



# 航空航天复合材料结构件 树脂传递模塑成形技术

Resin Transfer Moulding  
for Aerospace Structures

克鲁肯巴赫 (T. Kruckenberg) 编著  
(澳) 佩顿 (R. Paton)

李宏运 译

航空工业出版社

责任编辑：林佳毅

封面设计：王楠

ISBN 978-7-80243-289-5



9 787802 432895 >

定价：78.00元



# 航空航天复合材料结构件 树脂传递模塑成形技术

(澳) 克鲁肯巴赫 (T. Kruckenberg) 编著  
佩顿 (R. Paton)

李宏运 译

航空工业出版社  
北京

## 内 容 提 要

本书详细论述了航空航天用复合材料树脂模塑成形技术的原材料、预成形技术、工艺设备、成形工艺、工装模具、过程和质量控制、成本分析以及结构鉴定等方面的重要内容,包含了大量的工艺理论模型和工程应用实例,反映了国际上该领域的研究进展和应用水平,对我国航空航天低成本复合材料技术的发展具有重要的指导意义和借鉴价值,是从事相关复合材料技术研发、应用和生产的工程技术人员及高等院校师生的重要参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天复合材料结构件树脂传递模塑成形技术/  
(澳) 克鲁肯巴赫 (Kruckenberg, T.), (澳) 佩顿  
(Paton, R.) 编著; 李宏运译. —北京: 航空工业出版社,  
2009. 12

书名原文: Resin Transfer Moulding for Aerospace  
Structures

ISBN 978 - 7 - 80243 - 289 - 5

I. 航… II. ①克…②佩…③李… III. 航空材料: 树脂  
基复合材料—结构构件—传递成型: 塑料成型 IV. V258

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 220934 号

Translation from the English language edition:

“Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures” 1<sup>st</sup> edition, by T.

Kruckenberg&R. Paton; ISBN 978 - 0 - 412 - 73150 - 1

Copyright© 1998 Chapman and Hall,

as a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2008 - 5136

航空航天复合材料结构件树脂传递模塑成形技术

Hangkong Hangtian Fuhe Cailiao Jiegoujian Shuzhi Chuandi Mosu Chengxing Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2009 年 12 月第 1 版

2009 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 22.75 字数: 568 千字

印数: 1 - 2000

定价: 78.00 元

## 译者前言

树脂传递模塑技术 (RTM) 是复合材料低成本液体成形技术之一, 近年来在航空航天结构上的应用正在逐步增加。由于该技术易于实现结构的整体化、净尺寸和快速成形, 因而可以以较低的制造成本获得较高的减重效益, 该项技术已经在外国军机和民机结构上获得了成功的应用。目前我国的航空航天事业正在快速发展, 对先进复合材料尤其是低成本复合材料技术有着迫切的需求, 也正在积极开展这方面的研究工作, 迫切需要了解国际上该技术的发展现状。

《Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures》一书是由澳大利亚、美国和英国的大学、研究所和工业部门从事 RTM 研究和应用的专家编写的专著, 本书详细论述了航空航天用复合材料树脂模塑成形技术的原材料、预成形技术、工艺设备、成形工艺、工装模具、过程和质量控制、成本分析以及结构鉴定等重要内容, 包含了大量的工艺理论模型和工程应用实例, 反映了国际上该领域的研究进展和应用水平, 对我国航空航天低成本复合材料技术的发展具有重要的指导意义和借鉴价值, 是从事相关复合材料技术研发、应用和生产的工程技术人员及高等院校师生的重要参考书。

本书由中国航空工业集团公司北京航空材料研究院李宏运主持翻译和统校, 先进复合材料国防科技重点实验室的技术人员参加了翻译工作。其中第 1 章、第 14 章和词汇部分由李宏运翻译, 第 2 章由刘志真翻译, 第 3 章由刘志真和李晔翻译, 第 4 章由钟翔屿翻译, 第 5 章、第 8 章由李雪芹翻译, 第 6 章、第 13 章由张明翻译, 第 7 章由张尧州翻译, 第 9 章、第 10 章由安学锋翻译, 第 11 章由刘刚翻译, 第 12 章由唐邦铭翻译。

