

复合材料 成型技术及应用

FUHE CAILIAO CHENGXING JISHU JI YINGYONG

黄家康 ● 主编



化学工业出版社

复合材料 成型技术及应用

FUHE CAILIAO CHENGXING JISHU JI YINGYONG

黄家康●主编



化学工业出版社

· 北京 ·

地址：北京市东城区黄厂大街13号

电话：(010) 63996300

本书全面介绍了复合材料各种主要的成型工艺技术。既关注成型技术知识的基础性、系统性、完整性和实用性，也特别注意介绍近年来有关成型工艺各方面发展的新颖性。同时，用较多篇幅介绍了各种工艺的实际应用，特别是近几年的一些具有重大社会意义和经济意义的典型产品，还对其工艺过程做了简要的描述。

本书适合于从事复合材料行业的研究、生产人员阅读，也可供大专院校相关专业师生参考。对有兴趣采用复合材料的用户也有较好的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料成型技术及应用/黄家康主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-122-09806-1

I. 复… II. 黄… III. 复合材料-成型 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 210870 号

责任编辑: 王苏平
责任校对: 洪雅姝

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$ 字数 539 千字 2011 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

目 录

第一章 绪论	1
一、复合材料的定义与分类	1
二、树脂基复合材料的特性	1
三、中国复合材料的发展	3
四、树脂基复合材料生产工艺分类	8
五、树脂基复合材料生产工艺选择	9
参考文献	12
第二章 低压接触成型工艺及应用	13
第一节 低压接触成型工艺的特点和用途	13
一、特点	13
二、用途	14
第二节 低压接触成型工艺主要原材料	17
一、增强材料	17
二、基体材料	18
第三节 低压接触成型模具	21
一、模具形式的选择	21
二、模具设计	22
三、玻璃钢模具的制作	23
四、玻璃钢模具的维护与保养	24
第四节 低压接触成型工艺	25
一、模具	25
二、脱模剂	25
三、表面层	26
四、结构层	26
五、局部增强	27
六、固化	28
七、脱模	28
八、后修整	28
九、检验	28
十、包装	29

十一、运输	29
第五节 低压接触成型工艺局部补强与常见缺陷的解决方法	29
一、局部补强	29
二、常见缺陷的解决方法	30
第六节 夹层结构产品的制作	30
一、泡沫夹层	30
二、蜂窝夹层	31
三、其他夹层结构	31
四、夹层结构成型	31
第七节 无机玻璃钢	33
一、特性	33
二、主要原材料	33
三、产品制作	33
第八节 低压接触成型工艺的环境保护与职业健康安全	33
一、环境保护	34
二、职业健康安全	34
第九节 低压接触成型大型产品制作实例	36
一、模具	37
二、玻璃钢模具	40
三、机舱罩、轮毂罩、整流罩制品制作	42
四、修整与装配	43
五、检验及其他	44
参考文献	49
第三章 喷射成型工艺及应用	50
第一节 概述	50
一、分类	50
二、喷射成型工艺的优缺点	50
第二节 喷射成型工艺的原材料及模具	51
一、原材料的选择	51
二、喷射成型用模具	52
第三节 喷射成型的设备及辅助工具	52
一、树脂输送系统	53
二、树脂混合及喷射系统	54
三、无捻粗纱切割喷射系统	54
四、其他辅助工具	56
第四节 喷射成型的操作工艺	56
一、喷射成型工艺流程和工艺参数	56
二、喷射成型工艺要点	58

