



上海飞机制造有限公司
SHANGHAI AIRCRAFT MANUFACTURING CO., Ltd.

民用飞机复合材料制造和检测技术

刘卫平
2014-8-21

中国商用飞机有限责任公司总装制造中心
Final Assembly & Manufacturing Center of
Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd.

Shanghai Aircraft Manufacturing Corporation, Ltd.

目 录

1、复合材料制造技术基础知识

2、国内外复材制造技术最新动态

3、典型结构制造案例

4、上飞公司复合材料研究与发展

目 录

1、复合材料制造技术基础知识

2、国外复材制造技术最新动态

3、典型制造案例

4、上飞公司复合材料研究与发展



复合材料制造工艺方法

复合材料制造工艺

手糊成型工艺

预浸料
(丝束)
(带)

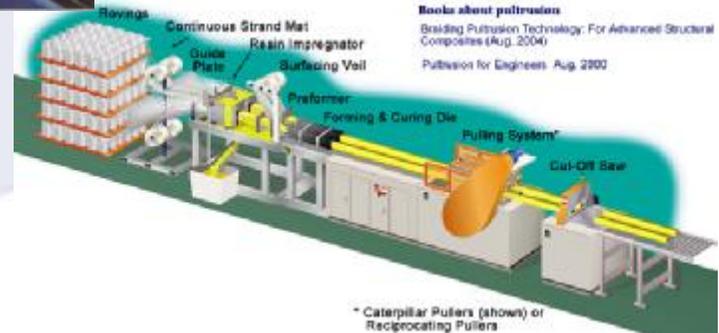
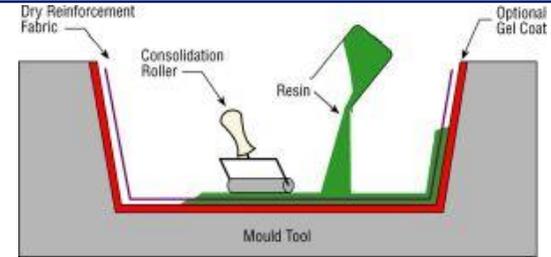
真空袋 - 热压罐

模压

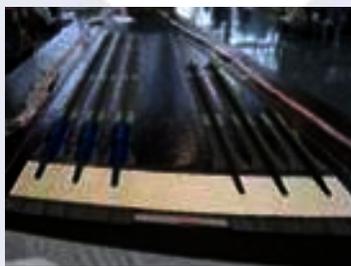
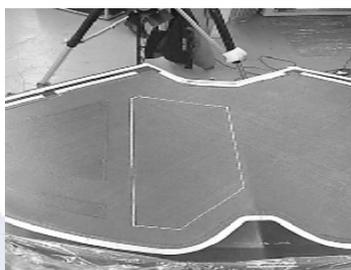
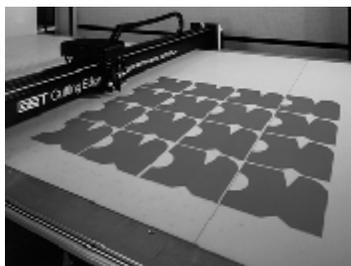
缠绕

拉挤

液体成型



预浸料真空袋—热压罐工艺过程



材料入厂

入厂复验

裁剪

铺贴

蒙皮、长桁、缘条的预成型及组合

目视检查

固化

检验固化参数

脱模

预浸料真空袋—热压罐工艺过程



目视检查

柔性模具+ 切割

随炉试片检测



目视检查和尺寸检测

无损检测



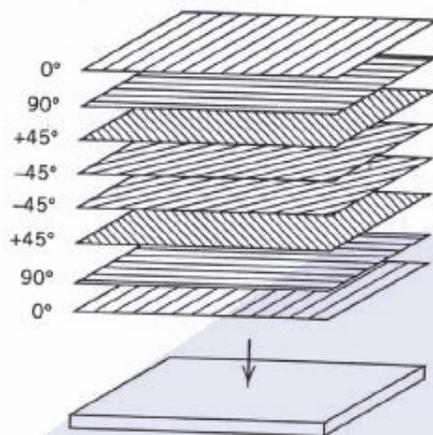
喷漆

终检

预浸料裁剪



单向带预浸料



预浸料叠层板



织物带预浸料



手工下料

← 手工下料主要使用下料样板;

自动裁床可以将曲面展开 →



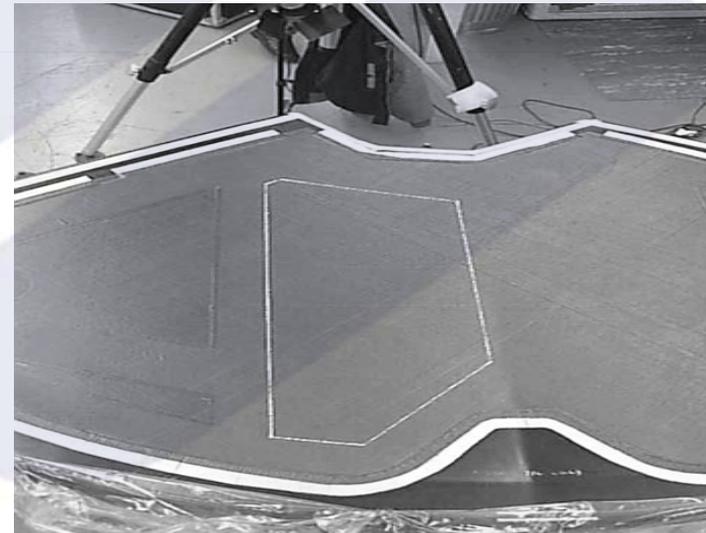
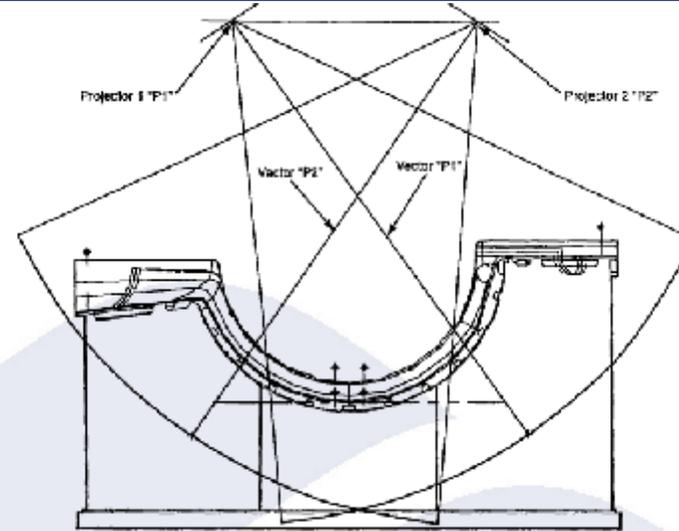
自动裁床

铺叠



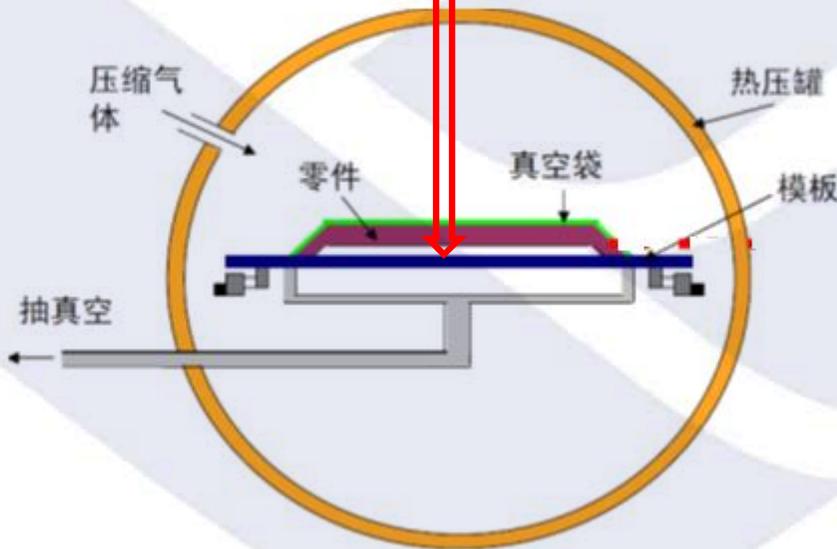
手工铺叠

- ▣ 预浸料要对准位置、纤维方向
- ▣ 沿一个方向逐步放下，避免裹入空气，形成气泡，纤维屈曲等
- ▣ 避免裹入杂物如塑料膜、纸等
- ▣ 铺3-5层预压实一次，排除空气



激光投影定位铺叠

组合



- ρ 最关键工序，特别是复杂零件
- ρ 采用系统检漏，一定保证真空袋不漏气
- ρ 真空袋及其它辅助材料不架桥
- ρ 要保护好真空袋不被刺破

固化

工艺过程： 利用热压罐内部的高温压缩气体产生压力对复合材料坯料进行加热、加压以完成固化成型的方法



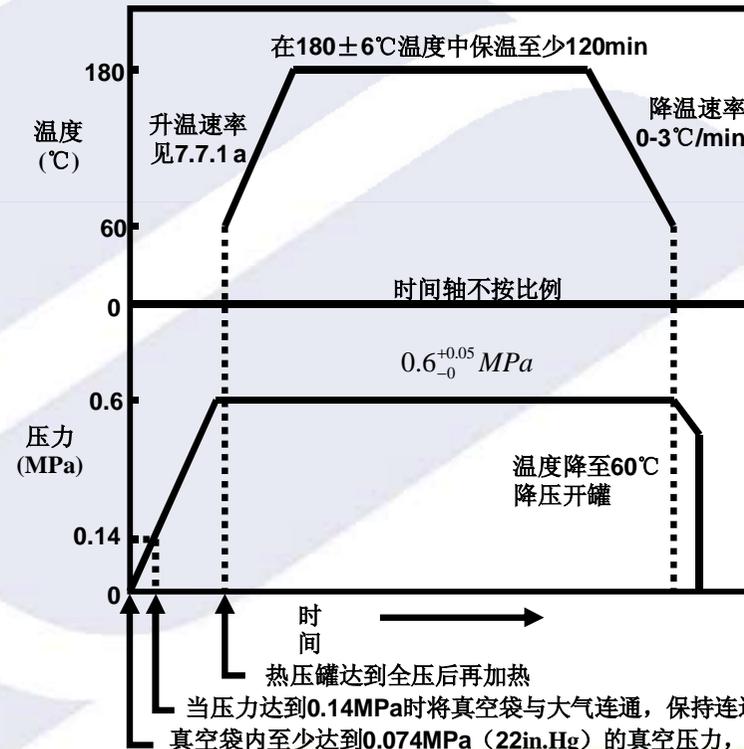
工艺特点：

- Ø 适合成型大型复杂构件；
- Ø 适合成型高性能复合材料
- Ø 设备成本高
- Ø 生产效率低

工艺参数：

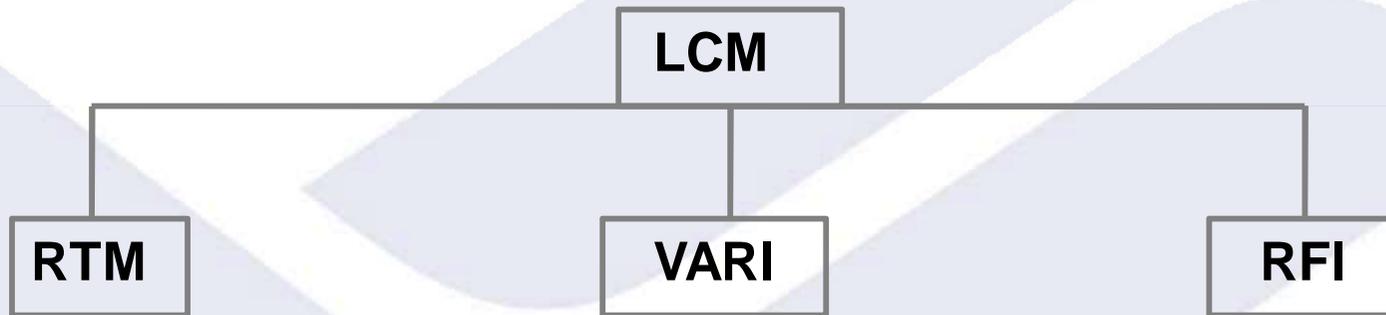
- p 温度：加速化学反应，固化
- p 真空：排除空气和挥发小分子
- p 压力：使预浸料坯料压实致密
- p 时间：大约8小时

目前发展趋势： 固化工艺曲线简单化，傻瓜工艺；就两个，250 F 和350F，材料供应商来满足要求



液体成型（LCM）工艺

复合材料**液体成型工艺**（Liquid Composites Molding，简称LCM工艺），是**树脂传递模塑**（RTM，resin transfer molding）、**真空辅助树脂渗透**（VARI，vacuum assisted resin infusion）、**树脂膜熔渗工艺**（RFI，resin film infusion）等一类复合材料成型工艺的**总称**。



优点：低成本、高效、适合于复杂结构或大尺寸复合材料制品的成型；

缺点：干纤维预定型困难；制品纤维含量较低；树脂对纤维的浸渍不够理想，树脂流动有效预测和控制很困难，容易出现干纤维现象。

树脂转移模塑 (RTM) 工艺

工艺过程:

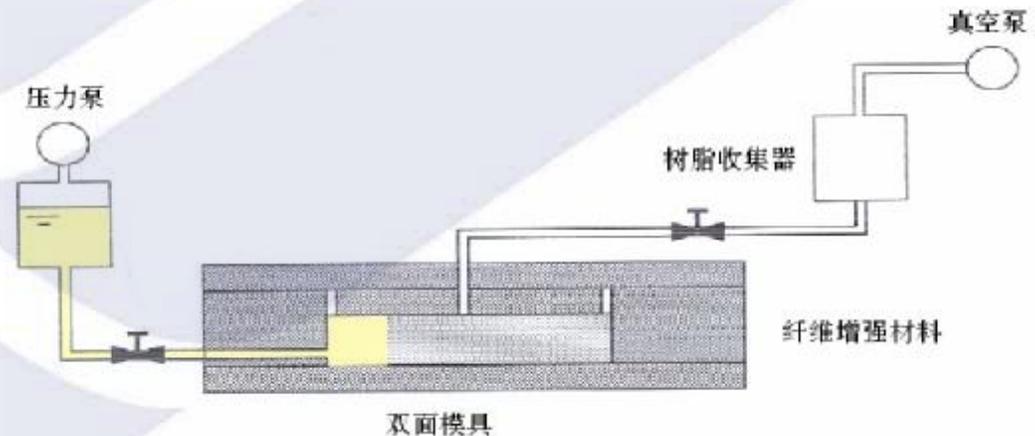
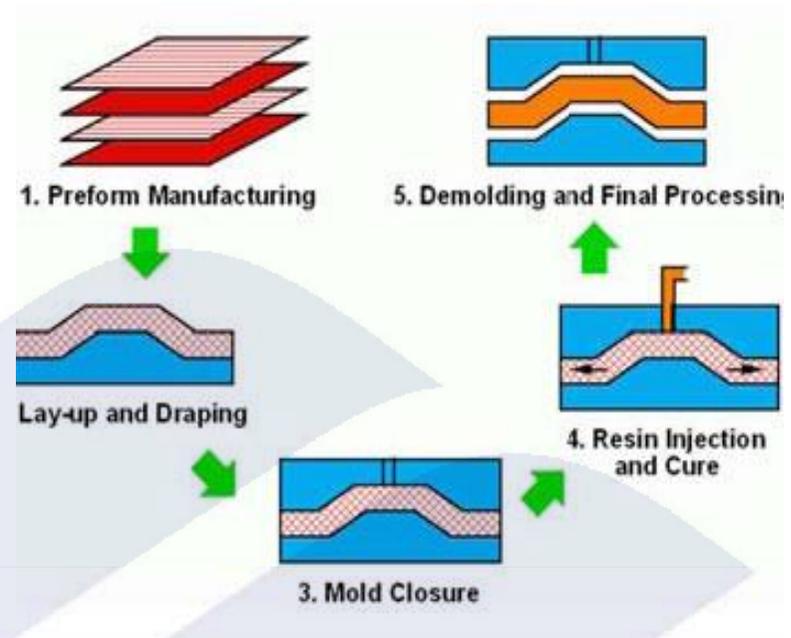
将预成型体铺放在模腔中，通过注射口将树脂注入模腔，依靠带压树脂的流动浸润纤维，并排除模腔中的气体。

工艺特点:

- Ø 非热压罐固化
- Ø 尺寸稳定性好
- Ø 成型周期短
- Ø 制品表面光洁度高
- Ø 成型采用双面模具，模具成本较高
- Ø 适合于结构复杂的零件制造

工艺参数:

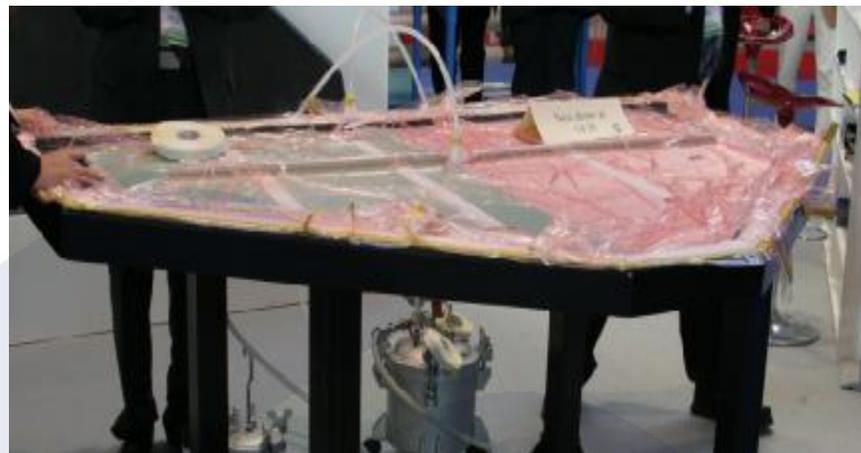
- Ø 树脂粘度低，注胶工作时间长
- Ø 温度、时间、压力、真空



真空辅助树脂渗透 (VARI)

工艺过程:

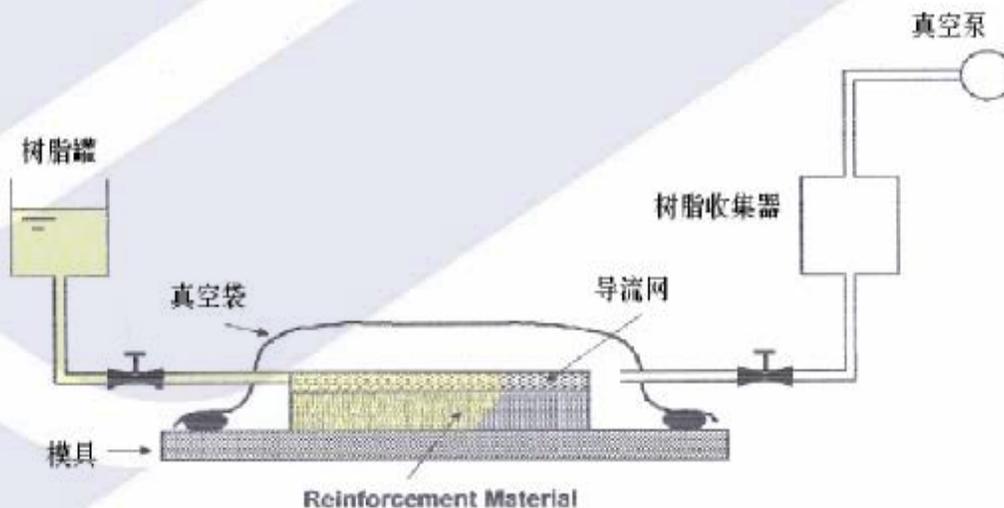
将预成型体铺放在模具中，通过真空压力将树脂吸入模腔，依靠真空袋内外压差使树脂浸润纤维，并排除预成型体中的气体。



工艺特点:

- Ø 采用单面模具
- Ø 通常非热压罐（烘箱）固化
- Ø 成本低

- | 制品纤维体积分数较低
- | 孔隙率较高
- | 适合于大尺寸零件的制造



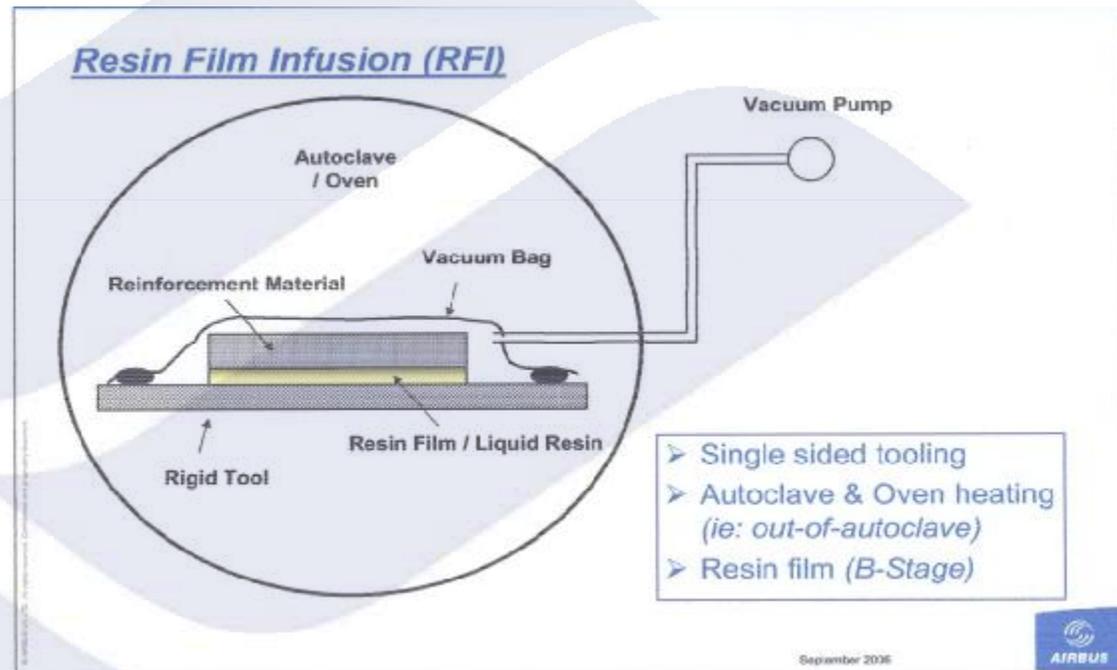
树脂膜熔渗工艺 (RFI)

工艺过程:

将预成型体和树脂胶膜铺放在模具中，升高温度，树脂胶膜融化，通过真空压力将树脂吸入预成型体中，使树脂浸润纤维，并排除模腔中的气体。

工艺特点:

- Ø 采用单面模具
- Ø 通常非热压罐（烘箱）固化
- Ø 成本低
- | 制品纤维体积分数较低
- | 孔隙率较高



LCM工艺用主要树脂体系的基本要求

- | 具有满足性能要求的机械和物理性能
- | 低粘度、凝胶时间长、能够确保充模及纤维浸润 过程的完成
- | 适当的固化特性保证合适的成型周期

航空LCM工艺用主要树脂体系：

- | 环氧树脂 (Epoxy)
- | 双马来酰亚胺 (Bismaleimide BMI)
- | 酚醛树脂 (Phenolic)

干纤维增强材料体系

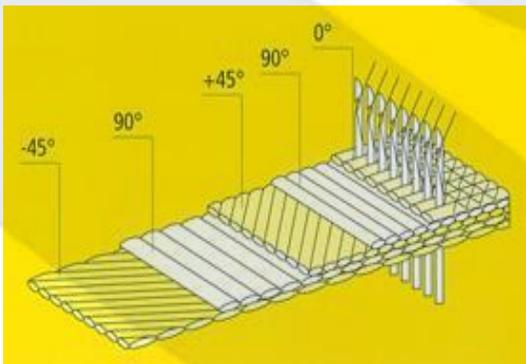
Cytec's Dry Tape: A Breakthrough Product

Baseline product: 1/4" wide, 196gsm

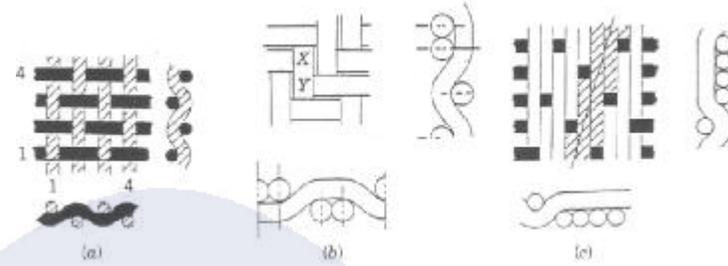
Product Features and Unique Benefits:

- Low fuzz
- Excellent steer-ability
- Low bulk > 10%
- Width control – prepreg tolerances
- Permeability enhancement compared to conventional dry tape materials
- Mechanical performance improvements over conventional NCF's
- Achievable V_f range 55 - 60%
- No distortion caused to tapes when tension is applied
- Flexible FAW and width

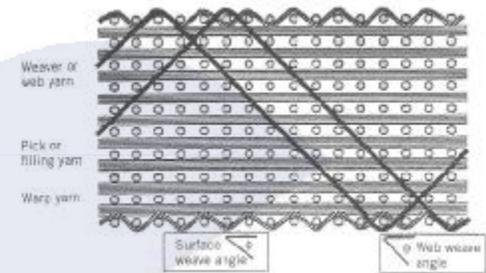
干纤维丝束



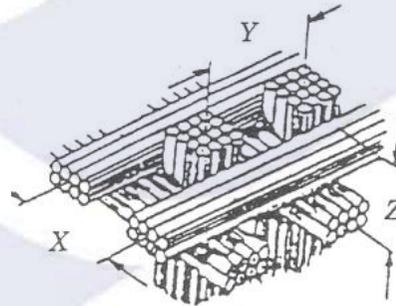
经编织物 (NCF)