书中翻译不妥之处, 欢迎读者批评指正。

李宏运

2009 年 12 月

# 原版前言

首先，我们并不是树脂传递模塑（RTM）技术及其相关领域中处于世界领先地位的权威，因此，我们选择的办法是汇集 RTM 技术不同领域的专家在一起编写这本书，我们相信该书将成为 RTM 技术领域的一本重要的参考资料。希望这本由工业部门和科研单位专家共同编撰的图书能够成为 RTM 技术领域，特别是在高性能材料的应用领域最大和最综合的一本书。我们希望读者，不论是刚接触这个新领域的学生，还是在专业上正欲探寻新观点的资深专家能发现这是一本有用的书。以我们的经验，仅仅为了获得一个好的想法就值得去购买这本书。

不同类型的 RTM 技术正快速地趋于多样化，现在，其应用范围涵盖了从生物医学部件到建筑设施、体育项目、汽车和航空航天结构以及航海和民用的工程设施等。尽管 RTM 技术在其所有应用领域的基本成形原理几乎是相同的，但在不同领域的 RTM 技术的经济性方面还存在许多差异。因此，材料的优化，制件的设计和制造方法也不尽相同。

自本书编撰开始，编者知道有许多 RTM 技术领域的其他优秀的新书已经出版，我们所知道的许多书或者是优秀的课程介绍，或者是集中关注有大量应用的汽车领域。但是到目前为止，编者的经验和兴趣主要集中在 RTM 成形技术在航空航天领域的应用。同时我们相信，目前还欠缺一本关于 RTM 技术在航空航天领域应用的综合性的参考书。因此，相信这本书对所有对 RTM 技术感兴趣的人来说都是一本有价值的参考书，特别是在高性能材料的应用领域。

读者可能发现，本书中的每一章由不同的作者编写，部分章节的主题有一定程度的重叠。编者试图将这种重叠减少到最小化，但是，为了保证每章作者观点的逻辑性，一些重叠部分仍不可避免地被保留。但是我们相信，能够从每位作者在专业上的不同观点去认识这个主题的优势将超过由于这种内容上的重叠所带来的一些干扰。编者发现这些可选择的观点激发在 RTM 技术方面的思想和讨论能让我们对 RTM 技术理解得更为深入，我们希望读者也同样发现这些认识的不同观点，提供解决问题或工程应用中新的方法。

在许多书中，液态成形作为一个被普遍使用的词汇去描述树脂浸渗方法，如 RTM 等。在这本书中，RTM 被用作液态成形的缩写。

主编：Teresa M. Kruckenberg

先进复合材料结构合作研究中心

361 Milperra 路，Bankstown，NSW 2200，澳大利亚

副主编：Rowan Paton

先进复合材料结构合作研究中心

506 Lorimer 街，Fishermens Bend Vic3207，澳大利亚

1997 年 8 月 29

## 原版致谢

1992年，我应邀编写一本关于树脂传递模塑（RTM）技术方面的书，那时候我因忙于兼职研究生的学习而没有接受。不管怎样，编写一本关于RTM技术方面参考书的想法已经产生，后来我便从事了这一激动人心的工作。随着项目开展，这项工作进展迅速。在此，我非常感激Rowan Paton先生答应作为副主编。没有他的贡献，就不会有像现在这样优秀的一本书，甚至其出版可能被严重推迟。

关于词汇表，特别是和RTM技术相关的新术语，是由许多作者通过密切的合作并参考其他资料来源共同定义和达成一致的。John Curiskis博士（高级讲师，New South Wales大学，纺织技术学院）和Michael Bannister博士（先进复合材料结构合作研究中心（CRC-ACS））共同编撰关于纺织定义的词汇表。其他定义的资料来源于Tubbs编辑的《名词和定义》第九版（纺织研究院，曼彻斯特，1991）和《工程材料手册》第一卷中的复合材料部分（ASM国际，Metals Park, OH, 1987），我们将感谢每一位对词汇部分作出贡献的人。

