

第七章

RTM成型



第一节 定义及发展史

RTM（树脂传递模塑）是将液态热固性树脂及固化剂，由计量设备分别从储桶内抽出，经静态混合器混合均匀，注入事先铺有玻璃纤维增强材料的密封模内，经固化、脱模、后加工而成制品的工艺。



RTM最早起源于1940年的MARCO法。在欧洲，由于最初的RTM虽然成本低但技术要求高，特别是对原材料及模具要求高，所以发展缓慢。直到1985年，以缩短成型周期、提高表面平滑性和质量稳定性为目标的第二代RTM加工法得以公开。



据国外专家估计，RTM成型工艺将成为21世纪初玻璃钢/复合材料行业的主导成型工艺之一。这种工艺可以取代手糊成型、喷射成型，而且可部分取代SMC、块状模塑料（BMC）成型工艺。



我国的RTM工艺起步较晚，80年代开始引进RTM工艺和设备。但RTM制品产量很低，投入生产者不多，设备利用率低。而且我国的RTM预成型坯制造技术、RTM模具技术、RTM用低粘度树脂等方面还在研究中。



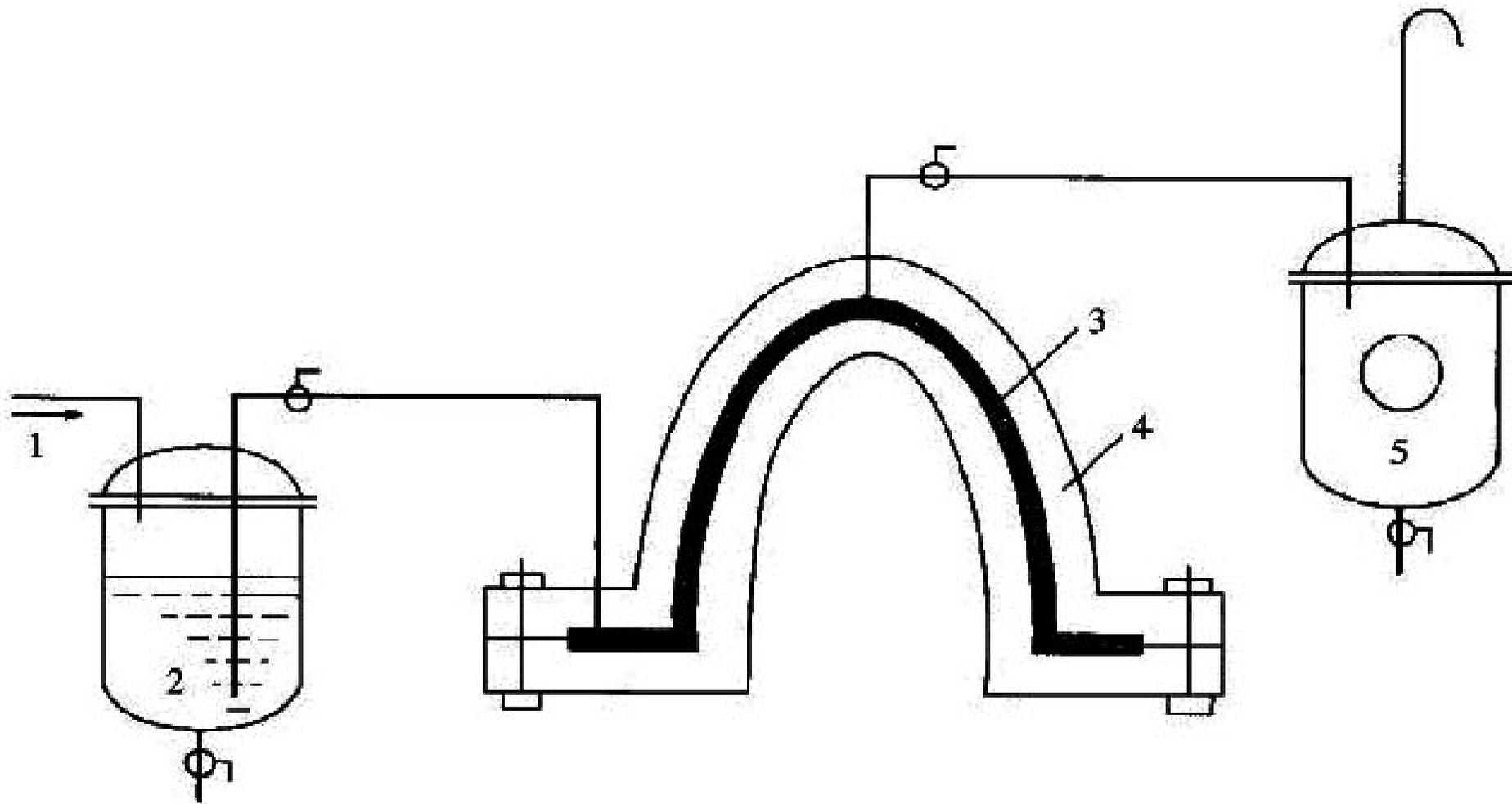


图2-16 RTM成型工艺示意图

1压缩空气；2树脂罐；3制品；4模具；5树脂接受器



第二节 RTM的特点及应用

特点：

- ①具有无需胶衣涂层即可为构件提供双面光滑表面的能力；
- ②能制造出具有良好的表面品质的、高精度的复杂构件；
- ③产品成型后只需做小的修边；
- ④模具制造与材料选择机动性强，不需要庞大的、复杂的成型设备就可以制造出复杂的大型构件，设备和模具的投资少；



- ⑤空隙率低（0~0.2%）；
- ⑥纤维含量高；
- ⑦便于使用计算机辅助设计进行模具和产品设计；