平纹/斜纹/缎纹干纤维织物



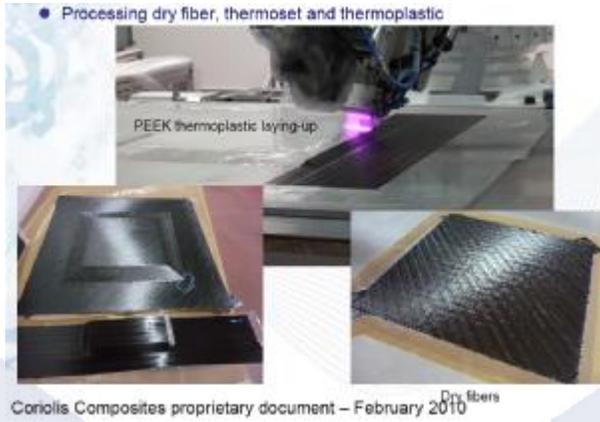
2.5D织物



3D织物



干纤维预成型体制备方法



自动铺干纤维



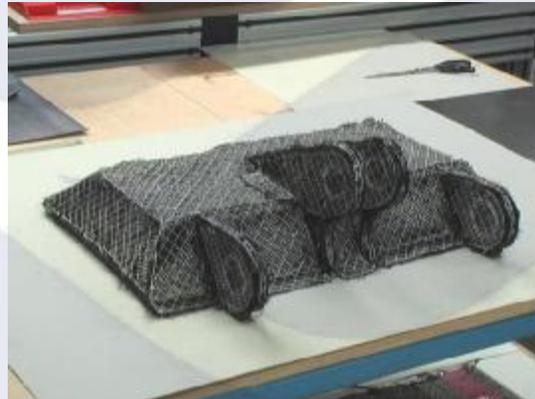
缝合



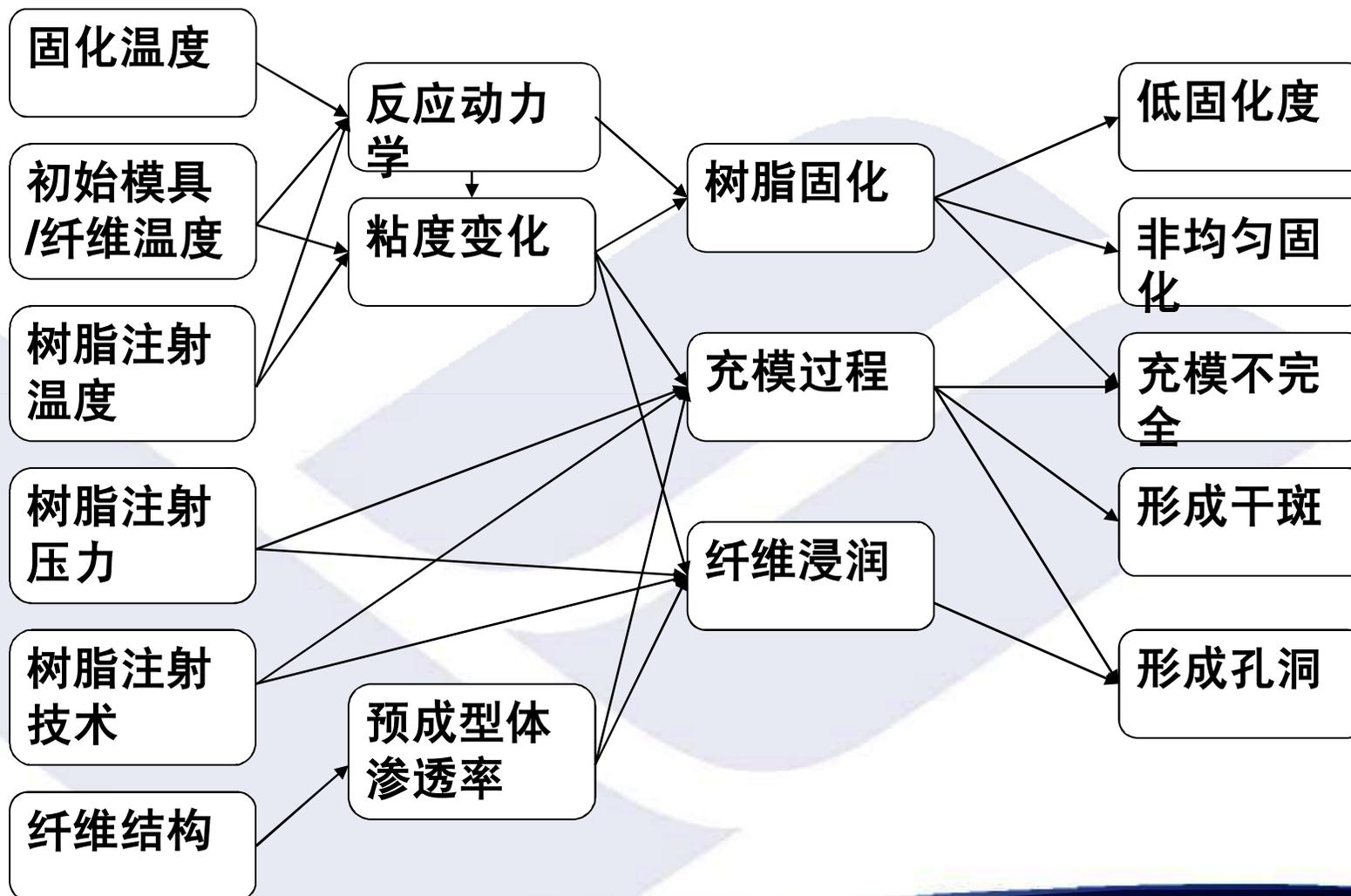
编织



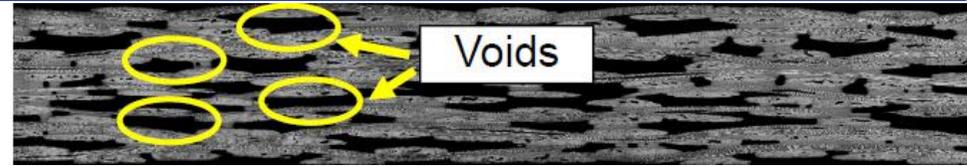
定型剂



LCM工艺主要影响因素



主要的缺陷形式



内部:

∅ 分层、夹杂、脱粘、架桥、空洞

∅ 孔隙率 1%, 1.5%, 2%

∅ 蜂窝进水、假粘接、蜂窝塌陷、孔格脱粘、泡沫微裂纹

外部:

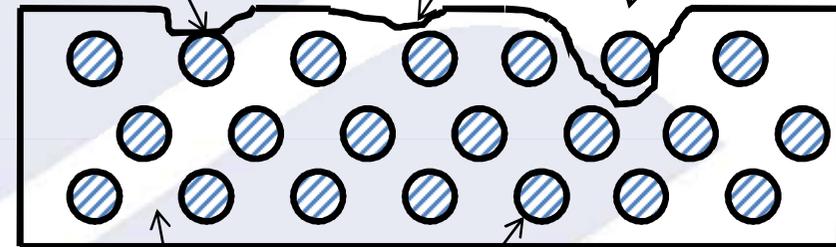
p 贫胶、富树脂、针孔、划伤、表面皱褶、纤维劈裂

p 变形、回弹、尺寸

纤维外露但没有干的或松散的纤维时，表面贫胶可以返工

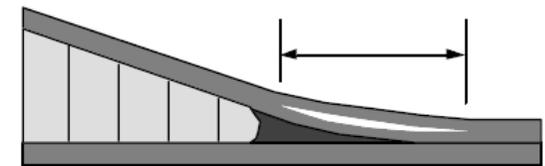
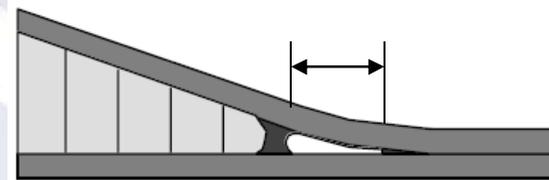
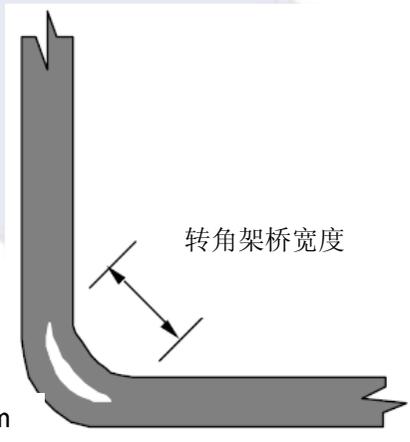
纤维未外露，表面贫胶可接受

外露纤维是干的或是松散的，表面贫胶不可接受



树脂

纤维



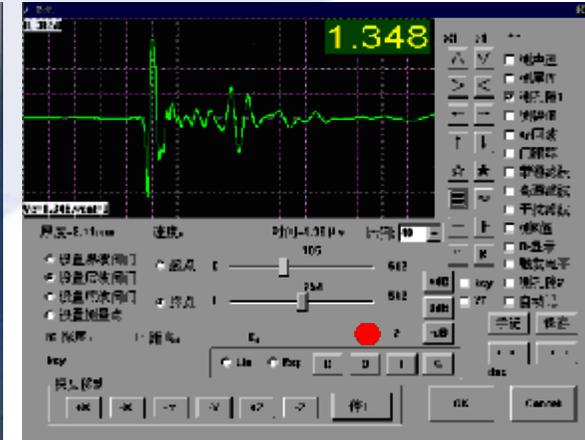
典型蜂窝边缘架桥

无损检测

1、无损检测(Nondestructive Testing, NDT): 是指对材料或工件实施一种不损害或不影响其未来使用性能或用途的检测手段。是在不破坏前提下,检查工件宏观缺陷或测量工件特征的各种技术方法的统称。

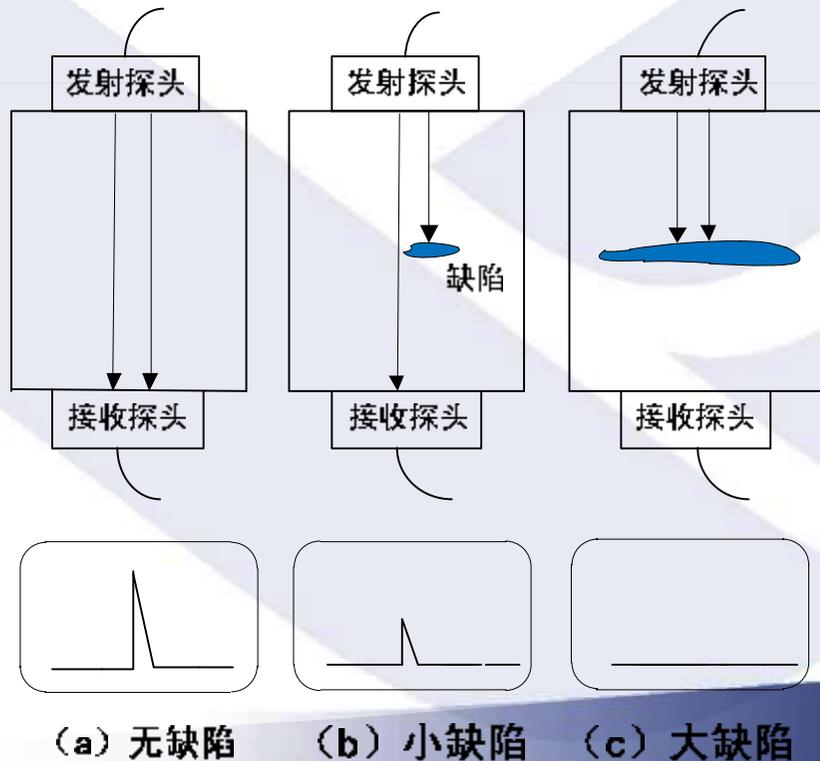
2、主要的无损检测方法

- ✦ 超声检查: A扫、C扫; 穿透法、反射法; 水浸、喷水
- ✦ 射线检查
- ✦ 空气耦合超声检测相
- ✦ 控阵超声检测
- ✦ 敲击检查
- ✦ 声阻检测
- ✦ 激光栅班检测
- ✦ 红外热成像检测

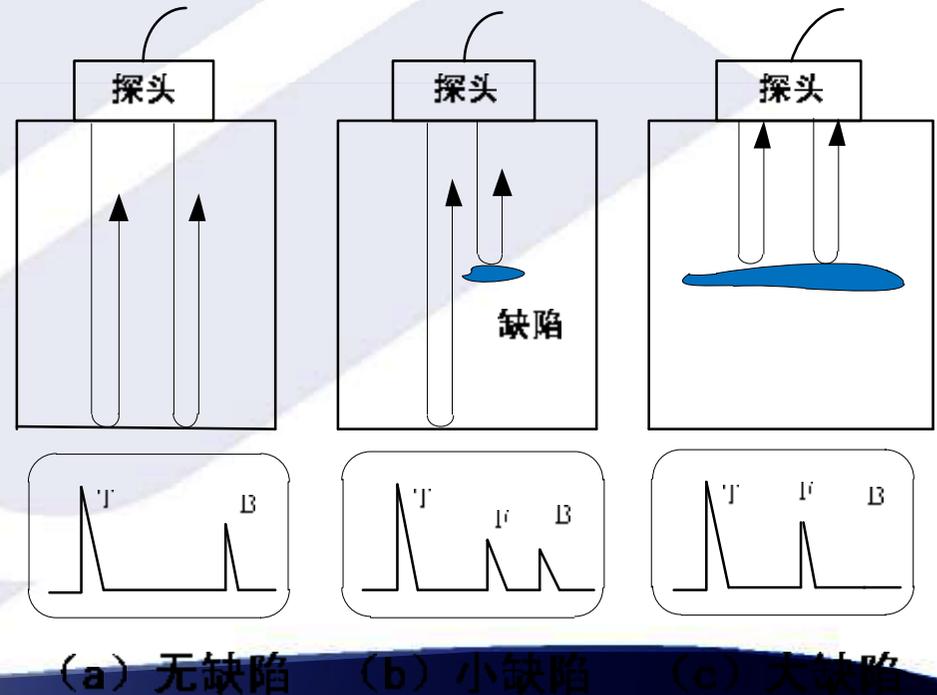


穿透法和脉冲反射法

穿透法: 采用一发一收双探头分别放置在工件相对的两端面，依据超声波穿透工件之后的能量变化来检测工件缺陷的方法。



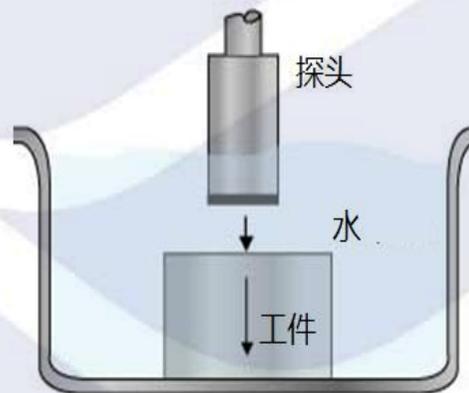
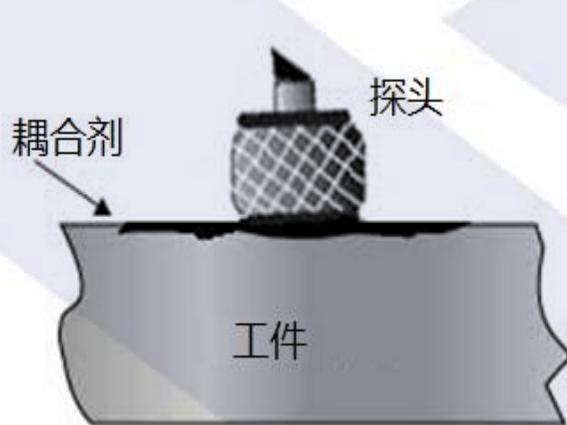
脉冲反射法: 超声波探头发射脉冲到被检工件内，通过观察来自内部缺陷或工件底面反射波的情况来对工件进行检测的方法。



