

第12章 聚合物基复合材料成型工艺

本章教学目的：

1. 了解复合材料各种成型工艺
2. 掌握常用成型方法
3. 了解模具及辅助材料
4. 了解复合材料固化成型过程

本章重点难点：

复合材料常用成型方法（需要的常用设备及主要工艺参数；复合材料固化成型过程）

12.1 概述

➤ 聚合物基复合材料的工艺特点

(1) 材料的形成与制品的成型是同时完成的

该特点可实现大型制品一次整体成型，简化制品结构，并且减少组分零件和联接零件的数量，因而减轻制品质量，降低工艺消耗和提高结构件使用性能。

(2) 复合材料的成型比较方便

复合材料基体及增强材料的特点，可使得一些复合材料用廉价简易设备和模具，不用加热和加工工艺的方法，由原材料直接成型出大尺寸的制品。

一种复合材料可以采用多种方法成型，选择成型方法可根据制品结构的特点、用途、生产量、成本以及生产条件的综合资料考虑，选择最经济和最简便的成型工艺。

成型工艺类型

- 手糊成型
- 真空袋压法成型
- 喷射成型
- 树脂注射和树脂传递成型
- 层压成型
- 模压成型
- 缠绕成型
- 热压罐成型

表12.1 树脂基碳纤维复合材料几种成型工艺对比

工艺	产品性能	制造成本	制品尺寸	加工量	应用领域
自动铺放技术	高	中	大型、超大型	中批量	大型复杂零部件的制造,例如波音公司的 B787 飞机(主机翼蒙皮、中央机翼和尾翼)空客 A350XWB 飞机(机翼蒙皮和中央翼)
热压罐成型	高	高	中大型	中批量	航空航天飞行器结构件
真空辅助成型	中	低	中大型、超大型	中批量,小批量	大型复合材料零部件, 风电叶片
RTM 成型	高	低	中小型	中批量	适用于制造高质量、形状复杂、纤维含量高的构件,主要应用于航空航天、汽车工业、机械设备和电子产品等领域
模压成型	高	低	中小型	大批量	广泛应用于航空、航天、汽车、建筑、机械等领域。

12.1 手糊成型工艺

手糊成型又称接触成型，采用手工方法将纤维增强材料和树脂胶液在模具上铺敷成型、室温（或加热）、无压（或低压）条件下固化，脱模成制品的工艺方法，是聚合物基复合材料制造中最早采用和最简单的方法。

糊成型工艺在世界各国复合材料工业生产中，仍占用很大的比例，如美国占35%，西欧占25%，日本占42%；中国占75%。这说明接触低压成型工艺在复合材料工业生产中的重要性和不可替代性。

优点:

- ① 不受产品尺寸和形状限制，适宜尺寸大，批量小，形状复杂产品的生产。
- ② 设备简单，投资少，设备折旧费低。
- ③ 工艺简单。
- ④ 容易满足产品设计要求。
- ⑤ 制品树脂含量较高，耐腐蚀性好。

缺点:

- ① 生产效率低，劳动强度大，卫生条件差。
- ② 产品质量不易控制，性能稳定性不高。
- ③ 产品力学性能较低。

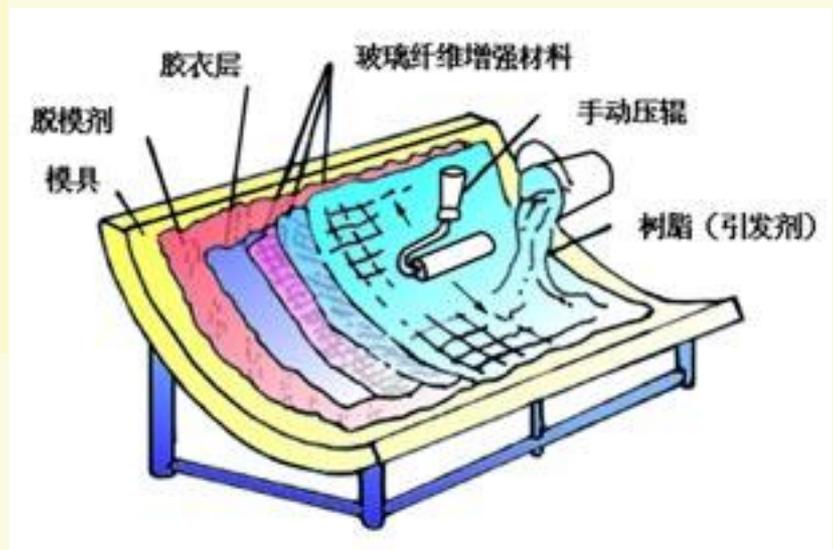
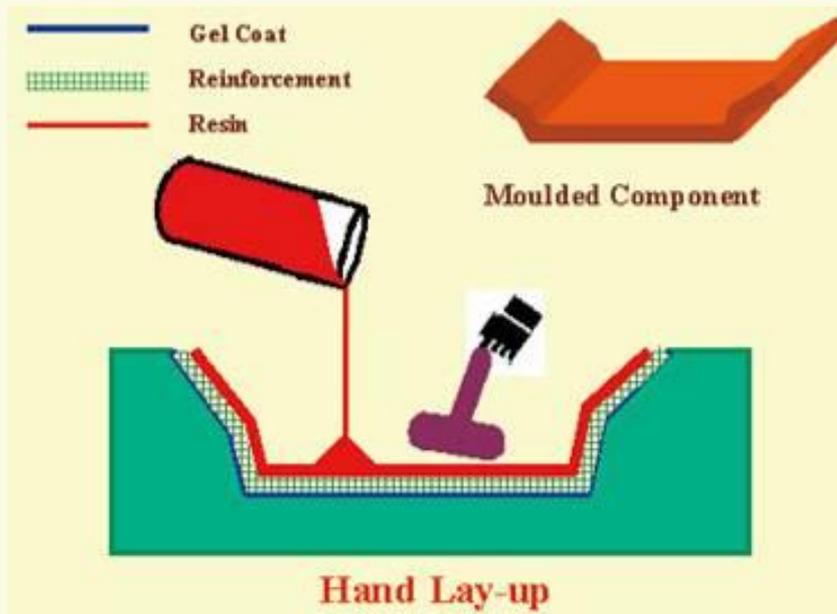


图12.1手糊成型示意图

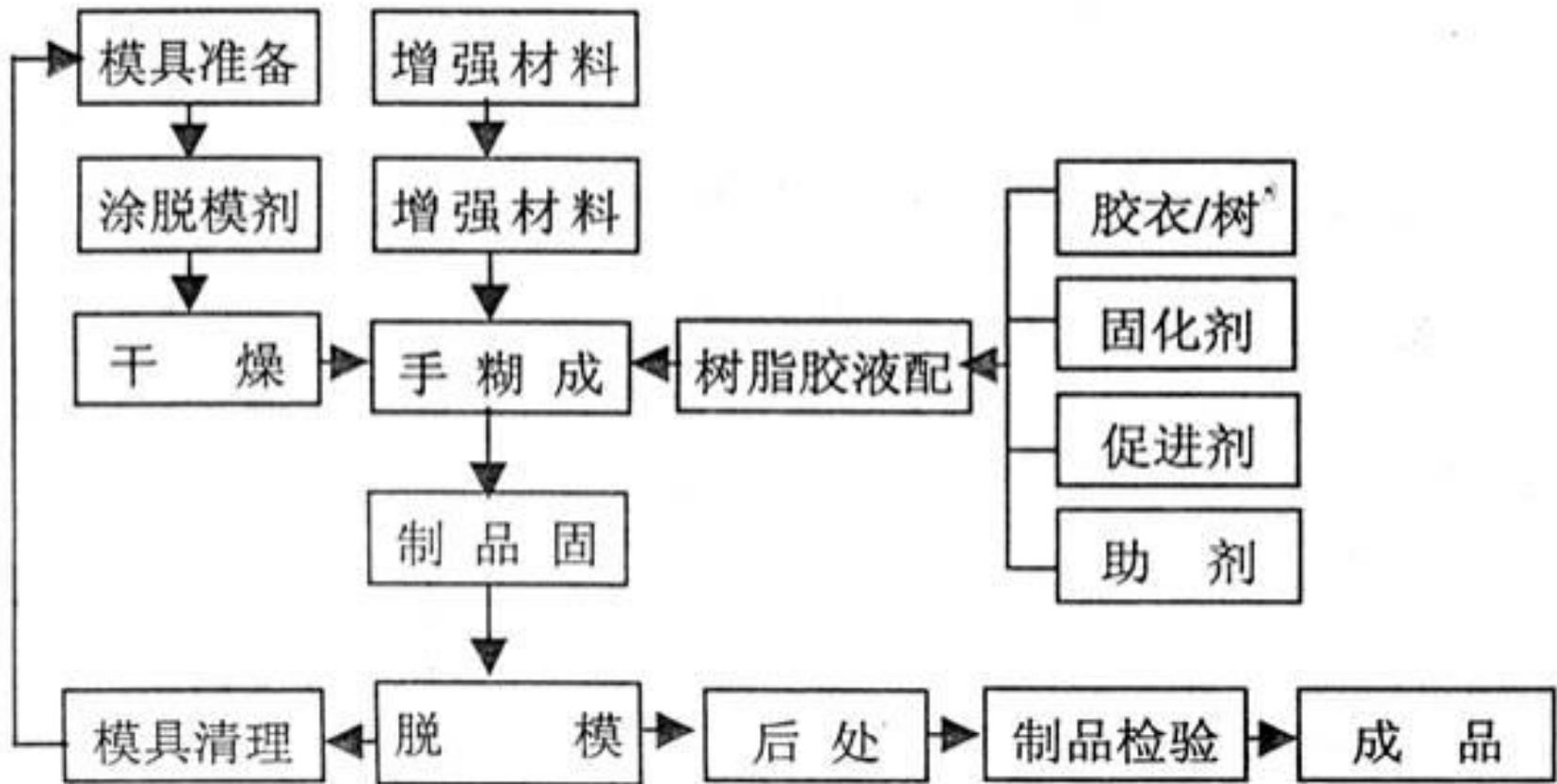


图12.2 手糊成型工艺流程图



图12.3 手糊玻璃钢制品

二、原材料选择

1. 增强材料

① 无捻粗纱布（方格布）：0.1~0.8mm

变形性好，易被树脂浸透，易排除气泡，增厚效率高。

② 加捻布（平纹布、斜纹布、缎纹布、单向布）

0.05~0.6mm

表面平整、气密性好；价格贵、不易浸透树脂、增厚效果差

③ 玻璃布带；④ 短切纤维；⑤ 表面毡；

⑥ 短切毡

树脂浸透性好，气泡容易排除，变形性好，施工方便，制品含胶量高60~80%，防渗效果好。

2. 树脂

1) 要求

- ① 粘度适宜, $0.2\sim 0.8\text{Pa}\cdot\text{S}$, 对玻纤有良好浸润性;
- ② 在室温下凝胶、固化, 并且无低分子物产生;
- ③ 无毒或低毒;
- ④ 价格便宜, 来源广泛。

2) 常用树脂: 不饱和聚酯、环氧树脂

3) 辅助材料

- ① 稀释剂
- ② 填料 (降低成本, 提高性能)
- ③ 触变剂 (适用垂直面施工, 活性 SiO_2)
- ④ 颜料 (一般选用无机颜料, 有机颜料影响固化)

三、手糊工艺过程

1. 原材料准备

1) 胶液配制

胶液工艺性：**胶液粘度、凝胶时间**

手糊工艺进行前，必须进行胶液凝胶时间试验。要使凝胶时间大于或等于所配胶液施工时间，否则手糊不能顺利进行。

不饱和树脂配方（质量份）

不饱和聚酯树脂：100份；

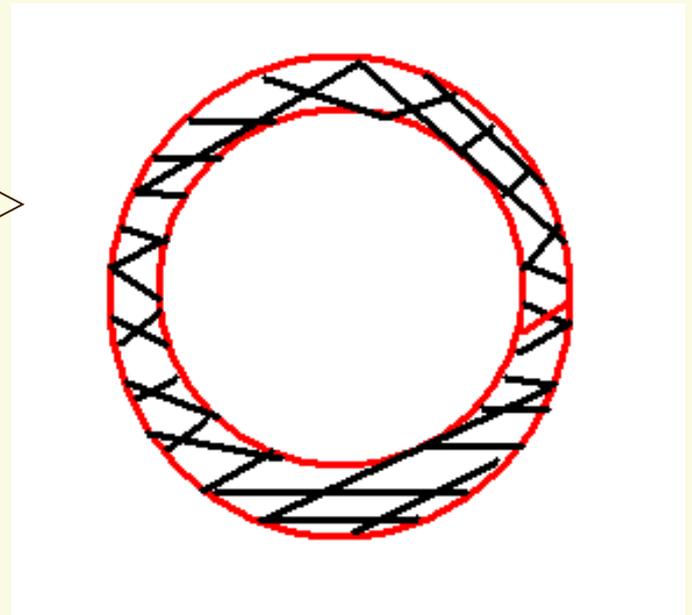
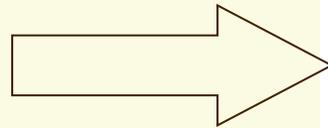
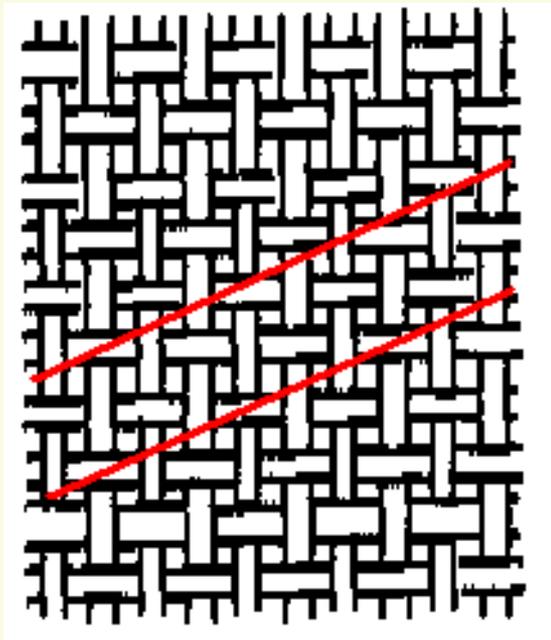
过氧化甲乙酮：2份（引发剂）；

萘酸钴苯乙烯溶液：1~4份（促进剂，加入量与环境温度有关）

2) 增强材料准备

玻纤布裁剪:

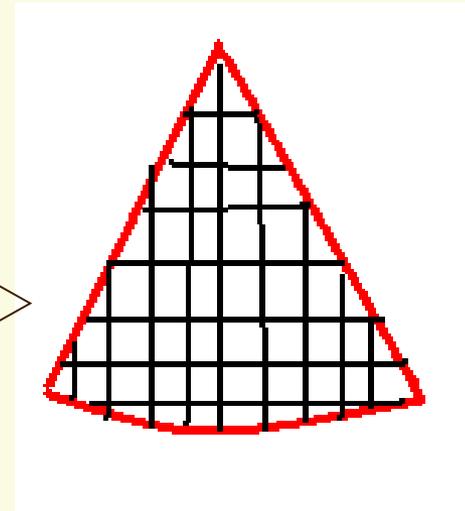
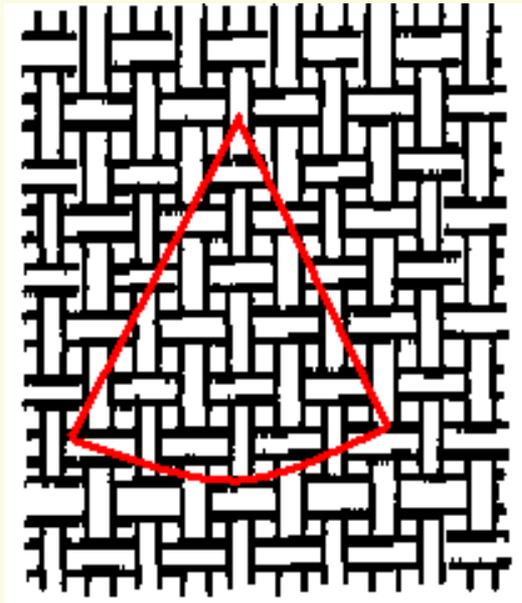
玻布沿径向45°剪裁 → 圆环形制品



2) 增强材料准备

玻纤布裁剪：

玻布裁成扇形 → 圆锥形制品



玻纤布裁剪 { 圆环形制品 ←—— 玻布沿径向45°剪裁
圆锥形制品 ←—— 玻布裁成扇形

布的拼接 { 对接 (表面质量要求高的产品)
搭接

3) 胶衣糊准备

可选用专用胶衣糊制作表面层, 提高表面层质量 (外观、性能)

2. 糊制

1) 表面层 (胶衣层、富树脂层)

厚度: 0.25~0.5mm, 或300~500g/m₂

涂刷 (二遍, 互相垂直) : 喷涂

表面毡 (材料)

2) 增强层

材料：玻璃布或短切毡

拼接 { 对接（注意对接缝错开）
 { 搭接
 { 二次固化拼接（ $d \geq 7\text{mm}$, 固化发热量太大，制品易变形或分层）

特殊处理 { 弯角或凹凸处：玻布剪开，压平
 { 直角：先填触变树脂，然后糊制
 { 凸字：先用树脂浇注，然后糊制

3. 固化 (凝胶-----定型-----熟化)

固化方式 { 常温固化: 温度 $> 15^{\circ}\text{C}$ ($25\sim 30^{\circ}\text{C}$) ;
湿度 $\leq 80\%$ ($15\sim 30^{\circ}\text{C}$, 8~24h)
加热固化: 烘箱、固化炉、模具加热、红外线加热 ($60\sim 80^{\circ}\text{C}$, 1~2h)

固化度 { 丙酮萃取法
硬度法 (巴氏硬度) > 15

4. 脱模：气脱、顶脱、水脱

5. 后处理

修整：除去毛边、飞刺、修补表面及内部缺陷，钻孔

装配：机械连接、胶接

表面涂饰

四、手糊制品缺陷及原因

1. 胶衣起皱、龟裂、变色

原因

起皱

- ①胶衣层太薄；②固化剂不足；③气温太低；④胶衣层厚度不均；⑤胶衣层固化不足

龟裂

- ①胶衣层太厚；②固化时热量过大；③固化剂用量过多；

变色

- ①固化剂用量过多；②胶衣流挂；③颜色分离；④胶衣层厚度不均

2. 制品收缩

原因：

- ① 拐角处圆弧半径过小；
- ② 脱模剂用量太多；
- ③ 制品局部厚度过大；
- ④ 胶衣层厚度不均，后固化加热不均

3. 制品翘曲和变形

原因：

- ① 固化剂用量过大
- ② 制品太薄；
- ③ 制品厚度不均匀或不对称；
- ④ 树脂集聚；
- ⑤ 脱模太早，树脂固化度不够；
- ⑥ 后处理过早或温度不均

▶ 模具与辅助材料

一、模具基本要求

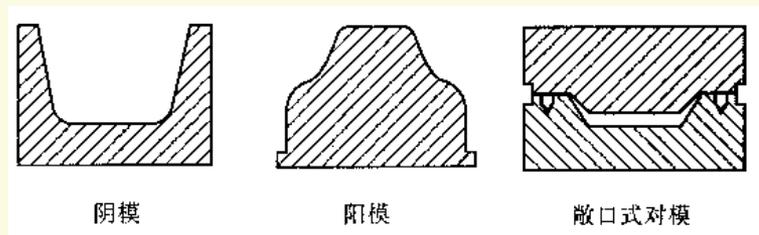
1. 符合制品尺寸、精度、外观要求
2. 足够的刚度、强度、热稳定性
3. 较小的热容量，有效利用热能；与制品热膨胀系数匹配
4. 质量轻，便于搬运，维护方便

二、模具材料

- ① 木材; ② 石膏; ③ 水泥; ④ 石蜡;
- ⑤ 泡沫塑料 (不脱模内芯) ;
- ⑥ 可溶性盐 (AlPO_4 (60~70%) + NaCO_3 (30~40%) + NaBO_2 (5~8%)) , 80°C溶于水;
- ⑦ 低熔点金属58%Bi+42%Sn, 熔点135 °C;
- ⑧ 玻璃钢
- ⑨ 金属: 钢材、铸铝, 不能用铜 (铜盐可妨碍树脂固化)

三、模具结构形式

- 单模 {
 - 阴模 (制品外表面光洁)
 - 阳模 (制品内表面光洁)
- 对合模 制品双面光洁
- 拼装模 (组合模) 大型模具, 由小块模具拼装而成



a. 阴模示意图

b. 阳模示意图

c. 对模示意图

图12.5 模具示意图

四、辅助材料

1. 脱模剂
- 油脂类：硅酯、黄油、凡士林、石蜡
 - 溶液类：聚乙烯醇（乙醇水溶液）
 - 薄膜类：PVC、PE、PA

脱模剂要求：

- 不腐蚀模具，不影响树脂固化，对树脂粘附力小；
- 成膜时间短，成膜均匀、光滑；
- 使用温度高于树脂固化温度；
- 操作简便，使用安全，价格便宜

2. 隔离材料（保护复合材料不受污染）：

PVC、PA薄膜

3. 透气材料、吸胶材料：玻璃布、吸胶纸、吸胶毡

4. 真空袋材料：气球步、橡胶袋、尼龙薄膜

5. 密封材料：胶条、胶带

12.2 喷射成型

喷射成型是通过喷枪将短切纤维和雾化树脂同时喷射到模具表面，经辊压、固化制得复合材料制件的方法。

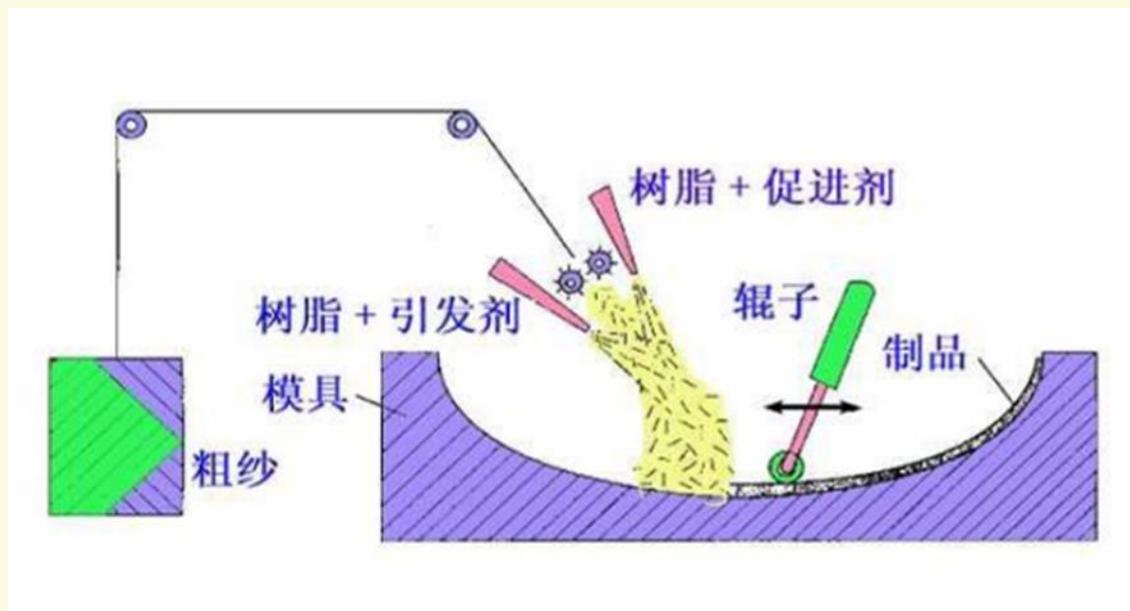


图12.6 喷射成型示意图

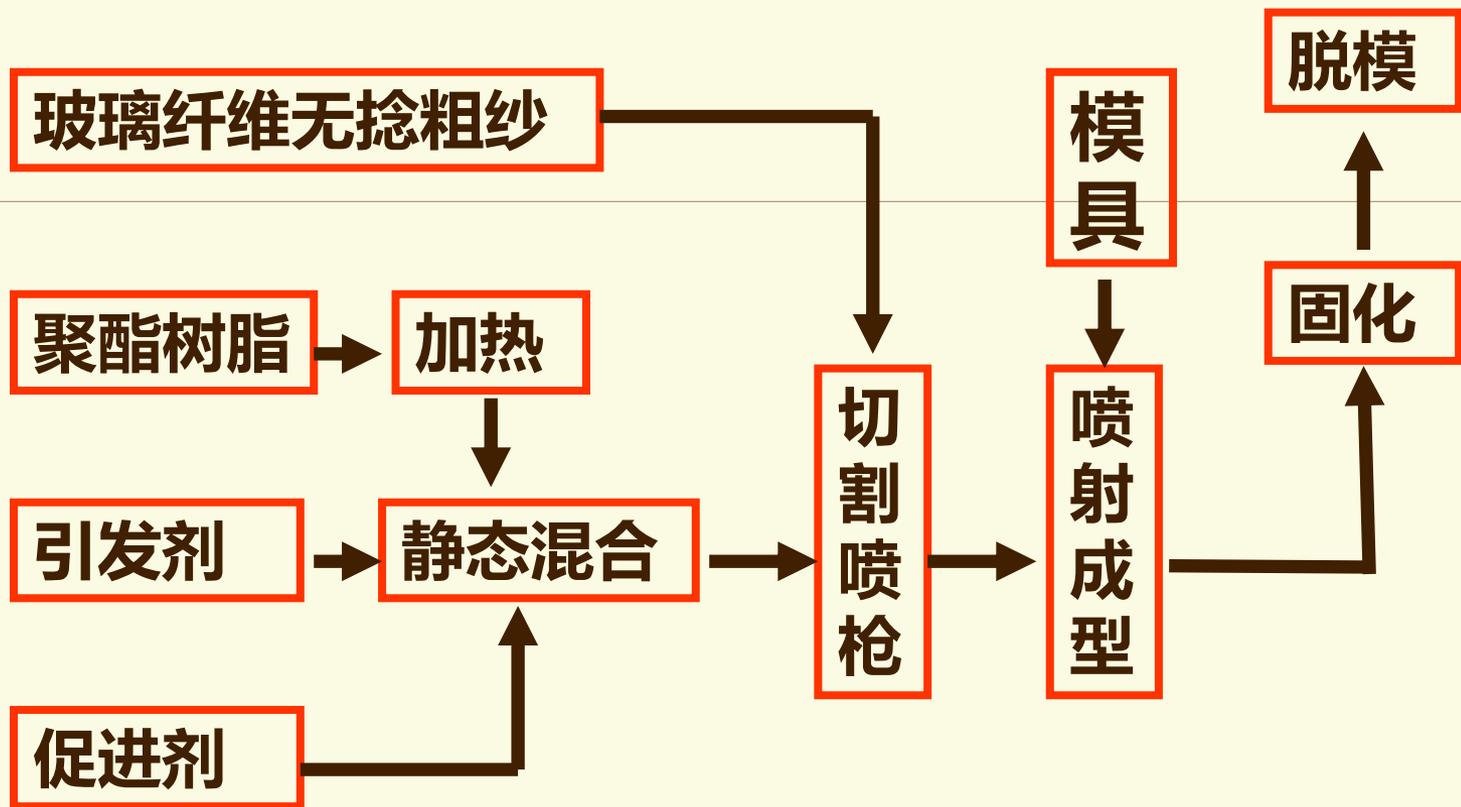
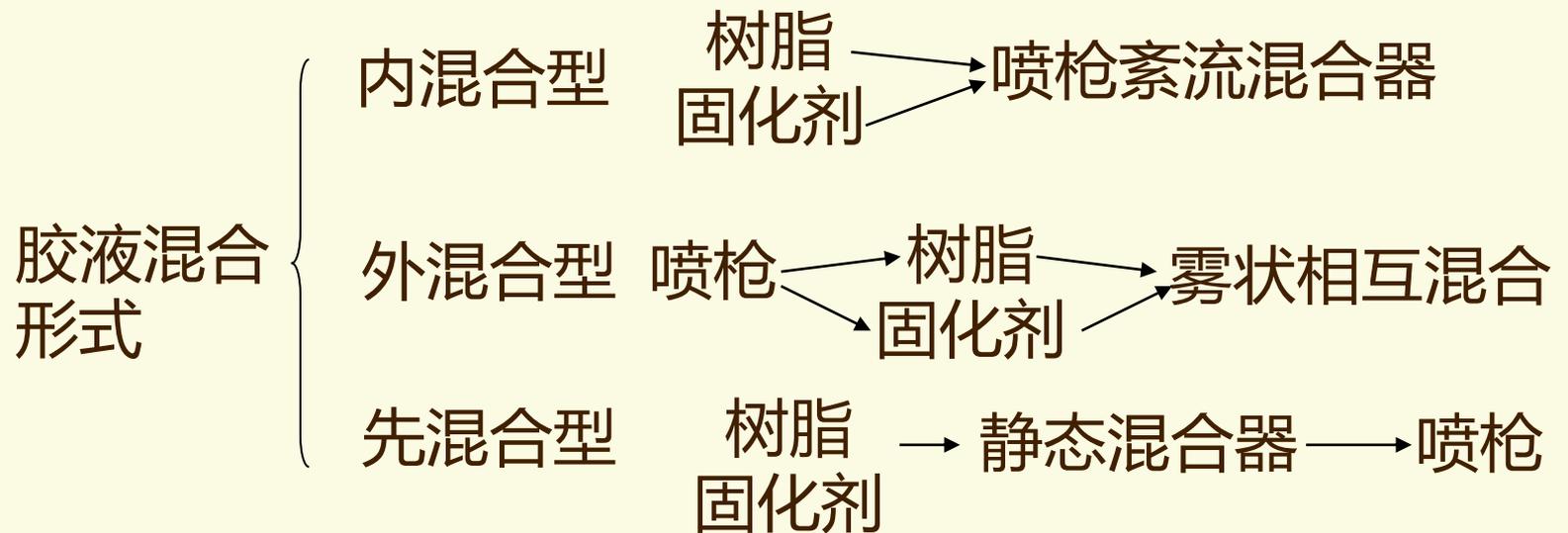