同样，我们也要感谢CRC-ACS的主任Gordon Long博士对本书编写工作的支持以及副主任Stuart Dutton对于本书不同章节之间编辑的大力帮助。

# 目 录

<b>第 1 章 树脂传递模塑简介</b> .....	( 1 )
1.1 前言 .....	( 1 )
1.1.1 RTM 技术是否是一种新工艺 .....	( 2 )
1.1.2 应用 RTM 技术的原因 .....	( 2 )
1.1.3 RTM 技术的基本原理和要求 .....	( 3 )
1.1.4 RTM 技术开发工作要点 .....	( 8 )
1.1.5 树脂传递模塑 (RTM) 技术与树脂膜渗透 (RFI) 技术的比较 .....	( 8 )
1.2 RTM 工艺和 RFI 工艺的发展现状和趋势 .....	( 9 )
1.2.1 应用与研发实例 .....	( 10 )
1.2.2 RTM 复合材料在航空航天领域应用展望 .....	( 13 )
<b>第 2 章 注射设备</b> .....	( 16 )
2.1 前言 .....	( 16 )
2.2 选择时的考虑因素 .....	( 16 )
2.2.1 制造厂商的选择 .....	( 16 )
2.2.2 设备使用因素 .....	( 17 )
2.3 树脂在 RTM 传输过程中的基本原理 .....	( 18 )
2.3.1 基本单元 .....	( 18 )
2.3.2 附加功能和选配 .....	( 21 )
2.3.3 恒压和恒流 .....	( 24 )
2.4 结论 .....	( 26 )
<b>第 3 章 材料</b> .....	( 29 )
3.1 树脂 .....	( 29 )
3.1.1 背景: 热塑性和热固性材料 .....	( 30 )
3.1.2 树脂传递模塑工艺工程: RTM 反应过程中的化学和物理作用 .....	( 32 )
3.1.3 韧性复合材料: 韧性树脂及复合材料结构 .....	( 35 )
3.1.4 环氧树脂体系 .....	( 36 )
3.1.5 酚醛热固性材料 .....	( 39 )
3.1.6 氰酸树脂 .....	( 40 )
3.1.7 双马树脂 .....	( 41 )
3.2 纤维增强体 .....	( 42 )
3.2.1 纤维增强材料 .....	( 43 )



3.2.2	集束纤维:束、纱线和织物 .....	( 48 )
3.2.3	浆料、上浆剂和涂料 .....	( 48 )
3.3	结论 .....	( 48 )
<b>第4章</b>	<b>先进增强体</b> .....	( 55 )
4.1	简介 .....	( 55 )
4.2	缝合 .....	( 56 )
4.3	机织 .....	( 60 )
4.4	编织 .....	( 63 )
4.5	针织 .....	( 66 )
4.6	非弯折织物 .....	( 67 )
4.7	结论 .....	( 69 )
<b>第5章</b>	<b>织物铺覆模拟与预成形体设计</b> .....	( 73 )
5.1	引言 .....	( 73 )
5.2	织物变形的基本原理 .....	( 74 )
5.2.1	变形机制 .....	( 74 )
5.2.2	试验描述 .....	( 75 )
5.3	动力学铺覆模型 .....	( 78 )
5.3.1	假设 .....	( 78 )
5.3.2	基本方程 .....	( 79 )
5.3.3	铺覆算法 .....	( 80 )
5.3.4	实例 .....	( 81 )
5.4	铺覆模型验证 .....	( 84 )
5.4.1	纤维体积分数变化 .....	( 84 )
5.4.2	自动应变分析 .....	( 84 )
5.5	对成形过程和性能的影响 .....	( 87 )
5.5.1	浸渍性能 .....	( 87 )
5.5.2	力学性能 .....	( 91 )
5.6	讨论 .....	( 92 )
<b>第6章</b>	<b>纤维预成形技术</b> .....	( 96 )
6.1	为何需要纤维预成形技术 .....	( 96 )
6.2	使用粘接剂和定型剂进行纤维预定型 .....	( 97 )
6.3	纤维预成形技术 .....	( 98 )
6.3.1	同步预成形工艺 .....	( 98 )
6.3.2	分步预成形工艺 .....	( 99 )
6.4	定型剂法纤维织物净尺寸预成形 .....	( 105 )
6.5	预定型模具设计 .....	( 110 )
6.6	预定型设备设计 .....	( 110 )
6.7	预成形体贮存 .....	( 111 )