- ⑧模塑的构件易于实现局部增强，并可方便制造含嵌件和局部加厚构件；
- ⑨成型过程中散发的挥发性物质很少，有利于身体健康和环境保护。



第三节 原材料和设备

1.增强材料

(1).RTM对增强材料的要求（增强材料的选择原则）

①铺覆性好。即增强材料在无褶皱、不断裂和不撕裂的情况下，能够容易地制成与工件相同的形状。

②质量均匀性好。



- ③容积压缩系数要大。
- ④耐冲刷性好。即增强材料在树脂注入时，能够较好地保持其原有的位置。
- ⑤对树脂流动阻力小，机械强度高。



(2).增强材料的种类

- ①片状增强材料：短切纤维毡，切断加粘结剂成型为毡状物；连续纤维毡不切断加粘结剂制成毡状物；或把纤维粗纱直接编织成成品。
- ②预成型坯：短切纤维毡预成型坯，连续纤维预成型坯，三维编织物，组合预成型坯。
- ③特殊纤维增强制品：碳纤维、芳纶纤维、聚酯纤维、维尼纶纤维等制成的片状或预成型坯。



表7-1为各种增强材料的综合性能比较

表7-1为各种增强材料的综合性能比较

增强材料	浸润性	充模性	FRP强度	FRP韧性	成本
连续毡	好	好	较高	一般	高
复合毡	好	一般	极高	好	较低
方格布	差	差	一般	较好	低



连续玻璃纤维毡，具有很强的耐冲刷能力，良好的树脂浸润性，良好的充模性能。目前在RTM中应用最多。

玻璃纤维复合毡，各层间用线针织制成，具有连接牢固，更好的耐树脂冲刷性能。又因为没有粘结剂，经纬相交的纤维间无粘结点，具有更好的树脂浸润性，并且它可以通过剪裁



直接制成RTM预成型件，使工艺过程时间缩短，操作方便，效率质量高。方格布，由于纱束密，交点多，工艺工程常出现被树脂冲动和起皱，树脂浸润性较差，一般与毡结合制成预成型坯使用。