接触法和液浸法

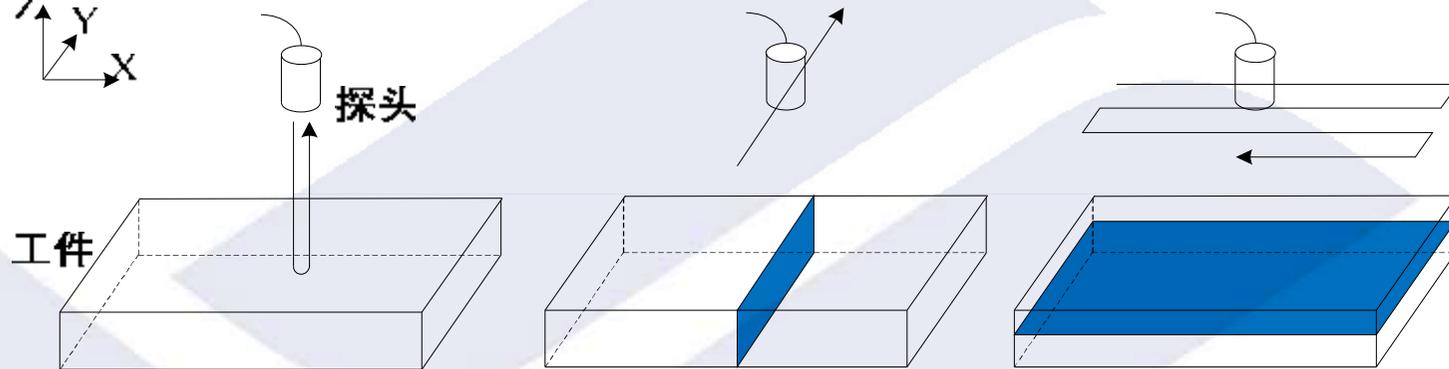
探头与工件之间涂上很薄的耦合剂层（油，水等），可以看做两者直接接触，称为**接触法**，接触法在工业现场使用最多，方便，灵活等，但是影响因素难以控制。

将探头与工件进入液体（水）中，液体作为耦合剂称为**液（水）浸法**，适合于自动化检测，水浸法可分为**全浸入**和**喷水式**。



显示方式

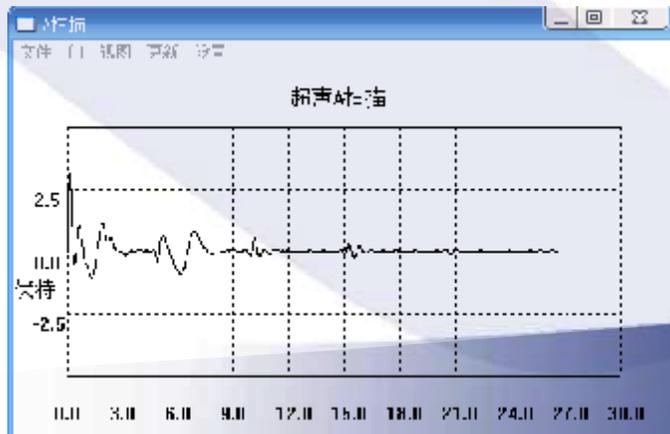
A型显示将信号幅度和传播时间在直角坐标中显示，目前在工业现场使用最多。**B、C型显示**是基于A的不同截面的成像方法。将信息转化为人眼可见的图像，获得物体内部声学特性的分布。



A型显示

B型显示

C型显示



相控阵超声检测技术

一种多声束扫描成像技术，其检测探头是由多个晶片组成的换能器阵列，阵列单元在发射电路激励下以可控的相位激发出超声，并使超声声束在确定的声域处偏转或聚焦，**适用于各种复杂结构。**

> 加筋壁板试样

L型试样



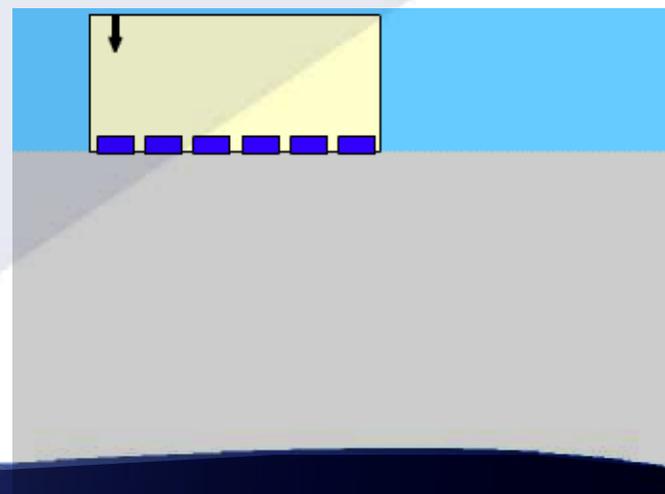
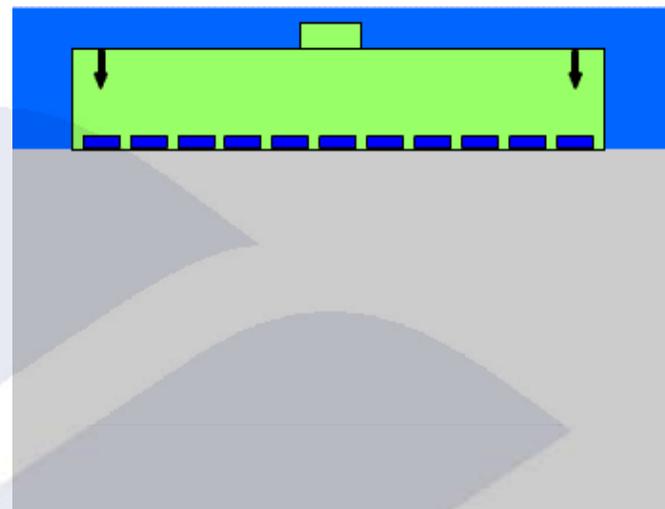
U型非等厚试样

