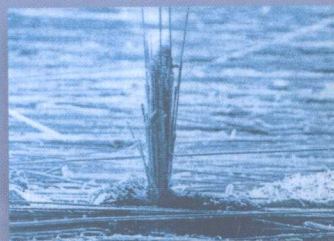
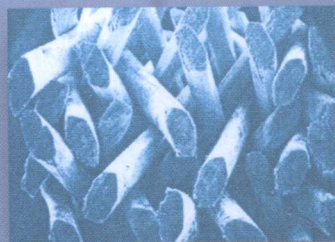


3D纤维增强 聚合物基复合材料

L. Tong, A. P. Mouritz 著
M. K. Bannister

黄涛 矫桂琼 译



科学出版社

www.sciencep.com

3D 纤维增强聚合物基 复合材料

L. Tong, A. P. Mouritz, M. K. Bannister 著

黄 涛 矫桂琼 译



科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2007-3642

内 容 简 介

纤维增强聚合物基(FRP)复合材料在航空、航天和航海、海洋石油平台以及汽车、运动器械、化学加工设备和桥梁、建筑等领域应用广泛。3D FRP 复合材料发源于 20 世纪 70 年代初,但是直到近 10~15 年这种材料才被大量地应用于工业领域。本书正反映了这一时期 3D FRP 复合材料最新的制造、力学性能、层间断裂韧性、冲击损伤容限和应用等方面的研究成果。本书主要介绍利用机织、编织、针织和缝纫以及 z 向销钉增强等纺织技术制成的 3D FRP 复合材料。

本书可作为国内航空航天材料研究机构广大科研和工程技术人员的参考书,也可作为高等院校材料科学、力学、航空、航天专业本科生和研究生教材或参考书。

This first edition of 3D Fibre Polymer Reinforced Composites by L. Tong is published by arrangement with ELSEVIER LTD, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1 GB

图书在版编目(CIP)数据

3D 纤维增强聚合物基复合材料/仝立勇(L. Tong), (澳) 莫里茨(Mouritz, A. P.), (澳)班尼斯特(Bannister, M. K.) 著; 黄涛, 矫桂琼译. —北京: 科学出版社, 2008

书名原文: 3D Fiber Reinforced Polymer Composites

ISBN 978-7-03-020109-6

I. 3… II. ①仝…②莫…③班…④黄…⑤矫… III. 纤维增强复合材料 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 031075 号

责任编辑: 胡 凯 / 责任校对: 张 琪

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张: 12 1/2

印数: 1—3 000 字数: 234 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈长虹〉)

译者前言

本书是澳大利亚悉尼大学航空与机电系 Liyong Tong 教授和皇家墨尔本理工大学航空工程系 Adrian P. Mouritz 教授及高级复合材料研究中心 Michael K. Bannister 教授合著“3D Fiber Reinforced polymer Composites”一书的译作。原书作者从事高级复合材料研究多年,是该领域颇具影响的知名学者。该书总结并提炼了近 10~15 年以来高级 3D 纤维增强聚合物基 (FRP) 复合材料的最新研究成果,内容涵盖 3D FRP 复合材料设计、制造、工艺、性能等各个方面的内容,着重描述了利用机织、编织、针织和缝纫以及 z 向销钉增强等技术制成的 3D 复合材料。这几种复合材料正是当今国际国内 3D 复合材料研究的焦点,是各航空航天大国新材料研究的重点。

本书的内容是近年来关于 3D 复合材料覆盖面最广,讲述最详细的一本著作,所引用的研究成果来源于国际公认著名期刊发表的高水平研究论文或美、澳等国大型研究机构的权威报告。目前许多高校和科研机构都在开展先进复合材料的教学和科研工作,但均缺乏这方面的权威全面的书籍,本书正好可以满足此要求。

限于译者的水平,书中难免有错误疏漏之处,敬请读者批评指正。

译者

2007 年 3 月

前 言

纤维增强聚合物基 (FRP) 复合材料使用在飞机、直升机、航天飞机、舰艇、轮船、海洋平台、汽车、运动器械、化学加工设备、桥梁、建筑等等几乎所有的高级工程结构上。FRP 复合材料的使用量正以令人惊异的速度增长, 不仅在传统工业领域上应用越来越多, 而且在一些新兴领域 (如生物医学和建筑结构) 上也确立了其地位。近年来这种复合材料广泛应用的关键因素是新型高级 FRP 材料的发展, 其中主要是高性能树脂体系的发展和新型增强材料 (如碳纳米管和纳米颗粒等) 的发展。另一个主要的推动力是三维纤维结构增强的先进 FRP 复合材料。3D 复合材料发源于 20 世纪 70 年代初, 但是直到近 10~15 年这种材料才被大量地开发成商用产品用于传统和扩展的市场。