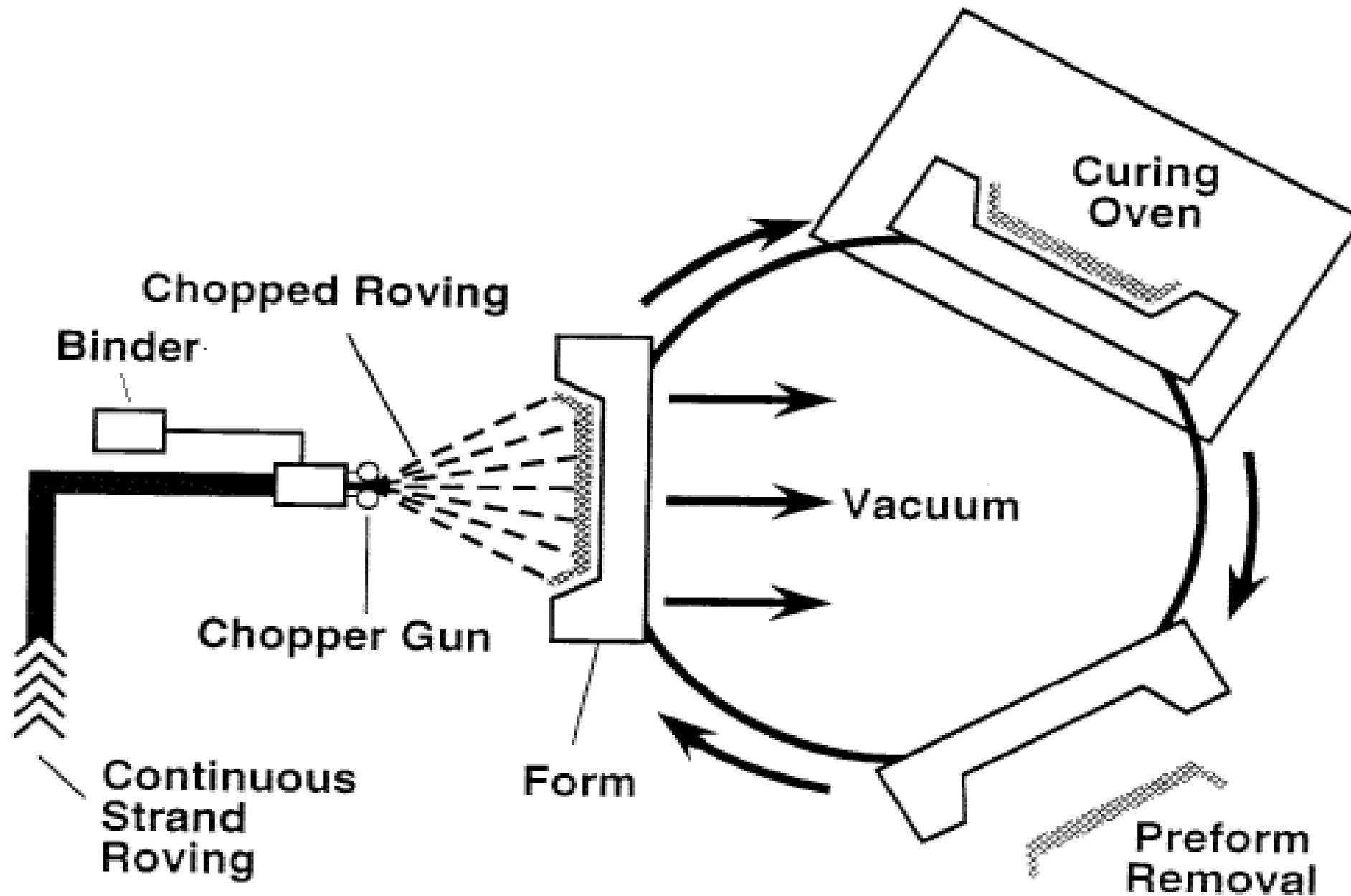


图7-1 基体增强示意图



2.树脂基体

树脂应满足的要求：

- ①室温或工作温度下具有较低的粘度（ $0.5\sim 1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ ），对增强材料浸润性好。能顺利地，均匀地通过模腔，浸透纤维，快速充满整个型腔。
- ②固化放热低（ $80\sim 130^\circ\text{C}$ ），防止损伤玻璃钢模具。



