲁碳材料科技有限公司、山东宽原新材料科技有限公司、华兴中科标准技术（北京）

有限公司等。起草单位主要参与草案的修改，测试方法验证等标准工作。

1.2.2 工作分工

1.2.2.1 第一次工作会议

2025 年 5 月 9 日，《低空飞行器用碳纤维复合材料多模态无损检测技术规范》启动会在深圳国际会展中心线下、线上同时召开。中国航空制造技术研究院高级工程师白金鹏宣讲了标准草案，多家参编单位共同讨论。

经讨论形成以下意见：无

1.2.2.2 工作进度安排

2025 年 1 月—3 月，项目市场调研。

2025 年 4 月，项目申报立项。

2025 年 5 月，编写团体标准项目草案，召开标准启动会。

2025 年 7 月，公开征求意见。

2025 年 8 月，召开编制组内部讨论会议。

2025 年 11 月，召开标准审定会。

2025 年 12 月，报批，发布。

二、标准编制原则

标准起草小组在编制标准过程中，以国家、行业现有的标准为制订基础，结合我国目前无损检测技术的现状，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》的规定及相关要求编制。

三、标准主要内容的确定

本标准的主要内容即确定原因如下。

1. 多模态无损检测方法定义

首先针对多模态无损检测方法进行了定义，多模态无损检测主要是采用多种不同物理场方法针对制件进行无损检测，对不同物理场检测结果数据进行融合处理，而不是针对检测过程中不同物理场进行直接耦合。

2. 多模态检测装置定义

将不同物理场检测技术集成在一起可实施多方法无损检测的装置。对于检测方法的数量没有进行限定，只要集成 2 种以上无损检测方法的装置定义为多模态检测装置。

3. 多模态检测方法选择

针对低空飞行器复合材料制件不同的结构特征，推荐了适用的多模态无损检测方法。检测方可根据相应复合材料制件具体结构或检测技术要求选用其他方法。

4. 一般要求

4.1 环境条件

对于检测的环境场地引用了 GB/T 34886、GB/T 35388、GB/T 36439 、GB/T 37166 、GB/T 38883、GJB 1038.1A 不同检测方标准进行规定。

4.2 检测人员

对于无损检测人员，规定了需要按照GB/T 36439标准取得相应资质，为了实施的灵活性，本标准规定并不局限于GB/T 36439标准，相应方法的无损检测人员也可依据其他等同标准获得Ⅱ级检测资质。检测人员必须具有一年以上的实际检测经验才能进行独立的无损检测。

4.3 多模态检测技术要求

(1) 超声检测系统技术要求

对于超声检测仪器基本要求，引用GJB 1038.1A中的相关规定；针对复合材料进行超声无损检测时，仪器必须与有足够的增益调节，才能实现针对高衰减材料的检测与评判。此外，最小增益步进不得大于0.5dB，可以对超声幅值进行微调有利于超声检测灵敏度的设置；针对复合材料检测，所采用超声检测信号的频率通常为2.5MHz~10 MHz，而要获得良好的超声信号，超声仪器必须具有足够的带宽，因此规定带宽为0.5MHz~20 MHz；超声检测仪器针对复合材料进行检测，必须具有足够小的盲区以分辨进表面缺陷，规定所采用的超声检测仪器表面检测盲区不大于0.2mm（或两个复合材料铺层厚度）；超声自动扫描检测设备的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，这样才能保证超声探头处于复合材料法线方向以保持超声有效入射和接收；检测系统超声水耦合必须良好，保证超声脉冲信号的良好发射接收；超声自动扫描检测系统具有检测结果存储、测量、分析功能，以对扫描检测结果进行分析评判和记录。

(2) X-射线检测系统技术要求

本标准对于X射线源的管电压及调节范围不进行具体数值的规定，应适于被检测物体的材质和厚度范围；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；应根据检测对象所要求的检测分辨率和成像清晰度要求选择具有合适焦点尺寸的系统，标准不进行具体数值的规定；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