图12.7 喷射成型工艺流程图

2. 喷射方法

喷射动力 {
气动型
液压型



4. 喷射成型特点

- 1) 生产效率较高（手糊成型的3-5倍），劳动强度低
- 2) 玻纤为无捻粗纱，材料成本低
- 3) 制品整体性好，无搭接缝
- 4) 产品形状和尺寸不受限制
- 5) 可调节产品厚度，纤维与树脂比例
- 6) 施工现场污染大，产品树脂含量高，强度小

12.3 树脂传递模塑 (resin transfer moulding, RTM)

在一对阴模/阳模组成的密封型模具中，配置纤维预成型件（将纤维预成型为产品形状的产品、织物等），通过压力将液态树脂注入密闭的模腔，浸润纤维织物毛坯，然后固化成型的方法。适用于中小型制品。

工艺流程

模具清理 → 预成型坯制造和安放 → 合模 → 树脂注入
→ 启模 → 脱模 → 后处理 → 制品

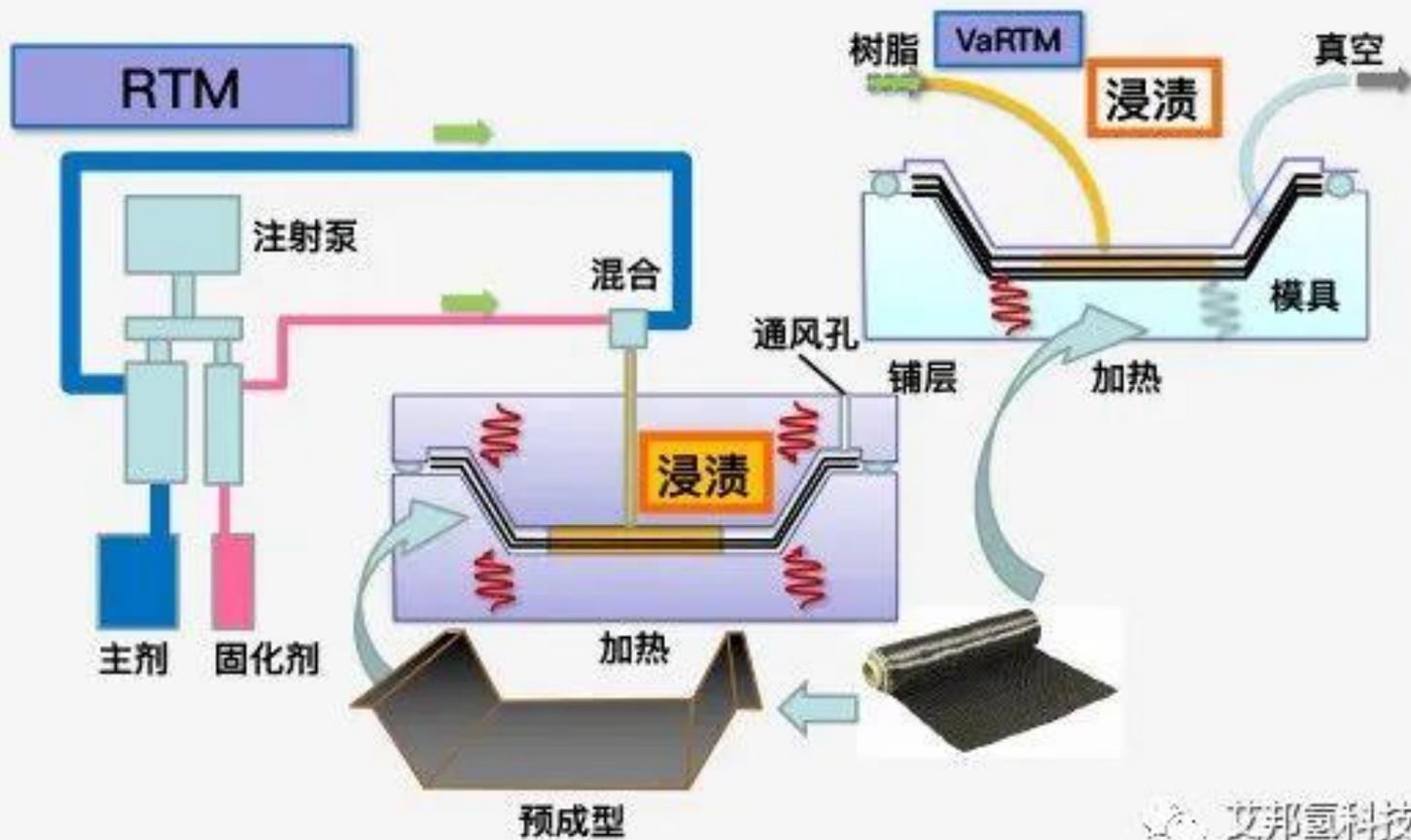


图12.8 树脂传递模塑成型 (RTM)

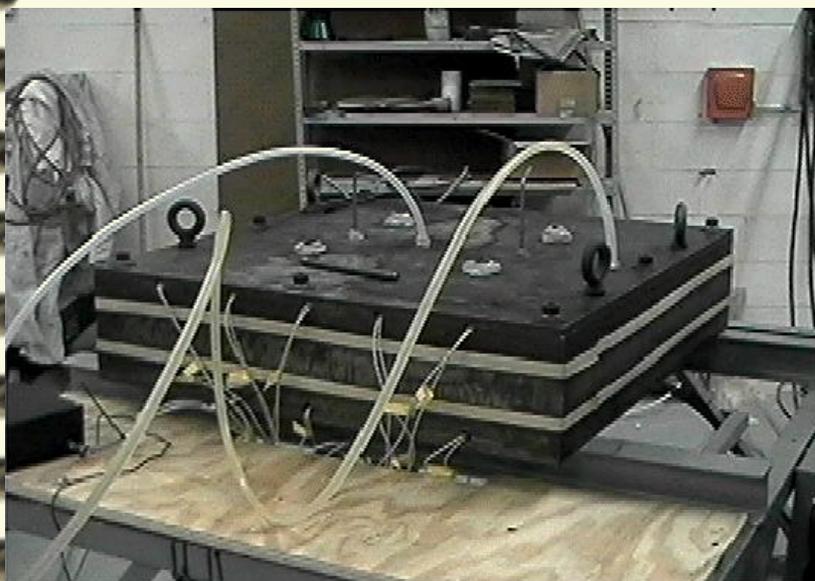
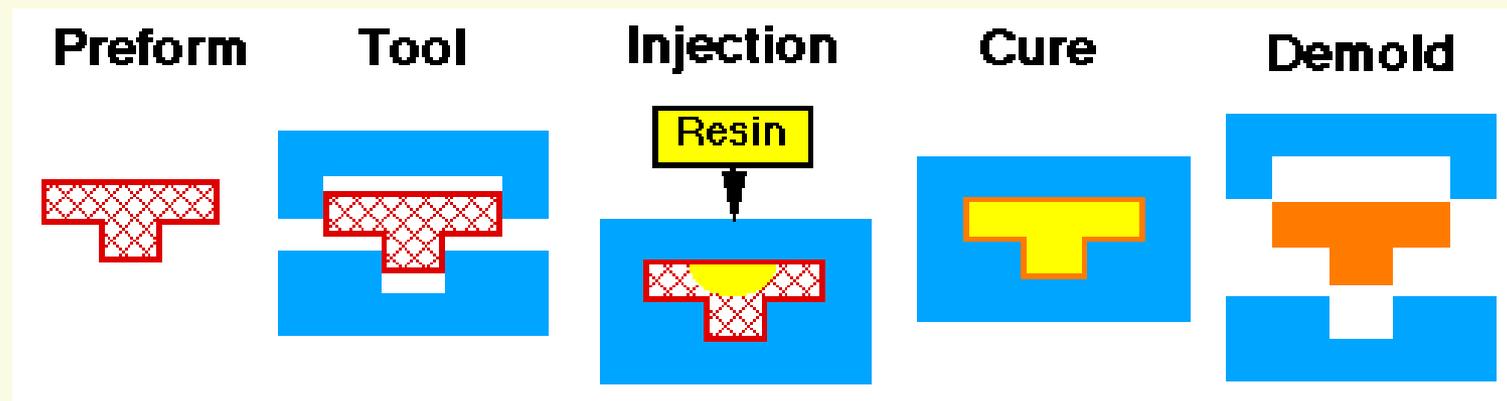


图12.9 RTM成型工艺流程

RTM工艺参数

1) 注胶压力

(由模具材料、产品形状、树脂粘度决定)

降低压力方法：降低树脂粘度；优化模具设计；优化纤维排布设计；降低注胶速率

2) 注胶速率

(由树脂对纤维润湿性和树脂表面张力及粘度决定)

3) 注胶温度

(由树脂活性期和最小粘度温度决定)

RTM对树脂工艺性要求

- 1) 室温或较低温度下具有低粘度 (0.1~1Pa.S) 及一定的适用期 (48h)**
- 2) 树脂对增强材料具有良好的浸润性、匹配性、粘附性**
- 3) 树脂不含溶剂或挥发物, 固化无小分子物放出**

仅使用阴模在真空压力下固化的方法称为**真空辅助成型工艺**（Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI）或**真空辅助树脂转移成型**（VARTM），是一种制造大型复合材料零件的新型低成本成型技术。它在真空下消除纤维增强材料中的气体，利用树脂的流动和渗透来浸渍纤维及其织物，并在一定温度条件下固化的成型方法。

VARI 成型技术是一种利用树脂的流动和渗透，在真空压力下浸渍纤维和织物，并在真空压力下完成固化的成型方法。

与传统工艺相比，VARI 成型技术不用热压罐，只需要单面刚性模具（上模为柔性真空袋膜）铺设纤维增强材料。该模具只是为了保证结构形面要求，简化模具制造工艺，节约成本。此外，只在真空压力下形成，没有额外的压力，有助于降低成本。

因此，该方法主要具有成本低、孔隙率低、性能接近热压罐工艺、适合制造大型零件等特点。

鉴于 RTM 法的局限性，VARI 法只能在真空条件下通过适当的工艺措施将树脂转移到包裹在真空袋中的增强纤维预制件上，并在真空压力下完成结构的固化过程。

VARI 法摆脱了对热压罐设备的依赖，对于航空航天领域广泛应用的各类结构件，这是一种具有明显可以降低成本的制造方法，具有广阔的应用前景。

表 12.3 树脂基碳纤维复合材料在大飞机中的应用

工艺	特点	大飞机代表性部件
热压罐	多用于主承力结构,产品的现为体积含量较高(57%–60%)	机翼,中央翼盒,机身
RTM	树脂在压力下被注入对合模具; 制件内外表面均有极好的光洁度; 可得到较高的纤维体积含量(57%–60%)	叶片、机匣
真空辅助成型	通常使用单面开放模具,抽真空使液态树脂渗入预制体,需采用低粘度树脂,与模具型面相贴的制件表面有极好的光洁度; 相比于 RTM 工艺、模具较为便宜; 得到的纤维体积含量通常较低(50%–55%)	机翼、襟/副翼、扰流板
模压成型	生产效率高,产品尺寸精度高,重复性好,表面质量好	窗框、直升机桨叶

据Stratview Research数据，全球真空辅助成型工艺材料市场在2016年已达到7.75亿美元，并预计以7.27%的年复合增长率在2022年达到11.82亿美元。

航空航天用真空辅材与风电叶片用真空辅材将占据绝大部分的市场，在2021年分别达到5.81亿美元和3.16亿美元。

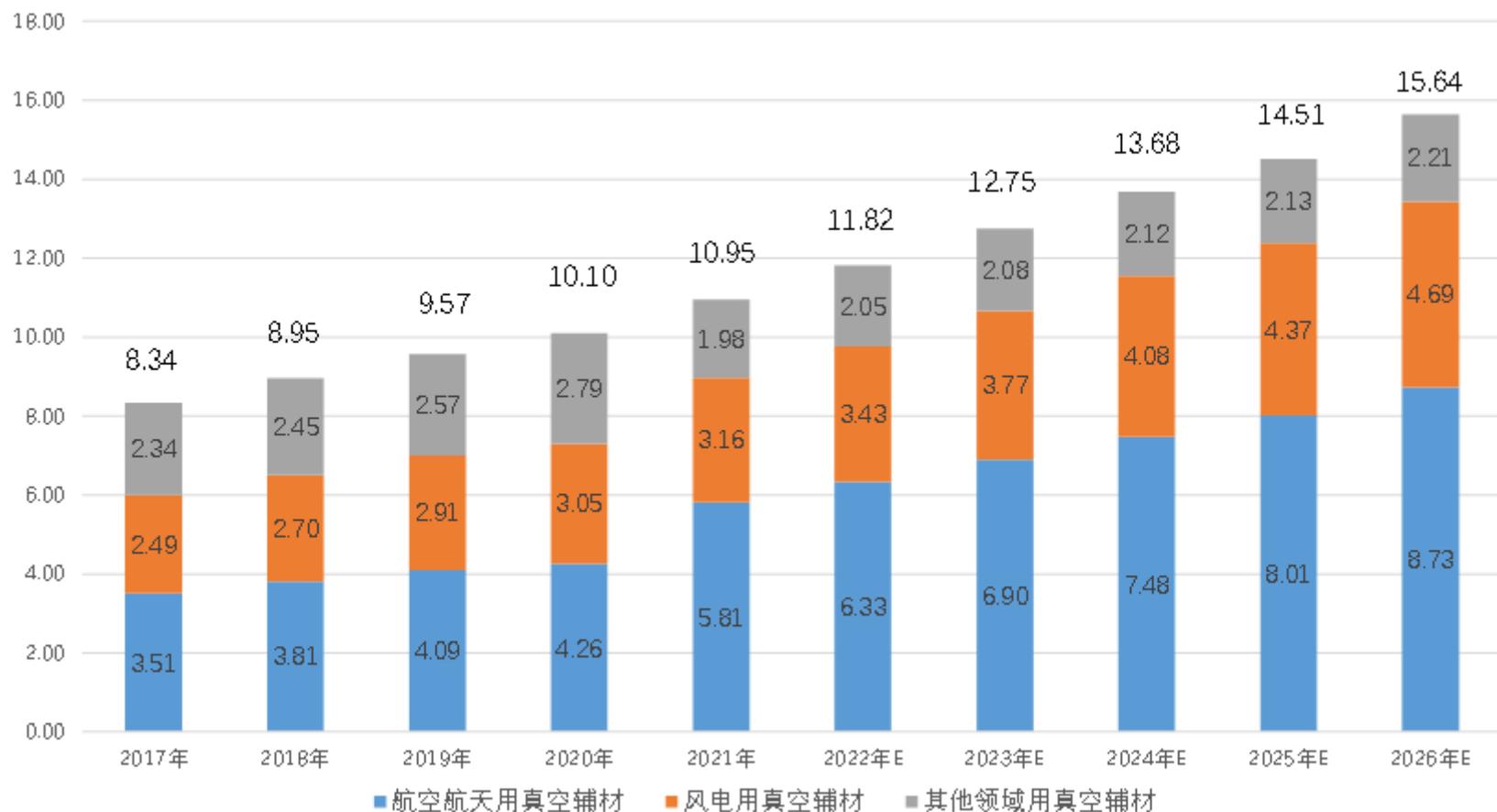


图12.10全球真空辅助材料市场规模预测（单位：亿美元）



图12.11 中国真空辅助材料市场规模预测（单位：亿元）

VARI成型实例：BMW i3的车身制造



图12.12 BMW i3 车架

CFRP材料车身重量比钢材料车身重量轻39%



图12.13 BMWi3 车架中碳纤维部件

- **HP-RTM成型 (High-Pressure Resin Transfer Molding)**

此次的i3有13个零件是通过HP-RTM做成的。

其生产工序是：将由CFRP编成的编织物材料卷曲材中切出，进行冲压成型的预处理（原材料）。将原材料放入RTM成型机中，进行真空处理后，用高压将树脂射出，在模具中进行热硬化，最后切下制品。