6.8 小结 .....	(111)
<b>第7章 预成形体的渗透率</b> .....	<b>(115)</b>
7.1 前言 .....	(115)
7.1.1 多孔介质流动 .....	(115)
7.1.2 复合材料液体成形中渗透率的重要性 .....	(116)
7.2 试验方法 .....	(117)
7.2.1 单向流方法 .....	(117)
7.2.2 径向流方法 .....	(127)
7.3 一般三维实例 .....	(133)
7.3.1 单向流数据分析 .....	(133)
7.3.2 数值试验 .....	(137)
7.3.3 三维流动试验 .....	(140)
7.4 总结 .....	(141)
<b>第8章 流动、热传递和固化的建模与模拟</b> .....	<b>(145)</b>
8.1 前言 .....	(145)
8.1.1 树脂传递模塑充模过程 .....	(145)
8.1.2 树脂流动模拟的必要性 .....	(146)
8.1.3 微观流动和宏观流动 .....	(146)
8.2 流动和预成形体结构 .....	(147)
8.2.1 无规织物的流动 .....	(148)
8.2.2 机织物和缝合织物中的流动 .....	(149)
8.2.3 非饱和流动 .....	(150)
8.2.4 多层预成形体中的横向流动 .....	(150)
8.3 织物变形及其对流动的影响 .....	(151)
8.3.1 面内变形 .....	(151)
8.3.2 横向压实 .....	(152)
8.3.3 突流 .....	(153)
8.4 预成形阶段分析和数值模型 .....	(153)
8.4.1 预成形体变形 .....	(154)
8.4.2 渗透率 .....	(156)
8.5 控制方程 .....	(159)
8.5.1 等温流动建模 .....	(159)
8.5.2 二维问题 .....	(159)
8.5.3 应用充模因子的方程 .....	(160)
8.5.4 能量方程 .....	(160)
8.5.5 能量转换边界条件 .....	(161)
8.5.6 固化动力学耦合 .....	(162)
8.5.7 随温度变化的黏度 .....	(163)

8.5.8	热扩散影响 .....	(164)
8.5.9	非牛顿流体 .....	(164)
8.6	数值方程和模拟 .....	(164)
8.6.1	几何复杂性 .....	(165)
8.6.2	二维有限元/控制体积法 .....	(165)
8.6.3	热传递和固化耦合的二维模型 .....	(167)
8.6.4	充模的纯理论有限元方法 .....	(168)
8.6.5	其他数值方法 .....	(168)
8.7	关键问题 .....	(168)
8.7.1	建模的完善水平 .....	(170)
8.7.2	输入 .....	(170)
8.8	算例研究 .....	(172)
8.8.1	渗透率模型 .....	(173)
8.8.2	纤维铺覆 .....	(173)
8.8.3	充模模拟 .....	(174)
8.8.4	结论 .....	(177)
8.9	模拟作为设计工具的应用 .....	(177)
<b>第9章</b>	<b>RTM 模具基础</b> .....	<b>(184)</b>
9.1	RTM 模具简介 .....	(184)
9.2	RTM 模具材料及工艺 .....	(185)
9.2.1	模具选材 .....	(185)
9.2.2	公差对模具制造工艺选择的影响 .....	(186)
9.2.3	模具赋型的方法 .....	(188)
9.2.4	机加工制造模具 .....	(189)
9.2.5	翻模制模 .....	(190)
9.3	模具成本 .....	(196)
9.3.1	生产率与产量 .....	(196)
9.3.2	模具原型 .....	(196)
9.3.3	刚性模具与半刚性模具 .....	(196)
9.3.4	精度对模具成本的影响 .....	(196)
9.3.5	模具耐久性的估算 .....	(197)
9.4	RTM 模具的形状设计 .....	(198)
9.4.1	净尺寸模具与带余量模具 .....	(198)
9.4.2	模腔间隙设计 .....	(198)
9.4.3	分型线的设计 .....	(198)
9.4.4	模具凸缘设计 .....	(200)
9.4.5	侧向凹陷和零拔模斜度情况的处理 .....	(203)
9.4.6	型芯的定位 .....	(203)