- ③固化时间短，一般凝胶时间为5~30min，固化时间不超过60min。
- ④树脂固化收缩率小。
- ⑤固化时无低分子物析出，气泡能自身消除。



下表7-2为Norpol42-10树脂的性能

表7-2为Norpol42-10树脂的性能

性能	纯树脂	玻纤毡强度		性能	纯树脂	玻纤毡强度	
纤维含量 (重量) /%		25—30	35—40	纤维含量 (重 量) /%	140	155	215
拉伸强度/ MPa	70	110	160	拉伸强度/MPa	3.6	7.2	10
拉伸模量/G Pa	3.7	8.0	10.3	拉伸模量/GPa	12		
断裂伸长率 /%	3.5	2.0	2.2	断裂伸长率/%	67		



表7-3为Disitron树脂的性能

表7-3为Disitron树脂的性能

性能	DS.21182	DS.441	性能	DS.21182	DS.441
粘度 (25°C) /mPa.s	700	450	I拉伸模量/G Pa	3.8	3,6
单体含量/%	39	35	断裂伸长率 /%	2.5	3
凝胶时间 (75°C) /s	170	210	弯曲强度/M Pa	100	130
热变形温度 /°C	95	75	弯曲模量/G Pa	3.7	3.8
拉伸强度/M Pa	60	70			



表7-4为复合材料性能

表7-4为复合材料性能

性能	数据	性能	数据
硬度Barcol	934.1	冲击强度/(kJ/m^2)	51
弯曲强度/MPa	177	密度/ (g/cm^3)	1.51
弯曲模量/GPa	6.2	玻纤含量/%	22
拉伸强度/MPa	69		



3.设备

RTM成型用设备通常可分为三大部分：控制树脂部分（RTM成型机，注射机）、压机和模具。

(1).RTM成型机是RTM工艺中的关键工艺设备。可分为：单组分式、双组分加压式、双组分泵式、加催化剂泵式四种。现在批量生产的主要采用加催化剂泵式。

(2).压机：作用是控制模具的打开、闭合，使注射时模具关闭紧密。



这些成型机基本特征：①注射量从每几分钟几克到45kg，每分钟输送树脂的能力跨度很大；②注塑机可操作多种树脂体系：聚酯、环氧、聚氨酯、甲基丙烯酸树脂等。



(3).模具:

RTM成型对模具的一般要求:

- ①保证制品尺寸、形状的精度以及上、下模匹配的精度，使制品达到A级表面精度；
- ②具有夹紧和顶开上、下模的装置及制品脱模装置；
- ③具有足够高的强度和刚度，在50~150KPa的注射压力下不损坏，不变形；
- ④可通电加热，能经受一万次85~120℃热冲击的试验不开裂、不变形；



- ⑤具有合理的注射孔、流逆、排气孔、密封件，保证树脂充满模腔；
- ⑥使用寿命长，至少可安全生产3000只制品；
- ⑦上下模密封性能好，除制品边缘外模内树脂漏损率 $<1\%$ ，能排尽型内气泡；
- ⑧上下模之间的型腔空间均匀，确保设计制品的厚度；
- ⑨制造成本低。



第四节 RTM成型工艺过程

一.工艺流程



图7-2 RTM成型工艺流程图



在胶衣涂布和固化的工序中，由于膜厚的分散性为操作者的技能所左右，有时要机械手进行喷涂，对胶衣树脂的性能有很多要求，例如：即使令其快速固化也不应因均化不足而发生气泡（针孔），表面凹凸要少。进一步还要求固化时间不吻合也不应发生脱离现象。



