

无损检测及其在复合材料领域的应用

2017.10.14

• 无损检测概念

无损检测 (Non Destructive Testing, NDT)，是指在**不损害**或不影响被检测对象的使用性能，不伤害被检测对象内部组织的前提下，利用材料内部组织结构异常或缺陷存在引起的**热、声、光、电、磁**等反应的变化，以物理或化学方法为手段，借助现代化的技术和设备器材，对试件内部及表面的**结构、性质、状态及缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布**及其变化进行检查和测试的方法。



五大常规检测方法

超声检测 Ultrasonic Testing (UT)

射线检测 Radiographic Testing (RT)

磁粉检测 Magnetic particle Testing (MT)

渗透检测 Penetrant Testing (PT)

涡流检测 Eddy current Testing (ET)

UT

- 复杂形状或不规则外形的制件检测有困难，缺陷的位置、取向和形状以及材质和晶粒度都对检测结果有影响

RT

- 制件的二维图片显示，存在信息的叠加，难以立体的显示缺陷的形貌和尺寸

MT

- 对于表面浅的划伤、埋藏较深的缺陷和与工件表面夹角小于 20° 的分层和折叠难以发现

PT

- 检测表面开口型缺陷，难以确定缺陷的宽度，难以作出定量评价

ET

- 只能检测导电材料，检测表面和近表面缺陷

其它检测方法

目视检测 (VT)

泄露检测 (LT)

声发射检测 (AE)

漏磁检测 (MFL)

超声波衍射时差法 (TOFD)

远场测试检测方法 (RFT)

导波检测 (GWT)

检测新方法

红外检测 (TIR)

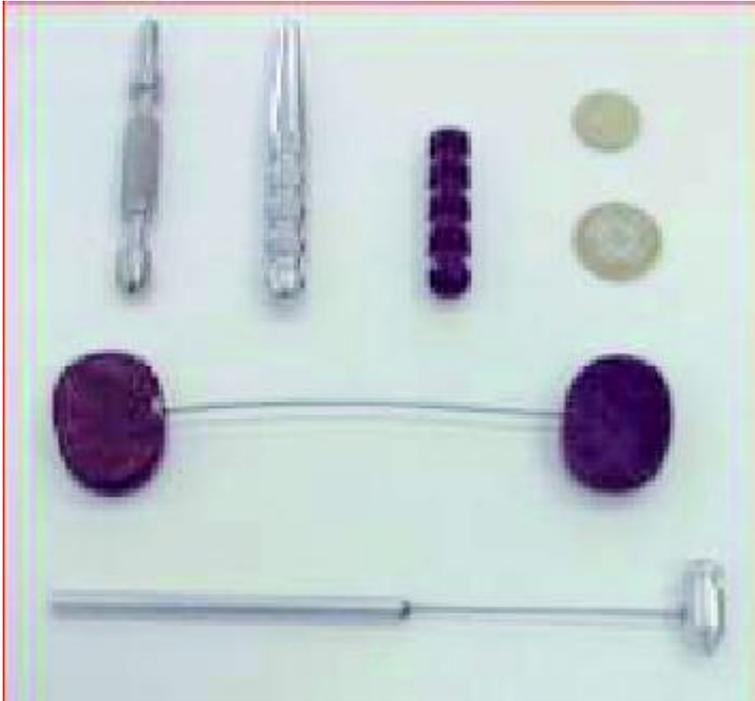
激光散斑检测

工业CT检测

超声相控阵检测

空气耦合检测

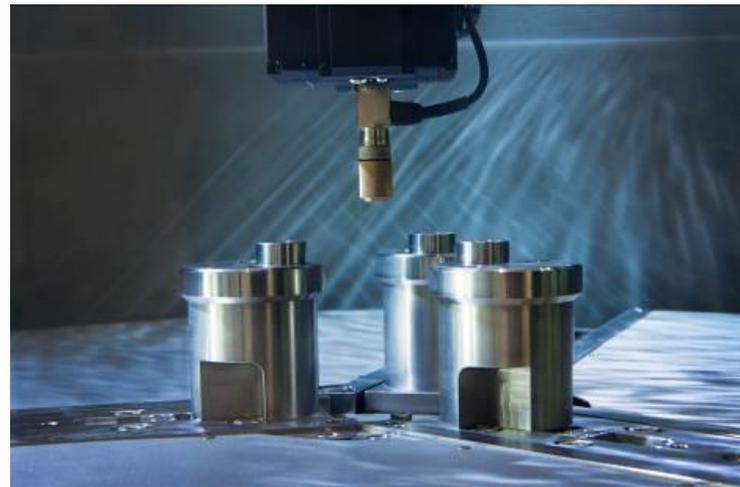
- 设备



- 敲击检测用小锤、硬币等工具



- 啄木鸟敲击检测仪



盘、环件检测系统

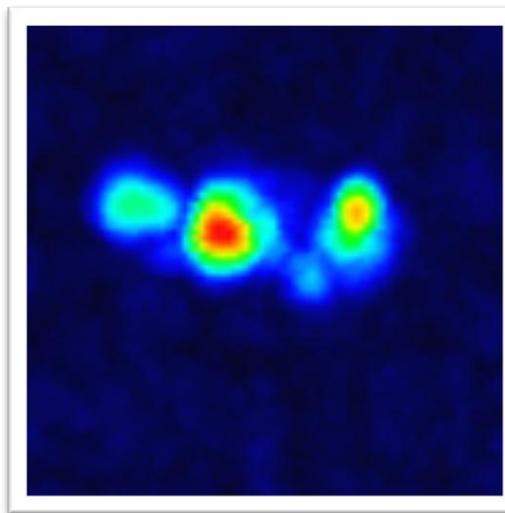
- 高精度扫描机械装置，各轴具有优越的分辨率和可靠性
- 优越的表面分辨率（可分辨埋深1.5mm的 $\Phi 0.4$ mm平底孔）
- 较低电噪声水平及较高检测灵敏度（可检测深度140mm、灵敏度可达 $\Phi 0.4$ mm -15dB）
- 友好便利的软件界面及强大的数据处理和分析功能

■ 锻件检测系统

- 三轴锻件检测系统，能够满足小型或大型锻件的超声检测



• 锻件检测系统



• 大型锻件缺陷的C扫描及金相结果



管、棒材检测系统

- 可进行管、棒材的纵波及横波检验
- 最大检测直径 $\Phi 50\text{mm}$
- 满足管、棒材的超声检测要求





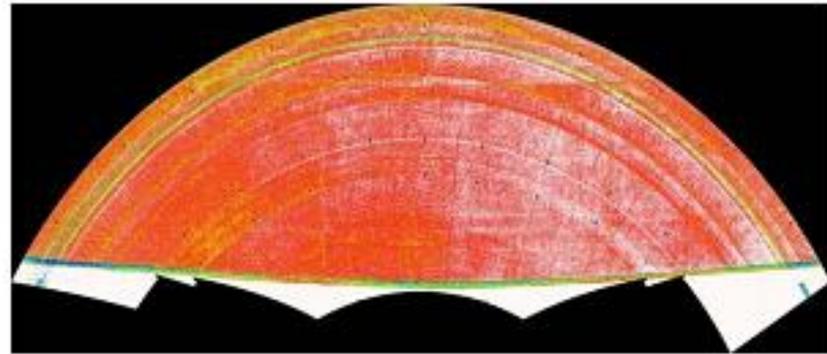
平面制件检测系统



圆柱、圆筒形制件检测系统



• 大型曲面跟踪检测系统



• 异性结构仿行自动检测系统



•X射线探伤机



• 荧光渗透检测线



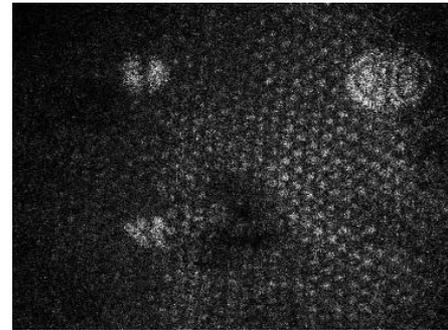
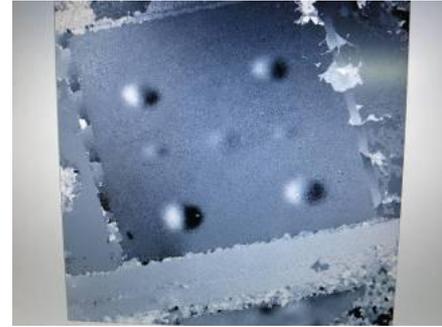
• 涡流探伤仪