本书的目的就是提供关于 3D FRP 复合材料最新的制造、力学性能、分层阻抗、冲击损伤容限和应用等方面的报告。本书将主要关注于采用机织、编织、针织和缝纫以及 z 向销钉增强等纺织技术制成的 3D 复合材料。本书适用于学习复合材料的本科生和研究生, 也适用于复合材料研究人员、制造商和最终用户。

第 1 章概括介绍了高级 3D 复合材料。这一章首先描述了促进 3D 复合材料发展的关键的经济和技术因素。这些因素包括更低的制造成本、更高的材料质量、更好的厚度方向性能和较好的分层阻抗, 以及比传统层压复合材料更好的冲击损伤阻抗和冲击后力学性能。本章最后概述了 3D 复合材料目前以及潜在的用途, 包括对其未来用途会造成影响的关键性问题。

第 2 章描述了用于制造 3D 复合材料的预成型件——3D 织物的机织、编织、针织和缝纫等工艺。这些工艺包括已经使用了数百年的传统纺织工艺以及最近出现且仍然在发展中的新纺织工艺。这一章中分析了纺织技术中工艺参数对 3D 复合材料和纤维构造的影响。

第 3 章描述了将 3D 织物预成型件固化成 FRP 复合材料的方法和加工过程。用于固化的液体注模方法包括树脂转移模塑成型法 (RTM)、树脂膜熔浸成型法 (RFI) 和 SCRIMP 法等。本章比较了制造 3D 复合材料不同固化工艺的优缺点和局限性。第三章还全面概述了使用液体注模方法制造 3D 复合材料可能出现的不同工艺缺陷 (如空洞、干污点、纱线扭曲等)。

第 4 章回顾了用于或可能用于对 3D 纺织复合材料力学性能进行理论分析的微观力学模型。本章介绍了确定 3D 复合材料面内弹性模量的模型, 包括 Eshlby、Mori-Tanaka、取向平均、二元法和单胞法等。本章同样还介绍了预测失效强度的模型, 比如单胞法、二元法和曲梁法等。本章评估了确定 3D 复合材料面内性能的模

型的精确度和局限性, 讨论了对更可靠模型的需求。

第 5 章到第 9 章分别描述了机织、编织、针织、缝纫和 z 向销钉增强 3D 复合材料的性能。这五章分析了 3D 复合材料在拉伸、压缩、弯曲和疲劳载荷下的力学性能和失效机理。这五章详细描述了 3D 复合材料层间断裂韧性、冲击阻抗和损伤容限的改善。这些章节中确定了我们对 3D 复合材料力学特性和厚度方向性能理解上的不足以利于未来的研究。

我们在此感谢过去十年来一起研究和发展 3D 复合材料的同事们, 特别是 I.Herszberg 教授, G.P.Steven 教授, P.Tan 博士, K.H.Leong 博士, P.J.Callus 博士, P.Falzon 博士, K.Houghton 先生, L.K.Jain 博士和 B.N.Cox 博士。我们还要感谢很多同事, 特别要感谢 T.W.Chou 教授, O.O.Ochoa 教授和 P.Smith 教授在本研究计划开始时对我们的鼓励。我们非常感激悉尼大学, 墨尔本皇家技术学院和高级复合材料联合研究中心允许我们为完成本书而使用其设备。LT 和 APM 感谢澳大利亚研究理事会 (ARC)、波音公司和高级复合材料联合研究中心的基金支持 (ARC 基金批准号: C00107070, DP0211709)。我们还要感谢许多杂志允许我们在本书中使用其照片、图片和图表。

目 录

译者前言

前言

第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 3D 纤维增强聚合物基复合材料介绍	4
第2章 3D 纤维预成型件制造	9
2.1 引言	9
2.2 机织	9
2.3 编织	17
2.4 针织	23
2.5 缝纫	29
2.6 总结	33
第3章 预成型件固化	35
3.1 引言	35
3.2 液体模塑成型技术	36
3.3 注入设备	39
3.4 树脂选择	41
3.5 预成型件问题	42
3.6 模具	43
3.7 构件质量	45
3.8 总结	46
第4章 研究力学性能的微观力学模型	47
4.1 引言	47
4.2 微观力学基础	48
4.3 2D 机织复合材料单胞模型	53
4.4 3D 机织复合材料模型	69
4.5 编织和针织复合材料单胞模型	77
4.6 失效强度预测	80
第5章 3D 机织复合材料	82
5.1 引言	82