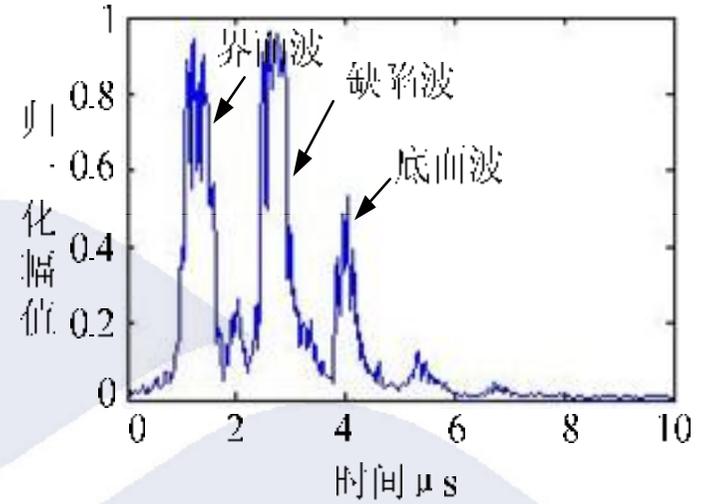


加筋壁板试样

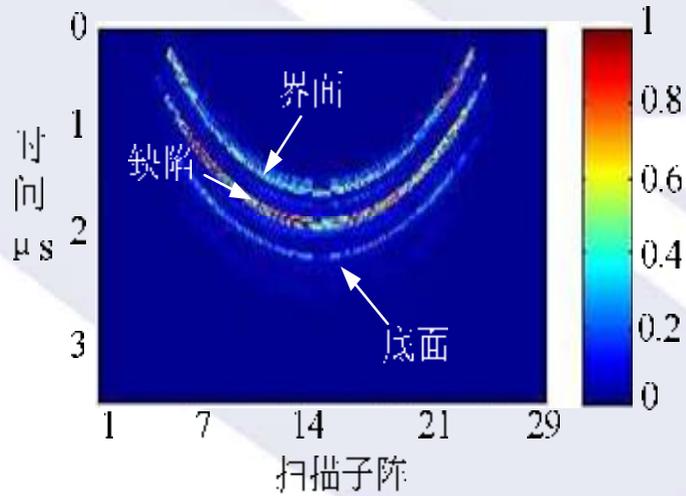


加筋壁板缩比件

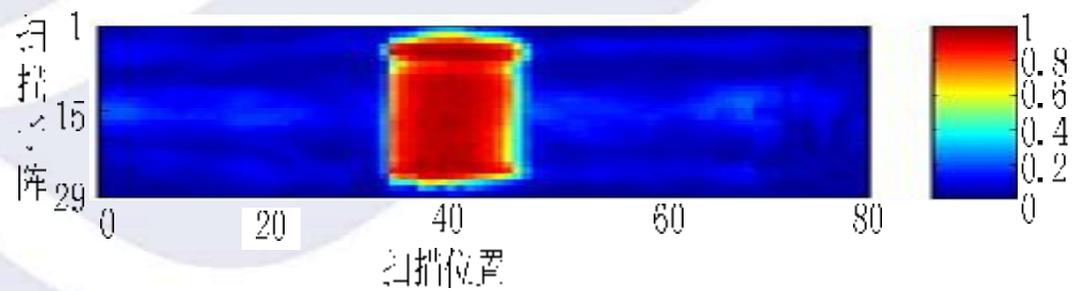




A扫



扇扫



C扫

空气耦合超声检测技术

摆脱材料限制

吸水
溶解
多孔
损伤浸入

摆脱环境限制

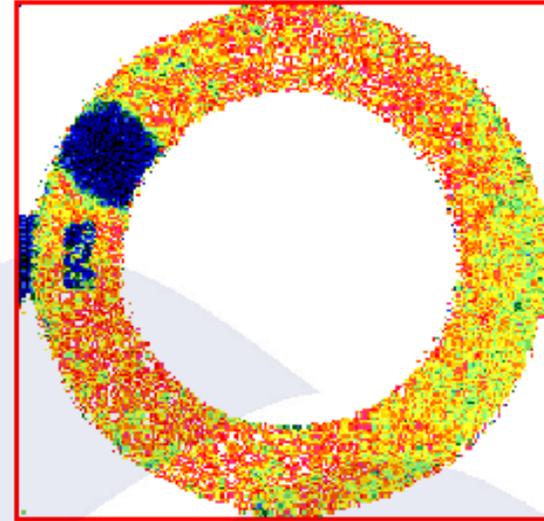
高温条件
原位检测
耦合剂难清理



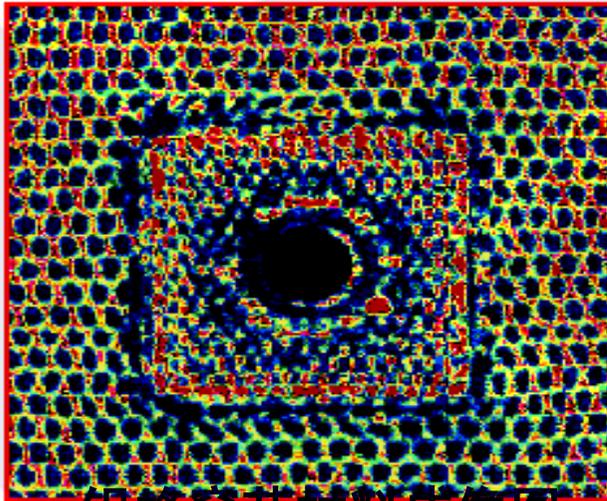
可用于不可耦合材料的缺陷检测（如陶瓷、蜂窝、泡沫等）



检测直升机叶片

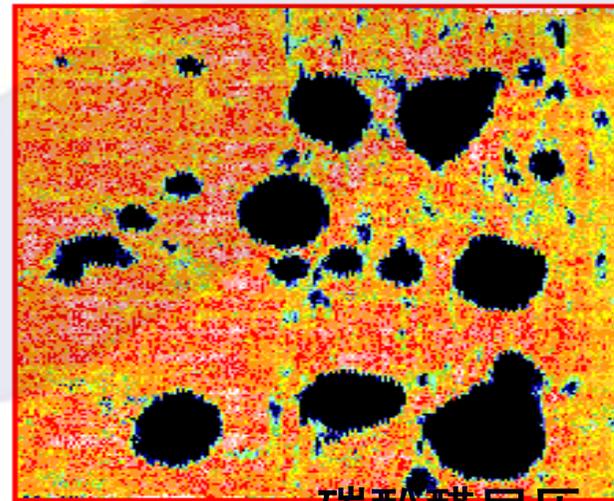


飞机炭制动盘成像图



铝蜂窝芯材料成像图

板成像图



碳酚醛层压

射线检测

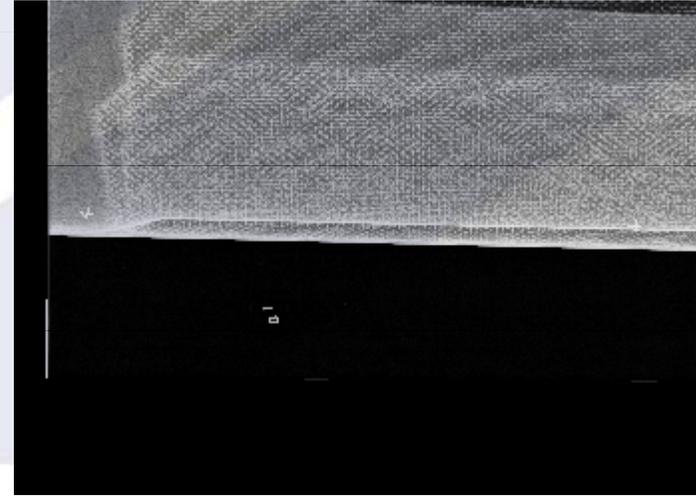
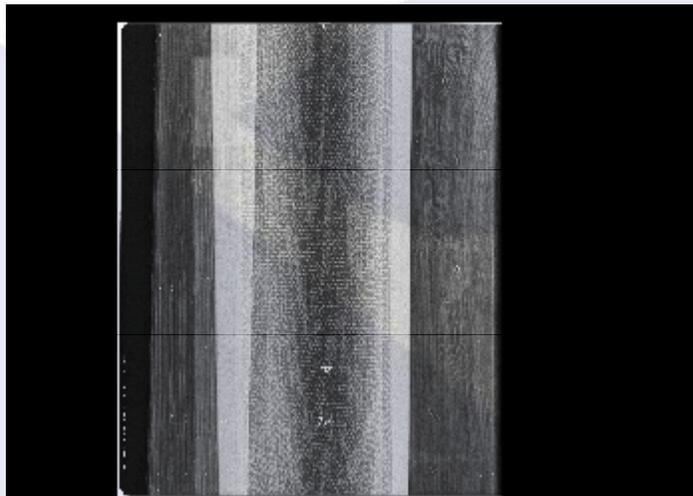
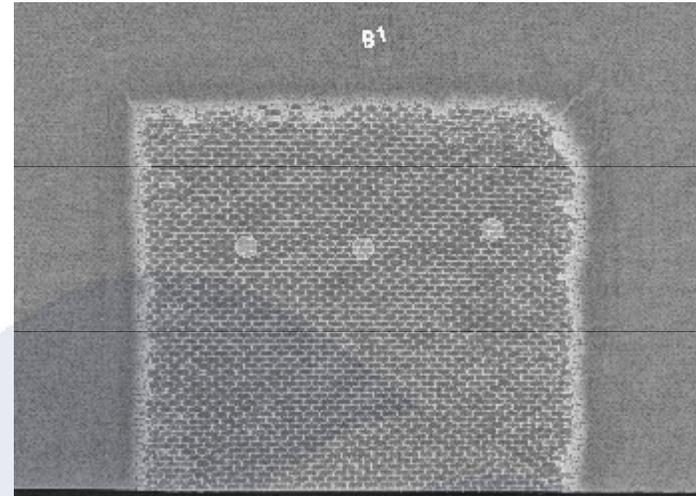
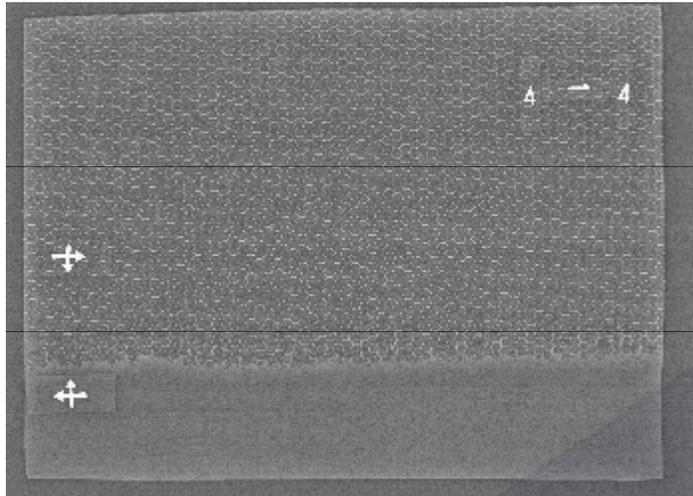
- I. 原理：射线能够**穿透可见光不能穿透的物体**，而且在穿透物体的同时将和物质发生复杂的物理和化学作用。缺陷的存在将**改变物体对射线的衰减**，引起透射射线强度变化，采用一定检测方法（如利用胶片感光）检测透射线强度，可以判断缺陷的存在及位置、大小。
- II. 应用：射线检测对**气孔、夹渣、疏松等体积型缺陷**的检测灵敏度较高，对平面缺陷的检测灵敏度较低。

X
射线
检测
仪



工
业
CT
仪





升降舵前缘射线检测

目 录

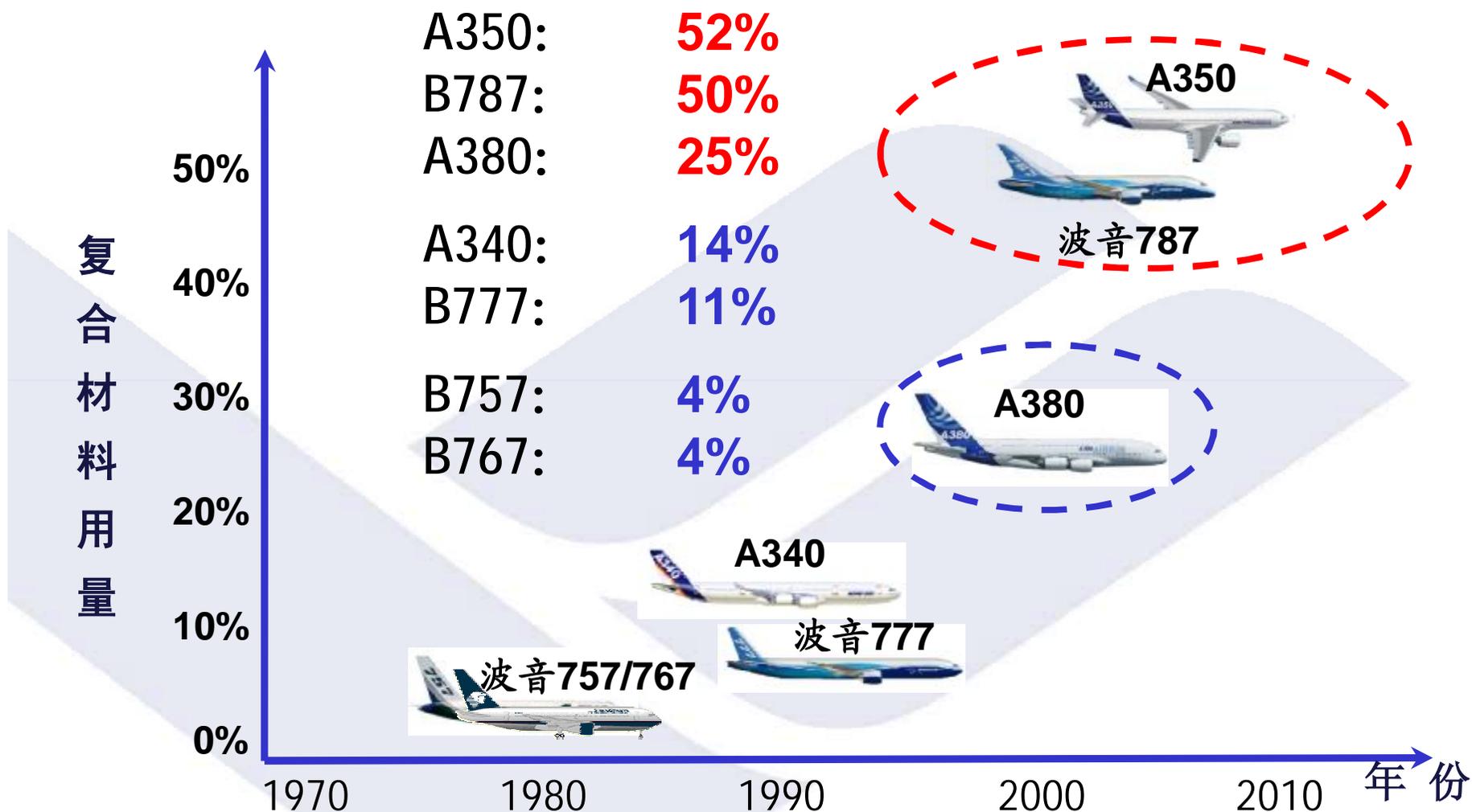
1、复合材料制造技术基础知识

2、国外复材制造技术最新动态

3、典型结构制造案例

4、上飞公司复合材料研究与发展

复合材料在商用飞机上的应用



商用飞机复合材料结构制造发展及特点

飞机主承力结构如机身、机翼等均采用复合材料，复合材料制造与设计结合更紧密

- Ø 高端装备快速发展，大规模采用自动化制造技术；
- Ø 大尺寸结构整体化制造技术得到广泛应用；
- Ø 低成本制造技术已开始应用；
- Ø 工装大型化和复杂化；
- Ø 热塑性复合材料重新引起关注；

复合材料结构自动铺放技术--铺带（ATL）

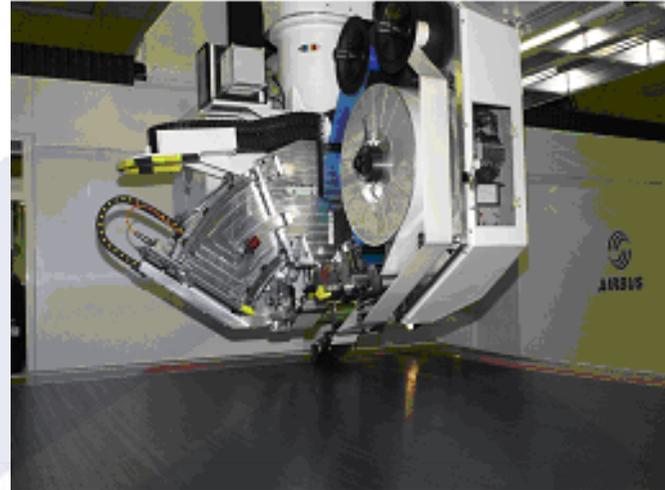
√ 特点:

- ∅ 特别适合曲率小的大制件生产
- ∅ 提高生产效率,减少对熟练工人的需要
- ∅ 纤维铺贴角度更准
- ∅ 重复性好

√ 实例:

- ∅ A350 机翼和中央翼盒
- ∅ B787 机翼等大量部件

国内哈飞、成飞、沈飞、西飞、中航复材、上飞均采购了铺带机



复合材料结构自动铺放技术--铺丝 (AFP)

√ 与铺带技术相比:

- ∅ 带窄
- ∅ 速度慢, 纤维间隙要小
- ∅ 适合于大曲面的制件

√ 实例:

- ∅ A350 机身
- ∅ B787 机身

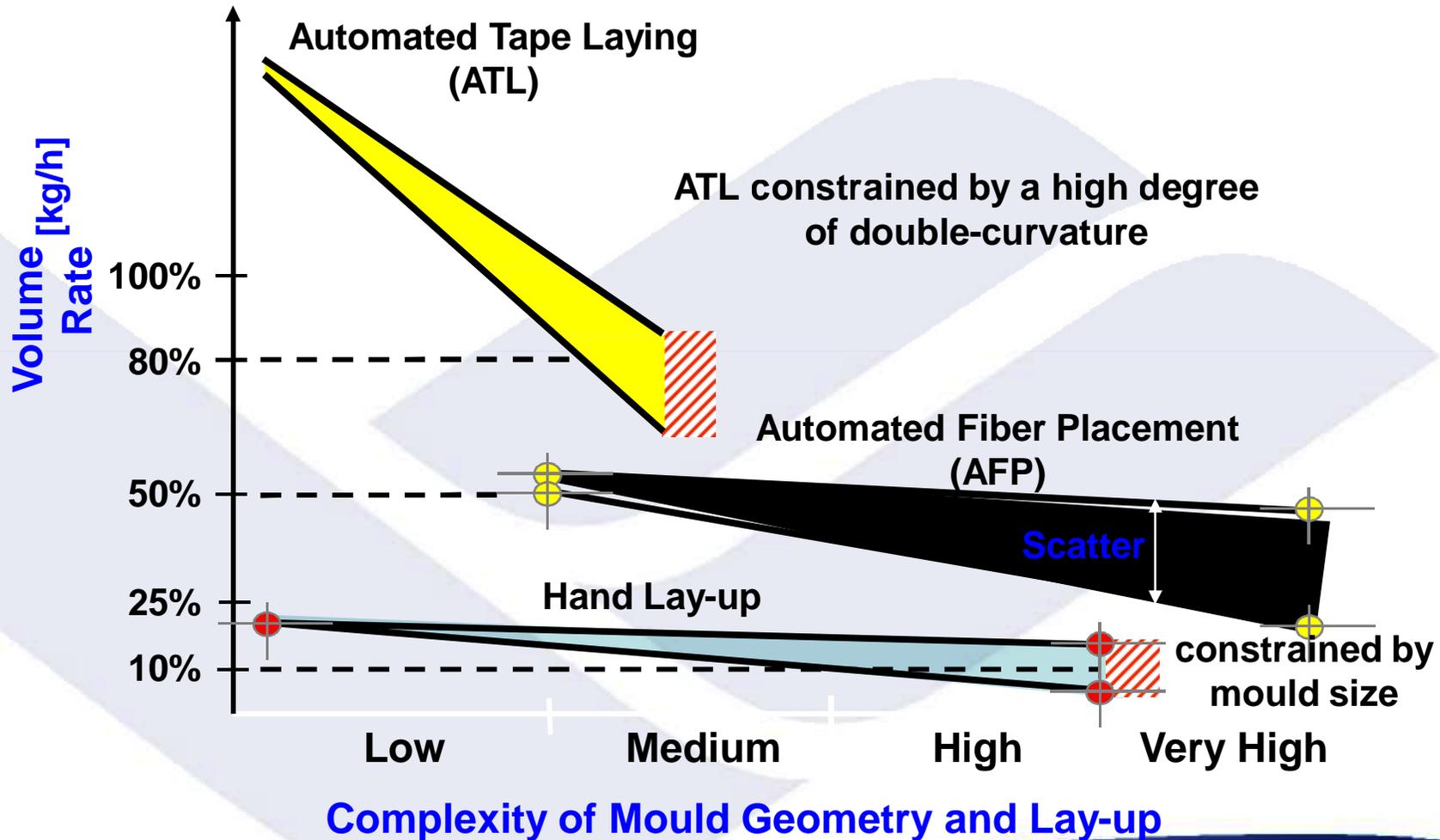


卧式

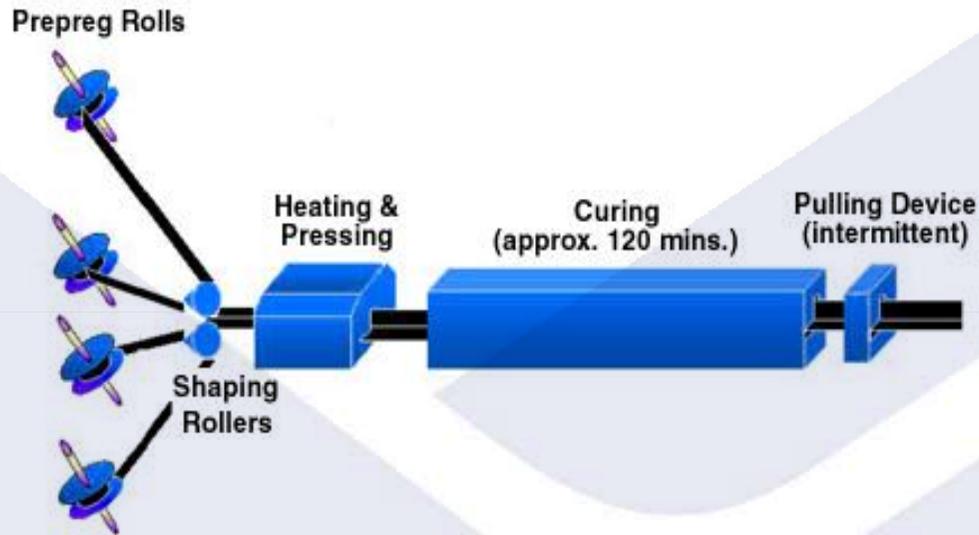


龙门式

铺放效率与结构复杂程度的关系



先进拉挤成型工艺（预浸料）



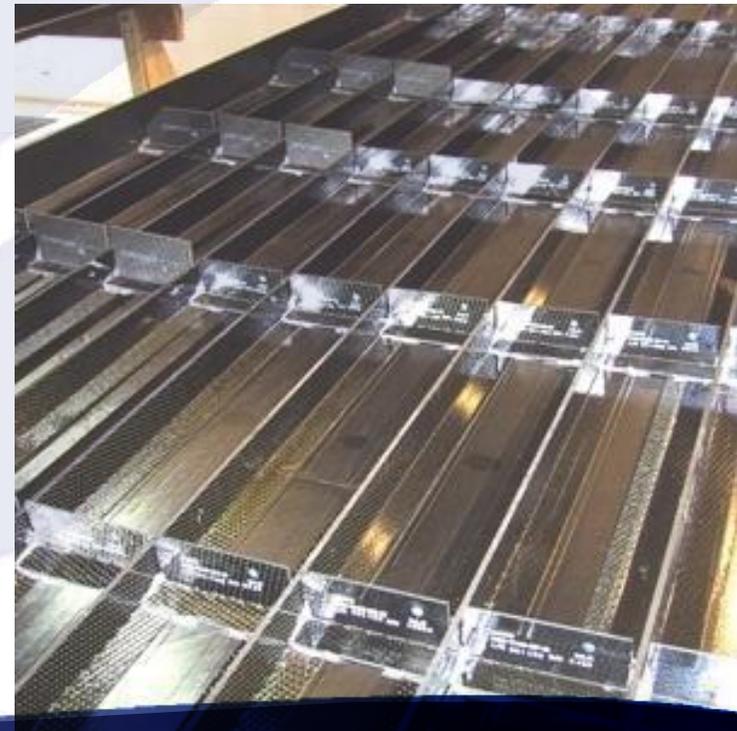
√ JAMCO Corp. (Mitaka, Tokyo, Japan)发明的低成本制造工艺

先进拉挤成型工艺



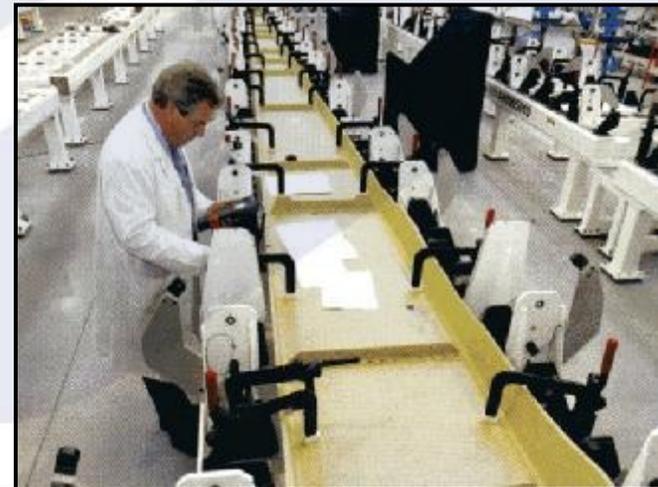
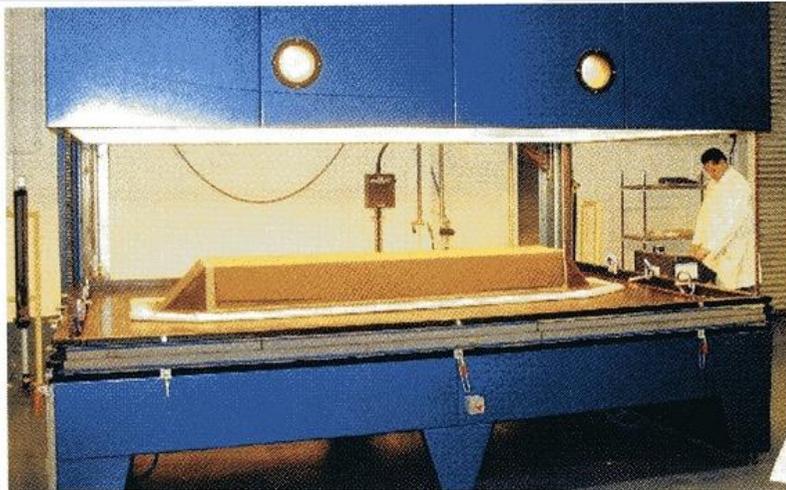
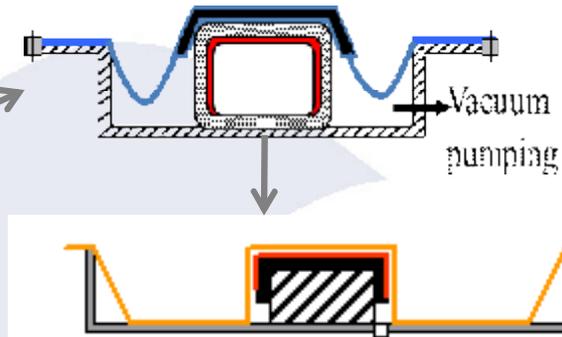
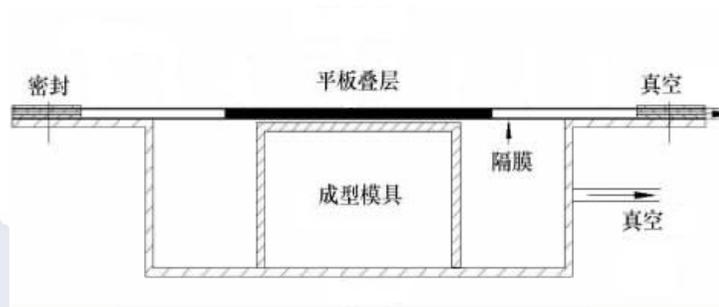
√ 应用于地板梁和加筋壁板的筋条成型

- ⌞ 预浸料拉挤成型，成本低，性能稍低
- ⌞ 已用于A380垂危壁板T型筋条，由工字加工为二



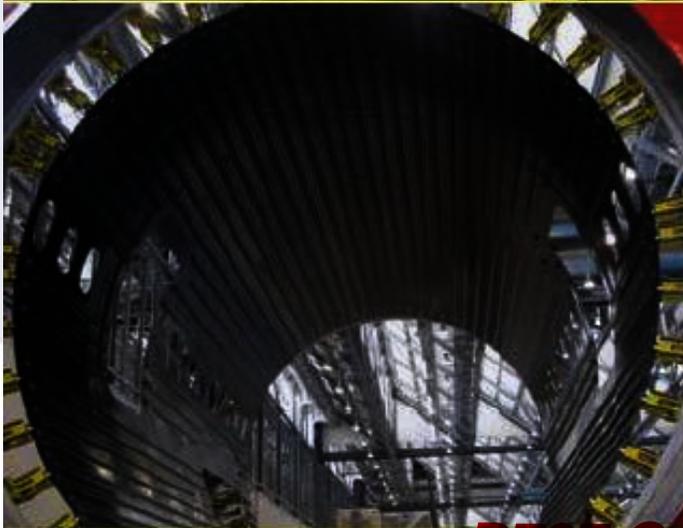
热隔膜预型工艺

✓ 应用于加筋壁板的筋条预成型和梁的成型



GKN aerospace, 18.3m

复合材料机身筒段整体成型



B787 Composite fuselage

B787水平安定面整体成型

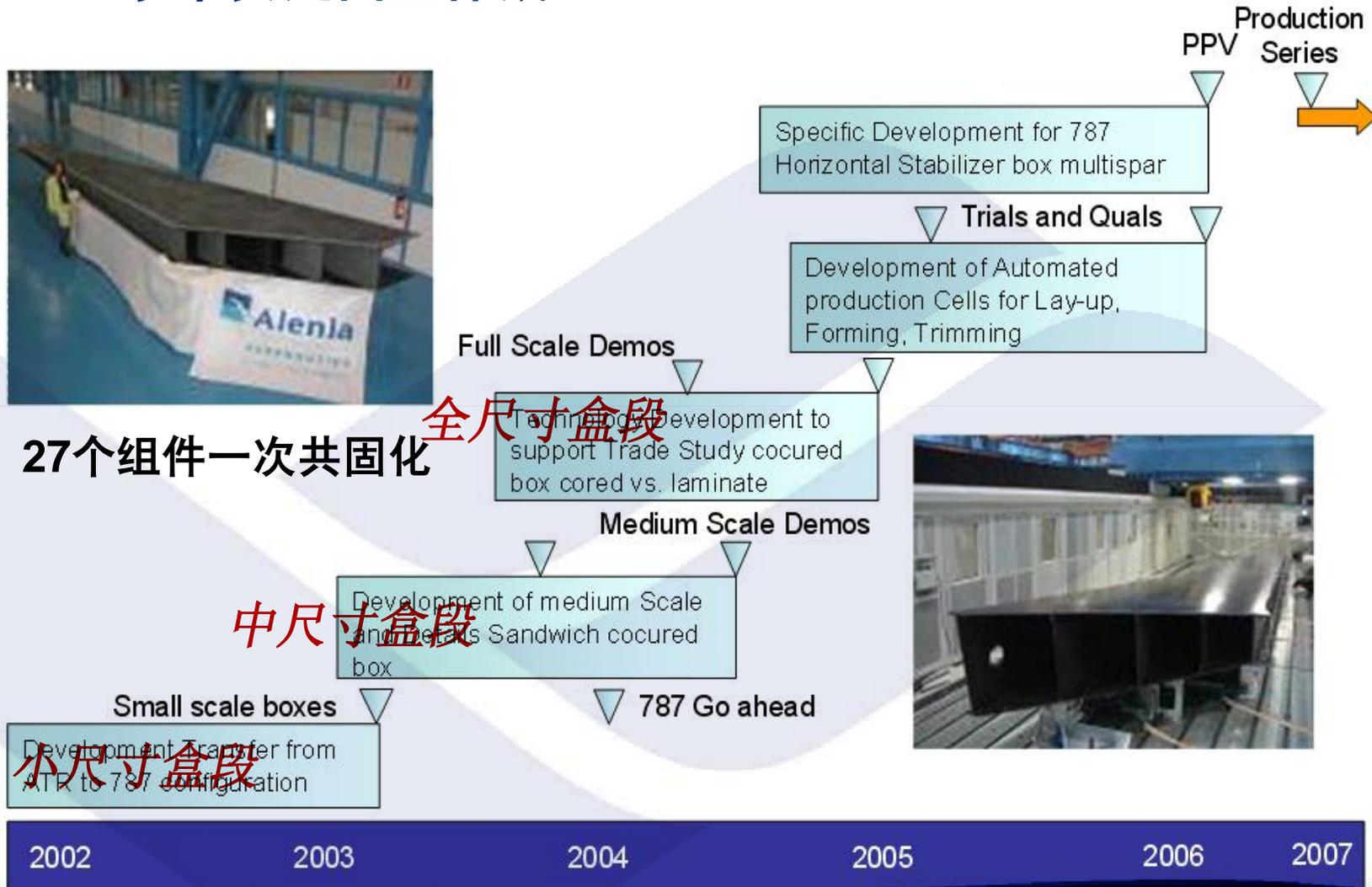


27个组件一次共固化

全尺寸盒段

中尺寸盒段

小尺寸盒段



液体成型技术应用



编织+RTM 机身隔框



自动铺干丝+VARI 机翼壁板
(C-series)



VARI 后压力框 (B787)



RFI 后压力框窗框 (A380)

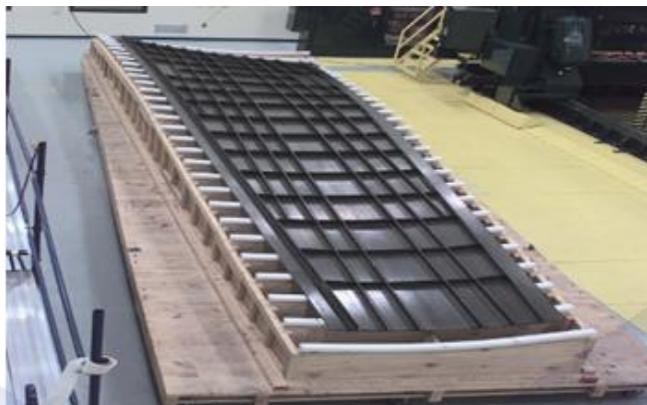


缝合+RTM窗框 (A380)



RTM扰流板接头 (A330/340)