• 涡流自动检测系统



• 红外热成像检测系统



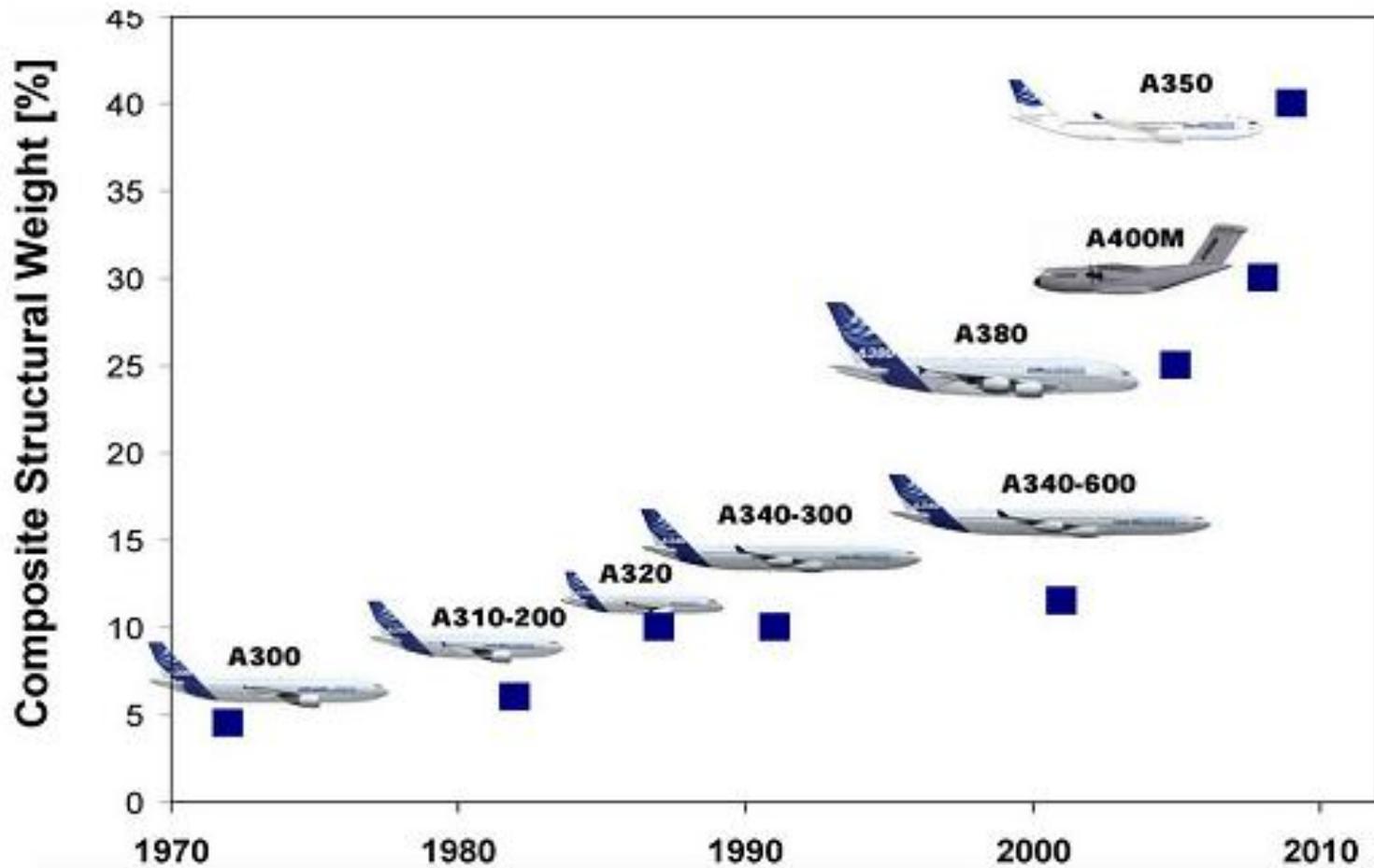
• 激光散斑检测系统

• 无损检测技术在复合材料中的应用

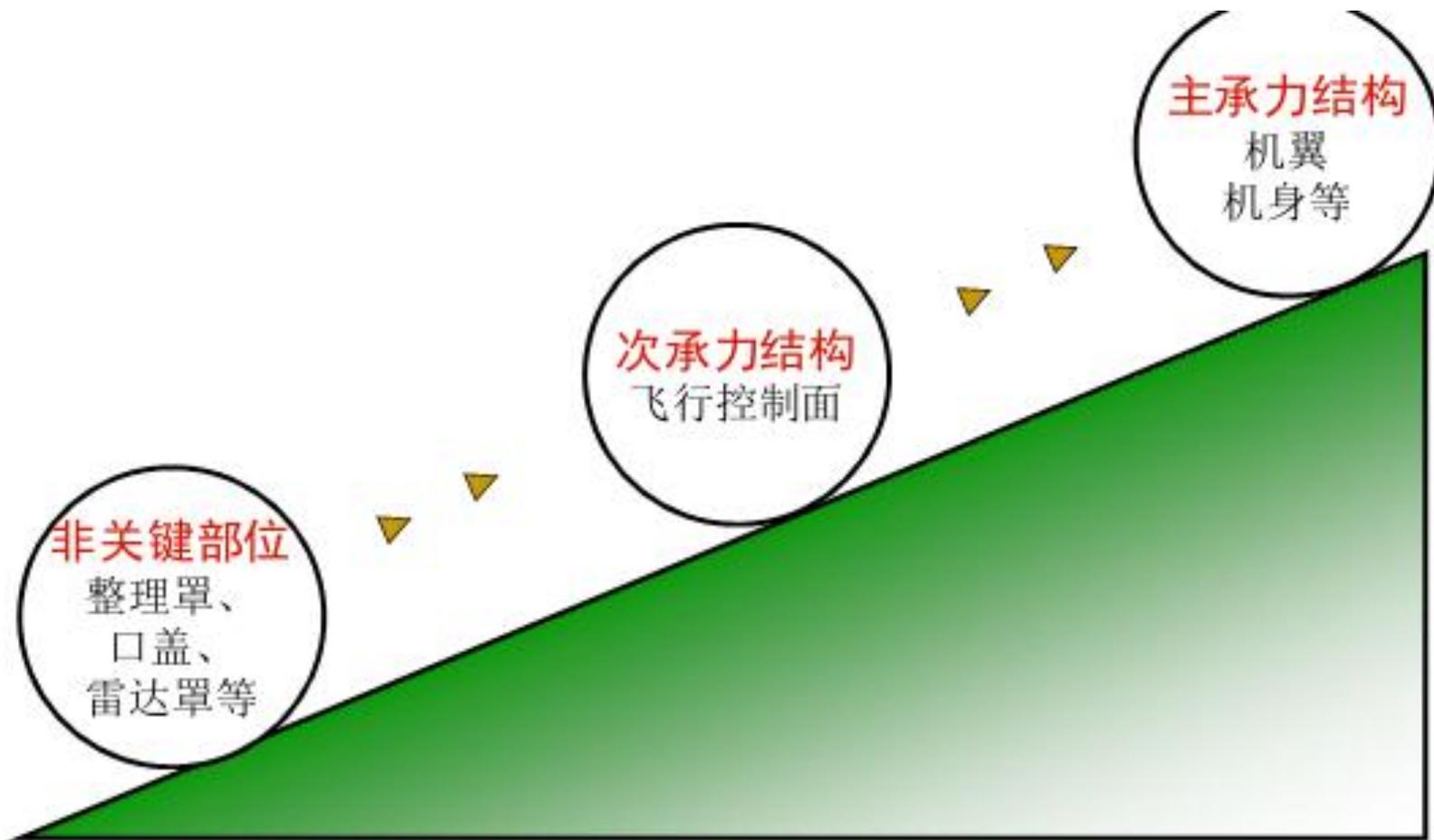
1970年代到21世纪，出现了复合材料，其比强度高于钛合金、钢、铝合金等，逐渐进入飞机结构材料中。新一代大型民用飞机B787、A380和A350等复合材料用量越来越大。

无损检测在飞机制造、维护及维修中所起的作用越来越重要。





•空客公司飞机复合材料用量



- 复合材料在飞机上使用部位的发展

■ 优点

- 重量轻
- 耐腐蚀
- 抗疲劳损伤性能强
- 机械加工量少
- 易实现锥形截面与复杂外形
- 可根据强度、刚度需要设计纤维方向
- 共固化可减少装配件和紧固件数量
- 吸收雷达微波（隐身性）
- 热膨胀系数低

■ 缺点

- 材料昂贵
- 缺乏已确定的设计许用值
- 检测方法复杂而昂贵
- 对于胶结，很难可靠检测
- 需要进行雷电防护
- 对缺陷的准确定位比较困难
- 在极限温度与潮湿环境中性能降低
- 与金属结合易产生电腐蚀
- 能量吸收能力差，易发生冲击损伤

——牛春匀，使用飞机复合材料结构与制造

• 复合材料与金属材料性能对比



•NDT在产品全寿命周期的作用ASTM E2533-09

- E 2533 – 09 Standard Guide for Nondestructive Testing of **Polymer Matrix Composites** Used in Aerospace Applications
- E 2580 – 07(12) Standard Practice for **Ultrasonic Testing** of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications
- E 2581 – 07 (14) Standard Practice for **Shearography** of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Applications
- E 2582 – 07(2014) Standard Practice for **Infrared Flash Thermography** of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications
- E2661/E2661M-15 Standard Practice for **Acoustic Emission** Examination of Plate-like and Flat Panel Composite Structures Used in Aerospace Applications
- E2662-15 Standard Practice for **Radiographic Examination** of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications

•ASTM 03.03卷 NDT (2015版211个标准)

■ 无损检测方法(9种)

- 声发射
- 工业CT
- 泄漏检测
- 射线照相 (含DR,CR,DDA,实时成像等)
- 错位散斑
- 应变测量 (电阻应变片)
- 红外热像
- 超声
- 目视

■ 缺陷类型

- 分层
- 密度变化
- 加载后的变形
- 脱粘
- 纤维脱粘
- 纤维偏差
- 断裂
- 泄漏
- 零件松动
- 微裂纹
- 孔隙率
- 厚度变化
- 空隙、污染、断丝、进水等

•ASTM 2533-09 宇航用高分子基复合材料无损检测指南

各种无损检测方法与可检测缺陷的对应关系

TABLE 1 Defects Detected By NDT Methods

Defect	Acoustic Emission	Computed Tomography	Leak Testing	Radiology with DDA; Radiography, CR, Radioscopy	Shearography	Strain Measurement	Thermography	Ultrasound	Visual NDT
Contamination		X		X				X	X
Damaged Filaments	X	X		X					
Delamination	X	X			X		X	X	X
Density Variation		X		X			X	X	
Deformation under Load					X	X			
Disbond		X			X		X	X	X
Fiber Debonding	X	X ^A					X	X	
Fiber Misalignment		X		X			X		
Fractures	X	X		X			X	X	X
Inclusions		X		X			X	X	X
Leaks	X		X					X	
Loose or Moving Parts	X								
Microcracks	X	X ^B		X ^{B,C}	X			X	
Moisture		X		X ^{D,E}			X		
Porosity	X	X		X			X	X	
Thickness Variation		X		X ^F	X		X	X	
Undercure								X	
Volumetric Effects		X							
Voids	X	X	X	X			X	X	

^A Can detect after impact (voids).

^B Depends on opening/size of crack.

^C Depends on angle of beam relative to planar defect and opening.

^D Only in central projection (Radiography, CR).

^E Radioscopic mode (Radiology with DDA).

^F For Radiography, applicable to CR and digitized films only.

