

ICS 19.100

CCS N 78



团 标 准

T/CEATEC XXX—2025

复合材料层压板空气耦合 Lamb 波损伤 成像技术规范

Specification for air coupled Lamb wave damage imaging technology for
composite laminates

(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 检测系统	2
4.1 系统组成	2
4.2 激励子系统	2
4.3 接收子系统	2
4.4 运动控制与扫描子系统	2
4.5 数据采集与处理子系统	3
4.6 系统校准与性能验证	3
5 检测人员	3
6 检测程序	3
6.1 检测前准备	3
6.2 试件准备与耦合	3
6.3 检测参数设置	3
6.4 扫描检测	3
6.5 数据采集与存储	4
7 结果评定与检测报告	4
7.1 数据预处理	4
7.2 损伤成像与识别	4
7.3 结果评定	4
7.4 检测报告	4
附录 A (规范性) 标准试块设计与制作要求	5

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

复合材料层压板空气耦合 Lamb 波损伤成像技术规范

1 范围

本文件规定了复合材料层压板空气耦合Lamb波损伤成像技术的检测系统、检测人员、检测程序、结果评定与检测报告。

本文件适用于航空航天、风力发电、交通运输等领域中采用的碳纤维、玻璃纤维等聚合物基复合材料层压板（厚度通常为1.0mm~20.0mm）内部的分层、孔隙、冲击损伤等缺陷的定性、定位检测与成像。

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

3 术语和定义

GB/T 12604.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

复合材料层压板 composite laminate

由纤维增强体与树脂基体按一定铺层方式复合成型，具有特定厚度和平面尺寸的板材结构，铺层角度包括0°、45°、90°等典型方向，层间通过树脂基体实现粘结。

3.2

空气耦合 Lamb 波 air-coupled Lamb wave

以空气为耦合介质，在复合材料层压板中激发并传播的导波，由纵波与横波在板件上下表面多次反射叠加形成，具有多模式传播特性。

3.3

损伤成像 damage imaging

利用Lamb波在结构中传播时遇到损伤（如分层、裂纹等）会产生散射、模式转换及幅值/相位变化的特性，通过扫描采集全场信号，并利用特定算法（如幅值成像、时差成像、概率成像等）重构出损伤位置和范围的可视化图像的技术。

3.4

声穿透损失 acoustic transmission loss

超声波在通过空气-复合材料-空气界面后，由于声阻抗失配导致的信号能量衰减，以分贝(dB)表示。

3.5

激励中心频率 excitation centre frequency

施加在激励探头上电脉冲或连续波的主要频率分量，单位兆赫兹(MHz)。

3.6

扫描步进 scan pitch

扫描过程中，探头在试件表面移动的相邻两个检测点之间的中心距，单位毫米(mm)。

4 检测系统**4.1 系统组成**

空气耦合Lamb波损伤成像系统至少应包括以下子系统：激励子系统、接收子系统、运动控制与扫描子系统、数据采集与处理子系统。

4.2 激励子系统**4.2.1 激励探头**

应采用非接触式空气耦合超声探头，常用类型为电容式或压电复合材料式。

4.2.2 频率范围

激励探头的标称中心频率应在50kHz~500kHz范围内，根据板厚和检测需求选择。对于薄板（厚度<2mm），可选用较高频率（如200kHz~500kHz）；对于厚板（厚度>4mm），可选用较低频率（如50kHz~150kHz）。