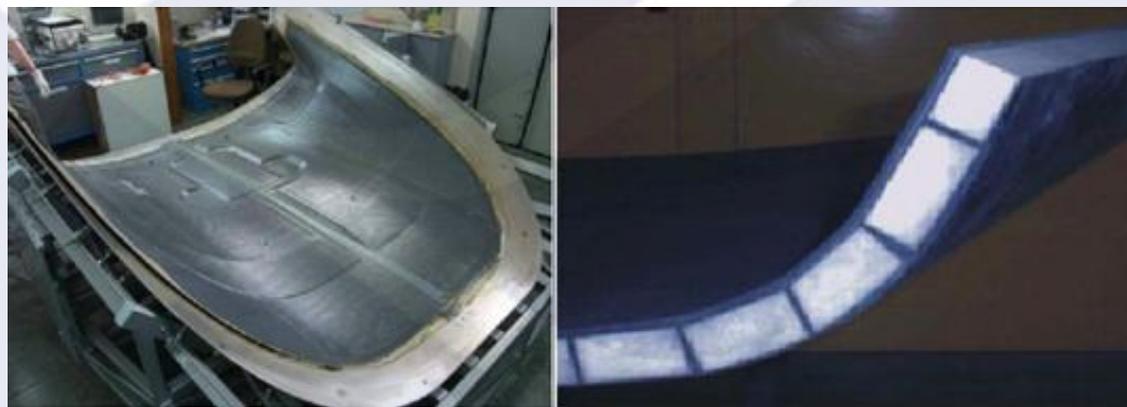
液体成型技术应用



RF 机翼壁板



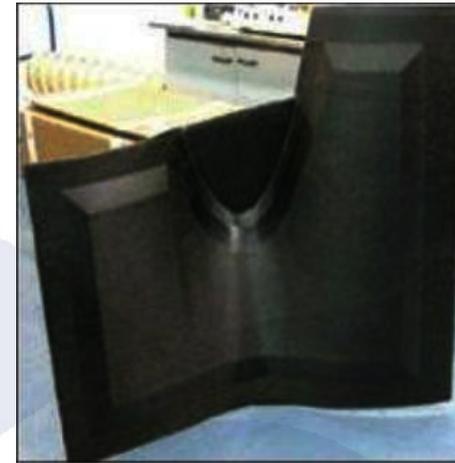
VARI 运输机货舱门 (A400M)



VARI成型飞机整流罩和泡沫夹层机身壁板

非热压罐成型技术 (OOA)

- 低成本 (烘箱取代热压罐)
- 工艺简单 (只需控制温度和真空度)
- 降低芯材塌陷和真空袋破裂的风险
- 非热压罐固化预浸料自动铺带技术
- 力学性能孔隙率达到热压罐工艺水平
- 主要取决材料水平和结构设计水平
- 复合材料修理



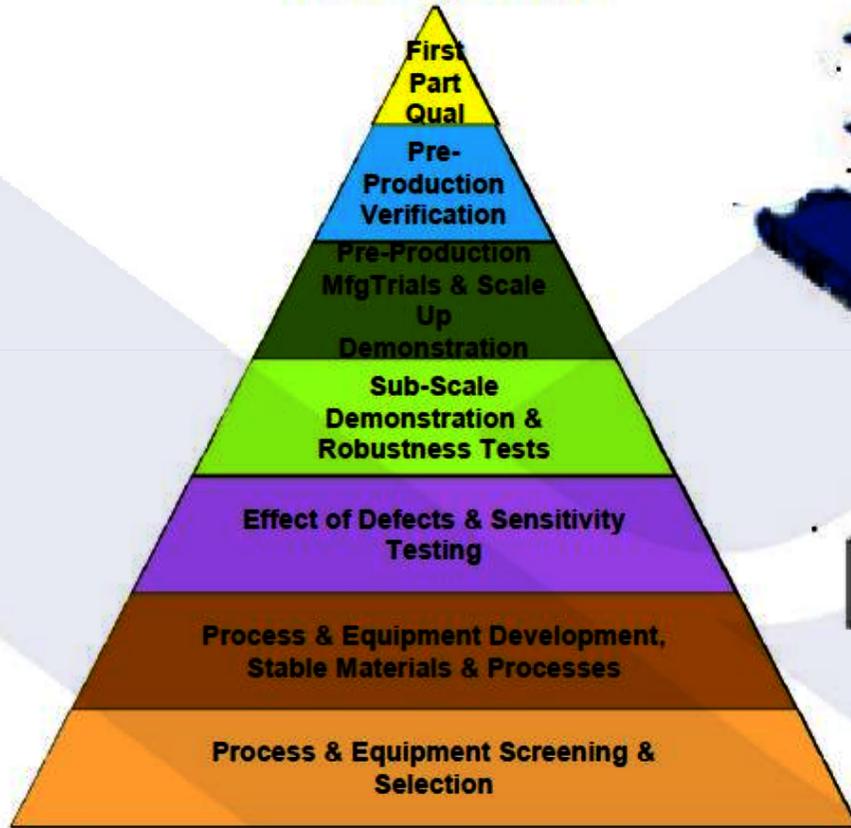
A320翼身接合处整流带



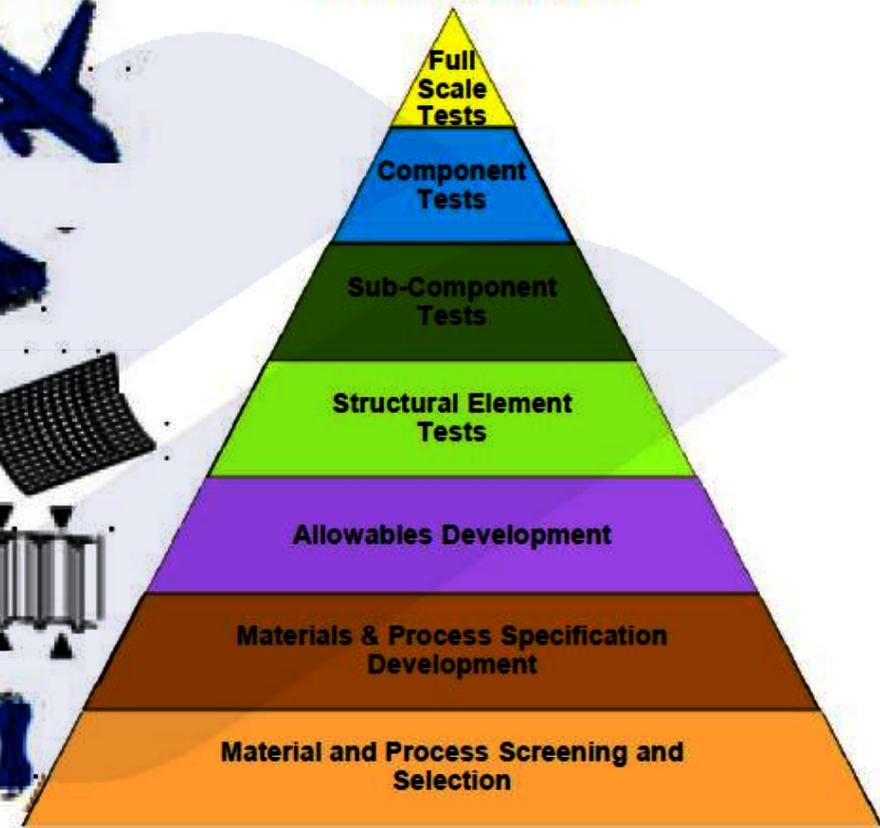
Dornier 328 机身

制造过程鉴定

Manufacturing Qualification Building Blocks



Structures Certification Building Blocks



目 录

1、复合材料制造技术基础知识

2、国外复材制造技术最新动态

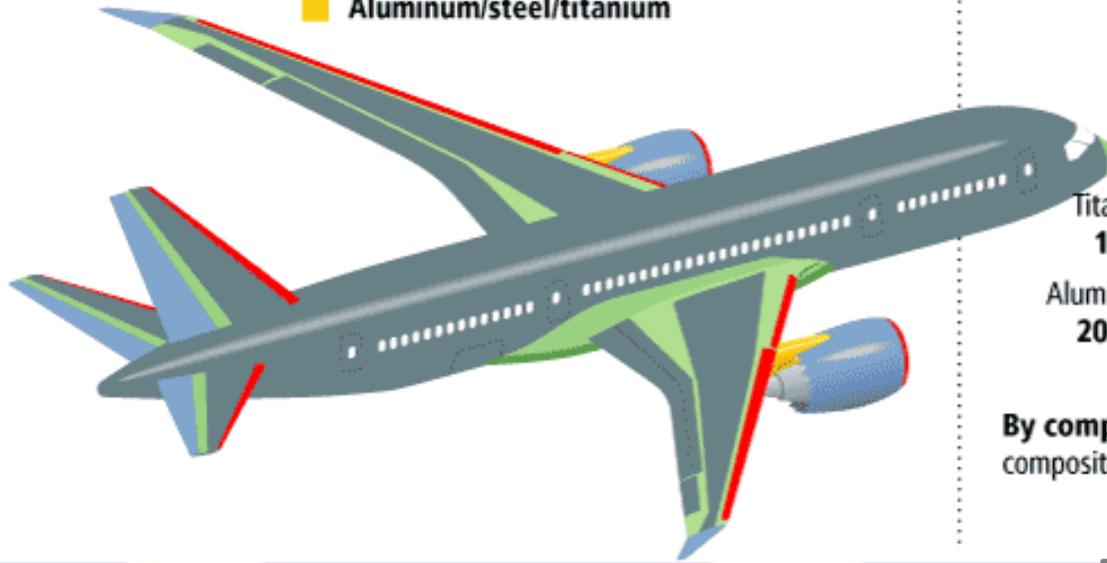
3、典型结构制造案例

4、上飞公司复合材料研究与发展

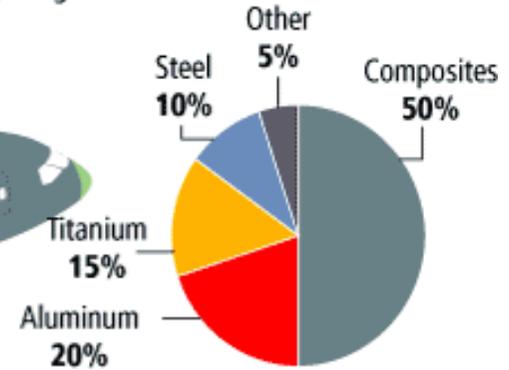


Materials used in 787 body

- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium



Total materials used By weight



By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

结构根据制造分类

壁板

夹层结构

加筋壁板

梁、肋和框等

蜂窝夹层

泡沫夹层

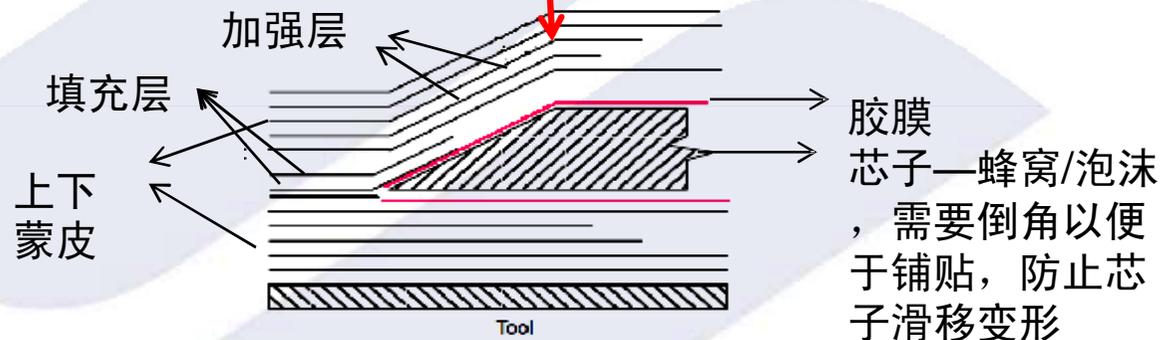
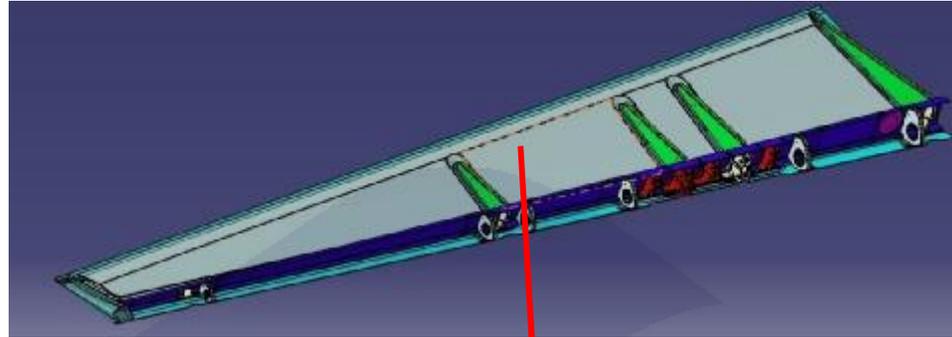
曲率较小

曲率较大

典型案例 1: 夹层结构壁板—升降舵/方向舵壁板

材料:
织物预浸料
+蜂窝芯子
+胶膜

结构示意图



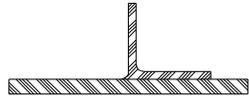
热压罐成型工艺路线:

- 1、一次固化也叫共固化，壁板的上下铺层及胶膜一次进热压罐固化，大部分夹层结构采用一次固化工艺，如C919升降舵、国内转包件等。成本低，性能好。
- 2、多次固化，先固化下蒙皮，再将蜂窝定型，最后固化上蒙皮，由于一些特殊原因，不得不采取的工艺路线，比如蜂窝的坡度较大，容易造成塌陷，如ARJ 2 方向舵采用多次固化。最大问题是粘接表面处理比较困难。