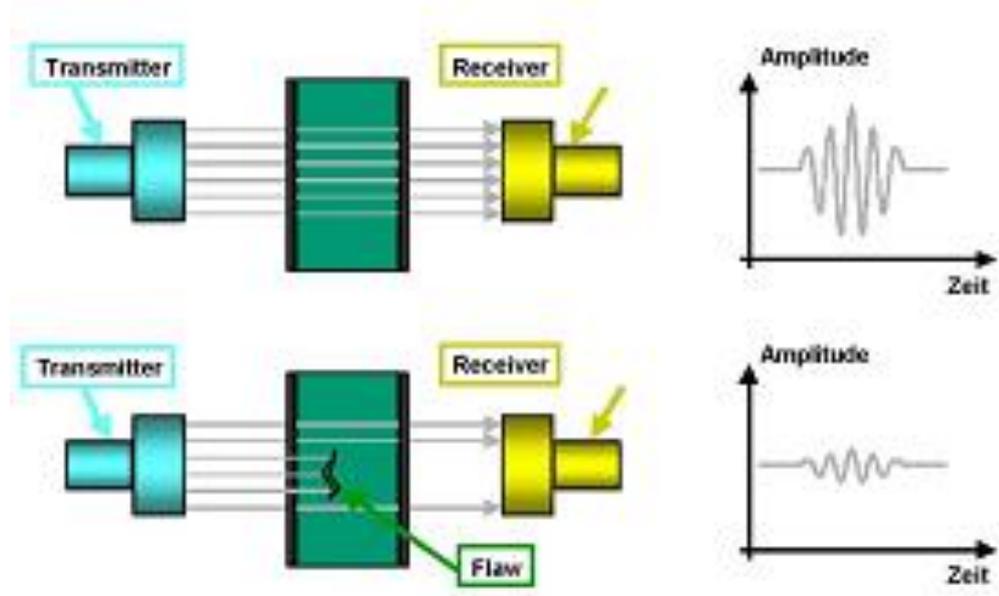
没有一种方法能够发现所有的缺陷!

