

复合材料夹层结构 理论、设计与应用

王璐 著

Composite Sandwich Structure Theory,
Design and Application



中国建筑工业出版社

复合材料夹层结构理论、设计与应用

王璐 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料夹层结构理论、设计与应用/王璐著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 10
ISBN 978-7-112-24132-3

I. ①复… II. ①王… III. ①复合材料结构 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 185165 号

作者围绕我国工程建设的重大需求以及节能减排的基本国策, 以绿色建筑和建筑工业化立足点, 提出采用高强纤维增强复合材料与轻质泡沫、轻木等芯材相结合, 通过结构创新组合体系, 最大限度地发挥和利用复合材料与芯材的潜质, 以低成本的玻璃纤维、泡沫、轻木等基础材料通过体系创新制备复合材料夹层结构构件, 代替了传统的高能耗、资源消耗型的混凝土结构与钢结构。全书共分八章, 主要内容包括: 绪论; 结构性能与分析; 冲击性能; 疲劳性能; 界面断裂力学; 热力学性能; 结构设计; 工程应用。

本书可作为结构工程及复合材料工程专业的研究生的基础教材和力学、机械专业相应课程的教学参考书, 也可作为复合材料夹层结构技术人员、管理人员进行工程设计、生产制造和开发应用的参考书。

责任编辑: 辛海丽 刘瑞霞

责任校对: 李欣慰

复合材料夹层结构理论、设计与应用

王璐 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 251 千字

2019 年 11 月第一版 2019 年 11 月第一次印刷

定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-24132-3

(34629)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国传统建筑材料大多采用混凝土、钢材等，为我国城市化进程和大规模基础设施建设提供了坚实的物资保障。然而，目前我国建筑业碳排放所占比重达到了 50%，主要由于混凝土、钢铁等材料均产自不可再生资源，其生产过程能耗大、污染重。据统计，在过去的五年中，我国每年钢材生产过程中二氧化碳排放量均已超 10 亿吨，约占我国总排放量的 15%；每年混凝土生产过程中消耗标煤超 2 亿吨，约占建材行业能源消耗总量的 75%。由此可见，混凝土及钢材生产工业作为能源消耗密集型产业，消耗大量不可再生资源，并排放了大量 CO₂，造成了严重的环境污染、能源和资源匮乏，对我国经济社会的可持续发展构成了严重威胁。此外，传统混凝土结构和钢结构的腐蚀、劣化问题也日益严重，其中以混凝土开裂和钢材锈蚀最为常见，这不仅严重影响了结构的正常使用寿命，增加了维修费用，还造成安全隐患。同时，我国跨海大桥、海洋平台、港口设施等海洋结构物的大量建设以及具有国家战略意义的南海岛礁基础设施建设对腐蚀环境下结构的耐久性提出了更高的要求。因此，在土木工程领域，研究生态环保的高性能结构材料及其相适应的结构体系势在必行。

针对此问题，作者围绕我国工程建设的重大需求以及节能减排的基本国策，以绿色建筑和建筑工业化立足点，提出采用高强纤维增强复合材料与轻质泡沫、轻木等芯材相结合，通过结构创新组合体系，最大限度地发挥和利用复合材料与芯材的潜质，以低成本的玻璃纤维、泡沫、轻木等基础材料通过体系创新制备复合材料夹层结构构件，代替了传统的高能耗、资源消耗型的混凝土结构与钢结构。

本专著的内容均曾在国内外有关刊物及学术会议上发表，受到国内外同行和设计工作者们的关注。本专著的研究工作还得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金及江苏省自然科学基金等项目的支持。本书的一些论点仅代表作者对这些问题的认识，鉴于所探讨问题本身的复杂性，某些论点定会随着研究工作的深化和扩大而得到改进。因而，对本书存在的不足之处，敬请读者批评指正。

作者诚挚感谢所有为本书面世做出贡献的朋友：南京工业大学刘伟庆教授一直关注本书的出版，并提出许多建设性意见；在本书的撰写过程中，香港大学苏启亮教授给予了许多鼓励和帮助；同济大学李凌志副教授和广州大学赖勉亨副教授为本书提供了大量的参考资料。我的研究生张玲峰、马亚利、张晨浩、何涛、王贤坤、吴琦、孙国庆、曹振明、杨方宇、夏益炜等协助完成了大量的计算和试验工作，他们均对本书作出了贡献。最后，作者感谢所有在本书出版过程中提供帮助的人们，作者将永远心存感激。

王 璐

2019 年 7 月

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 复合材料基本概念 | 1 |
| 1.2 复合材料夹层结构简述 | 2 |
| 1.3 复合材料夹层结构制造工艺 | 3 |
| 第 2 章 结构性能与分析 | 10 |
| 2.1 轴心受拉构件的受力性能 | 10 |
| 2.2 轴心受压构件的受力性能 | 10 |
| 2.3 夹层梁板的受弯性能 | 11 |
| 2.4 格构增强夹层结构的受力性能 | 15 |
| 2.5 夹层结构破坏准则 | 19 |
| 第 3 章 冲击性能 | 22 |
| 3.1 复合材料冲击与碰撞概述 | 22 |
| 3.2 低速冲击试验标准 | 32 |
| 3.3 复合材料夹层结构低速冲击性能 | 35 |
| 3.4 带冲击损伤的复合材料夹层结构残余性能 | 42 |
| 第 4 章 疲劳性能 | 47 |
| 4.1 夹层结构疲劳破坏机理 | 47 |
| 4.2 夹层结构疲劳失效模式 | 48 |
| 4.3 基于连续损伤力学的非线性累积损伤理论 | 60 |
| 4.4 基于刚度退化的疲劳损伤演变模型 | 64 |
| 4.5 夹层结构疲劳寿命预测 | 67 |
| 第 5 章 界面断裂力学 | 72 |
| 5.1 界面断裂行为 | 72 |
| 5.2 断裂韧度 | 73 |
| 5.3 黏聚力 | 87 |
| 第 6 章 热力学性能 | 93 |
| 6.1 高温对复合材料性能的影响 | 93 |