第五节 喷射成型制品的质量控制	59
一、喷射成型制品的缺陷与防治	59
二、质量控制	61
三、质量控制的主要检测指标	62
第六节 典型产品及工艺发展	62
参考文献	64
第四章 模压成型工艺及应用	65
第一节 概述	65
一、模压成型工艺的定义	65
二、模压成型工艺的特点和分类	65
三、模压成型工艺的发展状况	66
第二节 短纤维模压料的制备与成型工艺	67
一、概述	67
二、短纤维模压料的主要原材料	67
三、短纤维模压料的制备工艺	72
四、短纤维模压料模压成型工艺	77
第三节 聚酯模塑料模压成型工艺	81
一、概述	81
二、聚酯模塑料的主要原材料	86
三、聚酯模塑料的制备	97
四、聚酯模塑料模压成型工艺	106
五、聚酯模塑料的二次加工	115
六、聚酯模塑料模压成型工艺的典型应用	124
七、聚酯模塑料的综合处理与再生利用	130
第四节 吸附预成型坯模压工艺	140
一、概述	140
二、主要原材料	140
三、吸附预成型工艺及设备	142
四、预成型坯模压成型工艺	143
第五节 定向铺设模压成型工艺	145
一、概述	145
二、工艺简介	146
三、制品的力学性能	146
四、定向铺设模压成型工艺的典型应用——送风器转子成型技术	147
参考文献	149
第五章 层压成型工艺及应用	151
第一节 概述	151
一、层压工艺发展现状	151

二、层压工艺特点及生产流程	152
第二节 层压工艺的主要原材料	152
一、基体树脂	152
二、增强材料	152
三、辅助材料	153
四、溶剂	153
第三节 预浸料的制备	153
一、浸胶设备	153
二、浸胶工艺过程	156
三、胶布的质量指标及控制	159
四、胶布的存放	161
五、浸胶中易产生的问题和解决方法	161
第四节 层压板成型工艺	162
一、层压设备	162
二、层压工艺过程	163
三、层压板的性能	165
四、制品缺陷的分析及对策	165
第五节 玻璃钢卷管的成型工艺	166
一、工艺过程及主要工艺参数	166
二、玻璃钢卷管的基本性能	168
三、常见问题及解决措施	168
第六节 层压成型实例	169
一、覆铜箔层压板	169
二、超混杂结构层压制品	174
三、电气绝缘层压制品	176
参考文献	180
第六章 树脂灌注成型工艺及应用	181
第一节 概述	181
一、发展史	181
二、工艺特点	182
第二节 RTM成型工艺	183
一、RTM成型工艺过程	183
二、不同类型的RTM生产布局	184
三、RTM工艺参数对工艺过程的影响	185
四、RTM的衍生工艺	186
第三节 增强材料和纤维预成型技术	187
一、增强材料的类型	187
二、纤维预成型技术	189

第四节	RTM 工艺用树脂	192
一、	不饱和聚酯树脂	193
二、	乙烯基酯树脂	195
三、	环氧树脂	195
四、	双马来酰亚胺树脂	196
第五节	流动性分析	196
一、	概述	196
二、	纤维渗透率	197
三、	流动模拟	198
第六节	设备和模具	200
一、	RTM 树脂注射设备	200
二、	模具	203
第七节	RTM 产品的典型应用	206
一、	航空航天和军事领域的应用	206
二、	汽车部件	208
三、	游艇	211
四、	其他领域	211
参考文献	212
第七章	缠绕成型工艺及应用	213
第一节	概述	213
一、	缠绕成型工艺的特点与分类	213
二、	缠绕成型工艺的现状与发展	215
第二节	缠绕成型工艺原理	215
一、	缠绕规律分类	215
二、	螺旋缠绕规律分析	217
三、	缠绕规律的设计	234
第三节	缠绕成型工艺参数	236
第四节	缠绕设备	242
一、	缠绕机的自由度概念	242
二、	缠绕机的类型	242
三、	缠绕设备部件	245
第五节	缠绕制品及其应用	249
一、	缠绕制品的结构	249
二、	缠绕制品的应用	250
三、	典型缠绕制品	254
第六节	缠绕复合材料制品的质量检验及控制	260
一、	缠绕复合材料用树脂、纤维的规格要求	260
二、	复合材料的质量检验及控制	262