5.2	3D 机织复合材料的微结构性能	83
5.3	3D 机织复合材料面内力学性能	85
5.4	3D 机织复合材料层间断裂韧性	96
5.5	3D 机织复合材料冲击损伤容限	99
5.6	3D 间距机织复合材料	101
第 6 章	编织复合材料	102
6.1	引言	102
6.2	面内力学性能	102
6.3	断裂韧性和损伤性能	107
6.4	疲劳性能	108
6.5	编织复合材料建模	109
6.6	总结	110
第 7 章	针织复合材料	111
7.1	引言	111
7.2	面内力学性能	113
7.3	层间断裂韧性	119
7.4	冲击性能	120
7.5	针织复合材料建模	122
7.6	总结	123
第 8 章	缝合复合材料	124
8.1	缝合复合材料简介	124
8.2	缝纫工艺	125
8.3	缝合复合材料力学性能	128
8.4	缝合复合材料的层间性能	136
8.5	缝合复合材料冲击损伤容限	146
8.6	缝合复合材料接头	150
第 9 章	z 向销钉增强复合材料	153
9.1	引言	153
9.2	z 向增强复合材料制造	153
9.3	z 向销钉增强复合材料力学性能	157
9.4	z 向销钉增强复合材料的分层阻抗和损伤容限	158
9.5	z 向销钉增强接头	161
9.6	z 向销钉增强复合材料夹层结构	162
参考文献		164
索引		188

第1章 绪 论

1.1 背 景

第二次世界大战以后,纤维增强聚合物基 (FRP) 复合材料从一种只能用在特殊情况下的奇特材料逐渐成为一种用途广泛的普通工程材料。复合材料现在用于制造飞机、直升机、航天飞机、卫星、轮船、潜艇、汽车、化学加工设备、运动器械和民用基础设施等,而且还很有可能用于医疗修复和微电子设备中。复合材料因为其轻质、比刚度高、比强度高、疲劳性能优异和比普通金属合金 (如钢和铝合金) 更高的耐腐蚀性能,已经成为一种重要的材料。复合材料其他的优点包括各方向力学性能的可设计性,低的热膨胀性能和高尺寸稳定性。复合材料显著的物理、热学和力学性能使其在很多应用中能够替代金属,特别是在对减重要求较高时,这种优势更明显。

FRP 复合材料可以简单地描述为多组分材料,它由增强纤维嵌入硬质聚合物基体构成。FRP 复合材料中的增强物可以是微粒、晶须或连续纤维。工程应用中的大多数复合材料的增强纤维是玻璃纤维、碳纤维或芳纶纤维。有时复合材料的增强纤维也采用硼纤维、光纤或热塑性纤维。许多种聚合物都可以用作 FRP 复合材料的基体,通常分为热固性树脂 (如环氧,聚酯) 和热塑性树脂 (如聚醚醚酮,聚酰胺)。

在几乎所有需要高刚度、高强度和高疲劳阻抗材料的工程应用中,复合材料的增强纤维通常是连续纤维而不是微粒或晶须。连续纤维复合材料用二维 (2D) 层状结构来描述,其中纤维排列在材料平面内 (xy 面),如图 1.1 所示。2D 层压板的一个显著特征是在厚度方向 (z 向) 上没有纤维排列。从成本、工艺性以及力学性能和冲击损伤容限等方面考虑,没有厚度方向的纤维可能是不利的。

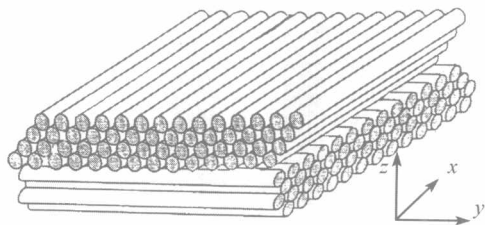


图 1.1 2D 层压板纤维结构示意图

一个严重的缺点是现在的复合材料制造工艺成本很高。传统的制造复合材料的工艺比如湿法铺设、热压罐和树脂转移模塑法等需要大量熟练劳动力来切割、铺叠层压板铺层并固定到预成型件中。在制造某些飞机结构时,大约有 60 层碳纤维织物或碳/环氧预浸带必须手工独立铺设。相似的,某些海军舰艇的舰体是由大概 100 层玻璃纤维织物构成的,这些纤维织物也必须手工铺设固定。缺少 z 向约束意味着每层纤维必须单独铺设,这样显著增加了制造的时间。而且,由于缺少 z 向纤维,纤维束在铺设的时候容易滑动,这会引起复合材料结构中的纤维角度变化。虽然制造设备非常昂贵且通常只适合制造某些特殊结构,如平板和微弯曲的板,采用半自动的工艺可以在某种程度上解决这些问题并减少工作量。制造复合材料的另一个问题是生产率很低,原因是树脂基体的固化很慢,在高温下也是如此。