探测器以实现高效快速检测；针对复合材料进行动态检测时选用高速探测器。

(3) 工业 CT 系统技术要求

参考 GB/T 37166 标准，工业 CT 检测系统的空间分辨率应优于 1.51p/mm ；系统密度分辨率应优于 1.0% ；选用的工业 CT 系统图像矩阵及像素尺寸应满足复合材料制件检测分辨率要求；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；工业 CT 系统断层厚度应该可以更改可调，以实现复合材料制件不同尺度的切片扫查；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，以便于检测结果数据的处理与分析。

(4) 红外检测系统技术要求

红外检测系统应至少具有脉冲激励方、锁相激励方式下的检测模式，以适用于不同厚度材料的检测；由于中波红外和长波红外波段对材料的热辐射响应敏感，能够捕捉到复合材料内部缺陷引起的局部温度变化，这些异常区域在红外热像仪下清晰可见，因此红外检测系统工作波长范围应在中波红外或者长波红外之间；红外检测系统软件应该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，以便对于不同时间的热图像进行分析更利于发现缺陷；红外检测系统具有热图序列和热图存储、连续查看功能，能够针对不同时刻红外辐射进行捕捉，获得不同时刻的热图像；红外检测系统应具有足够的热灵敏度，可分辨温度变化应小于 50mK ；一般热成像仪具有较大的温度测量范围，最高可达上千度，针对复合材料制件的红外检测，根据通常的检测环境规定了红外热像仪可测量温度范围为 $-10^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 激光错位散斑检测系统技术要求

激光错位散斑检测系统中的激光器发射的单纵模激光应具有良好的相干性，根据激光散斑通常的检测距离和激光器通常的相干长度指标，本标准规定相干长度不小于 40m ；系统接收光路上应该具有相互垂直的双向错位调节装置，通过错位调节实现图像在两个方向上的错位以实现缺陷的检测；用于图像采集的相机分辨率不低于 1024×1024 ，以满足检测精度要求；计算机散斑检测系统软件应该能够对获取的缺陷图像进行尺寸测量，以进行缺陷达到检测判别；系统在激光发射或接收光路上需具有光强调节装置，以避免光照饱和和影响缺陷的检测。

5. 对比试块

针对复合材料制件进行无损检测，必须制备相应的无损检测试块。复合材料工艺及结构影响无损检测结果，因此，制备的复合材料试块必须具备复合材料结构材料、工艺

及结构特征；利用与复合材料具有较大物理特性差异的异质薄膜作为模拟缺陷材料，在铺叠前预置在复合材料中进行固化。缺陷尺寸也是影响检测信号的关键因素，不同的复合材料制件具有不同检测要求，因此复合材料试块中应至少含有工程图纸或验收技术要求规定的应检出的最小尺寸缺陷，利用该缺陷验证检测系统是否达到相关要求并用来调整设备检测参数；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，以便于日常的便捷使用；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，以确保缺陷制作成功。

6. 检测步骤

6.1 多模态检测参数设置

(1) 超声检测参数设置

无论超声反射法或者超声穿透法，来自复合材料的超声信号应处于仪器屏幕宽度的 10%~90% 之间，以能够观察来自复合材料制件的超声信息；设置检测灵敏的都时，要求检测出最小缺陷与优区的超声信号幅值差异应不低于仪器屏幕的 20%，以保证缺陷的有效检测识别；扫查速度过快可能影响缺陷的有效识别，不对扫描速度数值进行规定，但是设置的扫描检测速度应能保证检测仪器或者系统能够有效检出验收技术文件规定的最小缺陷；超声扫描间距过大会遗漏缺陷，扫描间距过小则降低检测效率，在此规定扫描间距应能保证至少两次检出同一个最小缺陷。

(2) X 射线检测参数设置

依据 GB/T 35388 规定，针对复合材料检测需选用较小的焦点尺寸及几何放大来提高图像分辨率；在维持图像对比度的前提下，通过增加 X 射线光子数可提升信噪比，从而增强对微弱信号的分辨能力。因而，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；X 射线在穿透能力足够的前提下，通过增强光电效应占比提升衰减对比度，同时抑制散射噪声，使缺陷与复合材料差异最大化。因此，X 射线管电压应尽可能低，可以获得良好的缺陷检出率；X 射线束中心应垂直指向检测区域中心，对工件进行检测，倾斜入射角不能采用过大的角度，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°。