在合模和夹紧模具工序中，根据所准备模具的结构，并适应模具尺寸、精度、锁模力、生产速度等。有的锁模机构设于模具自身内有的用外设的简单合模压机夹紧，形式多样。



合模压缩的程度因使用纤维增强材料的种类、形态、纤维含量而变化，对于短切纤维预成型坯，如果纤维含量为（体积）15%，则合模压力约为49—78kPa。需要注意的是，该合模压力由于始终没有考虑预成型纤维毡内单重分散性，所以与合模压机的设定无关。



在树脂注入和固化的工序中，如果注入时间等于固化时间那是最理想的，但不言而喻这是不可能的。RTM的成型周期可根据预成型制品所要求的产量而适当设定，但由于一套模具的成型周期内树脂固化时间所占比例很高，所以要充分考虑注入树脂的固化时间和固化特性。



二.成型周期

从成型周期这一点看，如果采用以往的玻璃钢成型模具进行生产，模具占有时间约为150min（第一代），第二代模具约占时间30min，成型模具为镍电铸模。最近，正向第三代技术水平转移，生产规模与SMC相匹敌（模具占有时间约为3min），所成型制品的可靠性高。



三.影响RTM工艺的因素：（压力、注胶速度、注胶温度）

(1).压力：它的高低决定模具材料的要求和结构设计，以及需要的合模力。为降低压力可采取降低树脂粘度、降低注胶速度，设计合适的注胶和排气口，设适当的纤维排布计。高的压力需要高强度、高刚度的模具和大的合模力。如果高的注胶压力与低的模具刚度结合，制造出的制件就要超差。



(2).注胶速度：取决于树脂对纤维的浸润性和树脂的表面张力及粘度。充模越快效率越高，但树脂对纤维的完全浸渍需要一定的时间和压力，较慢的充模，有助于改善RTM的微观流动状况，但却降低生产效率，这对矛盾是现在研究的热点。



(3).注胶温度：注胶温度取决于树脂体系的活性期和最小粘度温度。在不至太大缩短树脂凝胶时间的前提下，为了使树脂在最小的压力下使纤维获得足够浸润，注胶温度应尽量接近最小树脂粘度的温度。过高的温度会缩短树脂的工作期。



为使压力降低，使纤维充分浸润，注射温度尽量接近树脂最小粘度的温度。温度过高，会缩短树脂的工作期；温度过低，会使树脂粘度增大，而使压力过高，也阻碍树脂渗入纤维的能力。较高的温度会使树脂表面张力降低，使纤维床中的空气受热上升，因而有利于气泡的排出。



四.真空辅助RTM工艺

为了使注射时改善模具型腔内树脂的流动性、浸渍性，更好的排除气泡，出现了腔内抽真空，再用注射剂注入树脂，或者仅靠型腔真空造成的内外压力差注入树脂的工艺，这两种方法基本原理和RTM工艺是一致的，使用范围也是类似的。



一般RTM工艺在树脂注入时，模具型腔内可积起几吨压力。通过使用真空，模具内形成这种压力的趋势得到减少，因而增加了使用更轻的模具的可能性。真空的使用也可提高玻璃纤维堆树脂的比率，使注入模具型腔内物料的纤维含量更高。真空还有助于树脂对纤维的浸渍。其工艺过程如下：



- (1) 各组分在各自的容器里加热，在686Pa真空度下搅拌3—4h，脱气泡；
- (2) 将模具型腔内抽真空，抽尽树脂里德气泡和纤维型坯里的水分，型腔内保持41.2Pa的真空度；
- (3) 注射前真空处理系统型腔内的真空度降到137Pa，并一直保持到注满型腔，以2.1—2.7MPa的压力将树脂注入型腔；
- (4) 型腔充满后真空度消失，在101kPa下型腔内的制品固化。



跟预浸料的制品相比，本工艺的制品的纤维含量高，空隙率低，可重复性好。例如：本工艺成型的直径38.11mm致密织物坯的制品里的纤维体积含量为66%—68%，累计空隙率为1.7%，而预浸料制品为5%—7%。