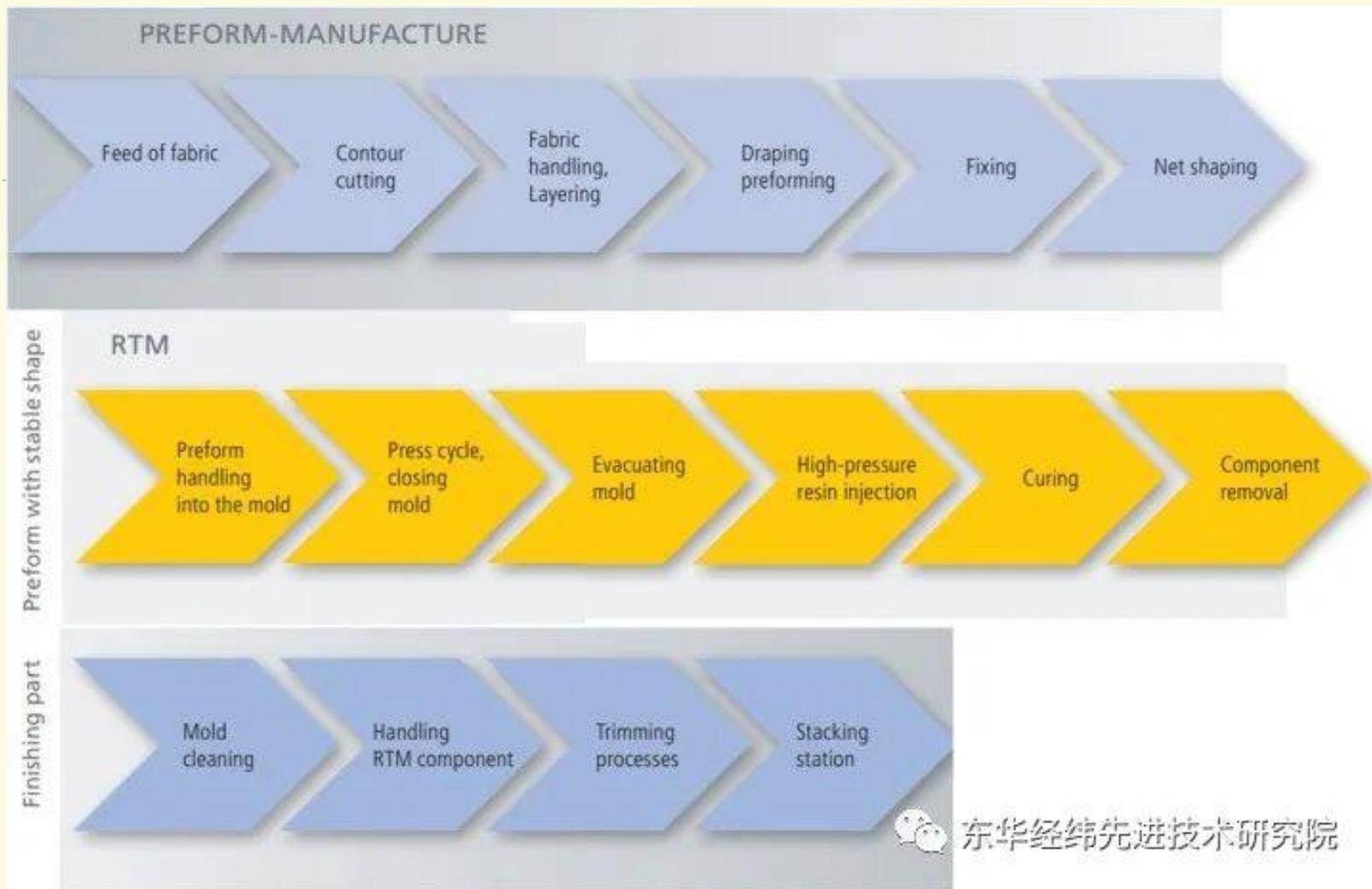


图12.14 HP-RTM成型过程



图12.15 HP-RTM成型设备



图12.16 德国KrussMaffei公司HP-RTM树脂注入机



图12.17 德国Dieffenbacher公司的高性能热压机

·湿法成型 (Wet Molding)

i3有19个零件采用Wet Molding制成。湿法成型作为HP-RTM的发展形式，可缩短循环时间。

工序上，到切出卷材这一步为止是一样的，**将树脂注入的工序提前到模具安装之前进行**。把CFRP材料里注入了树脂的编织物移动到RTM加工中心，将模具密闭加压使树脂渗透在纤维里面，进行热硬化。也可使用再生纤维薄板。

•HP-RTM Braided/W Core成型

i3有2个零件采用HP-RTM Braided/W Core制成。

HP-RTM Braided像加入了纤维的橡胶管那样，在圆周上加入碳纤维后编成管状后，通过RTM成型射出树脂进行热硬化，是管状CFRP制品的成型方法。适用于管状的骨架和加强筋。

德国Dieffenbacher公司从树脂注入成型(RTM)

开始, 还开发了其他各种各样的成型技术:

SMC (Sheet Molding Compound) , 将包含不连续的碳纤维等材料的板状热硬化性树脂放入模具中进行冲压成型、热硬化的方法。

SMC是适用于大量生产产品的成型方法。

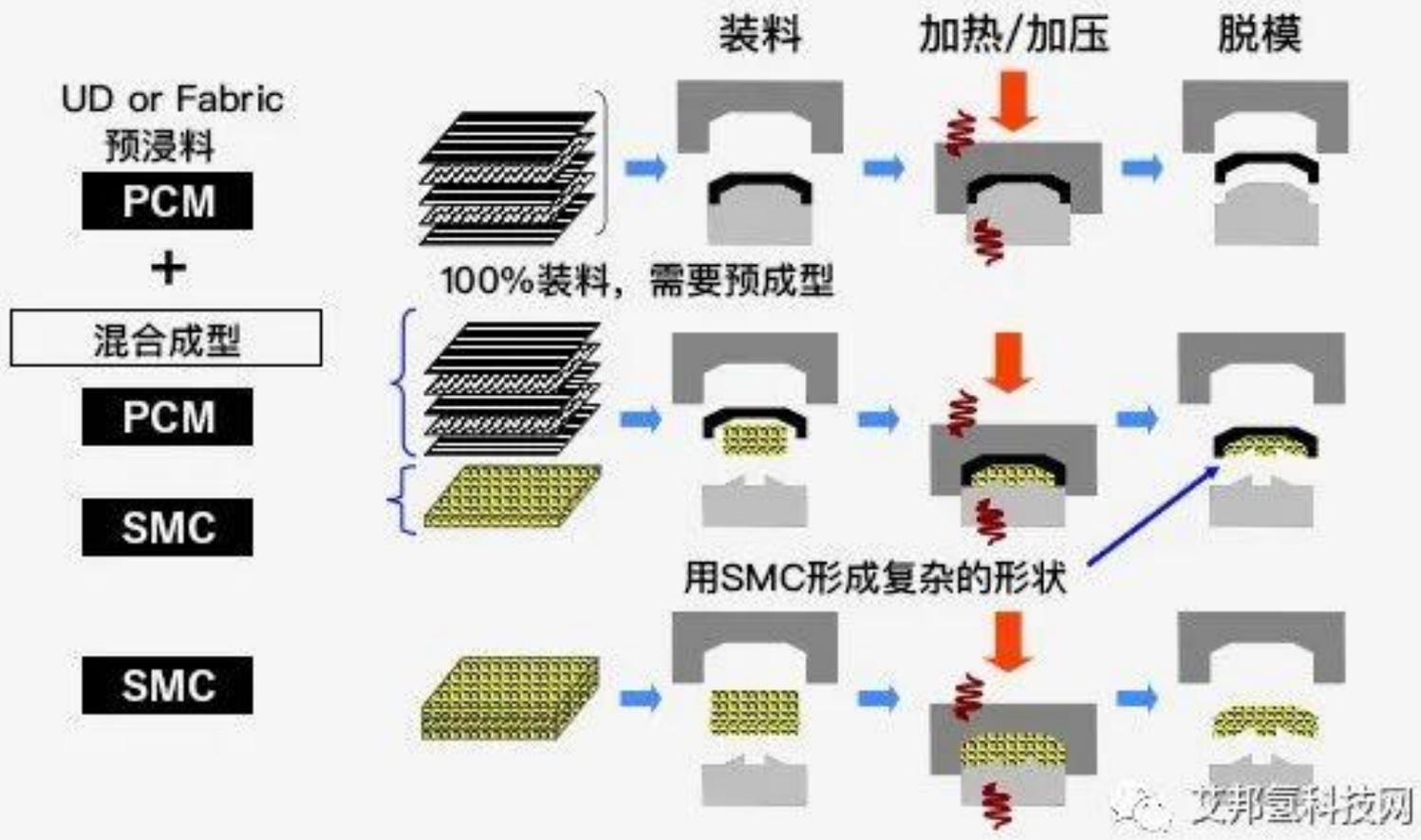


图12.18 SMC成型工艺

Dieffenbacher公司2012年与Fraunhofer公司共同开发了作为SMC成型最新技术的D-SMC生产线。

D-SMC在即将进行冲压成型工序之前，通过调配热硬化性树脂复合材料，实现了SMC成型的成本降低和品质管理的提升。

SMC产品的表面处理十分优秀，十分适合用作汽车的外板。



图12.19采用SMC/ D-SMC技术的例子

LFT-D (Long Fiber Thermoplastics Direct process)

LFT-D是将使用长纤维复合材料的热塑性树脂成型，从聚合物溶解到成型过程的工序直接衔接的生产系统。

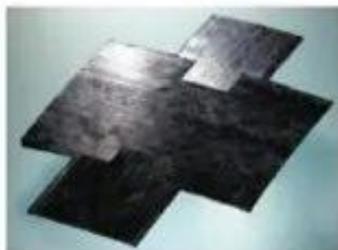
其特征是，由于使用了碳纤维，耐热性十分优越，具有较高的拉伸强度的同时，能够很好的保持复杂产品形状的尺寸精度。在前置模块的骨架部分、下层挡板、备胎板等成型商品上广泛应用。

Tailored D-LFT通过在D-LFT成型时使用追加的加强材料同时成型，可使刚性和强度以及能量吸收能力进一步提升。

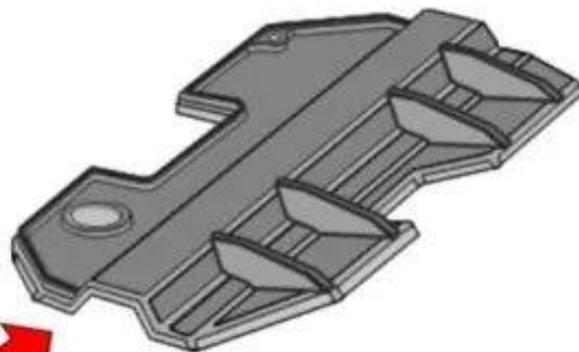
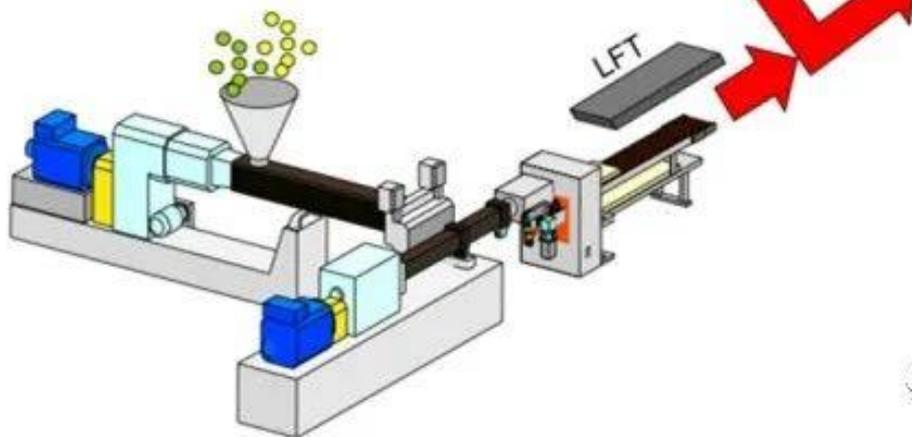
Picture: Courtesy of FIBERFORGE



UD Fiber tape



Consolidated laminate



东华经纬先进技术研究院

图12.20 Tailored D-LFT成型工艺

GMT (Glass Mat Reinforced Thermoplastics)

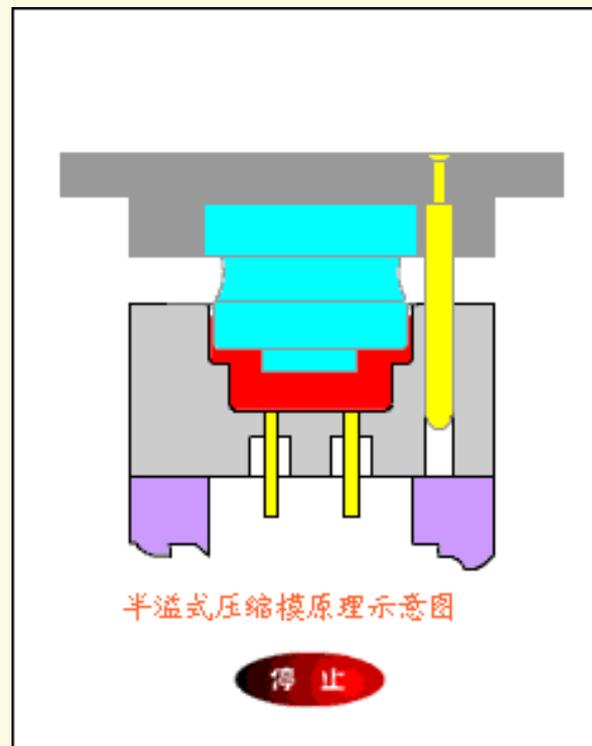
将玻璃纤维的不织垫在可塑树脂内浸润成型的方法。与之对应的最新技术，正在向在以往的玻璃纤维上叠加碳纤维强化材料进行成型的LWRT (Lightweight Reinforced Thermoplastics)技术方向发展。