4.2.3 带宽

应不小于中心频率的50%。

4.2.4 激励信号

应能产生高压尖脉冲或可调制的单音猝发波。猝发波周期数宜为3~10个正弦波。

4.2.5 功率放大器

输出电压峰值应不低于200V，带宽应覆盖探头的工作频率。

4.3 接收子系统**4.3.1 接收探头**

类型与激励探头匹配，其中心频率应与激励探头一致或相近。

4.3.2 灵敏度

在空气中，相对于1V/ μ Pa，接收探头的灵敏度应不低于-60 dB。

4.3.3 前置放大器

增益应不低于40 dB，等效输入噪声应小于5 μ V，带宽应覆盖探头工作频率。

4.4 运动控制与扫描子系统**4.4.1 扫描机构**

应采用至少为X-Y两轴联动的数控扫描架，定位精度应优于±0.1 mm，重复定位精度应优于±0.05 mm。

4.4.2 扫描步进

扫描步进（Pitch）应不大于预期最小损伤尺寸的1/2，且不宜大于探头有效直径的1/2，具体选择参见表1。

表1 扫描步进选择推荐表

预期最小损伤尺寸 (mm)	最大允许扫描步进 (mm)	推荐扫描步进 (mm)
>10	5.0	5.0
5~10	2.5	2.0
2~5	1.0	1.0
<2	0.5	0.5

4.4.3 探头布置

激励探头与接收探头宜采用穿透式布置，分别位于试件两侧，且声束轴线应保持对中。探头端面与被测试件表面的距离（提离）宜为1mm~5mm。

4.5 数据采集与处理子系统

4.5.1 数据采集卡

采样率应不低于探头中心频率的10倍，分辨率应不低于12位。

4.5.2 软件功能

应具备参数设置、运动控制、数据实时采集、信号处理（如滤波、平均）、数据可视化（A扫、B扫、C扫）、损伤成像算法及数据导出功能。

4.6 系统校准与性能验证

4.6.1 系统校准

每次检测前或检测条件（如温度变化超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）发生变化时，应进行系统校准。

4.6.2 时基校准

利用已知厚度的参考试块（如附录A所述），测量Lamb波传播时间，校准系统的时间基准。

4.6.3 灵敏度校准

在无缺陷的完好区，调节放大器增益，使接收信号的幅值达到满量程的40%~80%，并记录此增益设置作为基准灵敏度。

4.6.4 性能验证

应使用附录A规定的系统性能校验试块进行验证。在设定的检测参数下，应能清晰成像出试块中所有Φ5 mm及以上的平底孔。

5 检测人员

从事空气耦合 Lamb 波检测的人员应按相关行业或机构的规定进行培训和资格鉴定，并取得相应等级的无损检测人员资格认证。检测人员应具备以下知识和能力：

- a) 理解 Lamb 波在复合材料中传播的基本理论和特性；
- b) 熟悉所用检测设备的工作原理、性能及操作方法；
- c) 掌握本文件所规定的检测程序和技术；
- d) 能够根据检测结果对产品质量进行正确评定。

6 检测程序

6.1 检测前准备

6.1.1 了解被检工件的材料、铺层、厚度、结构几何形状等信息。

6.1.2 根据被检工件的特点和检测要求，选择合适频率的探头和检测参数。

6.1.3 确认检测环境。环境温度宜为 $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度应小于80%，避免强电磁干扰和剧烈振动。