•ASTM 2533-09 宇航用高分子基复合材料无损检测指南

• 超声是复合材料最主要的检测方法

分类：

- 脉冲反射法、穿透法
- 接触法、水浸法、喷水法
- 手动检测、自动检测
- 液体耦合、空气耦合
- 单通道、多通道、相控阵
- 聚焦探头、非聚焦探头



穿透法

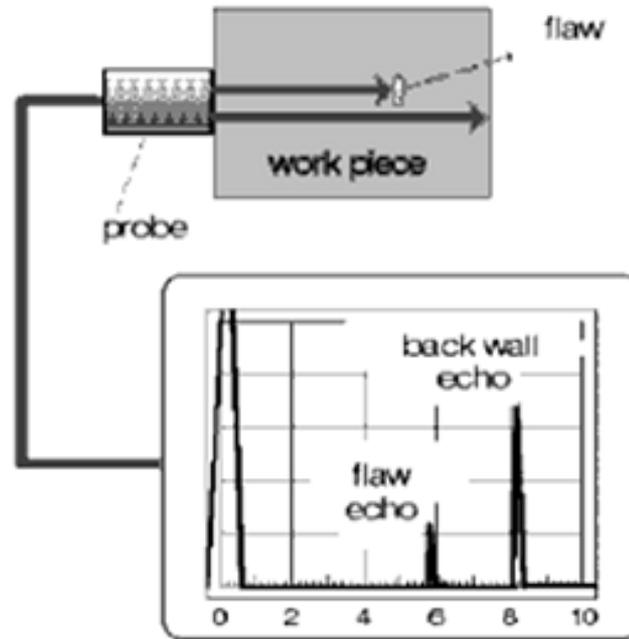
• 手动接触脉冲反射法

优点：

- 可操作性强、仪器便携
- 穿透能力强
- 单面操作

缺点：

- 存在近表面盲区
- 逐点检测、效率低
- 需要接触、耦合剂
- 人为因素影响缺陷判定



脉冲反射法

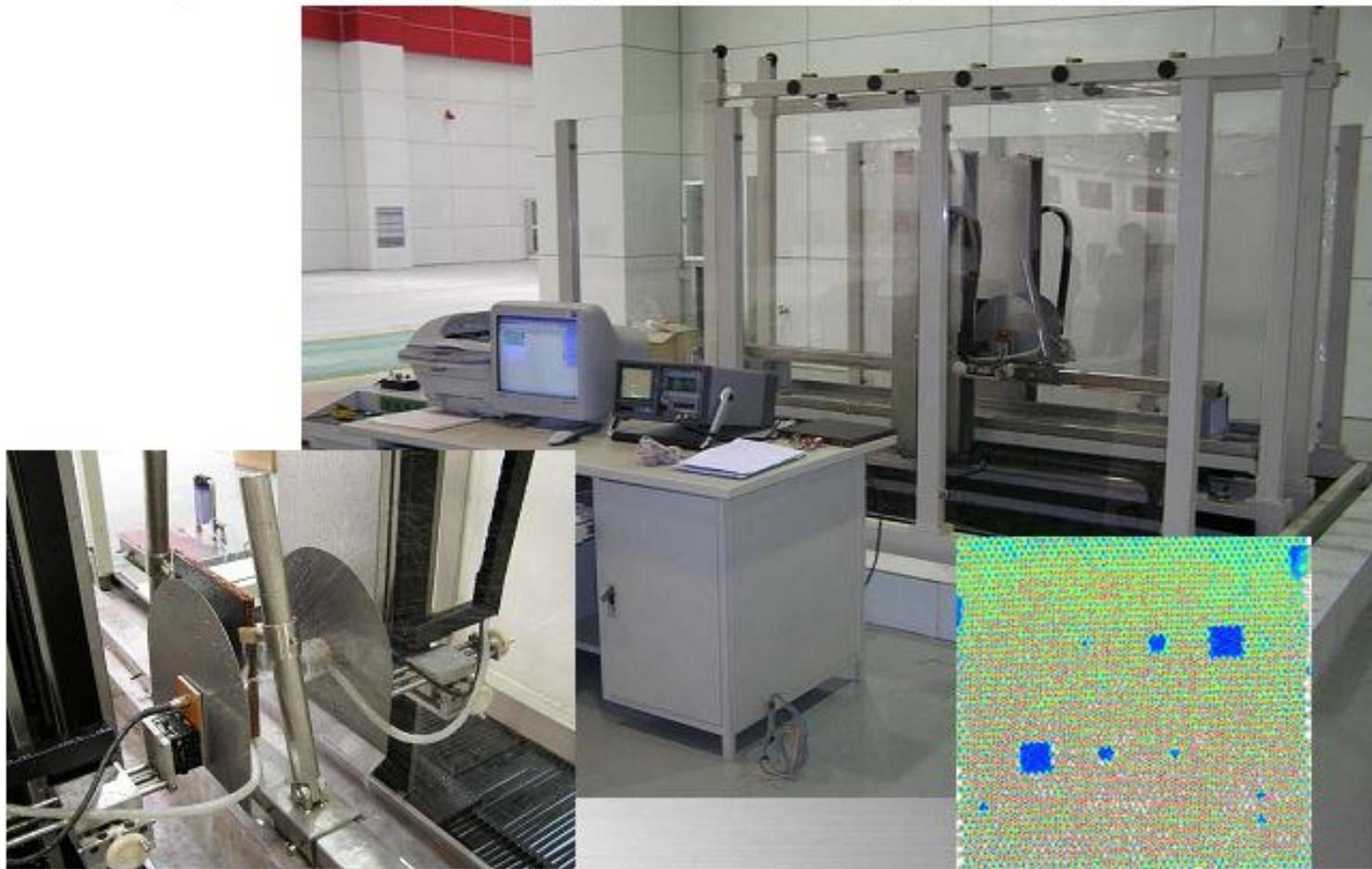
• 自动超声C扫描系统

优点：

- 定位准确、检测可靠
- 显示直观、易于判断
- 可同时采用穿透法或反射法

缺点：

- 只能在固定检测场地检测
- 价格高昂，大型多轴（曲面跟踪）系统约100~300万美元



二轴（平面）喷水穿透法C扫描系统



737尾翼超声脉冲-回波检测系统

737发动机罩超声穿透法
自动检测系统



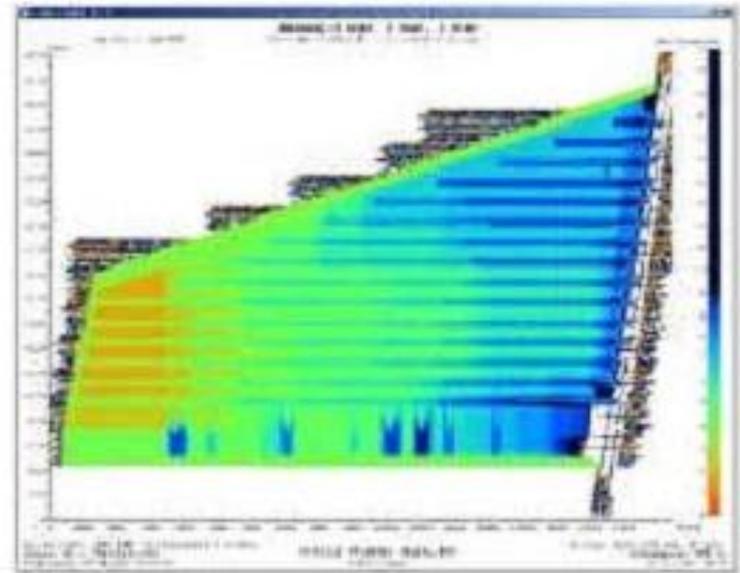
波音公司产品的超声检测系统

空客公司检测系统：

- 96通道
- 最大检测面积：13m \times 7m
- 扫描速度：100mm/s

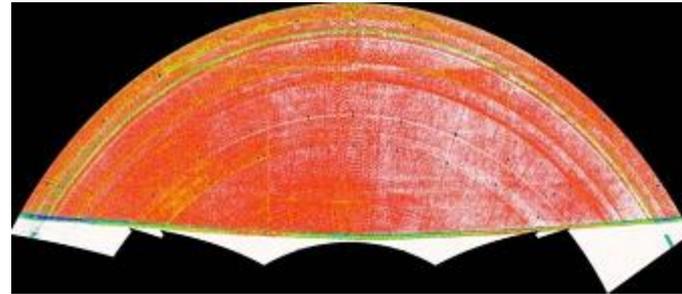
用于检测：

- 后压力隔框
- 垂尾、平尾
- 副翼等大型制件

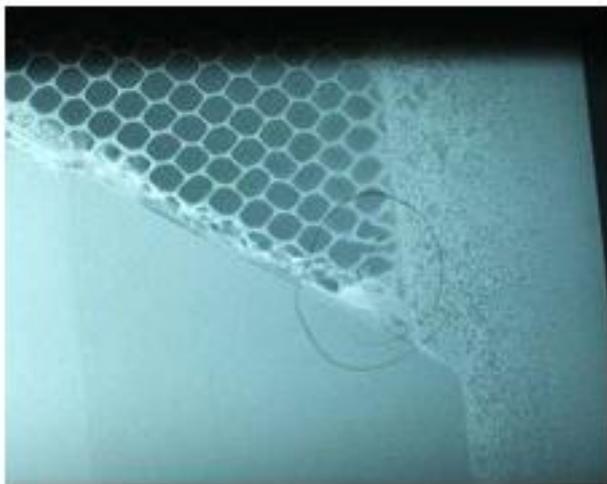




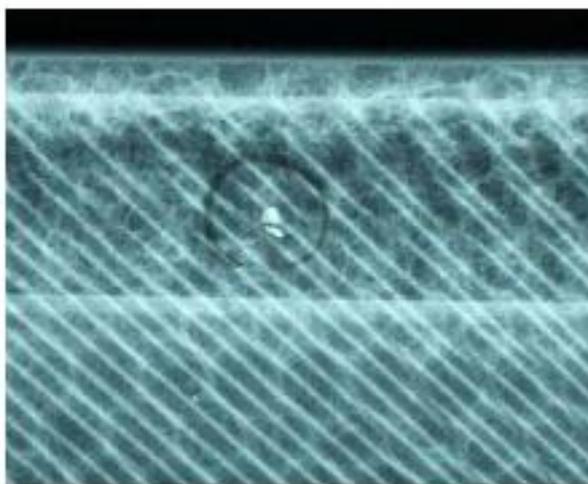
大型复杂曲面跟踪检测系统



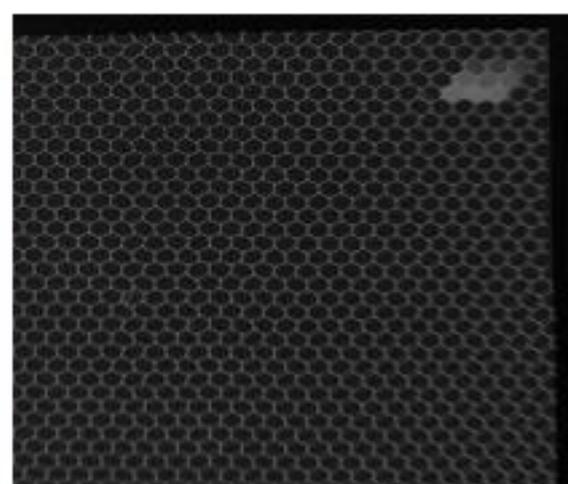
异型结构仿行自动检测系统



蜂窝开裂



外来物



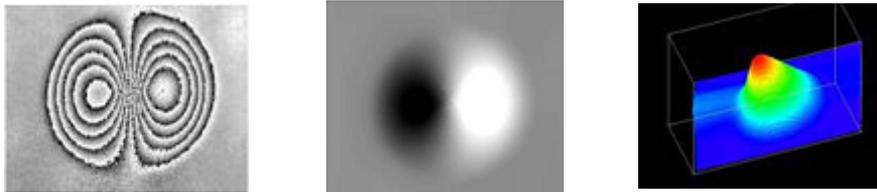
蜂窝积水

承担大量蜂窝夹层、泡沫夹层型号产品的射线检测，发现的缺陷有蜂窝开裂、外来物、蜂窝积水等。

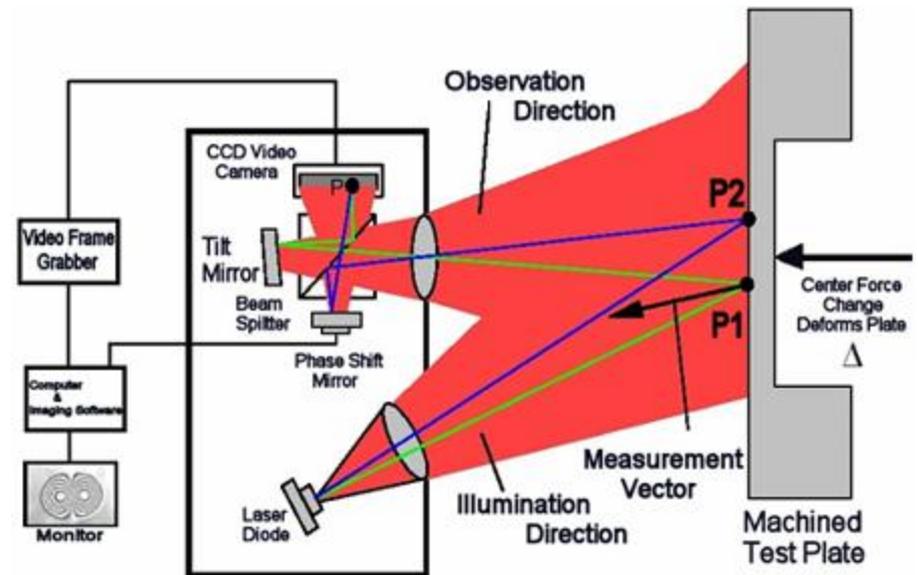
• 激光错位散斑检测

利用激光干涉原理，测量物体表面的离面位移。通过选用适当的加载方式（加热、真空、加压、振动等），使缺陷处产生与正常部位不一样的离面位移，从而在检测图像中显示出来：

- 灵敏度高，离面位移分辨力2nm
- 非接触检测
- 效率高，全场变形信息实时2维显示
- 可检测出紧贴性脱粘缺陷



Phase Map Image Unwrapped Image Integrated 3-D Plot



激光散斑在复合材料中的应用：

- 制造阶段：夹层结构的脱粘、层板结构的分层、部分夹杂或外来物（无法定量测量复合材料中的孔隙率）
- 外场检测：冲击损伤、分层、脱粘
- 检测对象：雷达罩、机翼、旋翼等
- 距美国LTI公司介绍，该公司2009年的激光散斑系统在世界范围内已经安装450套，其中超过100套为生产阶段的产品检测系统

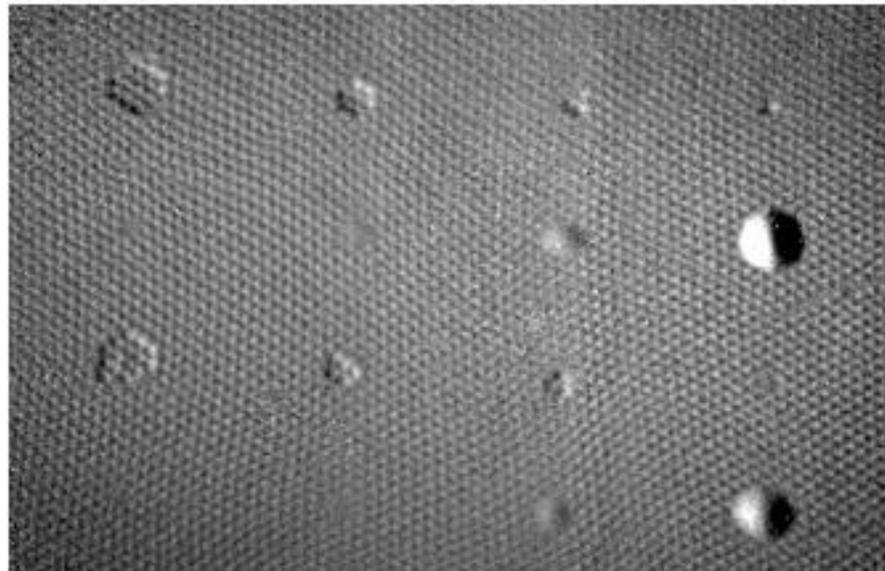
激光散斑在复合材料中的应用要点：

- 该方法通过表面变形（**离面位移**）检测缺陷
- 选用合理的加载方式使被检测缺陷能够产生足够大的异常变形（**蜂窝结构-真空；层板-加热**）
- 如有可能应先用材料力学性能数据预测**可检测性**

$$w_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)q_0a^4}{16Et^3}$$



LTI-5100HD检测系统



铝蜂窝结构的激光散斑检测结果:

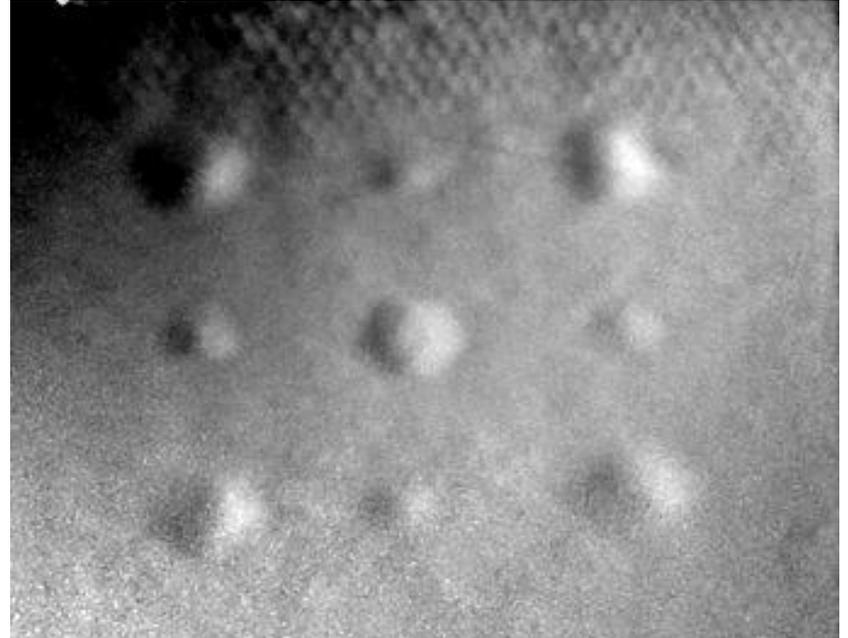
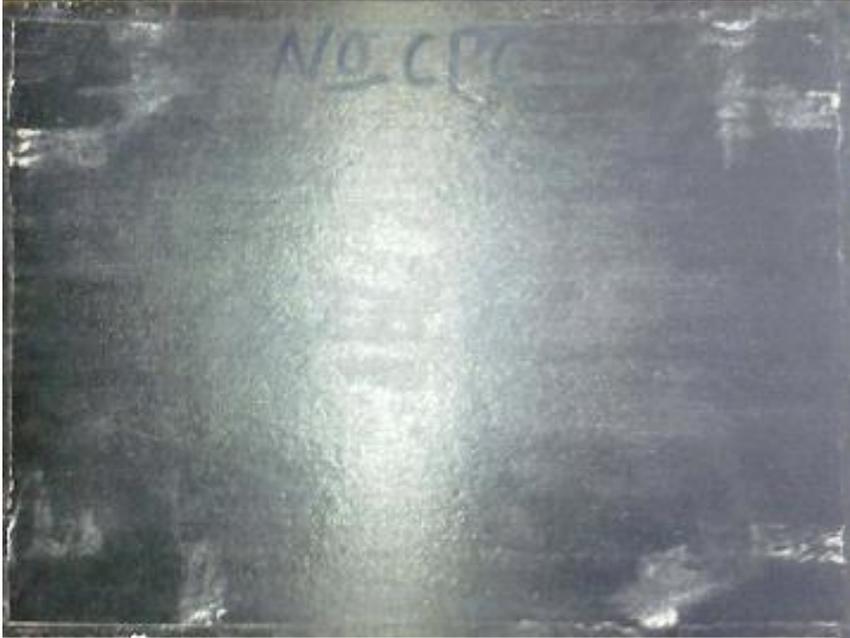
■ 试样尺寸: 400mm*300mm