第七节 缠绕成型工艺的最新进展	264
一、原材料方面的进展	264
二、工艺方面的进展	264
三、装备方面的进展	265
参考文献	267
第八章 真空辅助树脂扩散成型工艺及应用	268
第一节 概述	268
一、工艺流程	268
二、优点	269
第二节 VARIM 模具设计和制造	269
一、主模型的制造	269
二、模具胶衣的制备	269
三、结构层的制作	270
四、加热层的制作	270
第三节 VARIM 工艺的主要原材料	270
一、树脂	270
二、增强材料	271
三、真空袋膜	271
四、密封胶黏带	271
五、高渗透介质	271
六、剥离层介质	271
七、轻质芯材	271
第四节 VARIM 工艺的常见缺陷及原因分析	271
一、气泡和白斑	271
二、干斑和干区	272
三、褶皱和翘曲	273
四、过抽和缺胶	273
五、杂斑和富胶	273
第五节 VARIM 工艺的应用	273
一、航空大型部件	274
二、大型舰艇及上层建筑	274
三、大型复合材料风电叶片	274
参考文献	276
第九章 拉挤成型工艺及应用	277
第一节 概述	277
一、拉挤工艺的优点	277
二、拉挤产品的应用	277
三、发展趋势	280

第二节 拉挤工艺及设备	287
一、拉挤工艺原理	287
二、拉挤成型设备	289
第三节 拉挤工艺用树脂基体	295
一、基材的作用、组分及选用原则	295
二、常用热固性树脂	296
三、热塑性树脂	300
第四节 增强材料	300
第五节 常用助剂	302
一、脱模剂	303
二、阻燃剂	303
三、填料	303
四、色料	303
五、低收缩添加剂	303
六、分散剂	304
七、引发剂	304
第六节 拉挤工艺参数	305
一、成型温度	305
二、拉挤速度的确定	306
三、牵引力	307
四、各拉挤工艺变量的相关性	307
五、树脂预热与制品后固化	308
第七节 拉挤制品的设计	308
一、结构设计	308
二、制品设计	311
三、拉挤制品材料设计实例	313
第八节 拉挤工艺	314
一、常见拉挤型材的规格	314
二、拉挤制品的公差标准	316
三、拉挤产品的外观形状及工艺控制	319
四、拉挤工艺的科学管理	320
参考文献	323
第十章 连续板成型工艺及应用	324
第一节 概述	324
第二节 原材料	324
一、增强材料	324
二、树脂基体	325
三、抗老化薄膜	327

四、其他辅助材料	327
第三节 FRP 板材成型工艺流程及原理	328
一、成型工艺流程	328
二、FRP 板材连续成型机组	328
第四节 工艺参数确定及品质控制	329
一、树脂胶液配方	329
二、树脂的用量及控制方法	330
三、纤维的用量及调控	330
四、FRP 板材厚度及检验台控制	330
五、FRP 板材成型和烘箱控制	330
六、切割与堆放	331
第五节 特殊板材及填料的作用	332
一、胶衣 FRP 板材	332
二、阻燃 FRP 板材	332
三、散射板（斯凯特板）	332
四、网格增强板	333
五、低热能透过板	333
六、铝镁反射板	333
第六节 典型制品的应用及发展方向	333
一、FRP 连续成型板材的特点	333
二、FRP 连续成型板材的分类和应用	333
参考文献	340
第十一章 纤维增强热塑性复合材料成型工艺及应用	341
第一节 概述	341
一、简介	341
二、纤维增强热塑性复合材料的发展	341
三、纤维增强热塑性复合材料的特点	344
四、纤维对产品性能的影响	345
五、热塑性复合材料的工艺性能	345
第二节 基体树脂及助剂	348
一、基体材料	348
二、助剂	350
第三节 纤维增强热塑性复合材料半成品及制备方法	355
一、纤维增强热塑性复合材料粒料的生产方法	355
二、纤维增强热塑性复合材料片材的生产方法	356
第四节 纤维增强热塑性复合材料制品成型	359
一、注射成型工艺	359
二、模压成型工艺	365