12.4 模压成型

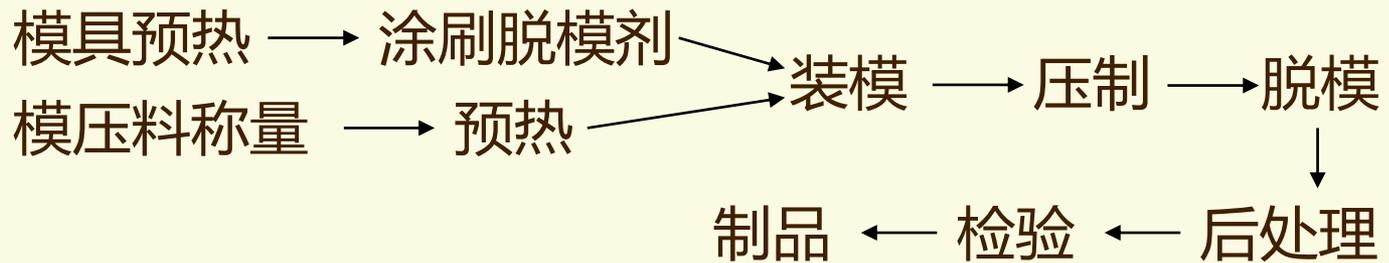
将复合材料片材或模塑料放入金属对模中，在温度和压力作用下，材料充满模腔，固化成型，脱模制得产品的方法。

特点

- ①生产效率较高，制品尺寸准确，表面光洁，产品无需二次加工，易于机械化、自动化；
- ②模具设计制造复杂，压机及模具投资高，产品尺寸受设备限制，只适于大批量中小型制品。



工艺流程



1) 模压料估算

$$W = \rho \cdot V(1 + \alpha)$$

ρ : 制品密度

V : 体积

α : 物料损失系数(3%~5%)

2) 确定工艺参数

A. 温度

装模温度：取决于模压料品种，制品结构和生产效率（快速成型 80°C 以上，一般室温 $\sim 90^{\circ}\text{C}$ ）

升温速度： $10^{\circ}\text{C}/\text{h} \sim 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$

最高模压温度 \longrightarrow 固化温度（温度过低，固化不完全；过高，局部固化，中间固化不良）

保温时间 \longrightarrow 固化反应时间不稳定，导热时间

B. 压力

作用：克服模压料之间以及与模腔间的摩擦，物料充满模腔；压紧制品，保证形状和尺寸

加压时机：树脂激烈反应放出大量气体之前

- a. 凭经验（树脂拉丝）；
- b. 树脂凝胶温度；
- c. 气体释放量

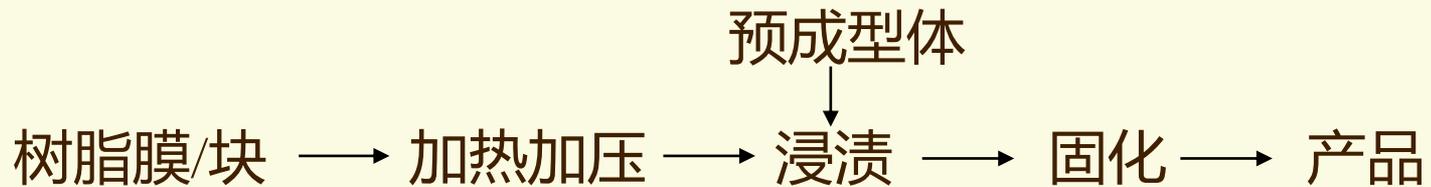
放气充模（加压、卸压、反复几次）

3) 预热和预成型

- A. 预热作用：改善工艺性能，提高模压料温度，缩短固化时间，降低成型压力；
- B. 预热方法：加热板、红外线、电烘箱、高频、远红外 60~100℃, 30min
- C. 预成型（室温下预先压制）：缩短生产周期，提高生产效率及制品性能

12.5 树脂膜熔渗工艺 (resin film infusion, RFI)

层压成型



特点

- 1) 设备、模具相对简单 (RTM相比)
- 2) 树脂纵向 (由下而上) 流动浸渍纤维, 时间短, 速度快
- 3) 树脂粘度范围广 (液—固均可)

一、工艺流程

1) 胶布裁剪（下料）

连续切割，手工裁剪， $d \geq 9\text{mm}$ 厚板，胶布纬向比横板窄5~10%

2) 配叠（排版或配布）

① 每块板料两面各放2~3张面层胶布

② 胶布挥发分 $< 7\%$ ，否则干燥处理

③ $d \geq 9\text{mm}$ 厚板，中间可夹配表角料、碎布，但不超过总量10%

④ 确定配料量

A) 按质量法下料

$$G = F \cdot H \cdot \rho(1 + \alpha)$$

F-面积；H-厚度； ρ ：密度； α -物料损失系数

B) 按层数下料：预先确定1mm板材所需胶布张数，据此估算

$$H < 5\text{mm}, \rho = 0.02 \sim 0.03; H > 9\text{mm}, \rho = 0.03 \sim 0.08$$

3) 组合

① 叠合体=铁板+衬纸+单面钢板+板料+双面钢板+板料+.....+双面钢板+板料+单面钢板+衬纸+铁板

一个叠合体5~10块板，一次可压制7~10个叠合体

② 组合原则：厚板放二侧，薄板料放中间；薄板料放二侧，后板料放中间； $H \geq 20\text{mm}$ ，单独压制

③ 衬垫材料（衬纸、石棉布）：传热、传压均匀；多次使用后变脆，应更换

4) 热压

预热预压：树脂熔化，除去挥发份；树脂浸渍玻璃布，
逐步固化至凝胶态

(板坯流胶，但不能拉丝时，预压结束)

热压：施加最高压力并保温 $2\sim 7\text{min/mm}$

5) 冷却脱模：

通冷却水并保持， $t < 50^\circ\text{C}$ ，除去压力，取出板材

6) 后处理：

后固化，烘箱， $120\sim 130^\circ\text{C}$ ， $120\sim 150\text{min}$

二、工艺参数

1) **成型压力**：压力大小、加压次数、加压时机

压力大小因素：胶布特性，板料厚度，升温速度

2) **成型温度**

①预热阶段（最高温度为凝胶温度）

②中间保温阶段（初步固化），板料浸润、密度

③升温阶段（最高温度为固化温度）

④加压保温阶段（充分固化）

⑤冷却阶段（ $t < 50^{\circ}\text{C}$ ）

3) **成型时间**（预压、热压、冷却时间之和）

因素：树脂固化速度，层压板厚度，压制温度

热压罐(AC)成型

在成型模具上层叠预浸料，盖上膨胀薄膜进行减压，在热压罐内施加压力加热固化。

该成型方法适合制造高品质、高性能产品，但由于成型周期长，成本较高。

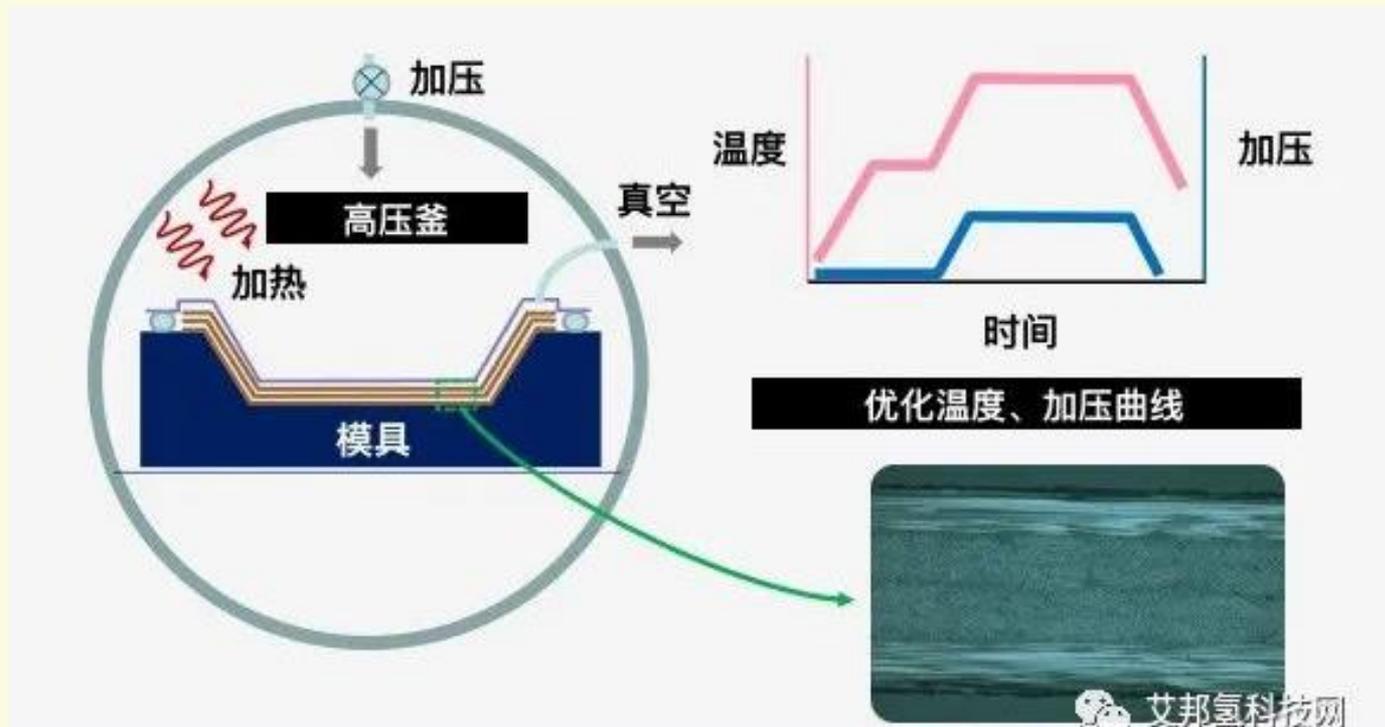


图12.22 AC成型工艺示意图

烘箱成型

与热压罐成型一样，在成型模上层叠预浸料，盖上膨胀薄膜进行减压，但在真空压力下加热固化。虽然在性能方面稍逊于热压罐成型，但运行费用低廉，是可用于较大型的成型品的成型法。