五.TERTM技术

在RTM工艺中还有一种独特的技术称为TERTM——热膨胀树脂传递模塑。使用聚氨酯、PVC、聚氨酯泡沫塑料等作为预成型坯的芯材。注射过程中树脂同时渗入芯材和预成型坯中，芯材在加热条件下发生膨胀，进而与纤维增强材料粘合，既减轻了重量有提高了强度。



到目前为止，TERTM技术产品包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、环氧树脂及混合材料所复合成的轻舟浆。另一种是向碳纤维带包容的聚氨酯泡沫编织的单向碳纤维管中注入环氧树脂所制的增强结构杆件。这些杆件可代替金属支架用于制造复合材料构件，具有理想的扭曲强度和良好的尺寸稳定性，并且膨胀系数低。



随着TERTM技术的发展，该技术目前已用于制造小型飞机机门，如Cessna206型飞机机门就是用该技术制造的。其优点在于提高强度、减轻重量、减低成本，可代替传统的铝合金材料。加拿大、美国、欧洲国家及日本和中国台湾省在该领域均有专利技术，处于领先水平。



六.树脂的加热方法

RTM工艺过程中对树脂的加热分为两步，一是注胶时加热，二是固化时加热。

1.树脂注胶加热

注胶过程中树脂的加热有两种：一是在材料容器、全部的泵送机构和模具内安放加热元件，实现树脂在容器内预热。并且在以后的全部工艺过程中保持这一温度；二是通过泵送机构连续往复循环已加热的物料。



二.树脂固化加热

1.直接加热法

将某种能（射频电、微波电）直接施加于树脂里，使树脂固化，例如：美国RP/C Machinery Corp将射频电能直接通到型腔内的树脂里，使树脂固化，这难度大、较先进，热效率高。目前，这种方法只处于研究试验阶段。



2.间接加热法

目前采用的热能由介质（如：热气、热水、油、蒸汽）携带，经模具背衬、型壳、型面传导到树脂里，使树脂固化。由于管路离型面较远，传导热较困难，因此加热速度慢，加热循环较长。要求模具材料的导热性好，模衬较平坦，以便铺设管路。



3.炉（釜）内整模加热法

物料充模后，将整个模具置于固化炉（或高压釜）内加热。热能经过模具传导到型腔内的树脂，致使树脂固化。要求模具材料导热性好，固化炉内容纳整个模具。如果炉大可同时加热多个模具，必须在固化炉外完成充模工作。本方法中热效率低，固化周期长。



4.含热激化催化剂聚酯薄膜技术

Lotus公司在真空模塑工艺（VPM）的基础上，利用含激化催化剂的聚酯薄膜取代液态聚酯，将上述薄膜覆盖普通预成型坯玻纤型坯，将型坯投入已加热的型腔中，闭模，薄膜熔化浸渍型坯，固化时间5min。此技术处于研究阶段。



第五节 应用

目前，RTM技术的应用已经覆盖了建筑、交通、电讯、卫生、航空航天等领域。

航空领域对树脂复合材料的要求较高，如：耐热性高、力学性能优异、制件精度高、性能分散性小。要达到如此高的要求用传统的成型工艺虽能实现，但制品成本高、生产效率低。而RTM技术制作高性能复合材料的方面具有明显的优越性，其在航空航天领域应用很广。



RTM工艺在汽车制造业中应用是非常广泛的。Tooling化学公司制造的汽车底盘保护板；北关工业使用CF/AF混织布成型汽车后稳定气翼和后支柱，卡车用导风板；日本的中国工业公司，整体成型安装用筋和凹台的汽车用前档泥板等等，都是用RTM工艺制造的。



RTM工艺制造的复合材料的应用覆盖了许多领域，美国Addax利用碳纤维和环氧树脂制造了工业水冷却塔驱动轴的旋翼叶和CAT扫描仪底盘板。Poicycle公司将环氧树脂用于与单向S-2G玻璃纤维复合的碳纤维编织管和芳纶纤维编织的套管，从而制成0.56m（22in）的自行车手柄。



本章结束