三、纤维增强热塑性复合材料直接在线成型工艺 (LFT-D)	369
四、其他成型工艺	371
第五节 纤维增强热塑性复合材料的应用	373
一、在汽车工业中的应用	373
二、在电气行业中的应用	376
三、在建筑模板中的应用	376
四、在其他方面的应用	377
参考文献	378
第十二章 先进复合材料成型工艺及应用	380
第一节 概述	380
一、先进复合材料的定义和分类	380
二、先进复合材料的特性	381
第二节 先进复合材料的成型技术	381
一、先进复合材料成型技术的分类及特点	381
二、先进复合材料的典型成型技术	383
第三节 先进复合材料的质量控制	389
一、先进复合材料的质量控制	389
二、先进复合材料的无损检测	392
第四节 国内外先进复合材料的应用现状及发展趋势	396
一、国内外先进复合材料的应用现状	396
二、国内外先进复合材料的发展趋势	402
参考文献	405

第一章 绪论

一、复合材料的定义与分类

“由两个或两个以上独立的物理相，包括黏结材料（基体）和粒料、纤维或片状材料所组成的一种固体产物”称为复合材料（GB 3961）。

复合材料主要由两大部分组成：基体与增强材料。

复合材料通常按其基体材料不同，分为三大类。

- ① 聚合物基复合材料，通常所说的树脂基复合材料归属此类。
- ② 金属基复合材料。
- ③ 无机非金属基复合材料，如陶瓷基复合材料。

三类复合材料中，以树脂基复合材料用量最大，占有复合材料总量的 90% 以上。树脂基复合材料中，又以玻璃纤维增强塑料（俗称“玻璃钢”）用量最大，占树脂基复合材料用量的 90% 以上。本书内容仅限于纤维增强树脂基复合材料。

复合材料的最大特点是复合后的材料特性优于组成该复合材料的各单一材料的特性，增强材料的性能随其组成材料的含量及分布情况而变。基体材料的性能、含量，增强材料与基体材料之间的界面结合情况及其复合方式与工艺等是决定复合材料性能的基本因素。

复合材料的性能与其生产工艺关系颇大。如树脂基复合材料中，采用纤维缠绕法制造的产品具有优异的力学性能；拉挤产品轴向强度高。

同一类复合材料，同一类生产工艺也因材料选择、配比的不同，而导致产品性能上的差异。

二、树脂基复合材料的特性

与传统材料相比，在设计与制造上树脂基复合材料有三个明显的特点。

- ① 材料性能指标的自由设计性。
- ② 材料与结构的一致性。
- ③ 产品形体设计的自由性。

树脂基复合材料的特性概括如下。

1. 优点

(1) 轻质高强 比强度、比模量高。玻璃钢的比强度可达钢的 4 倍；碳纤维增强环氧树脂复合材料的比强度可达钛的 4.9 倍，比模量可达铝的 5.7 倍多。这对要求自重轻的产品意义颇大。从表 1-1 可见，树脂基复合材料的力学性能相当出众。

表 1-1 几种常用材料与复合材料的比强度、比模量

材料名称	密度 /(g/cm ³)	拉伸强度 /×10 ⁴ MPa	弹性模量 /×10 ⁶ MPa	比强度 /×10 ⁶ cm	比模量 /×10 ⁹ cm
钢	7.8	10.10	20.59	0.13	0.27
铝	2.8	4.61	7.35	0.17	0.26
钛	4.5	9.41	11.18	0.21	0.25
玻璃钢	2.0	10.40	3.92	0.53	0.21
Ⅱ 碳纤维-环氧树脂	1.45	14.71	13.73		0.21
I 碳纤维-环氧树脂	1.6	10.49	23.54		1.5
芳纶纤维-环氧树脂	1.4	13.73	7.85		0.57
硼纤维-环氧树脂	2.1	13.53	20.59		1.0
硼纤维-铝	2.65	9.81	19.61		0.75

(2) 耐疲劳性好 疲劳破坏是材料在交变载荷作用下, 由于微观裂缝的形成和扩展而造成的低应力破坏。由于纤维增强复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展, 所以其疲劳破坏从材料的薄弱环节开始, 逐渐扩展, 破坏前有明显的征兆; 而金属材料的疲劳破坏不同, 是由里向外突然发展的, 往往事先无征兆。通常, 大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的 40%~50%, 碳纤维复合材料则可达到其拉伸强度的 70%~80%。