9.4.7	预成形体控制及压实机构的设计 .....	(203)
9.4.8	浮动型芯 .....	(205)
9.4.9	零件脱模机构设计 .....	(205)
9.5	RTM 模具设计中的热量因素 .....	(207)
9.5.1	模具加热 .....	(207)
9.5.2	模具的热膨胀 .....	(208)
9.6	RTM 模具的物理性能要求 .....	(209)
9.6.1	表面特征 .....	(209)
9.6.2	模具承受的压力 .....	(211)
9.6.3	选择锁模系统 .....	(212)
9.7	RTM 模具的工艺设计 .....	(214)
9.7.1	注胶口 .....	(214)
9.7.2	注胶口和出胶口定位 .....	(214)
9.7.3	顺次注射的管道要求 .....	(215)
9.7.4	设计树脂分配支路 .....	(216)
9.7.5	排气口 .....	(216)
9.7.6	设计预成形模具 .....	(217)
9.8	RTM 模具范例 .....	(217)
9.8.1	例 1 .....	(217)
9.8.2	例 2 .....	(218)
9.8.3	例 3 .....	(219)
9.8.4	例 4 .....	(220)
<b>第 10 章</b>	<b>RTM 模具型芯</b> .....	<b>(224)</b>
10.1	引言 .....	(224)
10.2	泡沫型芯 .....	(225)
10.2.1	泡沫材料的选择 .....	(226)
10.2.2	泡沫芯材的成形方法 .....	(230)
10.2.3	型芯的机加工方法 .....	(232)
10.2.4	使用泡沫型芯时需要注意的工艺问题 .....	(232)
10.2.5	使用泡沫型芯时获得的经验教训 .....	(233)
10.3	蜂窝以及其他开孔型芯 .....	(234)
10.3.1	防止树脂进入蜂窝孔的方法 .....	(234)
10.3.2	RTM 蜂窝的选择 .....	(236)
10.3.3	需要特殊注意的问题 .....	(236)
10.4	轻木芯 .....	(238)
10.4.1	轻木芯的选择 .....	(238)
10.4.2	成形中需要注意的问题 .....	(238)
10.5	软囊 .....	(239)

10.5.1	软囊的类型	(239)
10.5.2	使用软囊工艺时需要注意的问题	(241)
10.5.3	软囊材料的选择	(242)
10.5.4	制备内置软囊	(243)
10.6	相变模具型芯	(244)
10.6.1	可熔融和可溶解芯模材料的选择	(245)
10.6.2	低熔共晶盐	(245)
10.6.3	可熔融合金	(246)
10.6.4	蜡	(246)
10.6.5	可溶性石膏和团聚体	(246)
10.6.6	可破碎芯模	(247)
10.6.7	芯模成形	(248)
10.6.8	芯模表面的密封处理	(249)
10.6.9	使用可熔融芯模时需要注意的问题	(249)
10.6.10	可熔融芯模与热相关的问题	(250)
10.7	可抽取模具型芯	(251)
10.7.1	选材	(251)
10.7.2	设计和制造中需要注意的问题	(253)
<b>第11章</b>	<b>制造及工装成本要素</b>	<b>(256)</b>
11.1	前言	(256)
11.2	循环成本要素	(257)
11.2.1	生产数量因素	(257)
11.2.2	材料成本因素	(257)
11.2.3	制造成本因素	(259)
11.3	非循环成本因素	(264)
11.3.1	注射设备	(264)
11.3.2	热源	(264)
11.3.3	模具成本	(264)
11.3.4	认证成本因素	(265)
11.4	应用	(265)
11.5	实例研究	(267)
11.5.1	概念1: 平板	(267)
11.5.2	概念2: 曲面板	(267)
11.5.3	概念3: 加筋板	(269)
11.5.4	概念4: 襟翼	(269)
11.5.5	小结	(269)
<b>第12章</b>	<b>数据采集: 监测树脂流动位置、前沿反应程度及工艺性</b>	<b>(272)</b>
12.1	概述	(272)