(3) 工业 CT 检测参数设置

利用 CT 进行复合材料制件的检测，根据复合材料制件的尺寸、材料密度等特性，选择射线源管电压、管电流、焦点尺寸等射线源参数。当复合材料件图像在整幅 CT 图像中占比达到 2/3 左右时，能够确保射线源的能量分布更均匀地覆盖在试件上，有效减

少因射线能量分布不均导致的伪影、噪声等问题。因此，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 图像检测时应具有足够的空间分辨率、对比度和信噪比，且不存在影响评判的伪像。

（4）红外检测参数设置

红外检测时，来自复合材料表面的红外辐射应精确落在探测器上，若焦点偏移则物体表面 1 个点位热信号会扩散到多个像素上形成热斑扩大，相邻高温/低温区域的边界模糊，无法分辨细微温差。采用红外进行检测时，必须进行热像仪调焦才能获得清晰的缺陷图像，改变检测距离后应重新对焦；应根据被复合材料制件厚度、热传导性特点选择脉冲或者锁相加载方式及加热时间；热像仪为了接收来自制件的热辐射，与复合材料制件法线方向夹角不能有过大的夹角，应不大于 60° ；根据复合材料制件热传导速度，设置图像采集时间，以获得良好的缺陷显示图像。

（5）激光错位散斑检测参数设置

调整相机的焦距使得来自复合材料表面的激光散斑在图像采集单元上获得清晰的图像，以提高缺陷清晰度；根据试验进行错位量调节设置，通常可将双向错位调节量约为需检测缺陷尺寸的 50% 以上；根据检测对象特点确定加热方式、加热时间，设定不同能量的热加载；真空加载下选择合适的负压使得缺陷处产生足够的形变；检测前适当调节光强，使得采集图像的灰度不产生过饱和以使得缺陷具有良好的对比度。

7. 零件多模态扫查

（1）超声扫查

根据复合材料制件结构特点来选择手动或自动扫描检测，手动检测推荐便于实施的“N”字形扫查模式；自动扫描检测根据零件的几何特征设置相应扫查路径，使得检测系统按照特定路径进行扫描；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超声仪器检测灵敏度的校准，以避免系统灵敏度过大波动而漏掉缺陷或者误判为缺陷；自动扫描检测无法在扫描中间过程进行灵敏度校验，因此，在检测前及结束后进行灵敏度校验。

（2）X-射线扫查

针对复合材料制件采用数字 X-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，不同的复合材料制件始于不同的检测方法，因此需要根据不

同的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，通过对试块的同时照射验证检测参数的合理性；针对复合材料采用数字射线自动扫查，应保证相邻行扫查有足够的搭接区域，以避免复合材料漏检。

（3）工业CT扫查

根据复合材料构件尺寸、检测精度确定扫描方式，比如平移-旋转扫描、锥束螺旋 CT 扫描、拼接 CT 扫描、偏置拓展三代锥束 CT 扫描等。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。，比如进行重建矩阵的大小、层厚、重叠率、滤波参数等。针对复合材料进行CT无损检测，系统、扫描方式、参数获得的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。

（4）红外扫查

按照选择的激励方法，比如脉冲激励、锁相激励及激励的周期时间、周期数等参数进行热加载。检测过程中，检测对象、检测仪都必须相对静止以避免检测环境出现热源扰动带来的伪红外图像；热加载开始后利用热像仪进行同步的采集、数据记录与储存，获得时间序列的检测结果图像，以便于检测结果的分析；针对检测结果序列图像，可以对时间热图像进行观察分析，也可以对采集到的系列热图像进行傅里叶变换来进行检测结果的处理，获得更清晰的缺陷检测结果图像。