6.2 试件准备与耦合

6.2.1 检测前应清洁试件表面，确保无影响声波传播的油污、灰尘或松散颗粒。

6.2.2 为保证声波有效穿透，试件表面曲率半径应大于200mm。

6.2.3 在扫描区域内，应确保激励探头和接收探头的声路通畅，无遮挡。

6.3 检测参数设置

检测参数应根据被测试件的具体情况通过试验确定，并记录在检测报告中。

6.4 扫描检测

6.4.1 将试件固定于扫描架上，确保在扫描过程中无移动或振动。

6.4.2 调整探头位置和距离，使其处于最佳工作状态。

6.4.3 在试件上选取一个已知无缺陷的区域，进行系统灵敏度和时基校准（见4.6）。

6.4.4 设定扫描区域和步进，启动自动扫描程序。

6.4.5 扫描过程中，应实时观察A扫信号的质量，如发现信号异常（如幅值骤降、噪声过大），应暂停扫描，检查系统状态。

6.5 数据采集与存储

6.5.1 系统应自动记录每个扫描点的空间坐标（X, Y）及其对应的A扫波形数据。

6.5.2 原始数据应以无损格式（如.mat, .tdms, .h5）存储，并包含所有检测参数、探头信息和校准数据。

7 结果评定与检测报告

7.1 数据预处理

对采集的原始数据进行预处理，通常包括：

- a) 数字滤波：采用带通滤波器，通带范围一般为($0.5f_c \sim 1.5f_c$)，以抑制噪声；
- b) 信号平均：若采集时已进行时间平均，此步可省略；
- c) 幅值提取：提取每个A扫信号中特定模式Lamb波（如A0模式）的最大幅值或能量值。

7.2 损伤成像与识别

7.2.1 成像算法

常用的成像算法包括：

- a) 幅值衰减成像：以接收波幅值与基准幅值的比值或衰减分贝值作为像素值进行成像，损伤区域通常表现为低幅值（暗色）区域；
- b) 飞行时间成像：以Lamb波到达时间的变化作为像素值进行成像，损伤可能引起飞行时间异常；
- c) 损伤指数成像：构建基于信号差异（如相关系数、均方根偏差）的损伤指数进行成像。

7.2.2 图像生成

将处理后的数据映射到扫描区域的二维网格上，生成灰度或伪彩图像。

7.2.3 损伤识别

将成像图与已知的典型损伤图谱进行对比，结合工件结构和工艺信息，识别损伤区域。

7.3 结果评定

7.3.1 定性评定

确定损伤的类型（如分层、冲击损伤）。

7.3.2 定位评定

在成像图上标定损伤的几何中心坐标。

7.3.3 定量评定

测量损伤投影区域的面积、最大长度和宽度。对于可评估的损伤，其尺寸测量误差应不大于扫描步进的2倍。

7.3.4 验收标准

本文件不规定具体的验收等级，验收标准应由相关各方协商确定，并在检测合同中注明。

7.4 检测报告

检测报告至少应包括以下内容：

- a) 委托单位、被检工件名称、编号、材料、厚度、铺层等信息；
- b) 本标准编号及标准名称；
- c) 检测设备信息（型号、编号、探头频率等）；
- d) 检测参数；
- e) 检测结果，包括损伤成像图、损伤位置、尺寸和类型的说明；
- f) 检测日期、地点、环境条件；
- g) 检测人员、审核人员签名及资格级别；
- h) 检测单位盖章。

附录 A
(规范性)
标准试块设计与制作要求

A. 1 用途

标准试块用于检测系统的性能校验、灵敏度设置和检测程序的验证。

A. 2 材料与制造

标准试块应采用与被检复合材料相同或声学特性相似的材料制造。其纤维类型、树脂体系、铺层顺序和固化工艺应明确并记录。试块内部质量应经过可靠方法（如水浸超声C扫描）确认，无超过规定大小的缺陷。

A. 3 结构与缺陷

应使用包含人工缺陷的试块，试块典型结构如下：

a) 基体：一块尺寸不小于300 mm×300 mm的无缺陷层压板；

b) 人工缺陷：

——平底孔：在板厚度方向钻取不同直径（如Φ2 mm, Φ5 mm, Φ10 mm）的平底盲孔，模拟不同尺寸的分层，孔底深度为板厚的1/2；

——分层模拟：在铺层过程中植入不同尺寸（如10 mm×10 mm, 20 mm×20 mm）的聚四氟乙烯薄膜或类似脱粘材料，模拟分层；

——台阶区：通过机械加工在试块背面制造不同深度的台阶（如厚度减少10%, 20%），模拟厚度变化。

A. 4 标识

试块上应清晰永久地标识出：

- a) 试块编号；
- b) 材料牌号与铺层；
- c) 公称厚度；
- d) 制造日期；
- e) 各个人工缺陷的尺寸和位置索引。