(3) 减振性好 由于复合材料中的特殊组分和结构, 其振动阻尼很高, 具有较好的吸振能力。对形状、尺寸相同的轻金属合金及碳纤维复合材料所制造的悬臂梁做过振动试验, 前者需 9s 才能停止振动, 后者仅需 2.5s。同时, 通过对其结构和组分的优化, 可设计构件的固有频率, 从而避免共振而导致的破坏。

(4) 破损安全性好 纤维复合材料基体中有大量独立的纤维, 每平方厘米上的纤维少则几千根, 多至上万根。从力学观点上看, 是典型的静不定体系。当构件超载并有少量纤维断裂时, 载荷会迅速重新分配在未破坏的纤维上。这样, 在短期内不至于使整个构件丧失承载能力。

(5) 耐化学腐蚀 一般而言, 耐化学腐蚀性主要取决于基体。常见的热固性玻璃钢一般都具备耐酸、稀碱、盐、有机溶剂、海水等介质的性质。玻璃纤维不耐氢氟酸等氟化物, 在生产适应氢氟酸等氟化物的复合材料产品时, 接触氟化物表面的增强材料不能用玻璃纤维, 可采用饱和聚酯或丙纶纤维(薄毡), 基体也须采用耐氢氟酸的树脂, 如乙烯基酯树脂等。

(6) 电性能好 复合材料可以根据应用的需要, 设计成绝缘材料或是导电材料。通常, 玻璃纤维增强的复合材料具有较好的绝缘性能。另外, 玻璃纤维增强复合材料具有较好的高频介电性能, 应用其不反射电磁波、能透过微波的特性, 可用于制造天线罩等产品。

(7) 可设计性强 可根据需要, 通过加强肋、夹芯结构、波纹等结构, 使制品

获得所需的强度与刚度；各种组件、构件可在主体成型中一并嵌入成型；可根据产品的结构与使用要求及生产数量，合理地灵活选择原辅材料及成型工艺。

2. 缺点

(1) 耐热性低 目前高性能树脂基复合材料长期使用温度在 250℃ 以下，一般玻璃钢在 60~100℃ 以下。

(2) 表面硬度低 硬度低，易划伤。

(3) 存在老化问题 在日晒雨淋、机械应力以及介质侵蚀下，尤其是在湿热条件下，会导致外观及性能变差。

(4) 材料性能离散较大 由于其由多种材料复合而成，同时工艺过程影响因素较多，所以影响性能的因素很多，产品质量离散系数大，难以达到理想的性能。

三、中国复合材料的发展

尽管树脂基复合材料的产量比传统材料要少得多，但由于其一系列优异的性能，在国民经济中已是不可缺少的材料，在许多领域已得到了广泛的应用。

当今一个国家或地区复合材料的发展水平已是衡量其实力的标志之一，与其国民经济发展水平也是大体相应的。众所周知，美国、日本、德国三国国民生产总值居世界前几名，而各自复合材料产量也分别居世界前几名。法国、意大利、英国等发达国家则因经济规模小，市场有限，故排名不紧随三国之后。

中国复合材料的发展起始于 1958 年。1981 年复合材料的年产量为 1.5 万吨，到 1986 年达到 6.5 万吨，年增长率为 13%，2002 年达到 82 万吨，其中 GRP (GF/UPR) 销售量为 1992 年的 4 倍，2003 年一跃达到 94 万吨。总量在 20 世纪 90 年代末期超过德国，21 世纪初超过日本，热固性玻璃钢已超过欧洲总和。2009 年我国复合材料产量达到 323 万吨，成为全球产量第一的复合材料制造大国。2001~2009 年中国复合材料行业产量如图 1-1 所示，2001~2009 年 FRSP 增长率如图 1-2 所示。