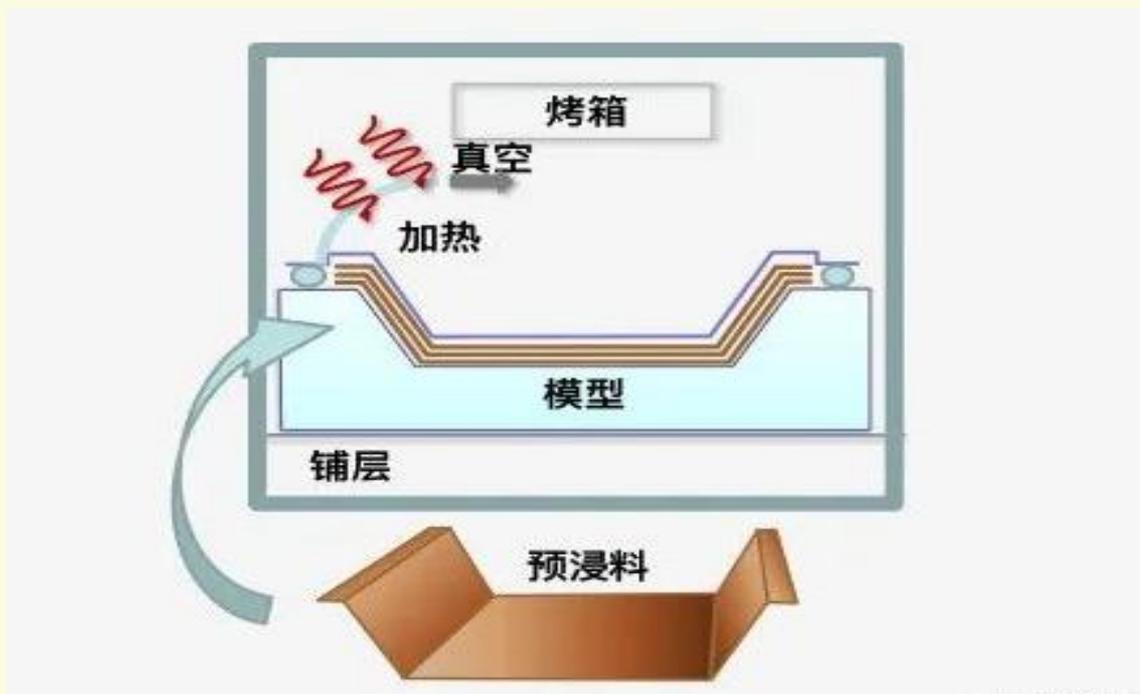


图12.23 烘箱成型工艺示意图

12.6 纤维缠绕成型

将浸渍树脂的纤维丝束或带，在一定张力下，按照一定规律缠绕到芯模上，然后加热或常温下固化成制品的方法。适用于管状和罐状成型品。



图12.24 缠绕成型工艺示意图

2. 分类

干法缠绕： 预浸纱 → 加热软化 → 缠绕

湿法缠绕： 纤维纱 → 浸胶 → 缠绕

半干法缠绕： 纤维纱 → 浸胶 → 烘干 → 缠绕

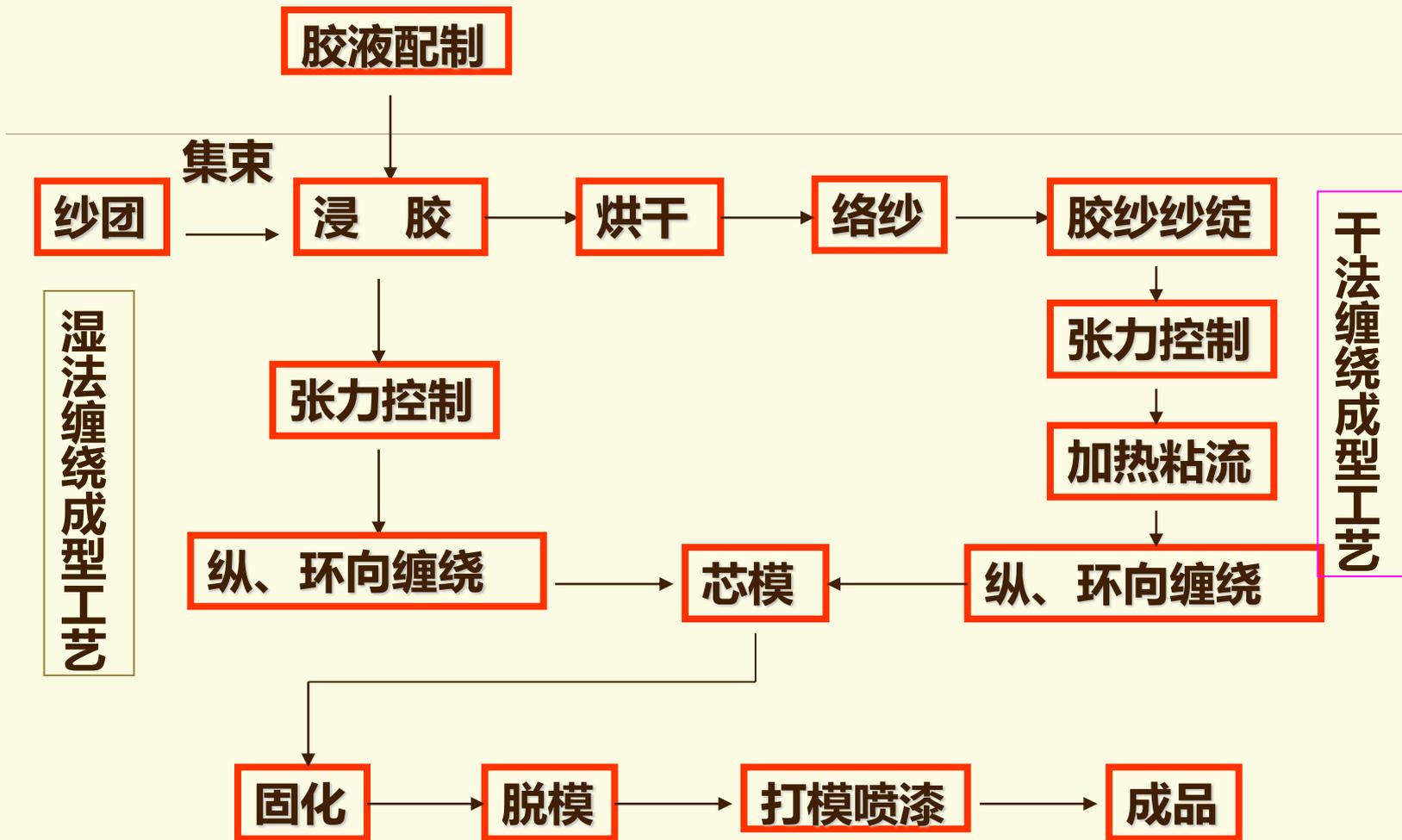


图12.25 缠绕成型工艺流程图

3. 缠绕规律（导丝头与芯模之间相对运动的规律）

1) 环向缠绕：

芯模每转一周，丝束沿芯模轴向移动一个纱片螺距。
只缠绕筒身段，承受径向载荷

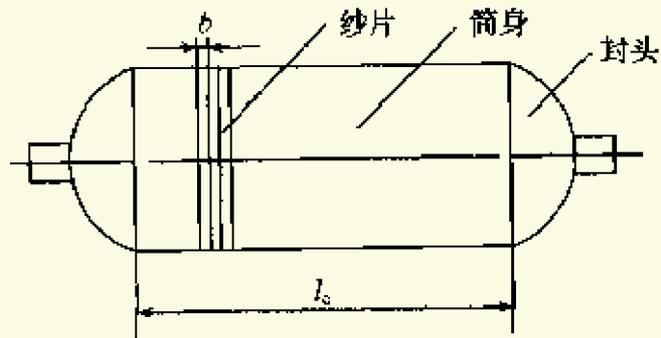


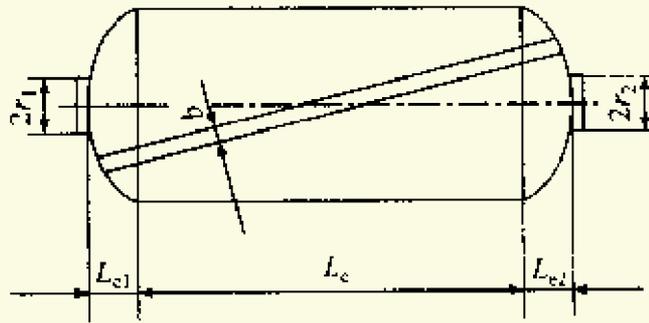
图12.26 环向缠绕成型示意图



图12.27 环向缠绕成型制品

2) 纵向缠绕 (平面缠绕) :

导丝头绕轴转一周, 芯模转动一个角度, 芯模表面转动一个纱片宽度。 承受纵向载荷

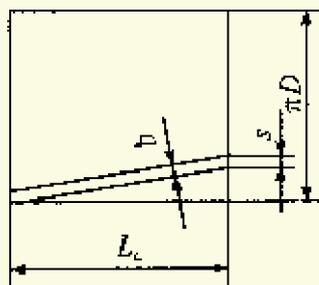
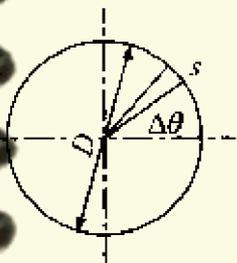


$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_1 + r_2}{L_1 + L_0 + L_2} \quad r_1 = r_2 \quad L_1 = L_2 \quad \frac{2r}{L_0 + 2L}$$

α : 缠绕角

r 为极孔半径; L_0 为筒身长度;
 L_1, L_2 为封头高度

2) 纵向缠绕



$$S = \frac{b}{\cos \alpha}$$

$$\Delta\theta = \frac{S}{\pi D} \cdot 360^\circ$$

$$i = \frac{\Delta\theta}{360^\circ}$$

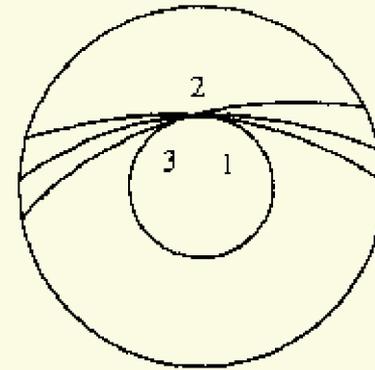
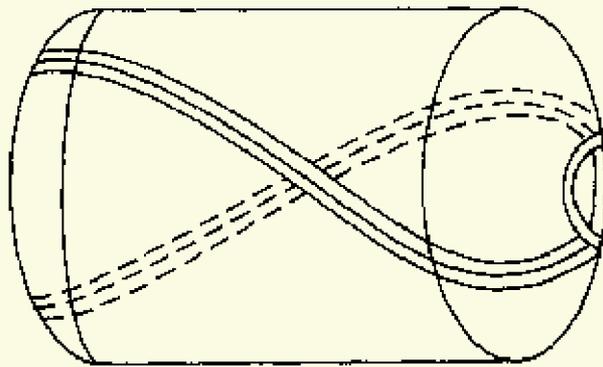
$$i = \frac{S}{\pi D} = \frac{b}{\pi D \cos \alpha}$$

转速比*i*: 单位时间内, 芯模转数与导丝头转数之比

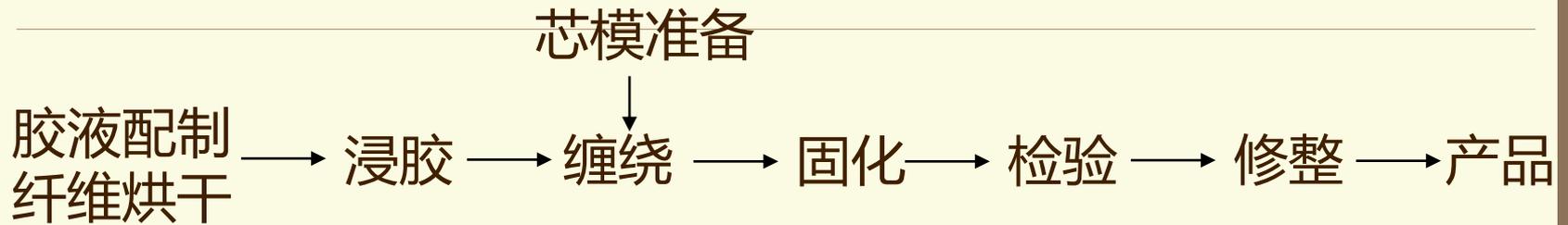
3) 螺旋缠绕 (测地线缠绕)

芯模绕轴匀速转动，导丝头沿芯模轴向往返运动。

缠绕筒身和封头



4. 工艺过程（湿法）



5. 工艺特点

- 1) 纤维能保持连续完整，制品强度高
- 2) 可连续化、机械化生产，生产周期短，劳动强度小
- 3) 产品尺寸、外形准确，不需机械加工
- 4) 设备复杂，技术难度大，工艺质量不易控制

缠绕成型实例：新型燃料电池汽车用高压氢瓶

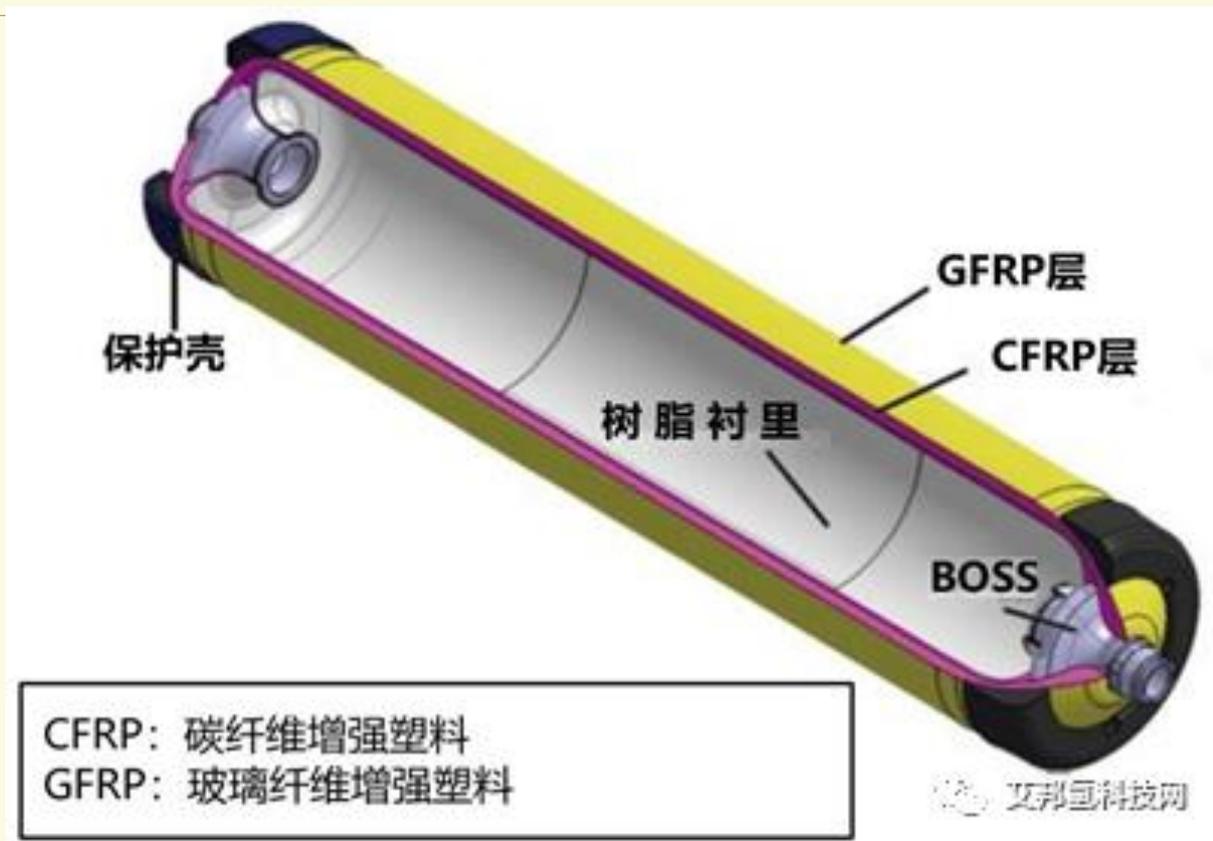


图12.28 高压氢瓶的结构

采用三维编织/缠绕共挤出一体化的热塑性碳纤

维复合材料制造出V型高压氢瓶，其主要特点有：

- (1) 无内胆
- (2) 耐高温 (460度)
- (3) 耐高压 (>125MPa)
- (4) 耐腐蚀 (防止氢脆性)
- (5) 数字化加工技术及自动化设备

第二代车载高压储氢系统的氢瓶碳纤维强度比第一代

提高了4%，CRRP主要特点体现在容积效率

(Volume Efficiency) 的提高、最大程度提高了储氢量、衬里的优化、氢瓶温度分布的优化。

通过采用CF，在不影响抗压强度的同时，减少了7%的CFRP层壁厚数，从而实现了目前世界上最高储氢瓶容积效率。作为单体容器，比上一代产品的质量效率提高了5% (图12.29)

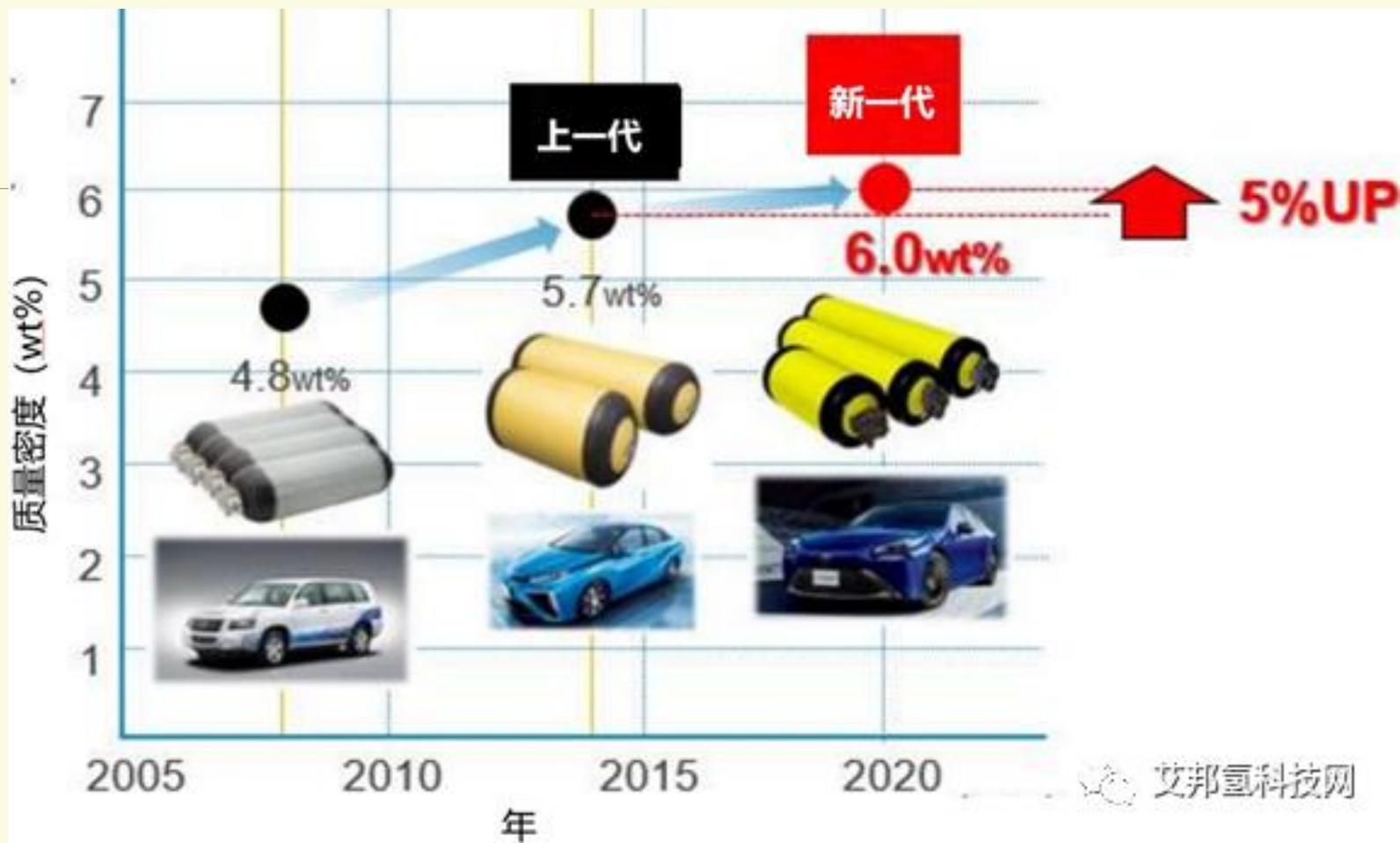


图12.29 高压氢瓶质量密度的变迁
 (质量密度=氢气质量/氢瓶总质量)