■ 测试距离: 1600mm

■ 加载功率: 2KW

■ 加载时间: 10s

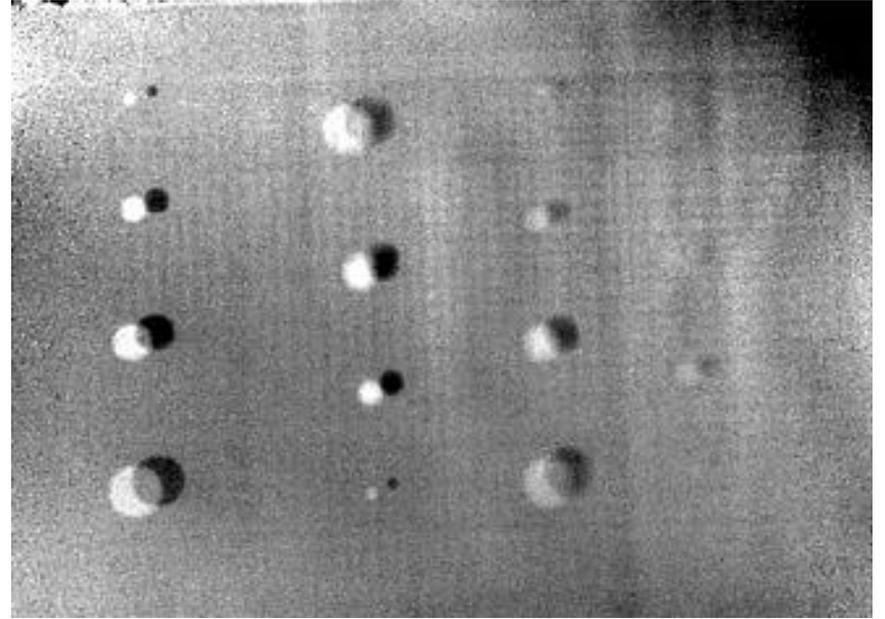
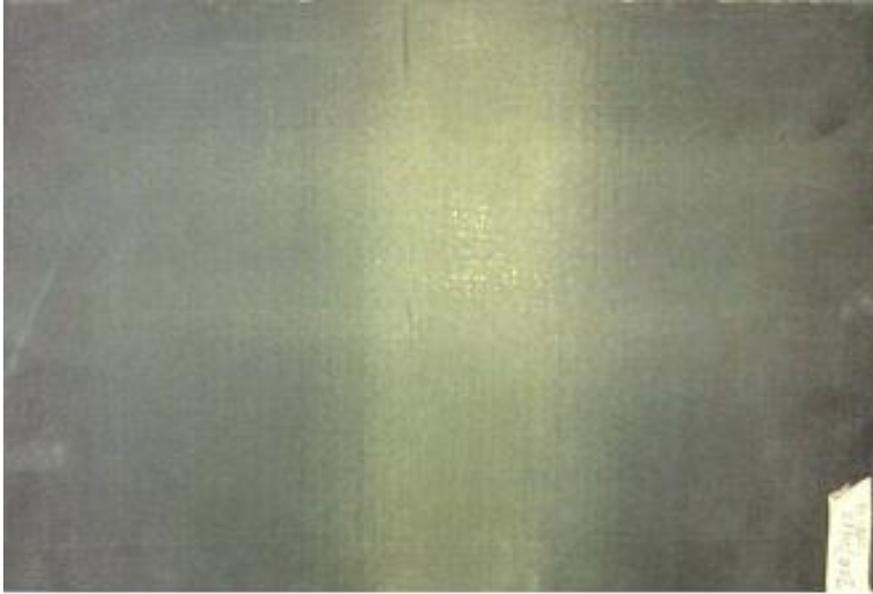
■ 错位量: 0.3inch



热加载下碳纤维蒙皮纸蜂窝样板错位散斑检测结果：

■ 试样尺寸：260mm*200mm

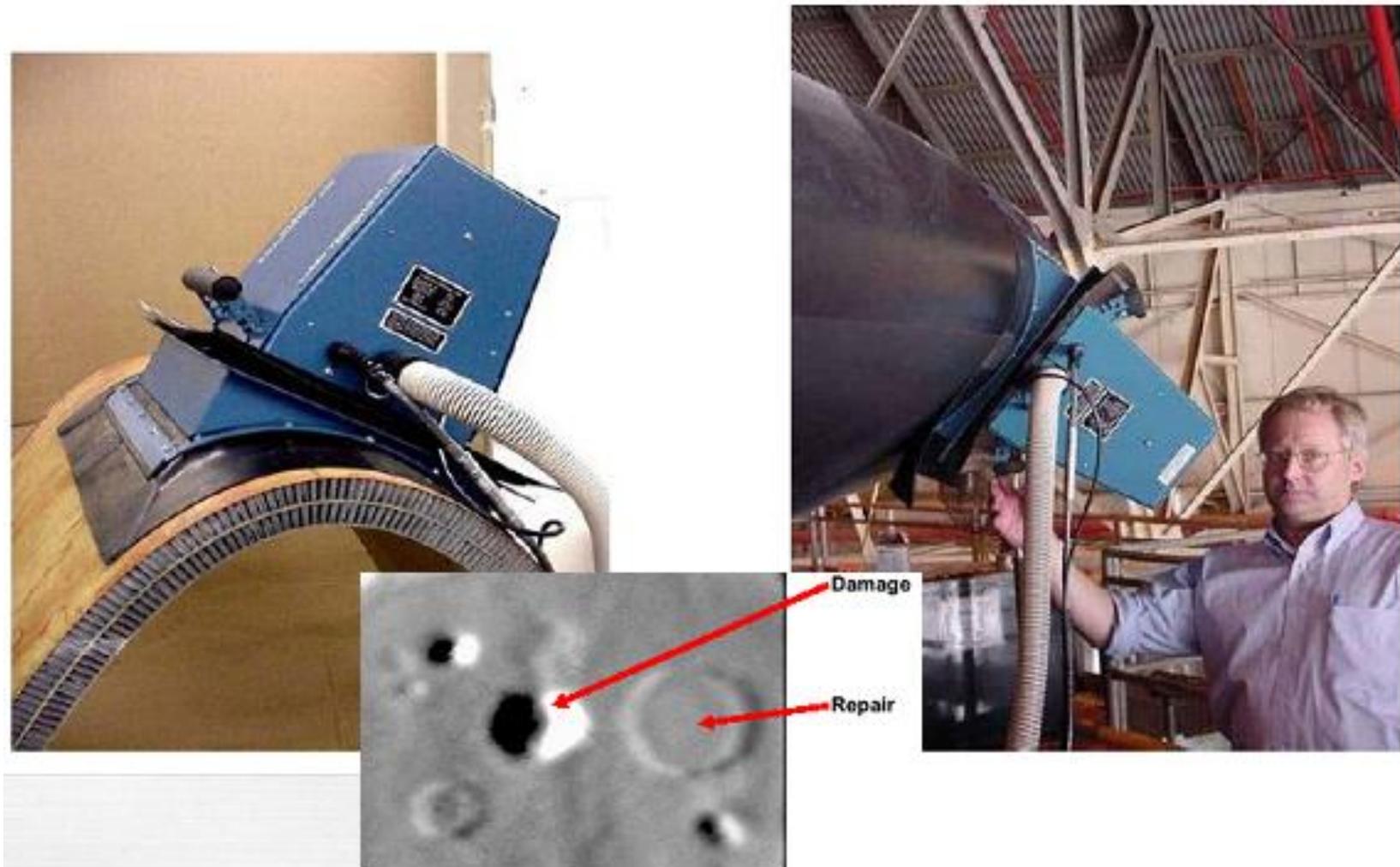
■ 加热：5s



热加载下碳纤维层板的错位散斑检测结果：

■ 试样尺寸：360mm*240mm

■ 加热：5s



散斑法检测预警机的雷达罩



真空室 $12 \times 5 \times 2,5 \text{ m}^3$
一次检测面积 $600 \times 800 \text{ mm}^2$ (24" x 31")
可检测 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 缺陷, 定位精度5mm
10分钟检测完成, 移动15次



