

ICS 19.100

CCS N 78



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

复合材料层压板空气耦合 Lamb 波无损 检测技术指南

Guidelines for air coupled Lamb wave non destructive testing technology of
composite laminated plates
(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 符号和缩略语 2

5 检测系统 2

 5.1 系统组成 2

 5.2 设备要求 2

6 检测人员 3

7 检测准备 3

 7.1 受检件信息 3

 7.2 检测区域的确定 3

 7.3 表面状态要求 3

 7.4 检测环境 3

8 检测程序 3

 8.1 检测模式选择 3

 8.2 探头选择与布置 4

 8.3 仪器参数设置 4

 8.4 扫查 4

 8.5 在线监测与数据记录 5

9 检测结果评定 5

 9.1 信号分析与处理 5

 9.2 缺陷识别与表征 5

 9.3 结果记录与报告 5

10 校验与维护 6

 10.1 日常校验 6

 10.2 定期维护 6

附 录 A （规范性） 标准试块设计与制作要求 7

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 波无损检测技术指南

1 范围

本文件规定了复合材料层压板（以下简称“层压板”）空气耦合Lamb波无损检测的符号和缩略语、检测系统、检测人员、检测准备、检测程序、检测结果判定、校验与维护。

本文件适用于厚度1mm~20mm的纤维增强树脂基复合材料层压板（含碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维增强类型）的内部缺陷与表面缺陷检测。

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

下列术语和定义适用于本文件。

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

频散特性 dispersion characteristics

Lamb 波的相速度和群速度随频率-厚度乘积（ $f \cdot h$ ，单位：MHz·mm）变化而改变的特性，是选择检测参数的关键依据。

3.4

耦合效率 coupling efficiency

超声波通过空气介质传输至层压板表面并进入材料内部的能量传递效率，以入射波与透射波的幅值比表示，单位为 dB。

3.5

C 扫描 C-scan

一种能够显示被检工件检测结果二维平面或投影视图的显示方式，通常以颜色或灰度表示信号幅度或飞行时间。

3.6

S0 模式 S0 mode

Lamb 波的一种对称扩展模式。

3.7

A0 模式 A0 mode

Lamb 波的一种反对称弯曲模式。

3.8

入射角 incidence angle

超声波束轴线与检测面法线之间的夹角。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

FMC: 全矩阵捕获 (Full Matrix Capture)

TOF: 飞行时间 (Time of Flight)

SNR: 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio)

f_d : 频率-厚度积 (Frequency-thickness product)

θ : 入射角 (Incidence Angle)

c_a : 空气中声速 (Sound velocity in air), 通常取 343 m/s (20° C 时)

c_p : 板材中 Lamb 波相速度 (Phase velocity of Lamb wave)

5 检测系统

5.1 系统组成

空气耦合 Lamb 波检测系统通常应包括以下主要部分:

- a) 发射单元: 包括高压脉冲发生器或函数发生器与功率放大器, 用于激励发射探头;
- b) 发射探头: 将电信号转换为超声波, 通过空气耦合激励出 Lamb 波;
- c) 接收探头: 接收在板材中传播后透射或反射的 Lamb 波信号, 并将其转换为电信号;
- d) 接收单元: 包括低噪声放大器、滤波器和数据采集卡, 用于接收、放大和采集信号;
- e) 机械扫查系统: 能够实现探头对检测区域的精确、稳定定位和移动, 至少具备二维 (X-Y) 扫查能力;
- f) 控制系统与数据分析软件: 用于控制整个系统 (发射、接收、扫查), 并具备数据存储、显示 (A 扫、C 扫)、信号处理和缺陷分析功能。

5.2 设备要求

5.2.1 探头

应满足以下要求:

- a) 中心频率: 使用频率范围宜为 50 kHz~500 kHz。对于薄板 (厚度 < 2 mm), 宜选用较高频率 (如 200 kHz~500 kHz); 对于厚板 (厚度 > 4 mm), 可选用较低频率 (如 50 kHz~150 kHz);
- b) 带宽: 应不小于中心频率的 50%;
- c) 声透镜: 可配备声透镜以聚焦声束, 提高信噪比和横向分辨率, 焦斑直径和焦深应满足检测分辨率要求;
- d) 耐候性: 探头外壳应具备一定的密封和防护能力, 以适应工业环境。

5.2.2 仪器

应满足以下要求:

- a) 发射电压: 脉冲发射器的输出电压应可调, 范围通常不小于 200 V;
- b) 接收器增益: 应不低于 80 dB;