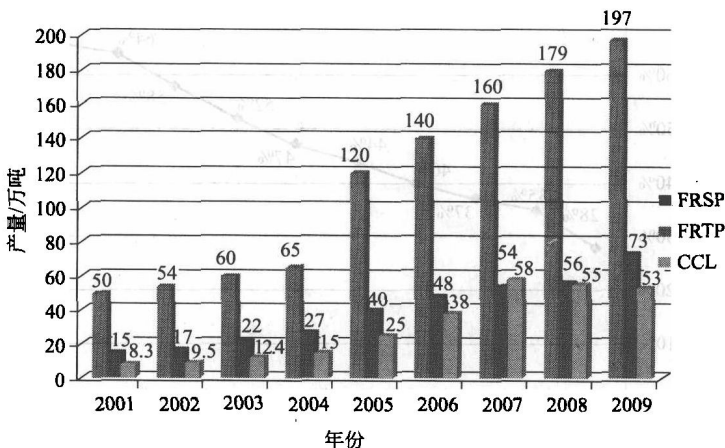


图 1-1 2001~2009 年中国复合材料行业产量

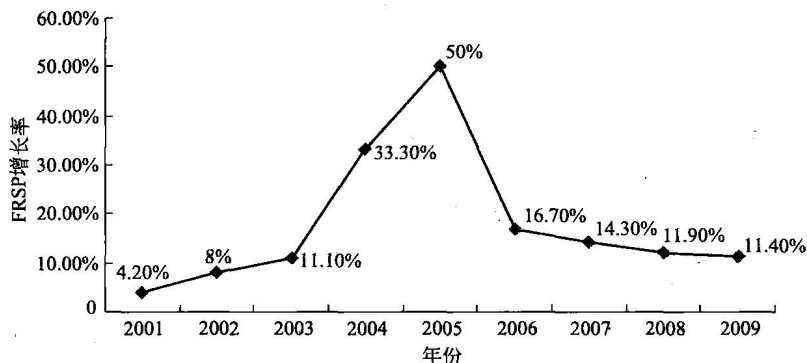


图 1-2 2001~2009 年 FRSP 增长率

同时, 新产品、新技术也不断涌现, 产品种类涉及国民经济的各个领域。复合材料与人们的生活日益贴近, 并开始影响人们的生活。

回顾 50 多年来的发展, 中国复合材料行业的发展呈现以下趋势。

(一) 成型技术由手工操作为主逐步向机械化方向发展

复合材料生产工艺由手糊技术向一些技术密集、高度自动化的方向发展, 如拉挤、RTM、SMC、GMT 等。改革开放前复合材料工业生产技术主要是手糊法成型, 其产品占复合材料年总产量的 90% 以上。到 2009 年机械化成型复合材料产量已占总产量的 60% 以上。工艺装备水平的提高, 促进了行业的发展。我国通过对外引进装备的消化吸收和自行研制开发, 计算机控制的纤维缠绕机、拉挤机、大台面高吨位压机以及喷射成型机等装备已实现了国产化。其中有些设备已达到国际同类产品水平。计算机控制缠绕机和聚酯树脂工业化生产技术等已出口国外。2001~2009 年中国复合材料机械化成型比例如图 1-3 所示, 2009 年 FRSP 主要成型工艺分类如图 1-4 所示。