| | | |
|------------|--------------|------------|
| 6.2 | 高温下复合材料的力学性能 | 96 |
| 6.3 | 高温下芯材的力学性能 | 106 |
| 6.4 | 夹层结构界面温度应变分布 | 108 |
| 第7章 | 结构设计 | 118 |
| 7.1 | 设计原则 | 118 |
| 7.2 | 连接设计 | 123 |
| 7.3 | 环境效应 | 126 |
| 7.4 | 优化设计 | 129 |
| 第8章 | 工程应用 | 135 |
| 8.1 | 土木工程领域 | 135 |
| 8.2 | 交通工程领域 | 138 |
| 8.3 | 航空航天领域 | 143 |
| 8.4 | 机械制造领域 | 150 |

第 1 章 绪 论

近年来,我国高度重视高性能碳纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维和各类树脂等基础材料的研发,复合材料在航空航天、国防、风电等尖端领域的技术研发及产业方面取得了长足发展;而复合材料结构在量大面广的土木、交通、船舶、海洋等工程领域同样拥有广阔的应用前景,且已呈现出良好的发展态势。新材料研发的目的是为了实现大规模工程应用,而应用的关键在于结构创新,经济、科学、合理地充分发挥新材料轻质高强的性能,从而满足工程结构的受力与功能需求。本章主要阐明了复合材料结构的基本概念、发展简史、主要特点,并论述了其发展方向。

1.1 复合材料基本概念

复合材料是指由两种或两种以上单一材料用物理或者化学的方法复合而成的一种新型材料。复合材料会保留组分材料的大多数优点,弥补组分材料存在的缺点,还可以产生组分材料没有的其他优异性能。现代复合材料历史中,钢筋混凝土的出现和应用具有重要的意义。现代复合材料具有比强度高、比刚度大、质量轻,并具有抗疲劳、减震、耐高温以及可设计等优点,在短时间内被广泛地应用到各个领域,如图 1-1 所示。

20 世纪 60 年代末期,树脂基高性能复合材料首先被运用于飞机的承载结构中,随后又逐步进入工业其他领域。为了克服树脂基复合材料存在的耐热性差、导热性低等缺点,在 20 世纪 70 年代末期,科学家们研究出了高强度、高模量的耐热碳纤维和陶瓷纤维与金属复合材料,并将其成功地应用于航空航天领域。进入 20 世纪 80 年代,陶瓷复合材料逐渐发展与应用起来。复合材料因其具有可设计的特点以及一系列优点而受到广泛地重视,因而发展极快^[1]。

作为工程应用的复合材料,主要由两种组分材料构成:一种是增强材料,一种是基体材料。其中增强材料主要决定复合材料的基本性能;基体材料起着支承增强材料、保持材料的形状以及传递增强材料之间载荷等作用。其中所采用的增强材料主要是纤维材料,如碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等;所采用的基体材料主要是塑料或者金属。因此这类材料也可以称为纤维增强复合材料(fiber reinforced composite materials,简称 FRC)。由于 FRP 具有比强度高、比模量高、热导率低、可设计性能好、工艺性能好等优点,得到了广泛的应用和发展。

在过去的十年,复合材料在土木工程中的应用已经越来越广泛,且在这一领域的应用是不可忽视的。在建筑业,复合材料被用在处于恶劣环境条件下的结构或构件上,例如海上平台、仓库、地面锚定器、非导电性和非磁性结构、结构增强、被动和主动增强、电线、交叉行走甲板、型材杆和隧道涂层等^[2,3]。