把复合材料加工成形状复杂的构件进一步增加了成本,因为某些织物和预浸带来式样就很单一。这些材料不易加工成复杂形状,因此一些复合材料构件必须由大量分离的部件采用共固化、粘接和机械连接等方式组装而成。这在航空工业中是一个大问题,因为如机翼这样的结构必须用蒙皮面板、加强件和桁条等大量的小的层压件组装而成。这些制造上的问题阻碍了复合材料在某些飞机结构上的更广泛的应用,因为它的成本明显高于航空铝合金。

除了成本问题,2D 层压板的另一个缺点是厚度方向因为缺少 z 向纤维而性能很低。二维排列的纤维对层压板厚度方向的刚度和强度贡献很低,厚度方向的性能由性能较低的树脂和纤维-树脂界面决定。图 1.2 比较了 2D 层压板面内和厚度方

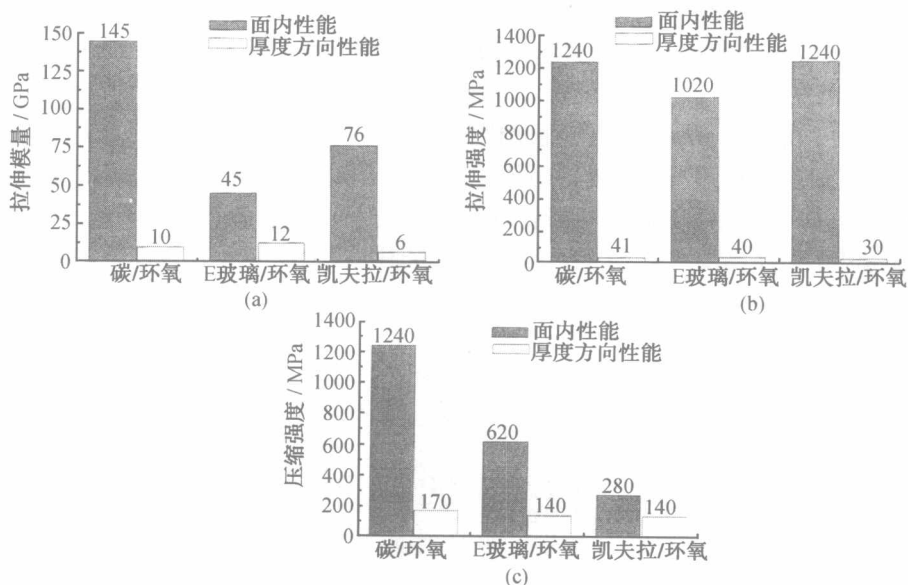


图 1.2 某些工程复合材料面内和厚度方向力学性能比较

向的性能。可以看出,厚度方向的性能通常不到面内性能的 10%,因此 2D 层压板不能用在承受较高厚度方向载荷或层间剪切载荷的结构上。

2D 层压板的另一个问题是其冲击损伤阻抗低,冲击后性能差。当受到低速冲击时,因为厚度方向强度较差,层压板易于产生分层破坏。这是复合材料飞机结构非常关心的问题,因为制造时掉落的工具撞击、鸟撞、冰雹和石块撞击都属于这种低速冲击。类似的,游艇、船只、舰艇的复合材料船体也可能因为受到水中漂浮物冲击或在大浪中撞上停靠的码头而损坏。这种损伤不易检测,会严重影响船体的水密性和完整性,特别是当其处于吃水线以下时。冲击损伤会严重降低材料在拉伸、压缩、弯曲和疲劳载荷下的面内力学性能。例如,图 1.3 显示了冲击载荷对某宇航级碳/环氧层压板拉伸和压缩强度的影响。随冲击能量增大,强度迅速下降,几焦耳的低能量冲击也会造成很大的强度损失。冲击后性能低是 2D 层压板的一个主要缺点,尤其是用在薄承载结构上时,如飞机机身和机翼壁板上少量的损伤就可能造成力学性能的严重下降。为解决分层损伤的问题,复合材料部件通常采用过设计的办法,即增加厚度。这样会增加成本、重量和体积,并且某些情况下冲击损伤阻抗的增加并不显著。