散斑技术检测直升机旋翼

FOV: 360 x 270 mm²



Use sensor overhead

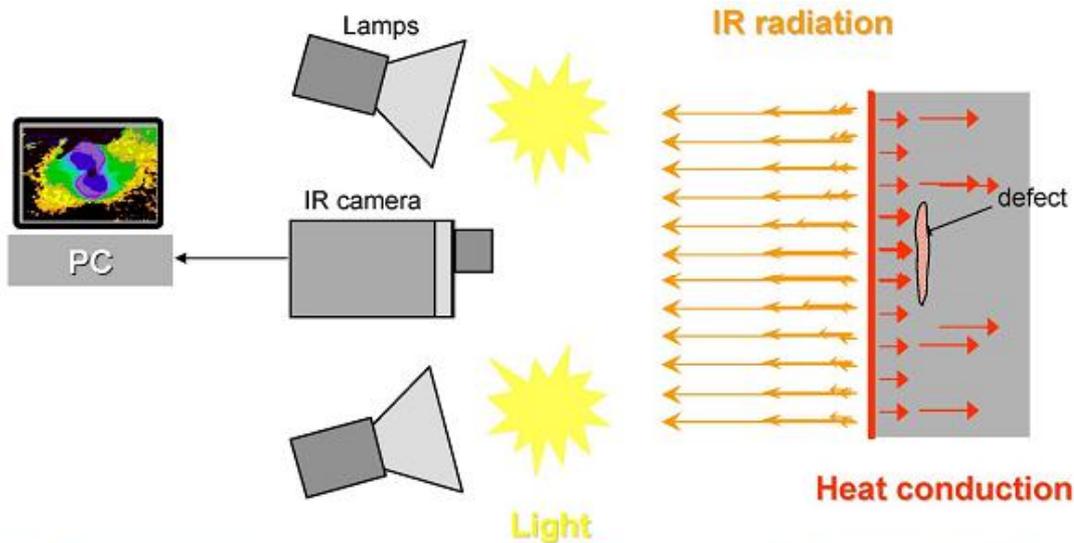


散斑技术外场检测

• 红外热像检测

通过特定加热方式使缺陷处产生与正常部位产生温度差，使用红外热像仪监测表面温度，从而发现缺陷：

- 完全非接触
- 快速检测
- 热像仪温度分辨力可达 0.02°C 左右
- 适合检测蜂窝积水、近表面的分层、脱粘等缺陷



加热方式：

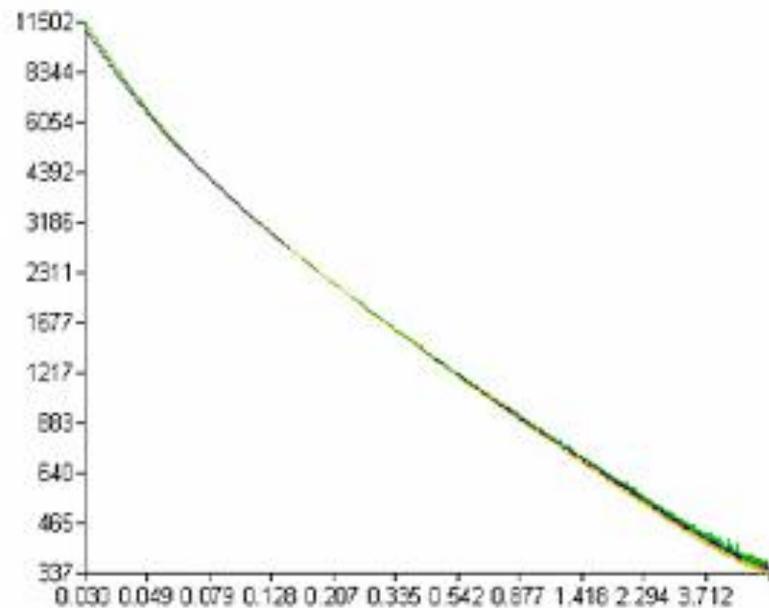
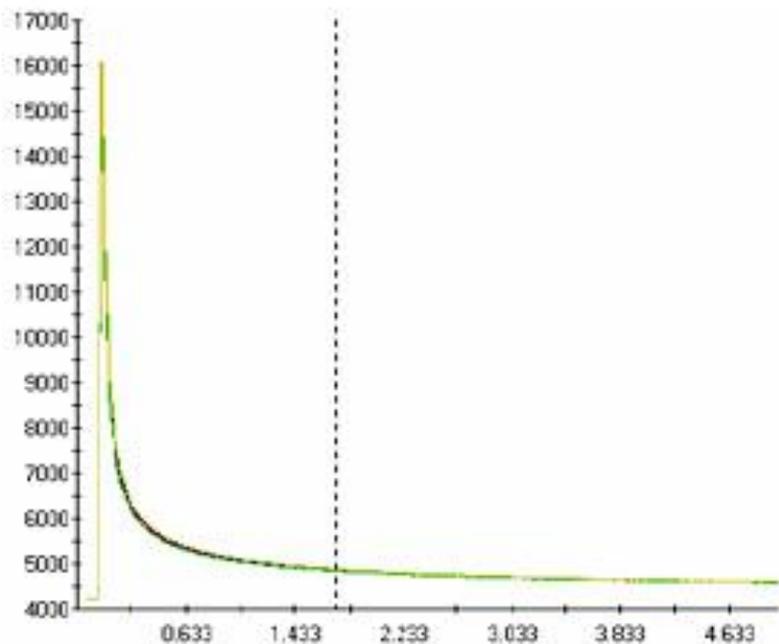
- 高能闪光灯
- 电吹风
- 喷降温剂
- 超声激励等

红外热像技术在复合材料中的应用要点：

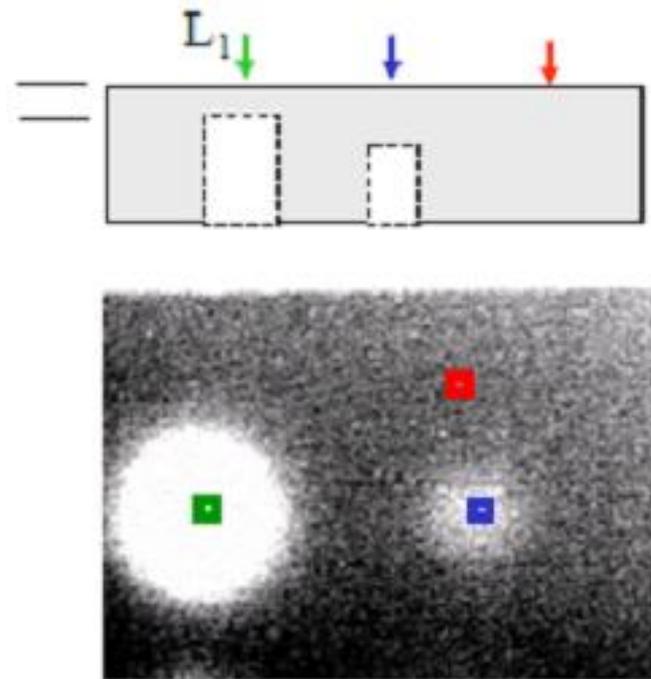
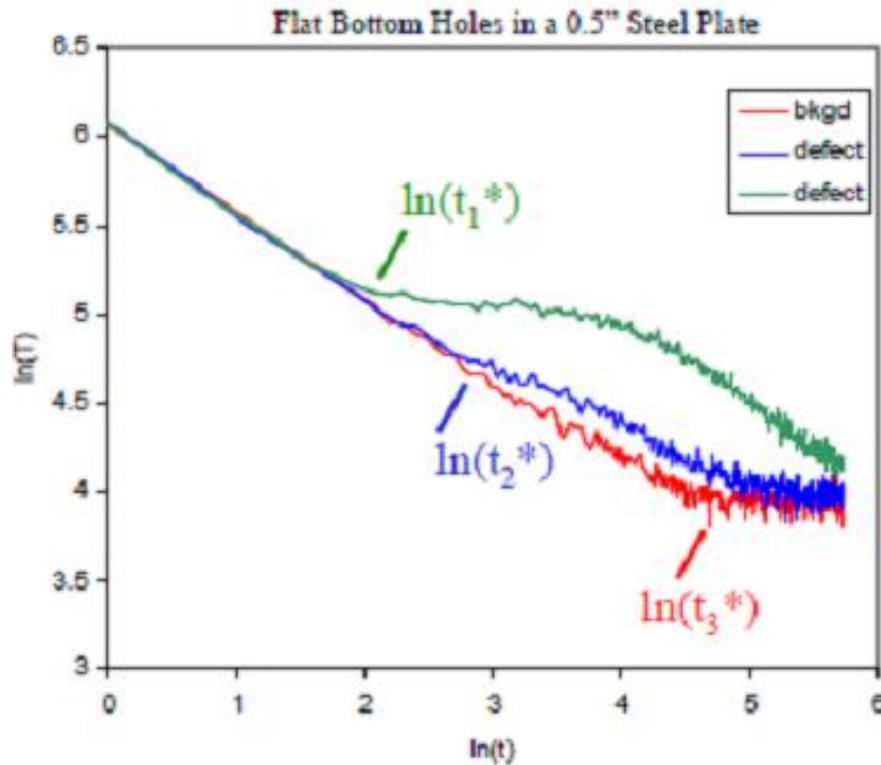
- 选择合理的热激励方式使缺陷处产生异常温度变化，进行必要的模拟计算来初步判断可检测性
- 蜂窝结构复合材料蒙皮的孔隙率问题影响热传递，可能影响脱粘缺陷的判定
- 结构的材质不均匀，内部结构都会影响热传递，从而在热像图中有所显示
- 先进的信号分析及经验对于缺陷定性至关重要

TWI公司的TSR（热信号重建）专利技术：

- 显著降低噪声，提供1D/2D分析手段
- 图像质量和缺陷判定能力大大增强



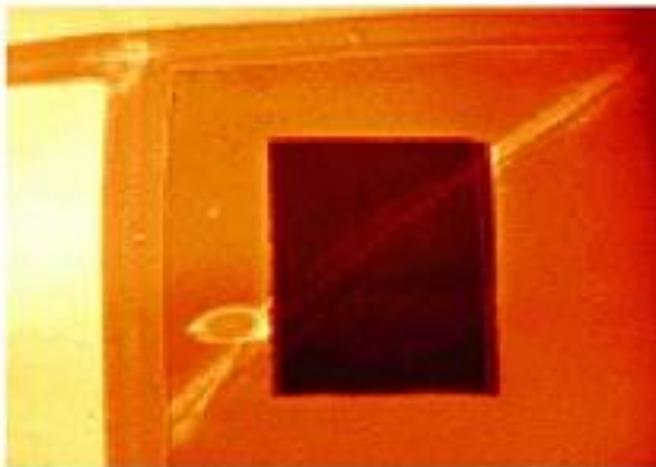
钢板上平底孔的信号分析



对数坐标下， $T-t$ 偏离直线的点（时间）与缺陷深度直接相关



E2-C Hawkeye



Subsurface crack in E2-C propeller

桨叶内部芯子裂纹:

- 最初敲击法
- 16个桨叶失效
- 射线和超声不利开展检测



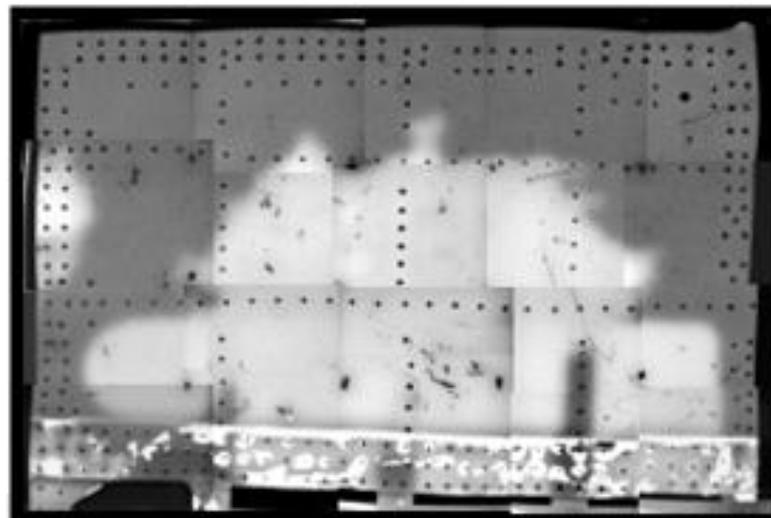
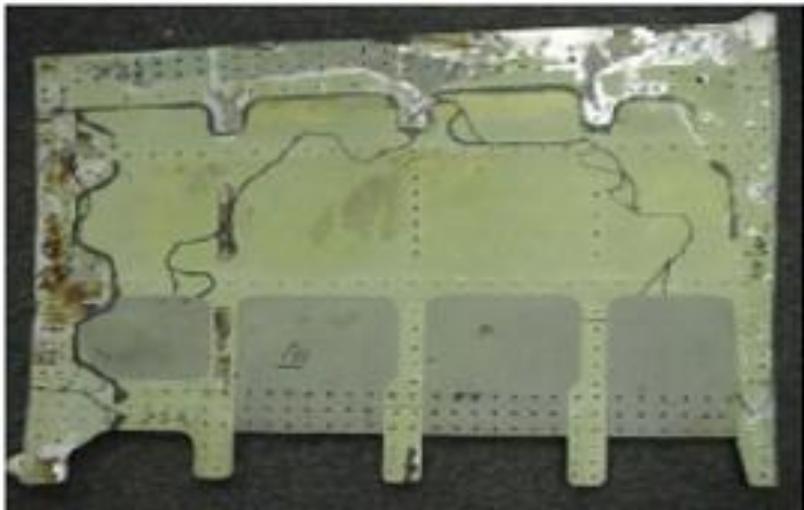
Acceptance inspection



On-aircraft inspection

98年100%热像检测:

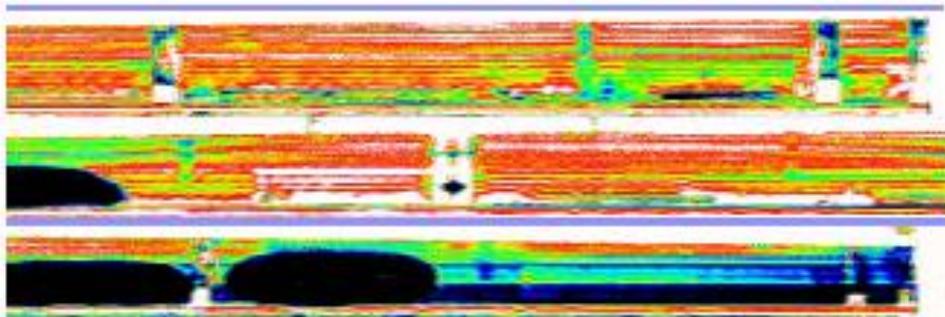
- 1h检测1片
- 培训17名检验员
- 以后未出现过问题



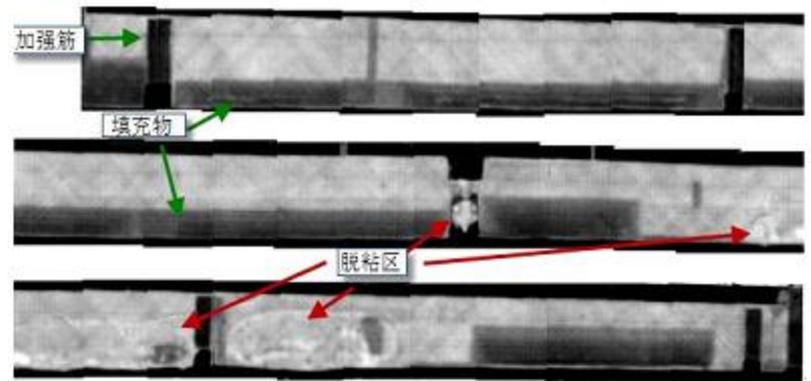
红外检测B737飞机蒙皮的金属-金属脱粘缺陷：

2001年8月起在B7X7系列飞机中使用，列入无损检测手册

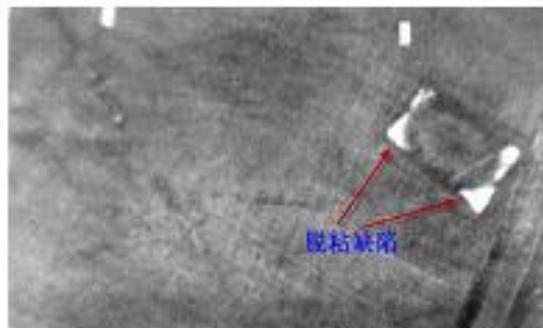
- 蒙皮厚度为1.1mm，分成3段进行检测
- 检测参数：闪光加热量为2.4J。采集时间10s
- 闪光灯激励脉冲热像法给出了更清晰的检测结果和更加丰富的构件内部信息，该方法适用于薄的碳纤维蒙皮泡沫夹层结构件的无损检测