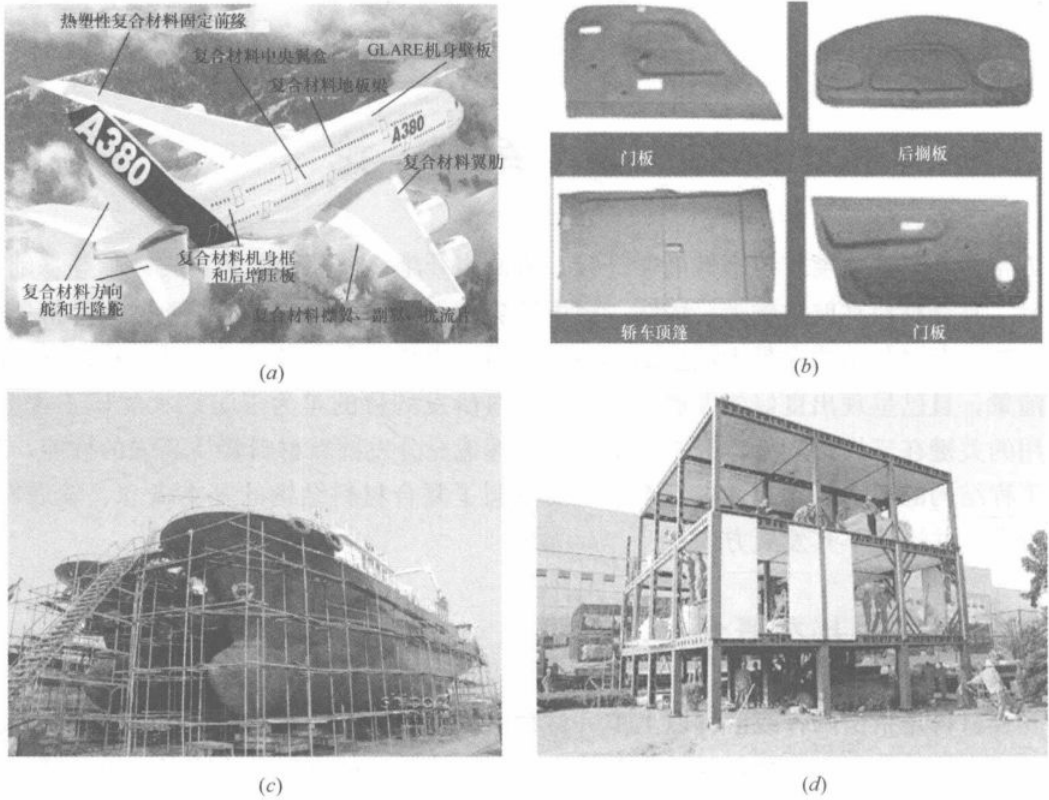


图 1-1 复合材料在各个领域的应用
 (a) 复合材料在飞机上的应用；(b) 复合材料在车辆上的应用；
 (c) 复合材料在船舶上的应用；(d) 复合材料在建筑上的应用

1.2 复合材料夹层结构简述

1820 年, Delau 提出了复合材料夹层结构的概念, 其工程应用起源于 20 世纪 40 年代, 最初以桃花心木为面板、轻木为芯材, 用作飞机的机翼。而后又出现了金属面板和蜂窝芯材的夹层结构, 制造飞机的水平安定面、舵面和直升机的旋翼。由于夹层结构的优异性能, 目前采用碳纤维面板和蜂窝芯材, 或纤维缝纫技术、泡沫芯材的夹层结构已经在飞机、导弹、卫星、宇宙飞船和航天飞机上得到了广泛应用^[4,5]。但用于航空航天等尖端领域的树脂基纤维复合材料成本高, 严重制约了其作为高性能结构材料在其余工程领域的大规模应用。而国内外近年来基于低成本纤维、树脂、芯材等原材料, 通过创新的组合结构体系, 设计制备出各类适用于工程领域的结构件, 极大降低了材料成本。因此复合材料结构的应用领域不断扩大, 除航空航天领域外, 在汽车交通、新能源、船舶及海洋工程、基础设施等领域也得到了越来越多的应用^[6,7]。

随着复合材料在土木工程领域的应用逐渐增多, 复合材料夹层结构也开始应用到土木工程领域, 如目前工程上常用的夹层结构有泡沫夹层结构、蜂窝夹层结构、波纹夹层结构等^[8,9]。而其中泡沫夹层结构(图 1-2)是复合材料应用的一种重要形式, 它至少由三层材料构成, 即在两块强度以及弹性模量较大的面板材料中间夹着厚而轻的芯层材料, 使三

层材料组成一个整体,保持两块面板之间的距离,从而增大面板截面的惯性矩。

通过这种组合既提高了构件的抗弯刚度,又充分利用了材料的刚度。而夹层结构的面层材料往往选用各种纤维(如玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维等)作增强材料的复合材料面板。夹层结构的芯材往往选用体积重量小,且有相当的压缩强度以及剪切强度的材料,一般如聚氨酯硬脂泡沫塑料。夹层结构建筑施工速度快、造价便宜、隔声、隔热效果好,因此在工程中得到了广泛的应用^[10]。

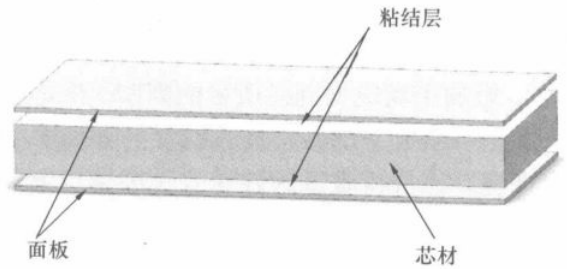


图 1-2 复合材料夹层结构

1.3 复合材料夹层结构制造工艺

复合材料夹层结构成型工艺是复合材料工业的发展基础和基本条件^[11]。随着复合材料应用领域的拓宽,复合材料夹层结构制造工艺得到迅速发展,目前已有 20 多种,并已成功用于工业生产,如:手糊成型工艺、拉挤成型工艺、纤维缠绕成型工艺、真空导入工艺等。