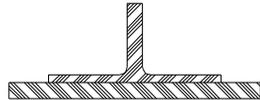
典型案例2：加筋壁板—中央翼下壁板、水平尾翼壁板

加筋壁板

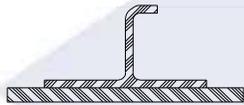
L形加筋壁板



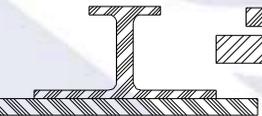
T形加筋壁板



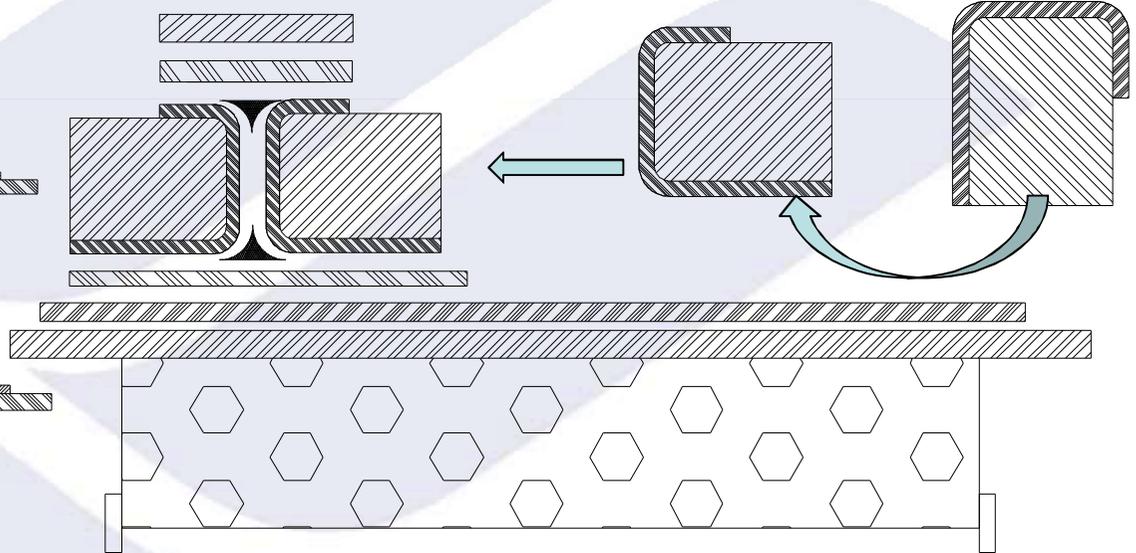
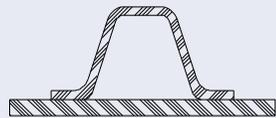
J形加筋壁板



工形加筋壁板



帽形加筋壁板



二次胶接

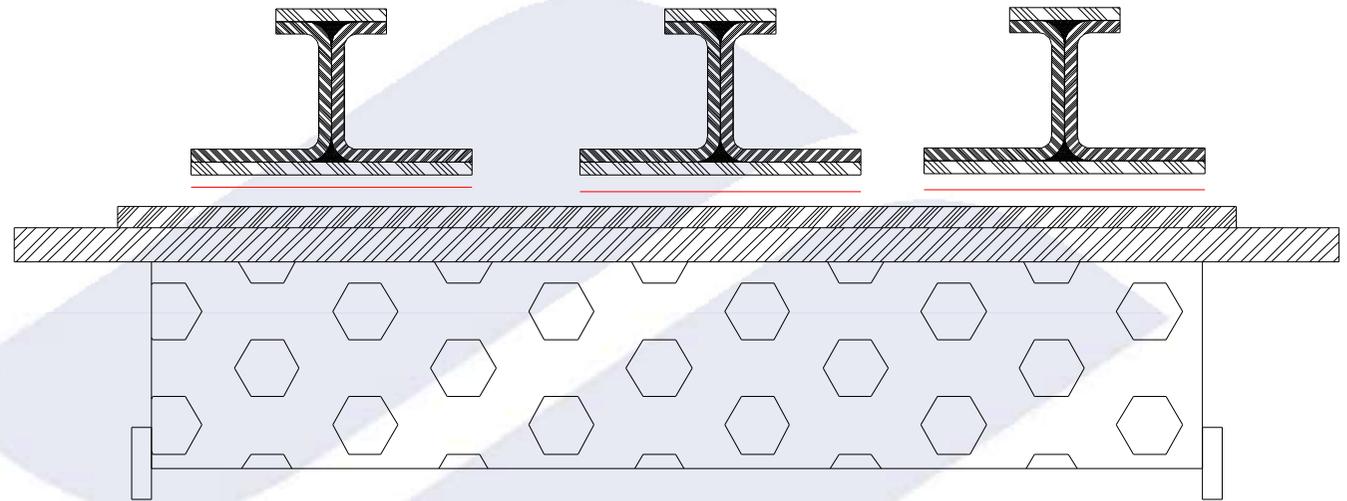
制造蒙皮且完成固化/
切割/无损检测

制造筋条(工字梁)且
完成固化/切割/无损
检测

蒙皮和筋条在工装上
定位/贴胶粘剂等

封袋固化

其它后续工序



共胶接—干长桁+湿蒙皮
湿长桁+干蒙皮

共固化—湿长桁+湿蒙皮

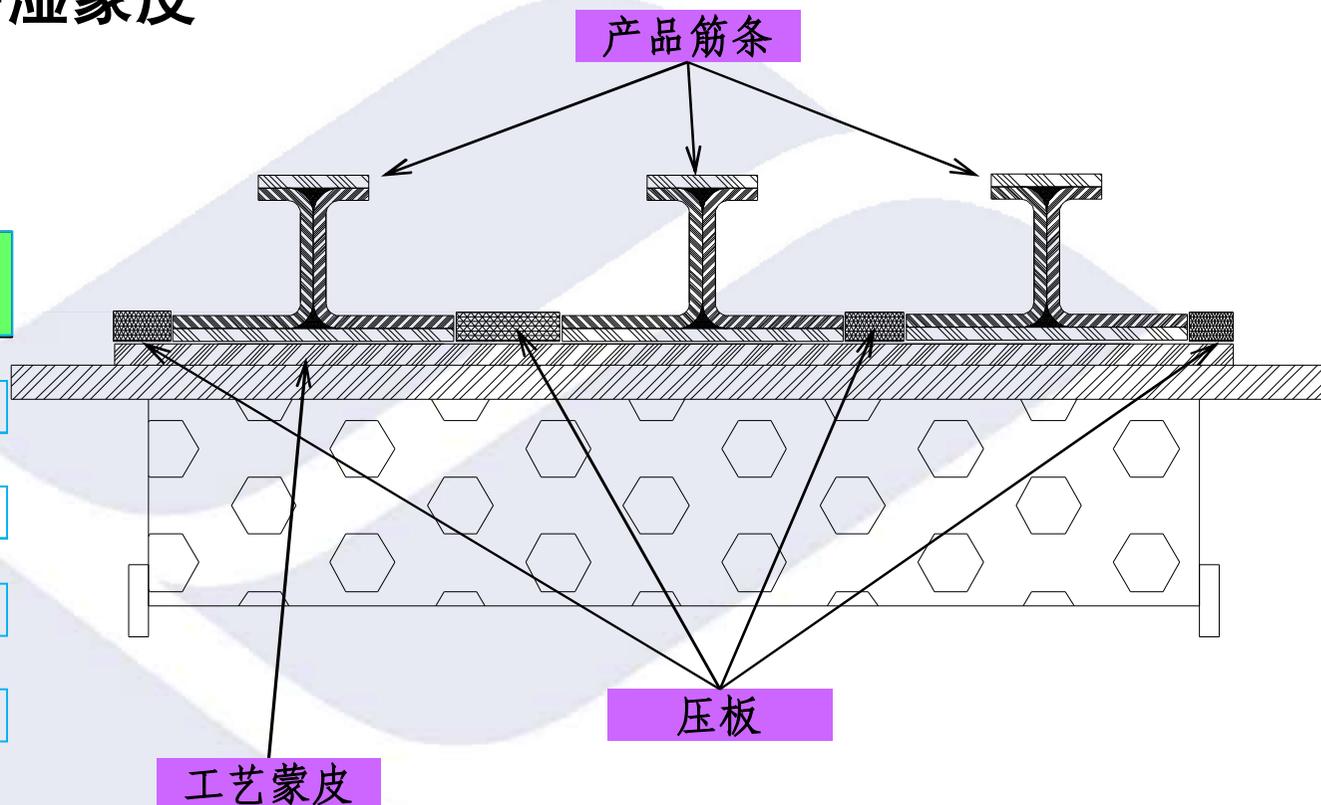
制造筋条(工字梁)且完成
固化/切割/无损检测

铺叠蒙皮

组合筋条和蒙皮

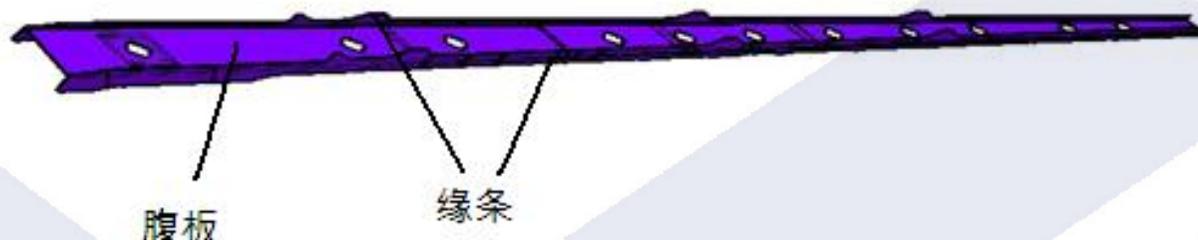
封袋固化

其它后续工序

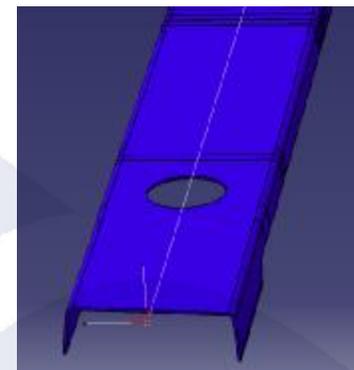


典型案例3：梁的制造—平尾外伸盒段“工”型梁、升降舵“C”型梁

结构示意图



平尾外伸盒段“工”型梁

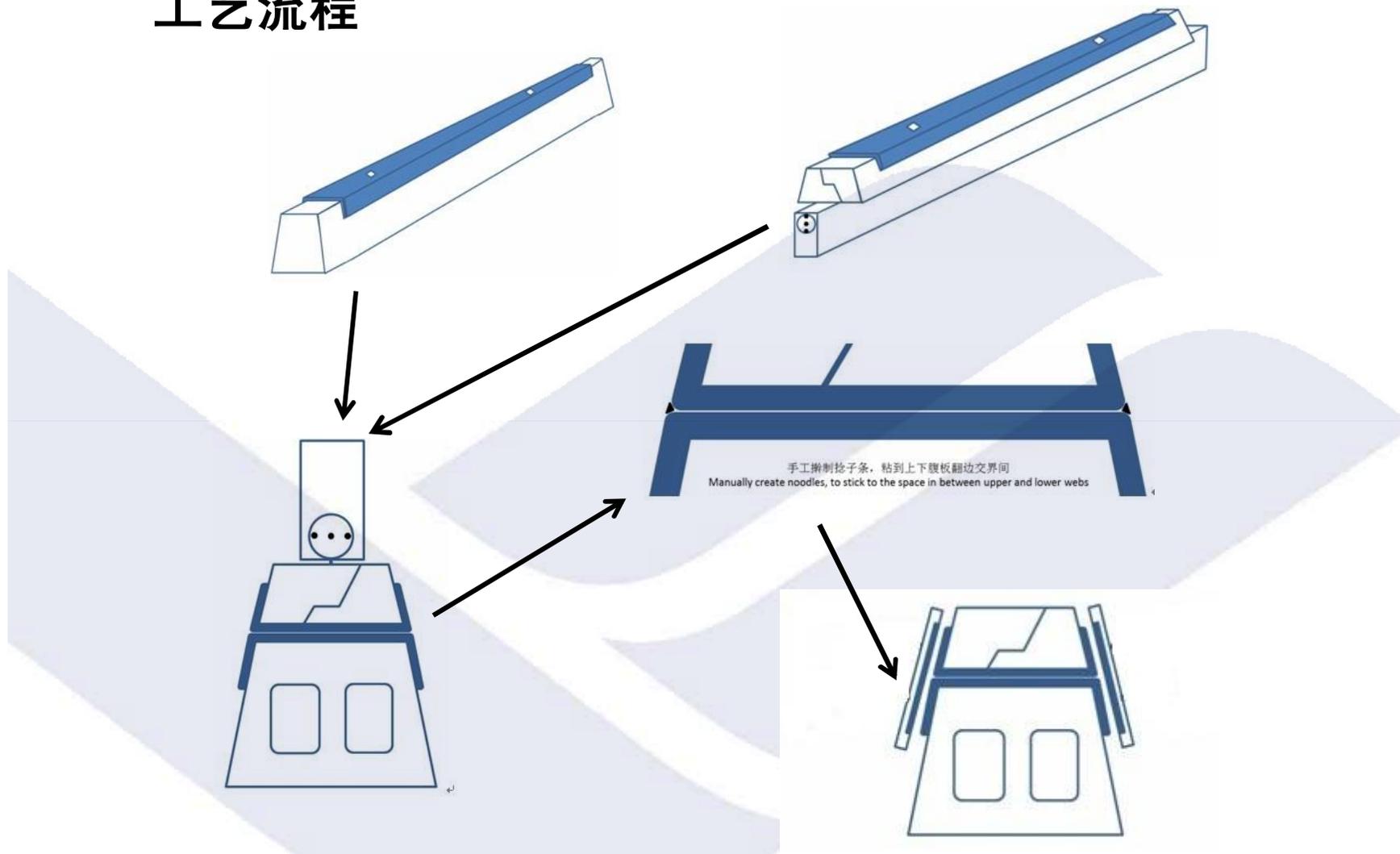


升降舵C型梁

工艺路线：

- 1、手工铺贴成型：下料---铺贴---合模/封袋---热压罐固化
- 2、自动铺带+热隔膜成型：自动铺带---热隔膜成型---合模/封袋--热压罐固化

工艺流程



目 录

1、复合材料制造技术基础知识

2、国外复材制造技术最新动态

3、典型案例

4、上飞公司复合材料研究与发展

谢谢!

THANKS