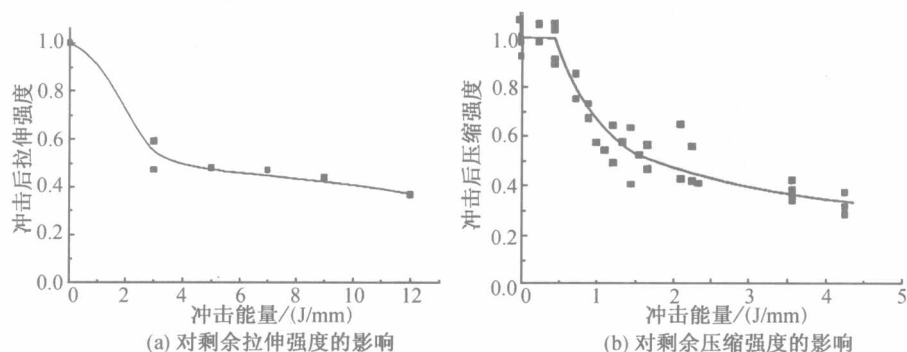


图 1.3 冲击能量对 2D 碳/环氧层压板的影响,冲击后强度对没有冲击损伤的层压板强度进行了归一化(拉伸和压缩数据分别来源于 Dorey(1989) 和 Caprino(1984))

为改善 2D 层压板的分层阻抗和冲击后力学性能,发展了很多种新材料。主要的冲击增韧方法是对树脂进行化学处理和用橡胶增韧,对纤维进行化学等离子处理和强化,在层压板中层加入韧性热塑性薄膜等。这些方法对改善层压板在低能量冲击下的损伤阻抗很有效,但每种方法都有很多缺点,从而限制了它们在大型复合材料结构中的应用。大多数方法最大的缺点是成本太高。比如,增韧树脂通常比标准树脂贵 5~10 倍。用加韧性薄膜的方法需要切割薄膜,并且逐层铺设到纤维层中然后再浸树脂。这种方法费时费力而且会显著增加复合材料的制造成本。另一个问题是用某些方法难以制造高质量的层压板。比如,使用橡胶增韧树脂制造复合材

料时,细微的橡胶颗粒可能会被增强织物阻碍而不能均匀分布到整个材料中。

1.2 3D 纤维增强聚合物基复合材料介绍

20 世纪 60 年代末以来,多种具有三维结构的纤维增强复合材料(混合了 z 向纤维)发展了起来,它们克服了二维层压板的上述缺点。也就是说,降低制造成本、增强厚度方向力学性能和改善冲击损伤阻抗的需求直接导致了 3D 复合材料的发展。3D 复合材料的发展主要依赖于航空工业,因为飞机、直升机或航天飞机中的承力结构对 FRP 材料的需求越来越大。船舶业、建筑业和汽车工业也推动了它的发展。3D 复合材料采用纺织技术中的机织、针织、编织和缝纫等工艺制造而成。3D 复合材料还采用一种称为 z 向销钉增强的新工艺制造。

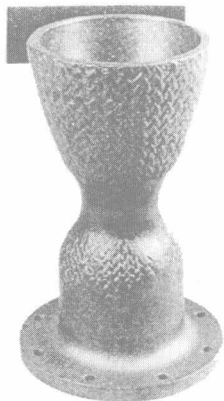


图 1.4 火箭喷管 3D 编织预成型件(大西洋研究公司同意公布)

编织工艺最早用于制造复合材料的 3D 预成型件。20 世纪 60 年代末,编织工艺被用于制造 3D 碳-碳复合材料的火箭发动机部件,以替代高温合金,其减重达到 30%~50%(Stover 等, 1971)。图 1.4 是一个用 3D 编织工艺制造的现代火箭尾喷管。尽管已经证明先进 3D 复合材料可以制造不规则形状构件,但当时只有很少的发动机构件用 3D 复合材料制造。此后不久,机织工艺首次用于制造喷气式飞机的 3D 碳-碳刹车部件(Mullen 和 Roy, 1972)。3D 机织复合材料被用于制造飞机刹车片以替代高温合金,从而提高耐久性,减少热变形。