复合材料夹层结构制造工艺的关键是在满足制品形状尺寸及表面质量的前提下,使纤维增强材料能按照预定方向均匀配置,并尽量减少其性能降级,使树脂基体材料充分完成固化反应,通过界面与纤维增强材料良好结合,充分排除挥发气体,减少制品空隙率;同时还应考虑操作方便和对操作人员的健康影响。所选择的设备与工艺过程应与制品的批量相适应,使得单件制品的平均成本最低^[12]。因此制造工艺是复合材料夹层结构领域中至关重要的内容。

1.3.1 手糊成型工艺

手糊成型工艺又称接触成型工艺(Hand lay-up molding process),是通过手工作业把玻璃纤维织物和树脂交替铺在模具上,然后固化成型为复合材料制品的工艺。

1. 工艺流程

手糊成型工艺是聚合物基复合材料制造中最早采用和最简单的方法。该工艺所需的原

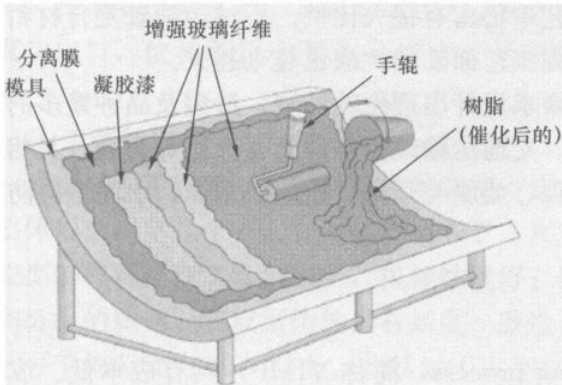


图 1-3 手糊成型工艺及示意

材料有纤维及其织物、合成树脂、辅助材料等。其工艺过程示意如图 1-3 所示,具体为:先在模具上涂刷含有固化剂的树脂混合物,再在其上铺贴一层剪裁好的纤维织物,用刷子、压辊或刮刀压挤织物,顺一个方向从中间向两边将气泡赶净,使纤维织物贴合紧密,含胶量均匀,再涂刷树脂混合物和铺贴第二层纤维织物,反复上述过程直至达到所需厚度为止。然后,在一定压力作用下加热固化成形(热压成

形), 或者利用树脂体系固化时放出的热量固化成形(冷压成形), 最后脱模得到复合材料制品^[13]。

2. 影响手糊成型制品质量的因素

影响手糊成型制品质量的因素主要包括: 施工人员的技术水平和基本素质、施工工艺的合理性、原材料质量的好坏、含胶量以及施工时的外界环境。作为手糊法施工制作产品, 施工人员自始至终都在参与制品的生产过程, 是制品生产的直接执行者, 施工人员的责任心、技术水平、工作情绪及素质都将影响到制品的最后质量。因此, 在手糊成型制品质量的影响因素中, 施工人员是最主要的。

施工工艺包括生产用的模具设计和施工方法的制定, 生产手糊成型制品用的模具的质量以及模具的选用直接关系到制品质量。制品是在预先设计好的模具上成型制成的, 因此, 设计制作完成的模具好坏直接关系到制品的外表美观与否、物理尺寸的精确度、施工过程中质量控制的难易、施工的方便与否和制品成型后脱模的难易, 这些都会影响制品的最终质量。

合格的原材料是保证制品合格的首要条件, 生产中原材料的质量得到保证, 复合材料制品质量才有了最基本保障。因此, 用于生产手糊复合材料制品的纤维、树脂等原材料必须具有出厂合格证、产品检验合格报告、生产许可证、生产厂家的厂名和地址、产品技术指标说明书。同时对进厂(实验室)的材料(特别是储存了一段时间的材料)还应该进行不定期的抽检, 送检验部门进行检查化验^[14]。

1.3.1.2 手糊成型工艺特点

手糊成型工艺作为应用最广泛的工艺, 具有较多优势, 如: 成型不受产品尺寸和形状限制, 适宜尺寸大、批量小、形状复杂的产品的生产; 设备简单、投资少、见效快, 适宜我国中小企业的发展; 工艺简单、生产技术易掌握, 只需经过短期培训即可进行生产; 易于满足产品设计需要, 可在产品不同部位任意增补增强材料; 制品的树脂含量高, 耐腐蚀性能好。同时, 该工艺也存在一些不足, 如: 生产效率低、速度慢、周期长、不宜大批量生产; 产品质量不易控制, 性能稳定性不高; 产品力学性能较低; 生产环境差、气味大、加工时粉尘多, 易对施工人员造成伤害。

1.3.1.3 手糊成型工艺的应用

在整个复合材料工业的发展历程中, 新的工艺方法不断涌现, 但由于手糊成型操作简便, 无需复杂的专用设备, 不受制品形状尺寸的限制, 同时可以根据设计要求, 随意局部加强, 因此手糊成型目前在复合材料成型工艺中仍占有很大比例。不过, 随着复合材料工业的不断发展, 机械化水平的日益提高, 手糊工艺面临的挑战也越来越大。

手糊工艺设计自由, 可根据产品的技术要求设计出理想的外观、造型及品种繁多的复合材料制品, 主要应用在建筑制品、造船业、交通运输以及各种防腐产品等领域。其相关产品主要有复合材料大篷、体育场馆采光层顶、船艇与军用折叠船、车壳、水泥槽内防腐衬层与钢罐内防腐层等。