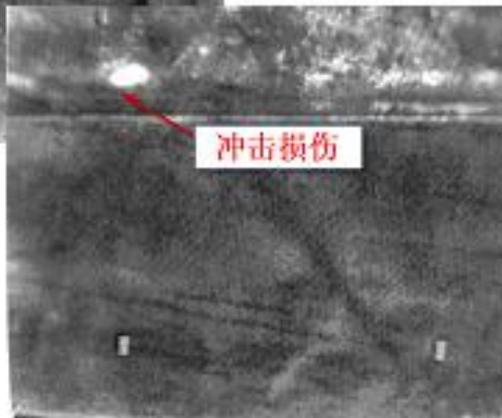
喷水穿透法超声C扫描图



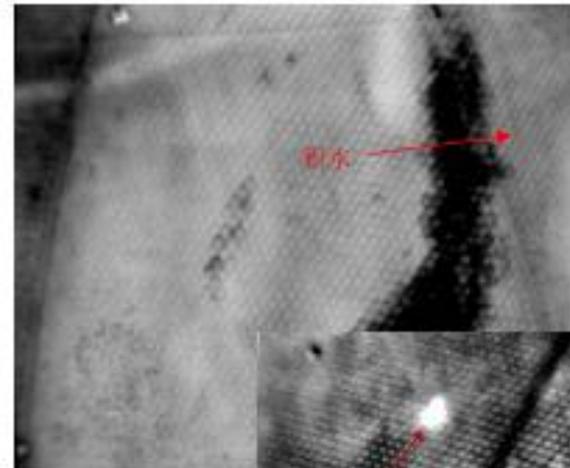
正面原始热像图



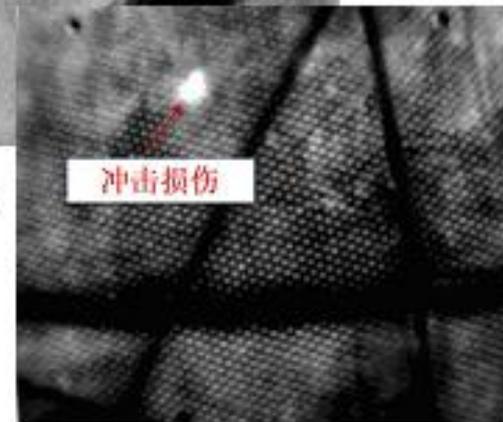
$t=0.117s$



$t=0.217s$



$t=8.608s$



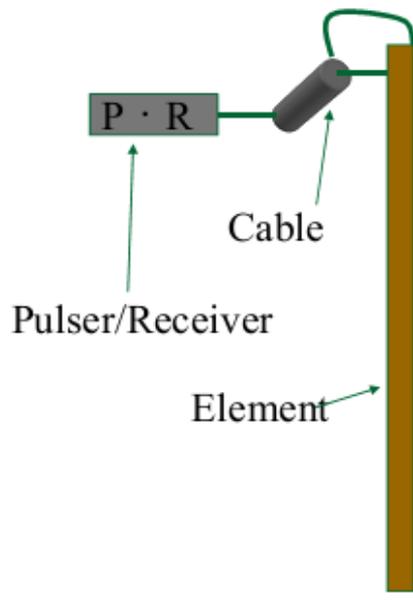
$t=0.834s$

- 蒙皮材料为玻璃纤维，厚度为0.6mm，蜂窝芯材为Nomex纸蜂窝
- 检测参数：闪光加热量9.6KJ。采集时间15s，60Hz

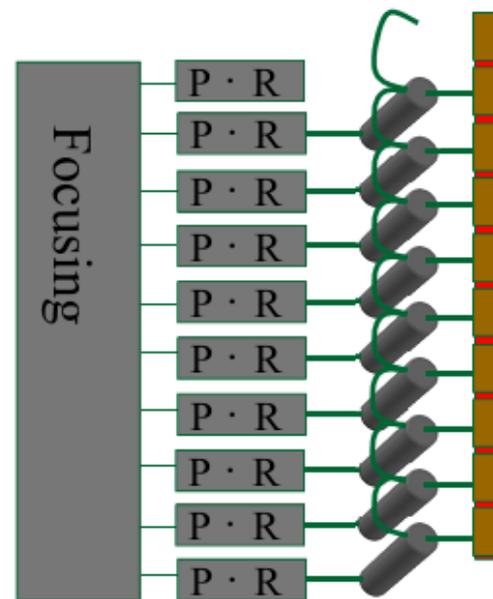
• 超声相控阵（Phased Array）检测

探头由多个单元组合而成，通过控制各单元激发的延迟形成方向与角度可控的合成声束：

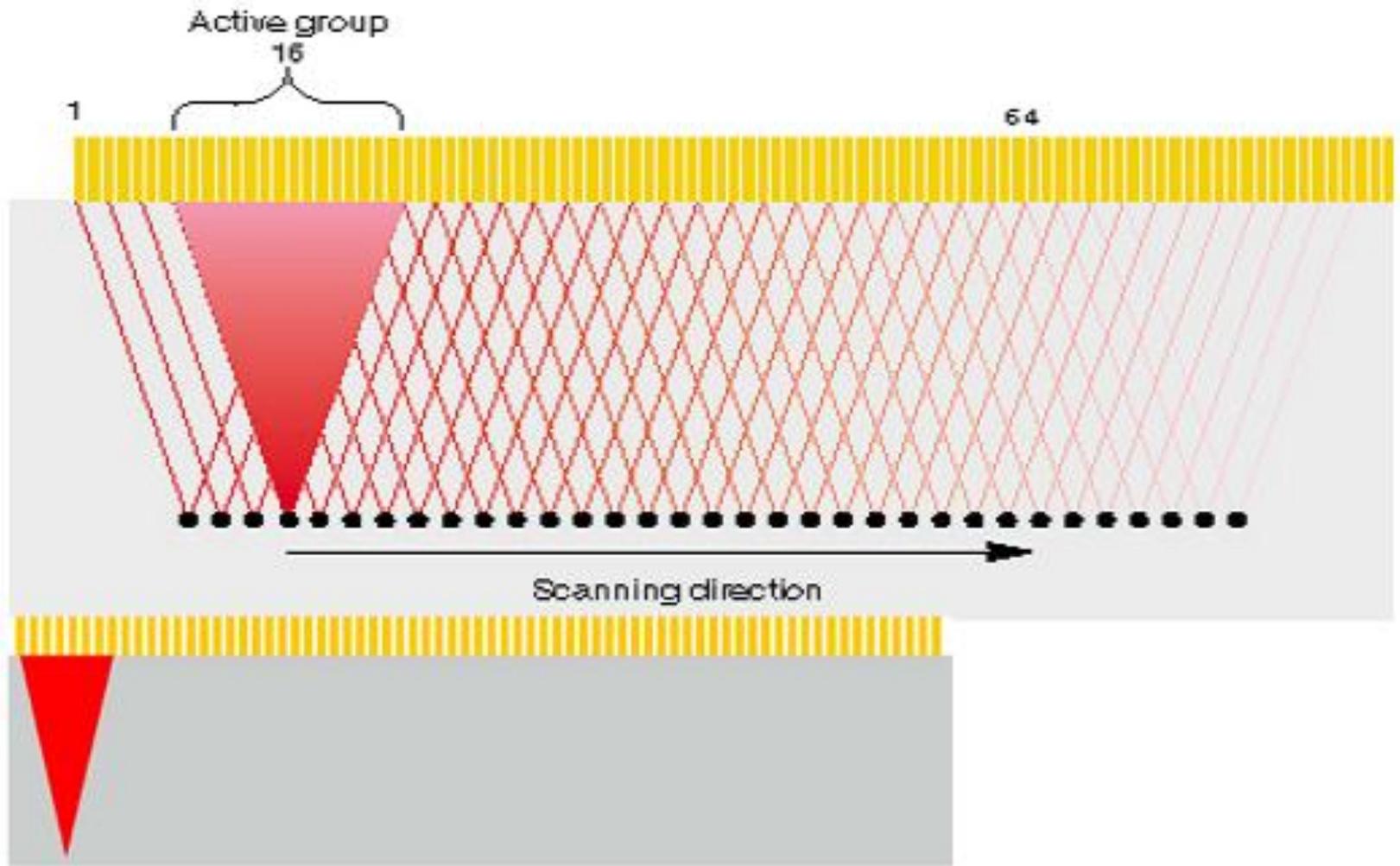
- 可实现电子扫描（探头不动、声束移动）
- 线阵方式可实现手动的实时C扫描成像
- 一个探头取代原先多个探头、效率大大提高



常规探头



相控阵探头



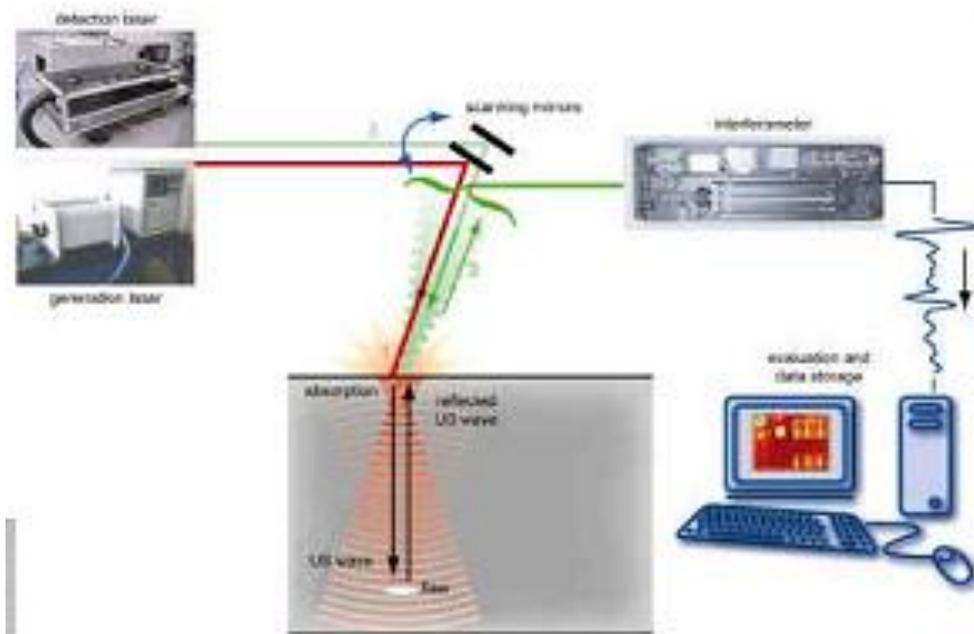
超声相控阵可实现电子扫描

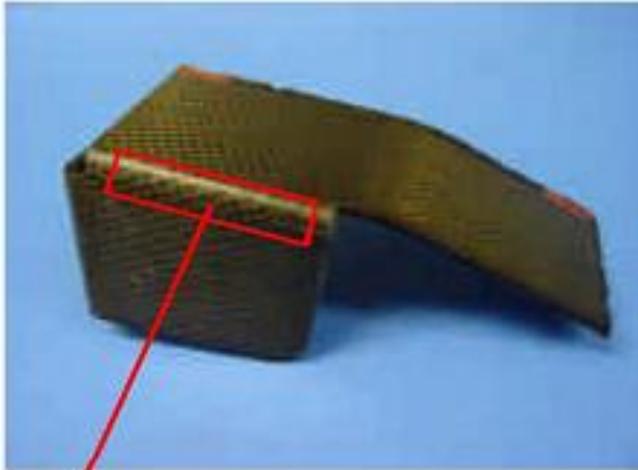
• 激光超声检测

使用高能脉冲激光加热表面一点，瞬间热膨胀产生超声波向内部传播，再利用光学干涉系统检测表面返回的振动信号：

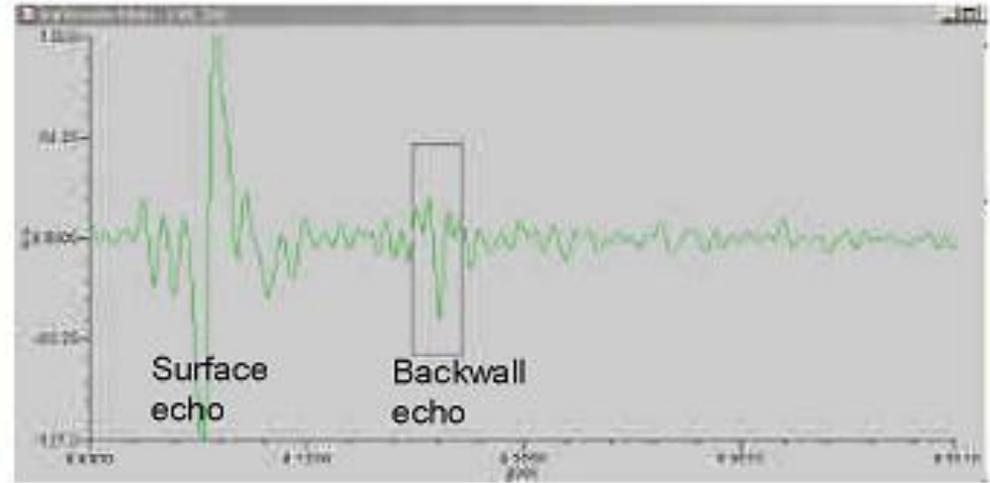
■优点：非接触、超声传播方向与激发用激光脉冲的入射方向无关，适合检测复杂型面

■缺点：价格昂贵（洛克希德马丁有3套系统）

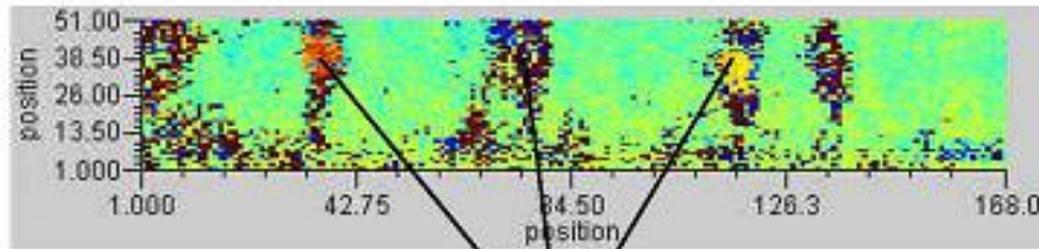




Inspected surface



A-scan



C-scan

artificial flaws

激光超声检测复杂型面零件

• 结论

- 大型复合材料构件需要多种检测技术的综合运用，以确保制件质量和性能。综合来看，喷水穿透超声C扫描是目前制造阶段的主流检测技术。
- 散斑、红外等新技术可作为制造阶段的辅助手段，但在特定的检测项目和外场维护中有重要作用
- 应继续在新技术的检测可靠性方面继续研究，推进其工程化应用
- 检测工艺优化和技术创新等方面的工作还有欠缺。
- 展望：红外热像、激光散斑、超声相控阵、空气耦合等新技术有较好的应用前景

Thanks !