12.2	仪器与方法	(273)
12.3	原理	(274)
12.4	校正:多重温度时间阶段成形过程中的固化监测	(275)
12.5	监测常规 RTM 过程中的树脂渗透,模型的验证	(278)
12.6	RFI 过程中流动状态的在线实时传感和监控	(280)
12.7	智能自动控制	(282)
12.8	结论	(283)
<b>第 13 章</b>	<b>质量与工艺控制</b>	<b>(288)</b>
13.1	导言	(288)
13.2	缺陷	(289)
13.2.1	空隙的特征	(289)
13.2.2	空隙的检测	(290)
13.2.3	缺陷的形成	(291)
13.2.4	缺陷对力学性能的影响	(293)
13.2.5	缺陷预防	(293)
13.3	工艺控制	(294)
13.3.1	热压罐固化工艺与 RTM 工艺的比较	(294)
13.3.2	RTM 工艺控制需求	(295)
13.3.3	材料的影响	(295)
13.3.4	设备的影响	(296)
13.3.5	工艺参数的范围及控制	(296)
13.3.6	工艺控制件	(298)
13.4	质量控制	(298)
13.4.1	材料规范	(298)
13.4.2	制造规范	(298)
13.4.3	工艺质量控制	(299)
13.4.4	模具	(299)
13.4.5	无损检测	(300)
13.5	小结	(300)
<b>第 14 章</b>	<b>航空航天领域应用 RTM 工艺的鉴定方法</b>	<b>(303)</b>
14.1	前言	(303)
14.2	什么是鉴定	(303)
14.2.1	鉴定的要素	(304)
14.2.2	许用值	(304)
14.2.3	纤维体积分数	(304)
14.2.4	破坏性测试	(306)
14.2.5	纤维取向	(307)
14.2.6	性能转化	(308)

14.2.7 候选应用制件的分类 .....	(309)
14.3 力学性能鉴定方法 (结构测试) .....	(310)
14.3.1 等同技术 .....	(310)
14.3.2 结构测试 .....	(313)
14.4 概念验证件 .....	(315)
14.5 规范 .....	(315)
14.5.1 材料规范 .....	(316)
14.5.2 工艺规范 .....	(316)
14.5.3 无损检测及合格标准 .....	(317)
14.6 鉴定审核 .....	(317)
14.7 降低风险计划 .....	(318)
14.8 首件鉴定 .....	(318)
14.9 编织及三维机织结构 .....	(319)
14.10 结论 .....	(319)
14.11 方法 1 (a) .....	(320)
附件 A 词汇 .....	(322)

# 第 1 章 树脂传递模塑简介

*Bernd Rückers*

## 1.1 前言

航空航天及先进复合材料领域一直处于传统意义上的技术前沿，在过去数年中，复合材料已成功地应用于军用和民用飞机的主承力结构，但此后其应用却出现了下降。复合材料制造成本和材料成本的降低幅度低于人们的预期，且由于燃油价格已相当低，使得减重的重要性下降，因此，复合材料并没有获得进一步应用。所以，成本已成为技术发展的首要驱动因素，即使在军用航空领域也是这样。

在很多公司，复合材料面临着与金属材料的激烈竞争，且对比的基础仅仅是制件的成本。目前，环氧树脂碳纤维预浸料的原材料成本仍比铝合金的高 5 ~ 10 倍，而制造成本则更高，这使那些早期对复合材料抱有乐观估计的人们感到惊讶。通过一次共固化技术来实现构件高度整体化从而减少零件数量的方法似乎很有前途，但不幸的是，实践证明生产诸如空客尾翼蒙皮等高度整体化部件却带来了很高的循环成本和非循环成本。模具本身、各种模具零件的清理，尤其是模具的调整等都需要很高的费用。