1.3.2 真空导入工艺

真空导入工艺(Vacuum infusion molding process, 简称 VIMP) 具有成本低、成型快的特点, 它是在真空状态下排除纤维增强体中的气体, 利用树脂的流动渗透, 实现对纤

维及其织物的浸渍，并在室温下进行固化，从而形成一定树脂/纤维比例的工艺方法。

1. 工艺流程

真空导入工艺在模具上铺“干”增强材料（玻璃纤维、碳纤维、夹层材料等），然后铺真空袋，并抽出体系中的空气，在模具型腔中形成一个负压，利用真空产生的压力把不饱和树脂通过预铺的管路压入纤维积层中，让树脂浸润增强材料最后充满整个模具，制品固化后，揭去真空袋材料，从模具上得到所需的制品^[15,16]。

图 1-4 为在平板模具上采用真空导入工艺制作泡沫夹层复合材料板的工艺原理。该工艺采用单面模具（类似通常的手糊和喷射的模具）建立一个闭合系统。事实上，真空导入工艺公之于世已很久了，这个工艺在 1950 年即出现了专利记录。然而，直到近十年才得到发展。由于该工艺由国外引入，所以在命名上目前有多种称呼，如真空导入、真空导流、真空灌注、真空注射等。

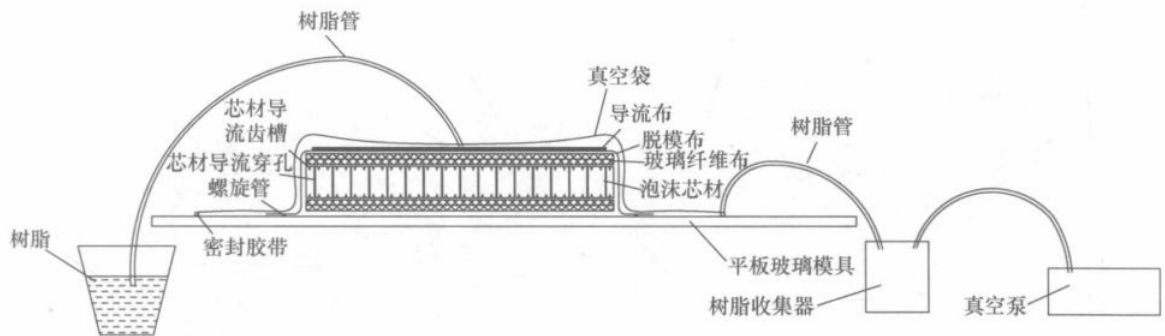


图 1-4 真空导入工艺原理

达西定律中，树脂被认为是不可压缩的，其黏度不受切变速度影响的牛顿流体。织物预制件被看作多孔介质，其特性可用孔隙率和渗透率表征，它们影响树脂在预制件中的流动方向和速度，因此决定着复合材料成型时需要的真空压力、充模时间和流动途径等关键参数，进而影响着树脂进口、出口及流道等关键结构的设计，以确保树脂在凝胶前完成充模过程。目前已有软件可模拟真空导入工艺中的流动过程，包括树脂流动前锋的位置和图样，可预先发现工艺中潜在的问题，并使工艺达到最佳化。

树脂在进口处的压力为 1 个大气压，其流动前锋的压力为零，树脂压力从出口处到进口处，其压力从零到 1 个大气压分布，离出口处越远树脂压力越大，相应预制件受的压力越小，纤维受压缩也越小，厚度也较大。在树脂到达出口处后，关闭树脂进口，而继续保持真空出口，使树脂压力稳定地减少，从而使预制件进一步压缩，可减缓厚度不均的现象。

2. 工艺特点

真空导入工艺是一种十分有效的成型方法，与传统的开模成型工艺相比，其优势^[7,8]主要体现在以下几个方面：在相同成本下，真空导入成型制件的强度、刚度或硬度较之手糊成型制件可提高 1.5 倍以上，机械性能好；通过设置真空度，可以在一定程度上控制树脂和纤维的比例，使成型构件具有高度一致性，重复性好；树脂浪费率低于 5%，比开模工艺可节约劳动力 50% 以上。尤其对于大型加筋结构，材料和人工的节省相当可观；开模成型时，苯乙烯的挥发量高达 35%~45%；真空导入成型中，挥发性有机物和有毒物

质均被局限于真空袋中，有效地避免了对环境的污染和对人身健康的危害。

此外，与传统的树脂传递模塑（RTM）工艺相比^[17,18]，真空导入成型只需要单面刚性模具，制品尺寸和形状受限更少，并且不需要繁杂的注射设备，进一步降低了成本，更适用于制造大型承力结构。

3. 工艺应用

真空导入工艺制造的复合材料制件具有成本低、空隙含量小、产品性能好的优点，并具有很大的工艺灵活性，能够一次成型带有夹层、加筋、预埋的大型复合材料结构件；且为闭模工艺，可有效地抑制苯乙烯挥发，绿色环保，已成为复合材料成型工艺的主要发展方向之一。随着在游艇、风力发电叶片等制品上的应用，真空导入工艺近几年得到了快速发展，作为一种相对高性能低成本的成型技术，正被越来越多的人认识和采用。图 1-5 (a)、(b) 为国外采用该工艺在常温常压下一次成型列车车头；图 1-5 (c) 为采用该工艺一次成型船体。