- c) 采样率：数据采集卡的采样率应不低于探头中心频率的 10 倍；
- d) 滤波器：应配备可调的高通、低通和带通滤波器，以优化信噪比。

5.2.3 机械扫查系统

应满足以下要求：

- a) 定位精度：不应低于 0.1 mm；
- b) 重复定位精度：不应低于 0.05 mm；
- c) 扫查速度：应可调，并能在最高设计扫查速度下保证数据采集的完整性；
- d) 稳定性：机械结构应稳固，在扫查过程中不应产生明显振动。

6 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。

7 检测准备

7.1 受检件信息

检测前应获取受检件的以下信息：

- a) 材料体系：纤维和树脂类型；
- b) 铺层顺序：详细的铺层角度序列，如[0/45/90/-45]s；
- c) 公称厚度及厚度公差；
- d) 几何形状与尺寸；
- e) 表面状态（曲率、粗糙度等）。

7.2 检测区域的确定

明确标识出需要检测的区域，必要时在工件上做出标记。

7.3 表面状态要求

被检工件表面应清洁、干燥，无影响声波耦合的附着物（如油污、灰尘、疏松的涂层或氧化皮）。表面粗糙度 Ra 宜不大于 6.3 μm。若表面有涂层，应评估其对检测灵敏度的影响。

7.4 检测环境

应满足以下要求：

- a) 温度：检测环境温度宜控制在 10° C~35° C；
- b) 湿度：相对湿度宜小于 80%；
- c) 环境噪声：检测区域应避免强烈的空气流动和机械振动。

8 检测程序

8.1 检测模式选择

应根据受检件的可达性和主要检测目标选择检测模式。根据探头布置方式，主要分为两种检测模式：

- a) 透射模式：发射探头与接收探头分别置于板材两侧。该模式对衰减类缺陷（如分层、孔隙）敏感，信噪比较高，但应双侧可达；
- b) 反射模式：发射探头与接收探头置于板材同侧（可为同一探头）。该模式对反射类缺陷敏感，单侧可达，但信噪比较低，信号解释更复杂。

8.2 探头选择与布置

8.2.1 探头选择

根据 5.2.1 和受检件厚度选择探头中心频率。可参考表 1 进行初步选择。

表 1 探头中心频率推荐选择指南

板材公称厚度 (mm)	推荐中心频率 (kHz)	目标 Lamb 波模式
1.0~2.0	300~500	A0, S0
2.0~4.0	150~300	A0, S0
4.0~8.0	80~200	A0
>8.0	50~100	A0

8.2.2 入射角调整

应通过实验（在无缺陷区调整探头角度至接收信号最强）或理论计算确定最佳入射角 θ ，理论计算见公式（1）：

$$\sin \theta = \frac{c_a}{c_p} \tag{1}$$

式中：

c_a ——空气中声速，约 343 m/s (20° C)；

c_p ——目标 Lamb 波模式的相速度。

8.2.3 探头间距

在透射模式下，发射与接收探头之间的间距 L 应根据板厚、选择的 Lamb 波模式以及检测区域的几何形状确定。间距过小会引入近场效应和直接通过空气传播的信号干扰；间距过大则会导致信号过度衰减。通常 L 可在 50 mm~300 mm 范围内调整。

8.3 仪器参数设置

8.3.1 发射参数

应满足以下要求：

- a) 脉冲类型：宜使用汉宁窗调制的正弦波脉冲（Tone Burst），以产生窄带激励，抑制频散。脉冲周期数通常为 3~10 个周期；
- b) 脉冲电压：在保证信噪比且不损坏探头的前提下，宜使用较高的电压。通常范围为 200V~600V；
- c) 脉冲重复频率：应设置得足够高以保证扫查时的数据密度，但不得超过仪器的最大允许值，并避免与前一次脉冲的回波重叠。

8.3.2 接收参数

应满足以下要求：

- a) 增益：调整接收器增益，使无缺陷区域的信号幅度达到满量程的 40%~80%；
- b) 滤波：设置带通滤波器的通带范围，通常为中心频率的 $\pm 30\%$ ；
- c) 采集长度：设置时间窗口长度，应能完整包含感兴趣的 Lamb 波模式信号。

8.3.3 灵敏度设置与校验

使用附录 A 规定的标准试块，在无缺陷区域调整仪器参数，使接收到的特定模式 Lamb 波（如 S0 模式）的幅值达到一个预设的参考水平（如 80%满量程），此设置作为检测的基准灵敏度。