另外，标准的预浸料/热压罐成形工艺并非对每个制件都适用。尽管很多类型的制件已经用这种复合材料工艺制造，但实际上其中一些是不合适的。仅当它应用于正确的构件，如蒙皮、肋、梁等结构上时，其优点才能得以实现。其他复杂形状和高集中载荷制件也尝试使用了这种复合材料技术来制造，但实践证明成本过高，最终不得不改用金属材料来重新设计。

总体上，每千克复合材料的制造成本要比每千克铝合金的制造成本高出 20% ~ 50%。尽管复合材料减重 20% ~ 25% 的优势对民机市场仍有一定的吸引力，但没有任何一家航空公司愿为此多付钱。在军机市场上，随着低成本意识的提升，复合材料的应用也必须进行成本比较。

复合材料在航空结构上应用份额的停滞不前，致使在一些项目中重新使用金属材料。显而易见，要提高复合材料用量，必须寻求一种新的低成本技术，尤其是可提供低成本优势的工艺。树脂传递模塑（RTM）就是新发展的工艺之一，而且是最有希望的工艺之一。它的低成本优势使得航空工业可以使用先进复合材料并发挥其独特性能特点：

- ①潜在的高减重；
- ②高抗腐蚀性；



③无疲劳问题。

这些优势连同材料价格的降低将会为复合材料未来的发展提供强大的竞争优势。

### 1.1.1 RTM 技术是否是一种新工艺

在航空工业中，除了预浸料的热压罐成形工艺，其他工艺只有非常少的应用。早期对树脂传递模塑工艺的描述<sup>[1]</sup>是应用于诸如小型船只外壳及其他简单低纤维含量的非航空零件制造。甚至到 20 世纪 80 年代后期，树脂传递模塑工艺还只是用于机械工程、汽车<sup>[2]</sup>或消费性产品，像储水罐（图 1-1）、雷达罩等是用 RTM 工艺成形的少量航空制件，所有的这些制件都是用玻璃纤维成形，且纤维体积分数低，其成形树脂黏度低、玻璃化转变温度低和韧性低。尽管这些制件很难称为先进复合材料，但树脂传递模塑工艺的理念已包含其中。



图 1-1 空客 A310 水箱  
(源自：AIK Faserverbundtechnik GmbH)

最近纺织技术和树脂技术的发展，使得树脂传递模塑技术所成形的复合材料具有更先进的设计性、更高的承载能力并最终用于主承力结构。这些树脂具有低黏度、高韧性和优异的湿热性能，成形的复合材料纤维体积分数提高到 55% ~ 60%，这也使碳纤维可应用于此工艺，因为碳纤维复合材料的高性能完全可以抵消因使用碳纤维而带来的成本提高。

先进的纺织技术也有助于提高预成形体的润湿性，使用 3D 编织和缝合技术也可以提高复合材料的韧性（这是预浸料复合材料所不能有效实现的）。

RTM 技术已从小范围应用发展到成为一种非常具有竞争力的复合材料成形技术，可以作为预浸料/热压罐技术的补充或替代技术。

### 1.1.2 应用 RTM 技术的原因

就像在前言中所提到的，人们已努力在许多构件上大量应用复合材料。存在的问题是许多构件采用了预浸料/热压罐成形工艺，尽管这种工艺并非最佳选择。目前既能形成优良材料性能，又能克服预浸料/热压罐成形高成本的工艺尚不存在。其他诸如缠绕、手糊及模压成形等工艺都不能提供与预浸料工艺相当的复合材料性能，因此不适合制造大部分的先进复合材料。

大部分先进复合材料都是用预浸料工艺制造的，并取得了一系列的成功。某些部件接近完美，并且非常有竞争力，而另外一些则因经济目标无法达到而应用失败。通过对这些部件的分析，我们可以得到一些非常有趣的结果。

尽管使用预浸料成形壁板（带加强筋或不带加强筋）等大型平板类制件成本很高，但这种工艺在此类制件成形中依然很有竞争力。但是，复合材料成形的发展趋势是采用更简