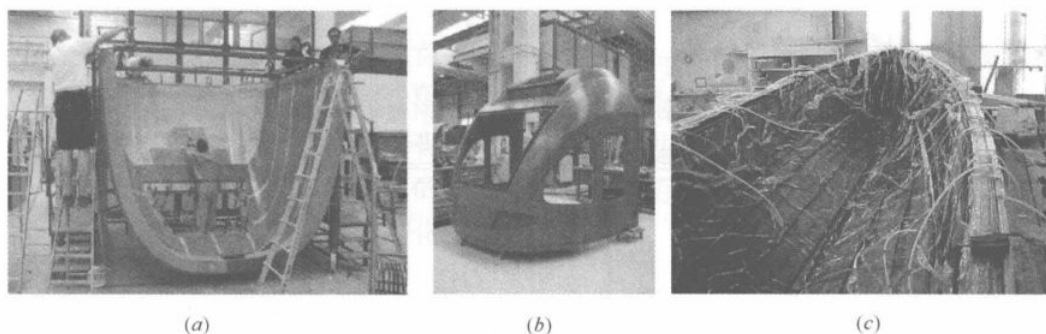


图 1-5 真空导入工艺成型

(a) 列车车头成型；(b) 列车车头成型后；(c) 船体成型

1.3.3 拉挤成型工艺

拉挤成型工艺是将纤维束或纤维织物通过纱架连续喂入，经过树脂胶槽将纤维浸渍，再穿过热成型模具后进入拉引机构，按此流程可制成连续的复合材料制品^[19]。

1. 工艺流程

拉挤成型工艺主要流程如下：

玻璃纤维粗纱排布→浸胶→预成型→挤压模塑及固化→牵引→切割→制品。

在拉挤成型工艺的发展中，有三种同时发展起来的工艺^[20]：

(1) 隧道炉拉挤工艺

该工艺是把玻纤粗纱或类似的增强材料牵引穿过树脂浴后，经过整形套管除去包藏的空气和多余的树脂达到预定的直径，然后牵引穿过隧道炉并悬空连续固化得到最终产品。

(2) 间歇成型拉挤工艺

该工艺是把增强纤维牵引穿过树脂浸渍槽并进入对分式阴模，在静止状态下由模外加热固化。通常模具的进入端要冷却以防树脂固化，当一段增强纤维上的浸渍树脂完全固化后，打开模具再把下一段牵引到模中。

(3) 高频或微波加热拉挤工艺

该工艺与上述两种方法类似，但采用高频或微波加热。该方法树脂固化速度快，在模内即可固化。

拉挤成型工艺可生产出截面形状复杂、性能稳定的连续型材（如：方形、工字形、槽形等型材），图 1-6 为拉挤成型工艺流程。由于拉挤型材中纤维主要沿轴向，且纤维含量高，有很好的受力性能，可直接作为受力构件，也可以与其他材料组合受力。目前，我国在拉挤成型工艺方面已有较大发展，能够连续成型各类较大截面的异形构件，也可拉挤成型夹层结构板材以及玻璃纤维/碳纤维复合拉挤型材^[21]。

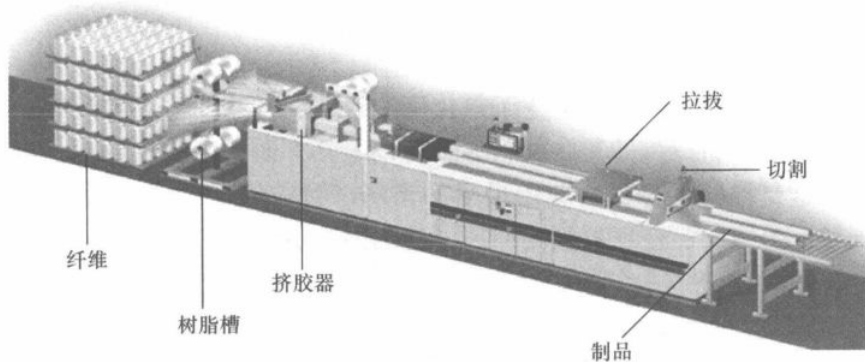


图 1-6 拉挤成型工艺流程

拉挤成型工艺通过对纤维、树脂比例的优化控制，达到增大复合材料刚度的效果^[17]。在合适的纤维、树脂比例下，长轴方向的弹性模量可达到 44GPa。拉挤型材的强重比是普通钢材的 4 倍。虽然刚度稍有不足，但是在达到同等强度和同等刚度的情况下，拉挤型材仍只有钢材约一半重量。而与钢筋混凝土相比，拉挤型材的强重比则可以高出 5 倍之多。

2. 工艺特点

拉挤工艺之所以能够迅速发展，是因为它具有许多突出的优点^[22]，首先，能够连续成型，制品长度不受设备和工艺因素的限制，只要空间足够，任何长度的制品都能够制成，并且很容易在空心制品的内腔或外表面设置纵向加强肋。其次，生产速度快，生产过程中无边角废料，产品不需后加工，故较其他工艺省工，省原料，省能耗^[23]，生产成本低。