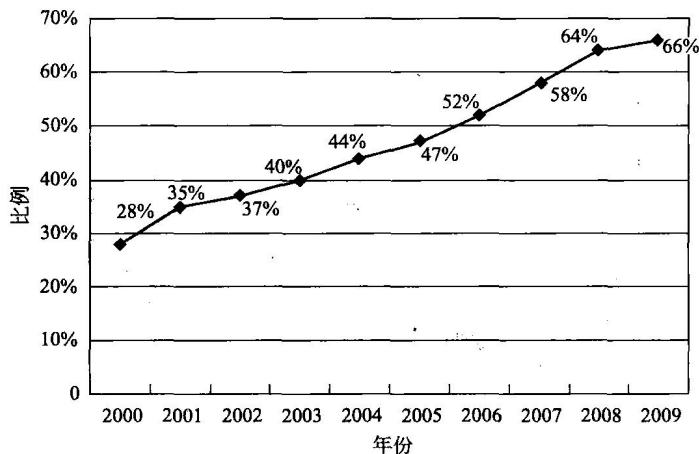


图 1-3 2001~2009 年中国复合材料机械化成型比例

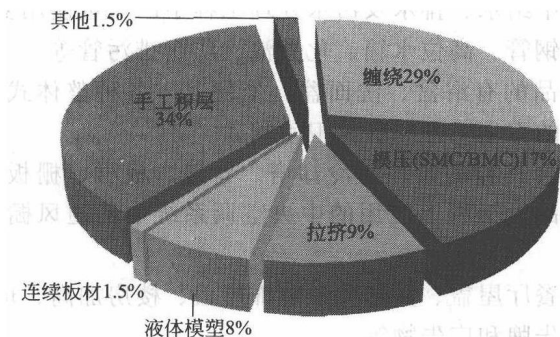


图 1-4 2009 年 FRSP 主要成型工艺分类

(二) 以国防应用为主向民用领域发展

初期复合材料主要应用在航空工业方面，如飞机的雷达罩、副油箱等。20 世纪 50 年代以后，美国出现玻璃钢火箭发动机外壳。1957 年回收的红石导弹第一级就是用玻璃钢制造的。1967 年在美国试飞了第一架全玻璃钢结构飞机。进入 70 年代，玻璃钢

船舶发展较快，目前产品已涉及国防与国民经济的各个领域。

复合材料产品的品种规格由几百种发展到现在的 1 万多种；产品结构已从过去的低档产品，逐渐向高档次、高质量产品过渡，已在建筑、汽车、机电和石化四大支柱产业中得到广泛应用。高性能复合材料的研究开发工作取得了重大进展，高性能复合材料所占比例已达到 10% 以上。

我国复合材料产品的发展初期，主要在国防军工方面开展研究工作。20 世纪 60 年代研制出导弹玻璃钢端头部件。70 年代为发展壮大时期。1971 年安装了直径为 44m 的大型全玻璃钢蜂窝夹层结构的地面雷达罩；1974 年颁布了 0.4m³ 铝内衬玻璃钢气瓶规范；同年，我国第一艘长度为 39.8m 的大型玻璃钢船舶下水；1975 年第一个直径 18.6m 的玻璃钢高山雷达防风罩服役；1976 年定型了直径 8m 的玻璃钢风机叶片。此后，每年都有新的玻璃钢产品研制成功，如冷却塔、化工贮罐、波形瓦、活动房屋、大型发电机护环、水箱、管道、体育器材及文娱用品等都相继投产。产品应用领域如下。

1. 建筑工程

(1) 承载结构 用作承载结构的复合材料建筑制品有柱、桁架、梁、基础、承重折板、屋面板、楼板等，这些复合材料构件，主要用于化学腐蚀厂房的承重结构、高层建筑及全玻璃钢-复合材料楼房大板结构。

(2) 围护结构 复合材料围护结构制品有各种波纹板、夹层结构板，各种不同材料复合板，整体式和装配式折板结构和壳体结构。用作壳体结构的板材，它既是围护结构，又是承重结构。这些构件可用作工业及民用建筑的外墙板、隔墙板、防腐楼板、屋顶结构、遮阳板、天花板、薄壳结构和折板结构的组装构件。

(3) 采光制品 透光建筑制品有透明波形板、半透明夹层结构板、整体式和组装式采光罩等，主要用于工业厂房、民用建筑、农业温室及大型公用建筑的天窗、屋顶及围护墙面采光等。

(4) 门窗装饰材料 属于此类材料的制品有门窗断面复合材料拉挤型材、平板、浮雕板、复合板等，一般窗框型材用树脂玻璃钢。复合材料门窗防水、隔热、耐化学腐蚀，用于工业及民用建筑，装饰板用作墙裙、吊顶、大型浮雕等。