新一代的高压储氢罐的轻量化瞄准的是中层。

中层采用的是对含浸了树脂的碳纤施加张力使之卷起层叠的纤维缠绕（Filamentwinding）工艺。

缠绕方法有强化筒部的环向缠绕、强化边缘的高角度螺旋缠绕和强化底部的低角度螺旋缠绕三种，三种方式均减少了缠绕圈数。

环向缠绕通过使高应力区集中在内层来确保强度，减少了缠绕的总圈数。

高角度螺旋缠绕通过改变塑料衬里的形状，减少了向筒部缠绕圈数，在筒部辅以环向缠绕。

低角度螺旋缠绕通过减小管底的开口部，减小了表面压力，从而降低了用量。

通过削减这三种方式的缠绕圈数，使CFRP的用量比原来减少了40%。

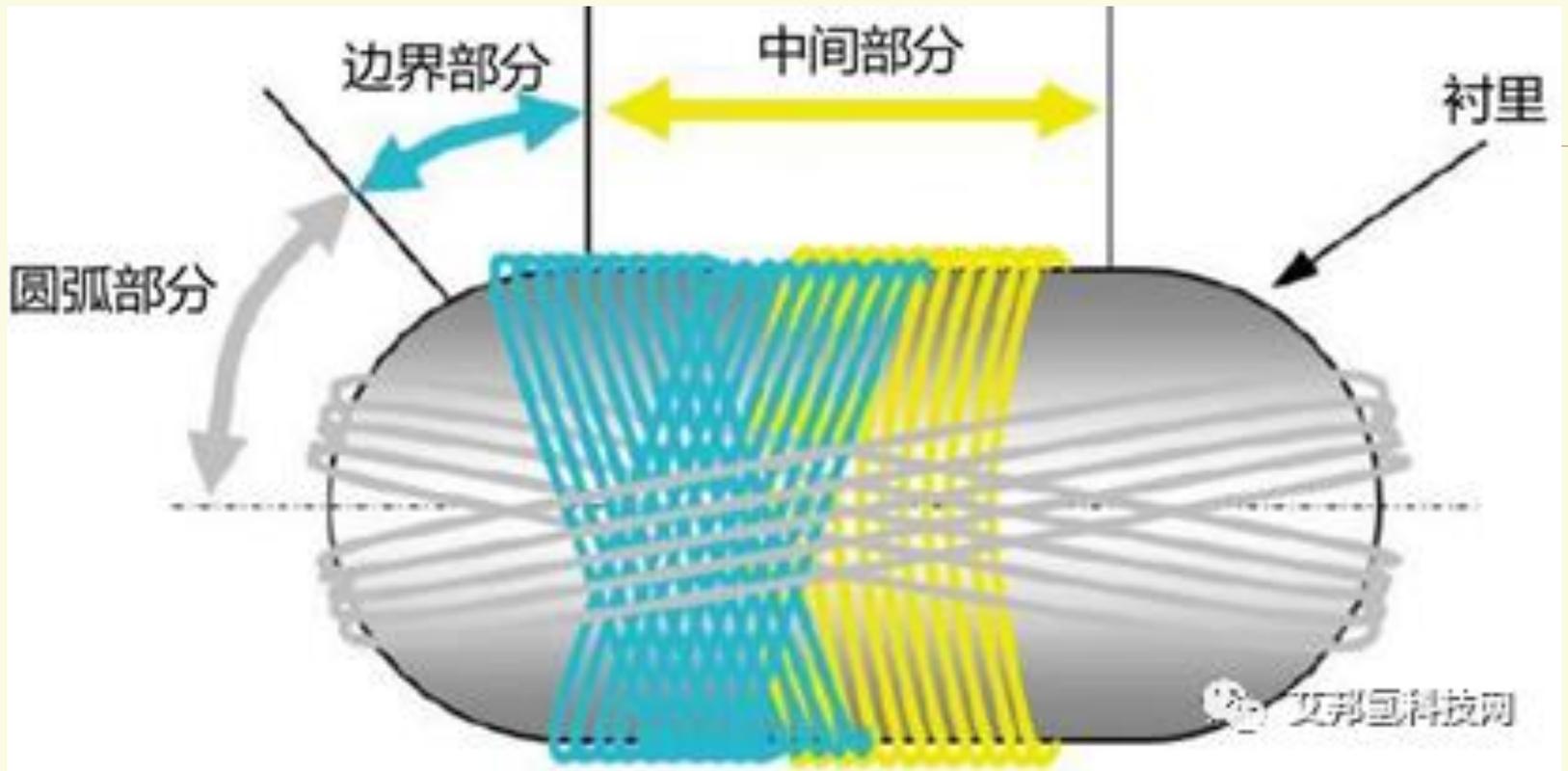


图12.30 高压氢瓶的缠绕方式

车载高压氢瓶的生产过程

高压氢瓶主要包括衬里加工、纤维缠绕成型、检查检验这三个总体过程，这三个过程依次完成。

其中衬里加工过程里包括对衬里的注塑成型与红外焊接，

纤维缠绕成型过程里包括纤维缠绕和固化，

检查检验过程包括对高压氢瓶进行水压测试和气密性测试。

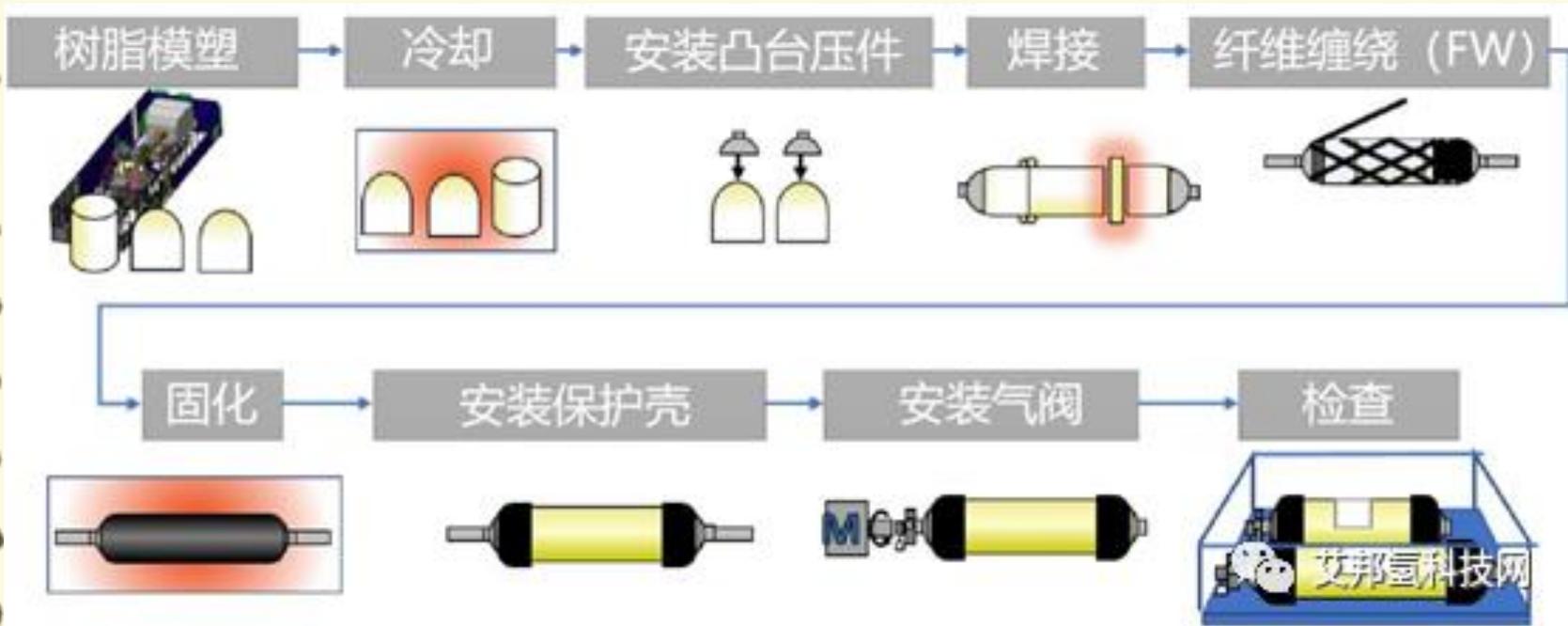


图12.31 高压氢瓶的制作工艺流程

碳纤维辊

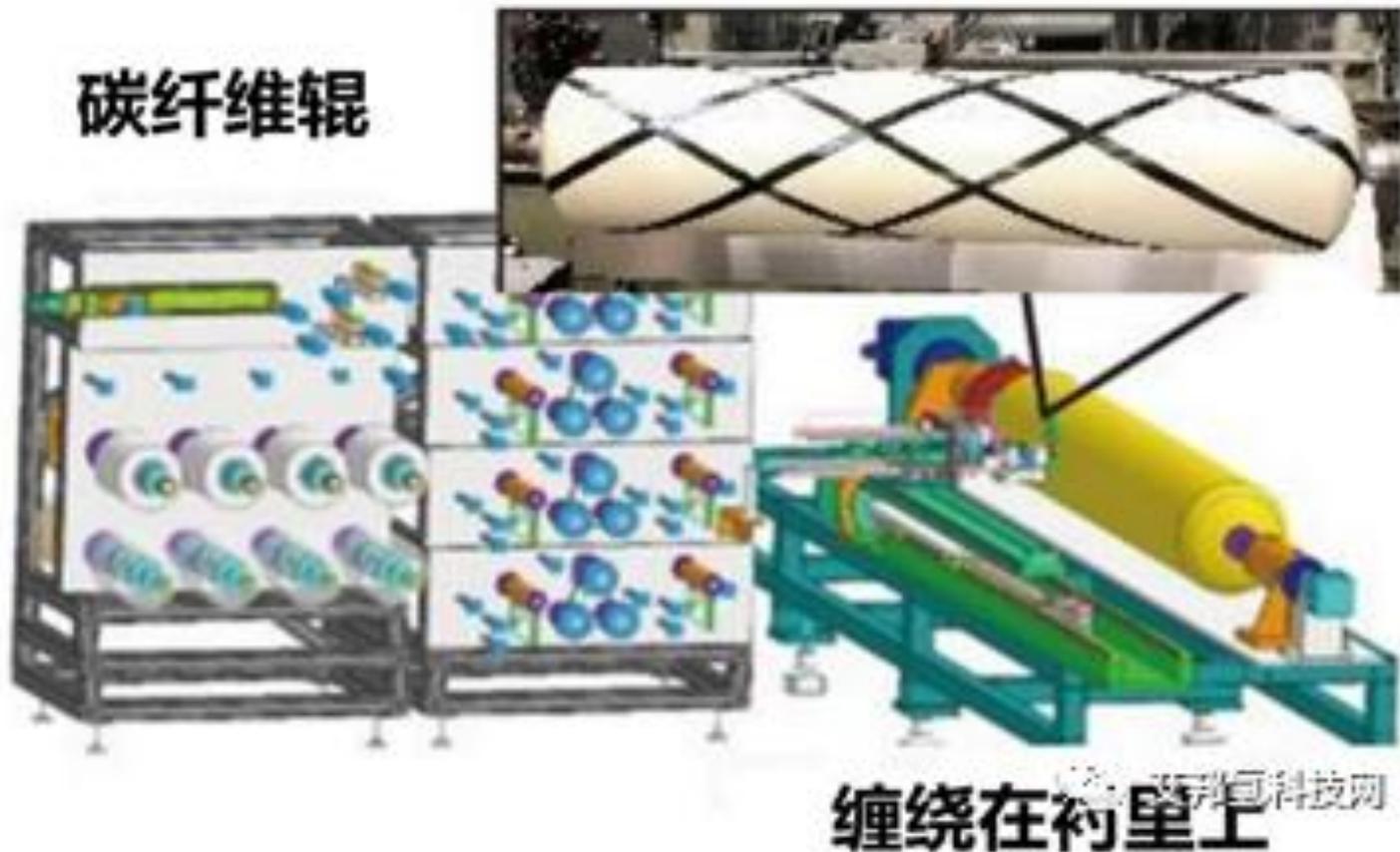


图12.32 高压氢瓶的纤维缠绕设备示意图

高压氢瓶在对低强度塑料衬里施加压力的同时，缠绕约3500米的碳纤维，以此保证了高压氢瓶的强度。

在新一代氢瓶生产中采用了**对纤维缠绕成像并进行图像处理的技术**，每一层纤维缠绕的质量检测可不不需要停止设备运转由自动完成。

如在低角度螺旋缠绕的氢瓶圆顶区域使用**激光变位测试仪**进行形状测定，利用叠层前后的形状差分算出。

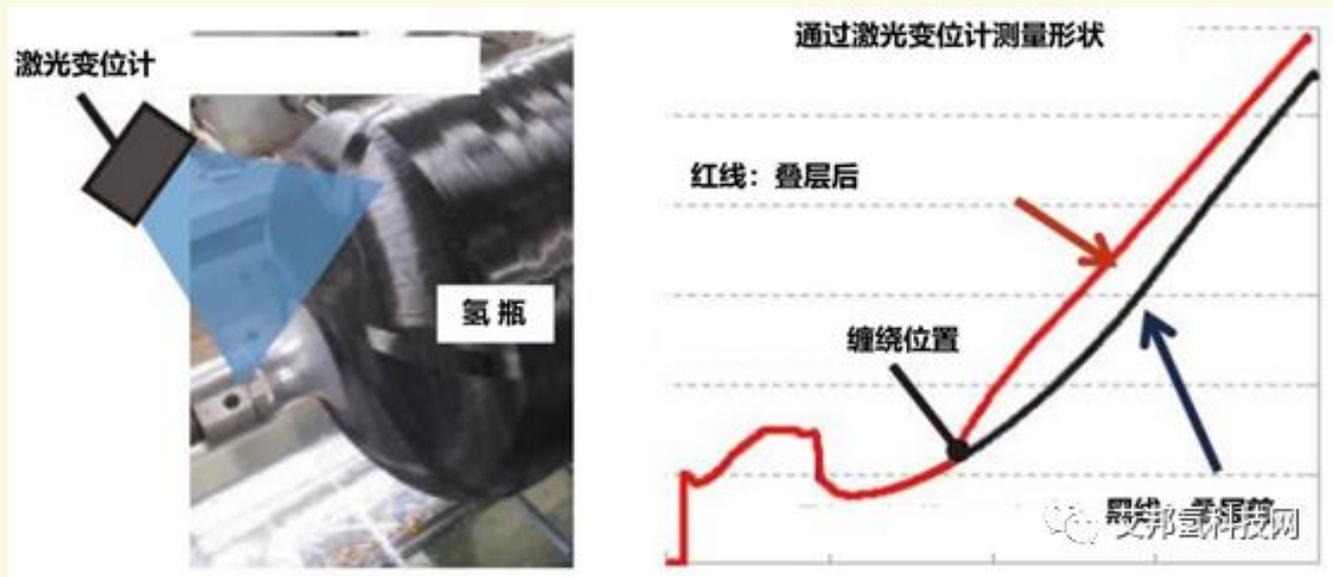


图12.33 低角度螺旋缠绕区域测量

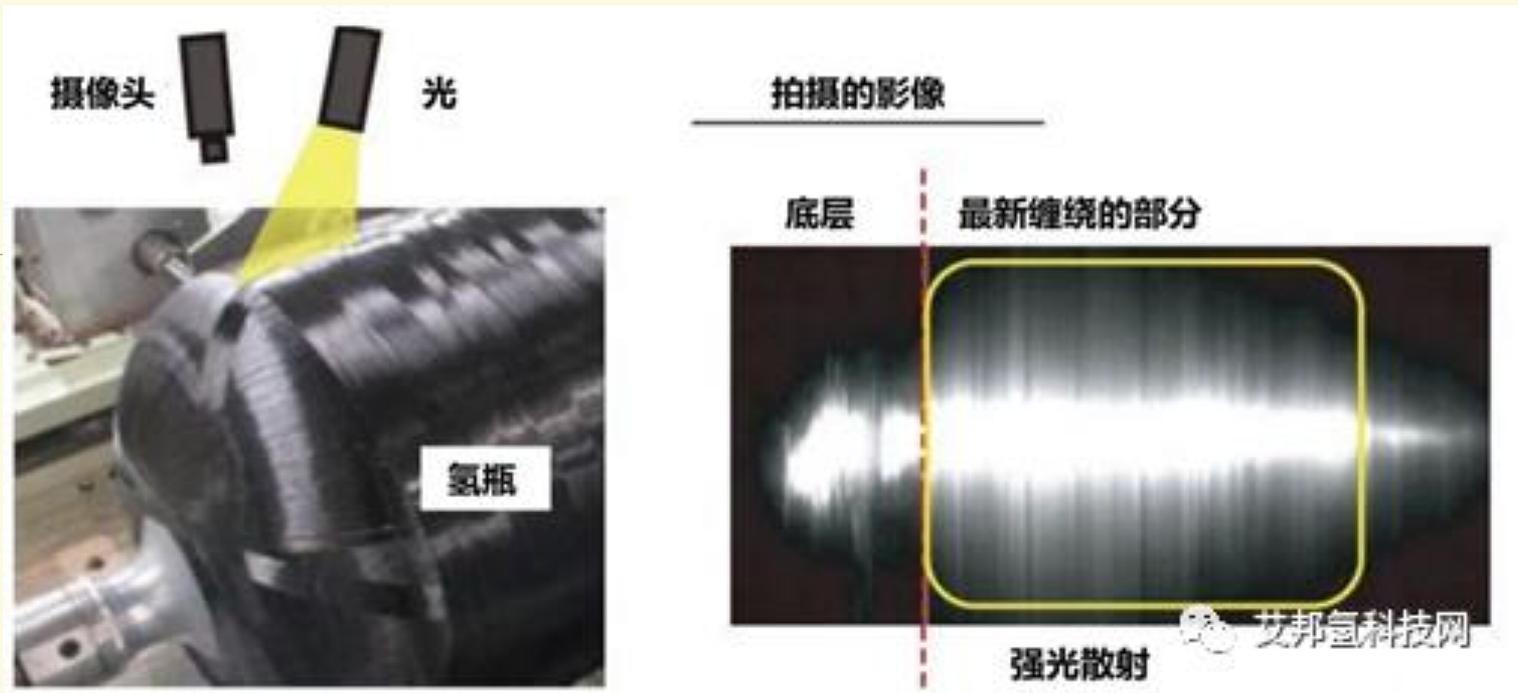