同时，拉挤成型工艺也有一些局限性：产品形状单调，只能生产线形型材，而且横向强度较低。

3. 工艺的应用

拉挤复合材料的应用范围是目前比较受关注的问题（图 1-7）。据统计，拉挤复合材料可以在国民经济各个产业部门中应用。采用拉挤工艺制备的复合材料型材是良好的绝缘和隔热材料，热变形温度高，变形率低；可以有效吸收和减小结构内部声波传递；不易渗透水和水蒸气（型材基质聚合物本身可能吸收少量水汽）；可抵抗融冻现象；抗酸碱腐蚀能力强，在树脂基体的选择方面可消除诸多限制；多为化学惰性材料，用于建筑结构中时释放挥发性有机物的危险性小；在火灾情况下，材料表面会形成“焦化”现象，对结构内部形成保护，使这种材料具有比无特殊处理的钢材更好的防火性能；另外，复合材料拉挤

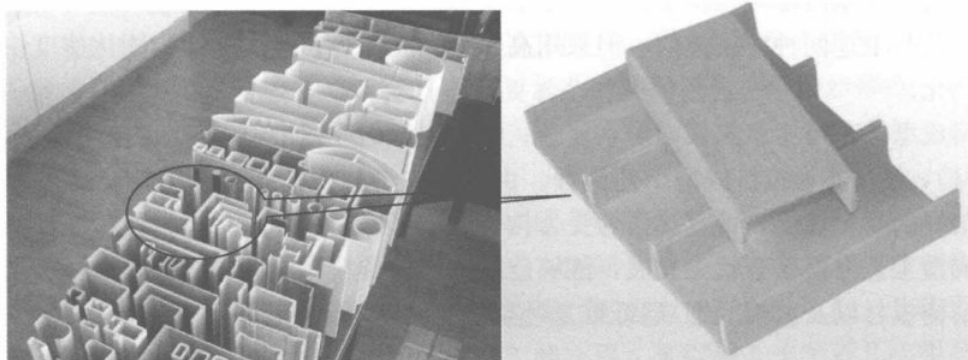


图 1-7 复合材料拉挤型材

型材在建筑结构中的应用可以大大减少二氧化碳的排放，对环境保护意义重大。

总的来说，目前拉挤成型的复合材料大致有以下几方面的应用：

电气领域：这是拉挤复合材料应用最早的市场，目前成功开发应用的产品有电缆桥架、梯架、支架、绝缘梯、变压器隔离棒、电机槽楔、路灯柱、电铁第三轨护板、光纤电缆芯材等。

化工、防腐领域：化工防腐是拉挤复合材料的一大用户，成功应用的有复合材料抽油杆、冷却塔支架、海上采油设备平台、行走格栅、楼梯扶手及支架、各种化学腐蚀环境下的结构支架、水处理厂盖板等。

消费娱乐领域：目前开发应用的主要产品有钓鱼竿、帐篷杆、雨伞骨架、旗杆、工具手柄、灯柱、栏杆、扶手、楼梯、无线电天线、游艇码头、园林工具及配件。

建筑领域：在建筑领域，拉挤复合材料已渗入传统材料的市场，如门窗、混凝土模板、脚手架、楼梯扶手、房屋隔间墙板、筋材、装饰材料等。同时筋材和装饰材料将有很大的上升空间。

道路交通领域和农村设施领域：高速公路两侧隔离栏、道路标志牌、人行天桥、隔音壁、冷藏车构件以及畜圈、禽舍用围墙栅、温室框架、支撑构件、藤棚、输水槽等。

参考文献

- [1] 王振清, 梁文彦, 吕红庆编著. 先进复合材料研究进展[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2014
- [2] 王全凤, 杨勇新, 岳清瑞. FRP 复合材料及其在土木工程中的应用研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2005, 26(1): 1~6
- [3] 黄晓艳, 刘源, 刘波. 复合材料在舰船上的应用[J]. 江苏船舶, 2008, 25(2): 13~17
- [4] [英]布赖恩·哈里斯(陈祥宝等译). 工程复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000
- [5] 沈真. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001
- [6] 姜作义, 张和善. 纤维-树脂复合材料技术与应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990
- [7] [日]植村益次. 高性能复合材料最新技术[M]. 贾丽霞, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [8] 王兴业, 杨孚标, 曾竟成等. 夹层结构复合材料设计原理及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [9] 方海, 刘伟庆, 万里. 新型复合材料快速抢建抢修路面垫板[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),

2009, 31(1): 93

- [10] 苏小萍. 碳纤维增强复合材料的应用现状[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 29(5): 34~36
- [11] 汤文成, 汤文宁, 易红, 唐寅. 复合材料成型的工艺方法[J]. 合成纤维, 1996, 04: 35~37
- [12] 赵秋艳. 复合材料成型工艺的发展[J]. 航天返回与遥感, 1999, 20(1): 41~46
- [13] 陈玉辉, 王嵘. 手糊成型工艺生产过程中的质量控制[C]. 玻璃强学会第十四届全国复合材料/复音材料学术年会论文集, 2001
- [14] 李宏伟. 手糊复合材料质量的控制[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(5)
- [15] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型工艺研究[J]. 纤维复合材料, 2002(1): 42~46
- [16] Correia N C, Robitaille F, Long A C. Analysis of the vacuum in-fusion molding process[J]. Analytical formulation Composites, 2005, (03): 1645~1656
- [17] 祝颖丹. 真空注射成型工艺的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002: 8~9
- [18] U K Vaidya, A Abraham, S Bhide. Affordable processing of thick section and integral multi-function composites. Composites; Part A, 2001(32): 1133~1142
- [19] Dag Lukkassen, Annette Meidell. Advanced Materials and Structures and their Fabrication Processes [M]. Narvik University College, HiN, 2007
- [20] 黄克均, 张建伟. 拉挤成型工艺及应用[J]. 工程塑料应用, 1997, 25(3): 54~57
- [21] 周效谅, 钱春香, 王继刚, 郑孝霞. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料拉挤工艺研究与应用现状[J]. 高科技纤维与应用, 2004, 29(1): 41~45
- [22] 孔庆保. 纤维增强塑料拉挤成型工艺综述[J]. 纤维复合材料, 1984, (1): 52~62
- [23] 孔庆宝. 纤维缠绕技术进入新的高速发展阶段[J]. 纤维复合材料, 1998, 9(3): 35~41