（5）激光错位散斑扫查

调节视场使得被检测件处于视场中间区域以便于检测；调节光强调节装置使得采集到的图像亮度适中；利用光路调节装置，调节光路产生错位产生两幅错位图像，通常使得图像在两个方向上均衡错位；对于较大面积的零件进行分区标记，逐个区域进行检测，以避免漏检；结合检测试验，确定对复合材料制件是采用热激励方式加载或者真空方式加载，采集加载前后的图像数据记录，在此基础上进行图像结果数据的运算处理，最终获得反映内部质量分布的图像。

8. 无损检测结果判定

针对复合材料多模态的检测，首先针对每种检测方法结果进行单独的评判。

（1）超声检测结果判定

参考《GJB1038. 1A》中规定，采用手动检测时根据 6dB 法进行缺陷边界判定和缺陷轮廓标记；超声传播距离与时间为线性对应关系，因此利用超声反射法获得复材表面、底面回波信号及缺陷信号，根据不同信号在时域上的相对分布位置进行缺陷深度的判别；

超声自动扫描检测时，根据检测结果图像进行缺陷尺寸测量和判定。常规超声反射法自动扫描检测系统通常不保存界波、底波之间所有的超声数据，因此，需要采用超声手动反射方法进行缺陷深度的辅助判别；超声自动扫描检测设备若保存界波、底波之间所有的超声数据，则根据缺陷区域原始超声反射信号数据进行缺陷深度的判别。

（2）X-射线检测结果评定

针对 X-射线检测结果图像，可采用人工或者计算机进行缺陷的自动评定；针对复合材料制件检测获得的图像灰度分布质量应满足 GB/T 35388 规定的要求再对检测图像进行评定，否则进行重新的扫描检测；同一缺陷在不同图像中的尺寸可能差异显著影响定量分析，因此需要在固定的图像缩放模式下进行检测评判；使用 X-射线系统提供的辅助评定工具，如尺寸测量工具、面积测量工具对缺陷进行定量分析。

（3）工业 CT 检测结果评定

针对复合材料检测，利用制备的相应试块作为依据可对 CT 图像进行密度、材质均匀性及缺陷评判的参考；复合材料制件中的夹杂、分层及褶皱缺陷会产生特定图像灰度特征，根据图像灰度分布特征对复合材料制件中的夹杂、分层及褶皱等缺陷的进行定性、定量分析；利用检测结果根据相应技术文或相关检验标准进行评判。

（4）红外检测结果评定

获得的红外序列检测结果图像后，为防止环境或者边区域的干扰，可针对检测结果图像关注区域进行专门的处理分析以获得更高质量结果图像，使得缺陷更清晰的显现；针对检测结果图像上细节特征的灰度、形状和尺寸等情况对图像进行缺陷的尺寸分析；由于复合材料的热辐射随着时间变化，因此，针对连续采集的热图序列进行分析是缺陷检测识别的主要手段，通过缺陷区域和正常区域的灰度差异进行缺陷的分析与判别；可以利用试块进行检测验证试验，利用温度-时间变化曲线进行缺陷深度的评估。

（5）激光错位散斑检测结果评定

结合试块的检测试验结果，根据复合材料制件图像灰度特征进行缺陷的分析和判别；在检测之前先利用标定物对检测系统进行尺寸标定，然后再对缺陷尺寸进行评判。

9. 多模态检测数据融合评判

根据复合材料制件检测要求，可在试验基础上针对复合材料制件采用多模态检测数

据融合方式来进行检测结果的评判。数据融合分为图像融合、特征融合及决策融合三个不同的层级，可根据不同的需求进行不同层次的融合后再进行综合评判。

四、与国际、国外同类标准水平的对比情况

经查，暂无相同类型的国际标准与国外标准，故没有相应的国际标准、国外标准可采用。本标准达到国内先进水平。

五、与国内相关标准的关系

本标准的制定过程、技术要求的选定、试验方法的确定、检验项目设置等符合现行法律法规和强制性国家标准的规定。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、标准作为强制性或推荐性标准的建议

建议该标准作为推荐性团体标准。

八、其他

本标准不涉及专利。由于本标准首次制定，没有特殊要求。

团体标准起草组

2025 年 7 月