图12.34 环形缠绕区域的测量

在环形缠绕的氢瓶中间区域**使用强光照射**，基于强光散射图像进行判断，可以发现纤维里层和新缠绕的纤维层呈现出不同的光线散射图像。

自动检测技术的开发使得检测时间削减了90%。

12.7 拉挤成型

也称为拉拔成型，是将浸渍液态树脂的纤维引入和穿过模具，对其加热固化的连续成型法。

适用于杆状、管状等具有一定截面形状的成型品。

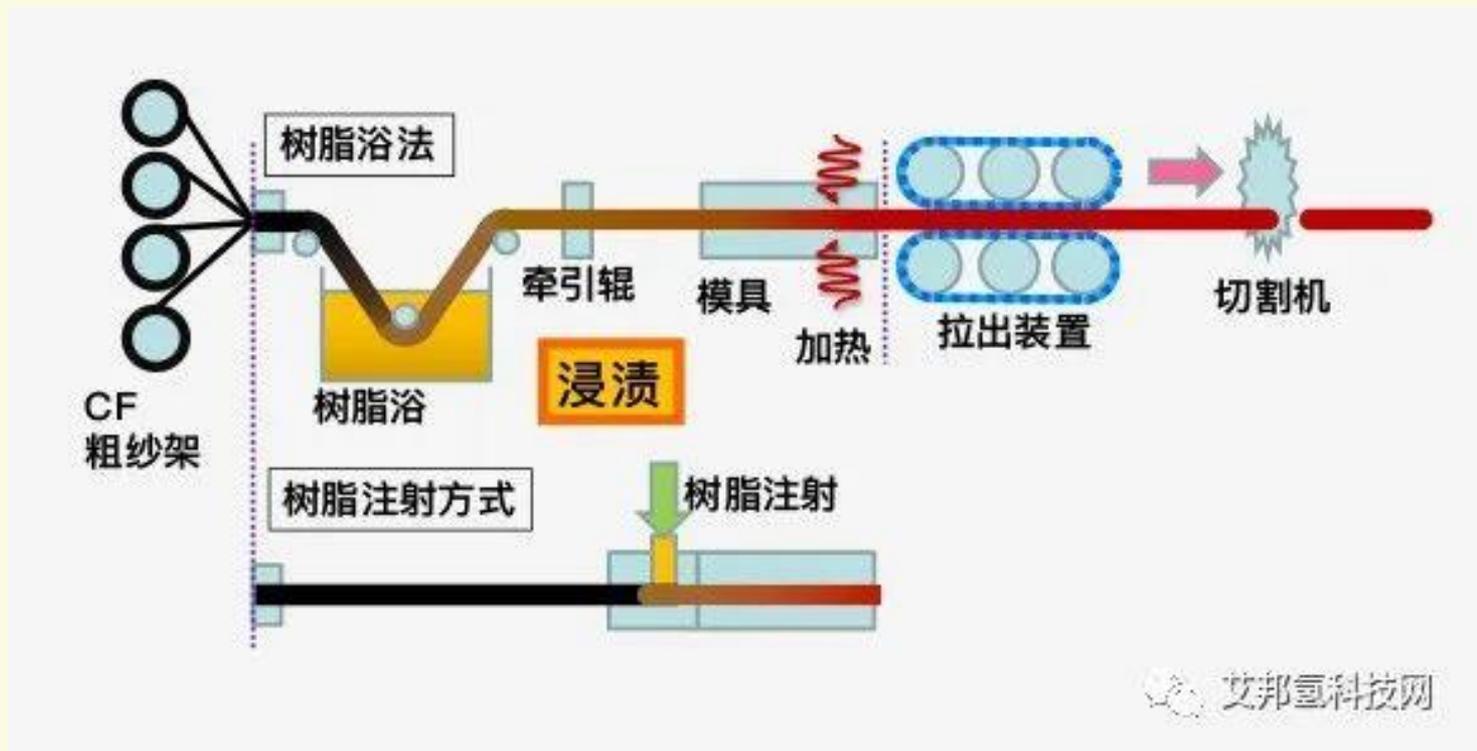
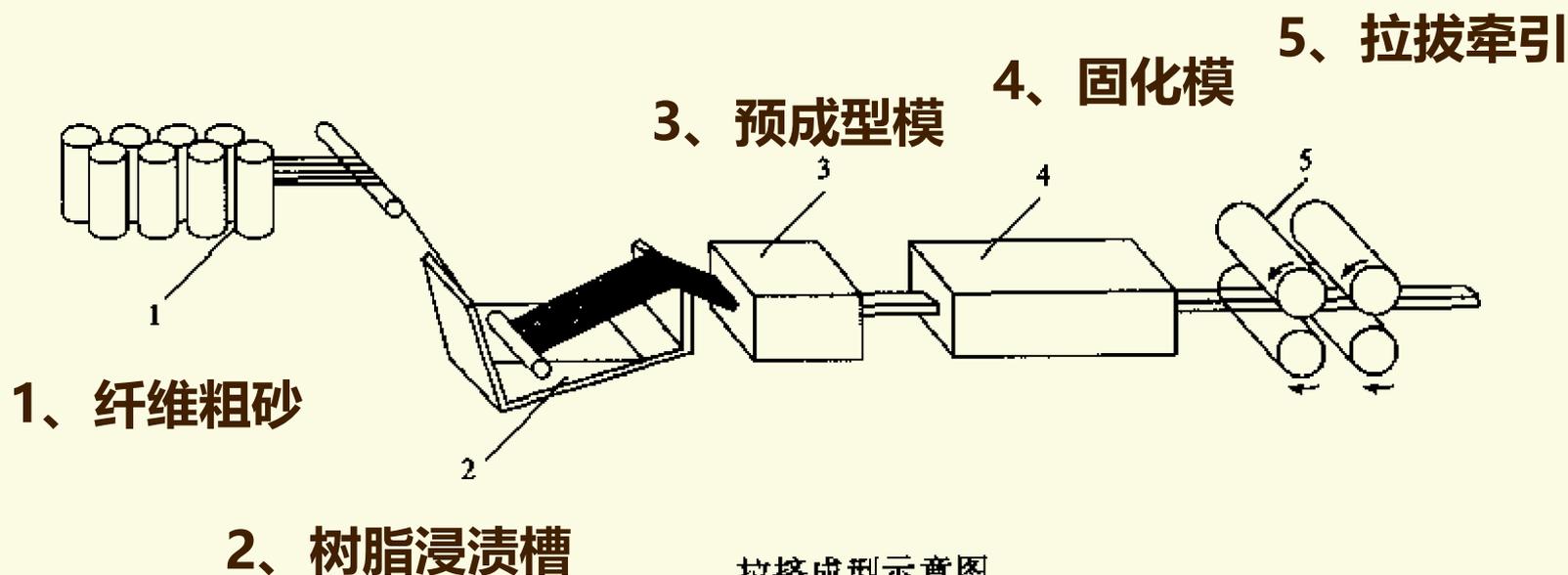


图12.35 拉挤成型示意图



图12.36 拉挤成型制品

1. 工艺过程



2. 原材料

树脂：不饱和聚酯树脂、乙烯基树脂、环氧树脂、ABS、PA、PC

纤维：无捻玻纤初纱、连续纤维毡、碳纤、芳纤、双向或三向织物

3. 型材类型

工字形、槽形、角形、异型截面

4. 工艺特点

- ①连续成型，制品长度不受限制；
- ②产品纵向力学性能突出，产品性能稳定；
- ③制造成本低，自动化程度高，生产效率高

12.8 离心法成型

将纤维和树脂置于旋转模内表面，借助模具转动的离心力将物料压紧，并排除其中的空气，固化后得到产品。

特点

产品厚度均匀，外表光洁。

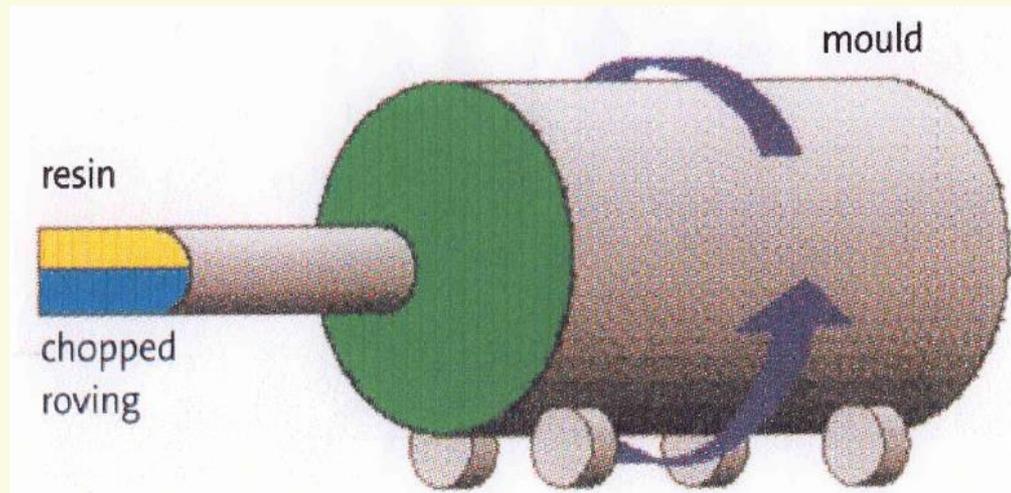


图12.37 离心法成型示意图

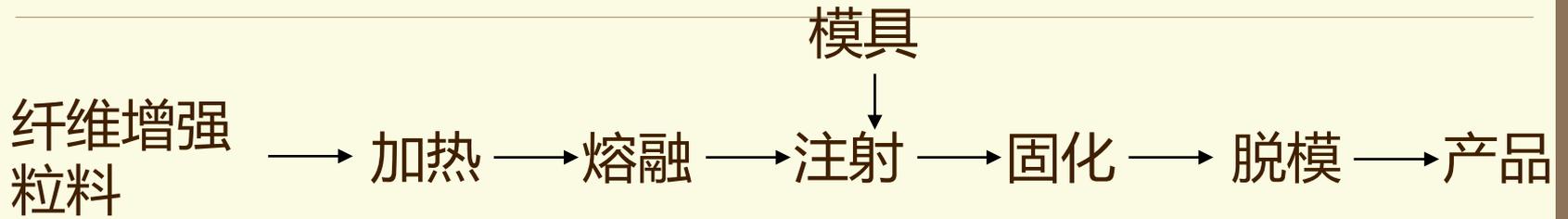
12.9 注射成型

也称为注塑成型，是将碳纤维增强热塑性树脂原料(粒料)进行加热熔融，并注射到模具腔的成型方法，是一种适用于短周期、复杂形状成型的成型方法。



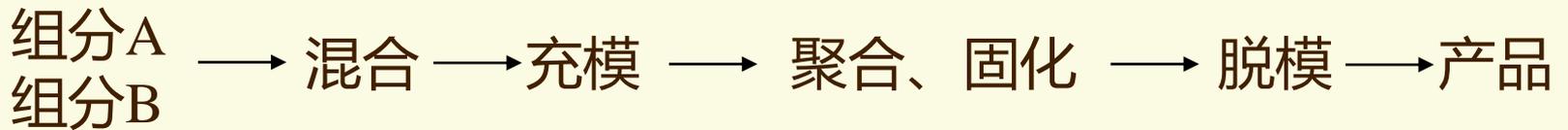
图12.38 注射成型示意图

1. 工艺过程



2. 方法

反应注射成型



增强反应注射成型