第 2 章 结构性能与分析

复合材料夹层结构具有良好的力学性能和物理特性,本章将通过理论分析方法对复合材料夹层结构进行力学性能的分析,为日后的复合材料夹层结构的设计做理论基础的铺垫。

2.1 轴心受拉构件的受力性能

在轴心受拉构件中,截面上的拉应力是均匀分布的。由于复合材料没有明显的屈服点,在达到材料的极限强度前,应力应变曲线近似为一条直线。所以,在计算轴心受拉构件强度承载力时,应以材料极限强度为强度准则,考虑工程中各种安全因素后,应采用比极限强度小的设计值 f_d 进行计算。轴心受拉构件的设计承载力 P_d 为:

$$P_d = Af_d \quad (2-1)$$

式中 A ——构件截面尺寸。

2.2 轴心受压构件的受力性能

2.2.1 复合材料面层对各向同性芯材的约束

对于各向同性芯材,由于受复合材料面层约束,实际服役中处于三轴受压状态。芯材的约束抗压强度 f'_F 可使用约束混凝土抗压强度计算公式得出,如公式 (2-2) 所示:

$$\frac{f'_F}{f_F} = 1 + k_1 k_s \frac{f_l}{f_F} \quad (2-2)$$

式中 f_F ——非约束芯材抗压强度;

f_l ——复合材料面层对芯材的横向约束强度,可由公式 (2-3) 计算;

k_1 ——有效约束系数,矩形截面为 2.98,圆形截面为 2.0;

k_s ——截面形状系数,可由公式 (2-4) 计算。

$$f_l = \frac{f_{w_t} t}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2-3)$$

式中 f_{w_t} ——复合材料面层拉伸强度。

$$k_s = \frac{b}{a} \frac{A_e}{A_F} \quad (2-4)$$

$$\frac{A_e}{A_F} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{a} \right) (a - 2R_F)^2 + \left(\frac{a}{b} \right) (b - 2R_F)^2 \right]}{3A_F} \quad (2-5)$$

式中 A_e ——有效约束面积;

- A_F ——芯材面积；
 a 、 b ——截面长和宽；
 R_F ——转角半径。

2.2.2 复合材料面层对各向异性芯材的约束

对于各向异性芯材，如木材、蜂窝等，须通过 Tsai-Wu 准则计算芯材的三轴抗压强度。芯材所受横向压力 P_w 可由公式 (2-6) 计算。

$$P_w + \frac{t_s}{R_w} \sigma_{s,h} = 0 \quad (2-6)$$

- 式中 R_w ——芯材半径；
 $\sigma_{s,h}$ ——复合材料面层横向应力。

由 Tsai-Wu 准则可知，强度张量多项式为：

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 = 1 \quad (2-7)$$

式中 $F_1, F_2, F_3, F_{12}, F_{13}, F_{23}, F_{11}, F_{22}, F_{33}$ ——强度参数，可由单轴压缩试验测得。

芯材的二次屈服方程为：

$$f = \sigma_e^2(\sigma_i, \alpha_i, M_{ij}) - k^2 = 0 \quad (2-8)$$

- 式中 σ_e ——有效应力；
 α_i ——屈服面中点；
 k, M_{ij} ——屈服面形状参数。

屈服方程为：

$$f = \sigma_e^2(\sigma_i, \alpha_i, M_{ij}) - (\varphi + M_{ij} \sigma_i \sigma_j) = 0 \quad (2-9)$$

在弹塑性阶段，屈服面方程为：

$$f = \sigma_e^2[\sigma_i, \alpha_i, M_{ij}(\epsilon_p)] - k^2(\epsilon_p) = 0 \quad (2-10)$$

式中 ϵ_p ——有效应变。

2.2.3 极限承载力

夹层构件轴向受压极限承载力可由公式 (2-11) 计算：

$$P_{pre} = 0.67 f_w A_w + f_s A_s \quad (2-11)$$

- 式中 A_w, A_s ——芯材和面层截面积；
 f_w ——芯材抗压强度；
 f_s ——面层轴向抗压强度。

若面层对芯材有约束作用，公式中芯材抗压强度代替为约束芯材抗压强度 f'_w 。

2.3 夹层梁板的受弯性能

复合材料夹层结构的受力性能与其芯材和面板的基本材性、几何尺寸与布置以及所受外荷载情况等密切相关，如图 2-1 所示。本章分别以“f”和“c”表示面板 (facing) 和