8.4 扫查

应满足以下要求：

- a) 扫查路径：规划扫查路径，确保覆盖整个检测区域，可采用栅格扫查；
- b) 扫查步进：扫查步进（栅格间距）应不大于预期最小缺陷尺寸的 1/2，或根据探头的有效声束宽度确定。通常步进可在 0.5mm~2mm 之间；
- c) 扫查速度：对于 C 扫描，扫查速度 v 应满足：

$$v \leq \frac{Step}{PRF^{-1}} \tag{2}$$

式中：
Step——扫查步进；
PRF——脉冲重复频率。

8.5 在线监测与数据记录

在扫查过程中，应实时观察 A 扫信号和 C 扫图像，监控信号质量（如幅值稳定性、噪声水平）。记录所有 A 扫波形数据和对应的位置信息，或至少记录用于生成 C 扫图像的特征值（如特定时间窗口内的峰值幅度、TOF）。

9 检测结果评定

9.1 信号分析与处理

9.1.1 特征值提取

从每个采集点的 A 扫信号中提取用于评定的特征值，通常包括：

- a) 峰值幅度：特定模式波包（如 S0 模式）的最大幅值；
- b) 飞行时间（TOF）：从发射脉冲起始点到特定模式波包到达点的时间；
- c) 信号能量：在选定时间窗口内信号的积分能量。

9.1.2 成像

利用提取的特征值生成 C 扫图像：

- a) 幅度 C 扫：以颜色或灰度表示接收信号的峰值幅度，幅度下降通常表示存在衰减型缺陷；
- b) TOF C 扫：以颜色或灰度表示飞行时间，TOF 异常可能表示厚度变化或存在影响波速的缺陷。

9.2 缺陷识别与表征

9.2.1 缺陷识别

将 C 扫图像中的异常区域与无缺陷区域的信号特征进行比较，识别缺陷。

9.2.2 缺陷表征

应包括以下内容：

- a) 缺陷位置：根据扫查编码器数据确定缺陷在工件上的坐标位置；
- b) 缺陷尺寸：对于幅度 C 扫，通常将信号幅度低于预设阈值（如基准幅度的-6 dB）的区域判定为缺陷区域，并测量其边界以确定尺寸，阈值应根据信噪比和检测要求确定；
- c) 缺陷类型判断：结合幅度变化、TOF 变化、缺陷形貌以及受检件的工艺和历史信息，综合判断缺陷类型（如分层、孔隙、冲击损伤），参见表 2。

表 2 典型缺陷的 Lamb 波特征

缺陷类型	透射模式幅度 C 扫特征	透射模式 TOF C 扫特征	可能的反射模式特征
分层	明显幅值下降，边界清晰	TOF 可能无明显变化或轻微增加	在分层界面产生反射回波
孔隙率均匀偏高	幅值均匀性下降，整体幅值降低	TOF 可能轻微增加	背景噪声水平升高
冲击损伤	幅值下降区域呈圆形或椭圆形，中心区域衰减最大	TOF 可能增加，分布与幅值下降区域对应	可能出现复杂的散射回波
夹杂	局部幅值下降	可能引起 TOF 局部变化	可能出现界面反射回波
树脂富集/贫胶	幅值轻微变化	可能引起 TOF 的轻微变化	通常不明显

9.3 结果记录与报告

检测报告应至少包括以下内容：

- a) 委托单位、受检件名称、编号、材料、厚度等信息；
- b) 检测标准编号（即本标准编号）；
- c) 检测设备型号、探头参数（类型、频率、晶片尺寸）；
- d) 检测条件（检测模式、探头间距、入射角、仪器参数设置、扫查参数）；

- e) 检测区域和结果（附上带标尺的 C 扫图像）；
- f) 缺陷记录（类型、位置、尺寸、评定结果）；
- g) 检测日期、地点、环境条件；
- h) 检测人员、审核人员签名及资格等级。

10 校验与维护

10.1 日常校验

每个工作班次开始前或检测重要工件前，应使用标准试块（见附录 A）对检测系统进行校验。校验内容包括：

- a) 在固定位置测量参考信号的幅度和 TOF，与历史记录比较，变化不应超过 $\pm 10\%$ ；
- b) 检查 C 扫描图像的均匀性和分辨率。

10.2 定期维护

按照设备制造商的要求每半年或每年对系统进行一次全面的性能核查与维护，包括清洁探头、检查电缆连接、校准机械扫查系统的定位精度等。

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。