早期的 3D 复合材料用碳-碳材料而不是纤维增强聚合物制造,因此不值得讨论。3D 纤维增强聚合物基复合材料的需求增长在 20 世纪 60 年代还很小,直到 20 世纪 80 年代中期这种材料才真正得到发展。从 1985 年到 1997 年, NASA 领导了著名的先进复合材料计划 (ACT 计划),该计划集合了飞机公司、复合材料制造商、纺织工业等共同努力研究和发展 3D 纤维增强聚合物基复合材料 (Dow 和 Dexter, 1997)。ACT 计划检验了机织、编织、针织、缝纫等纺织工艺用于为航空工业制造先进 3D 复合材料部件的可能性。ACT 计划和其他一些研究机构的研究工作用 3D 复合材料制造了许多种类的构件和结构,下面将分别进行介绍。当然,因为某些构件的商业敏感性,我们只介绍在公开的文献上报道的部件。

1.2.1 3D 机织复合材料的应用

机织工艺已经使用了超过 50 年,主要用于制造作为复合材料增强相的单层宽织物。但是直到最近,机织工艺才进行了改进以用于制造包含面内纤维和厚度方向纤维的 3D 机织材料。一种改进的织机具有数量不等的 x , y 和 z 向纤维,可以根据需要织出性能各异的 3D 机织复合材料。3D 机织工艺的巨大灵活性表明其可以为航天、航海、市政基础设施和医药工业提供各式各样的复合材料部件 (Mouritz 等, 1999)。但是,只有少数 3D 机织复合材料被实际使用,大多数部件都是为揭示 3D 机织复合材料的优点而制造的验证性部件。表 1.1 列出了 3D 机织复合材料的一些应用,图 1.5 是一些 3D 机织预成型结构的照片。可以看到,许多外形复杂的结构都可以用机织工艺一次成型,比如法兰盘、涡轮转子、梁、柱面等。制造这些验证部件大都证明了 3D 机织复合材料部件比 2D 层压板更快更廉价,尤其是对于外形复杂的结构。而且,3D 机织复合材料部件具有更好的分层阻抗和冲击损伤阻抗。

表 1.1 3D 机织复合材料验证部件

涡轮发动机反推力装置, 转子, 转子叶片, 绝缘体, 结构增强和热交换器
火箭头锥和喷管
发动机支架
飞机机身框架的 T 型截面元件
肋, 十字筋条, 多筋条增强飞机壁板
加工加筋板时填充筋条底部的 T 型和 X 型部件
机翼前缘和连接件
民用建筑 I 型梁
检查孔盖板

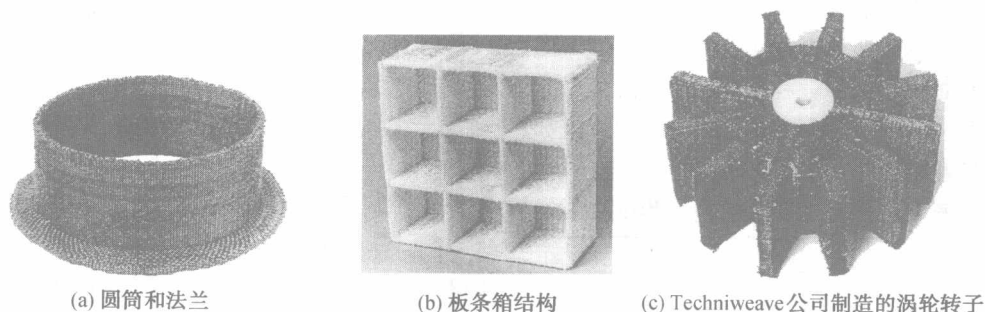


图 1.5 3D 机织预成型件的例子 (Techniweave 公司同意发布)

在制造了许多不同的部件验证了 3D 机织复合材料的多功能性和有效性的同时,关于其实际应用的报告却很少见。一个应用是 Beech Starship 飞机上的 3D 机织复合材料 H 型连接件 (Wong, 1992)。这种机织连接件用于连接机翼蜂窝壁板。3D

复合材料的使用降低了制造成本,同时改善了连接头的应力传递,减小了剥离应力。洛克希德·马丁公司采用 3D 机织复合材料制造联合攻击战斗机 (JSF) 进气道壁板的加强筋。与传统 2D 层压板和铝合金相比,使用 3D 机织复合材料加强筋减少了整个进气道中 95% 的紧固件,因而改善了气动性能和雷达反射特征,缩短了油路,简化了制造装配过程。据估算,进气道的制造时间可以缩短 1/2,而成本只有原来的 2/3,同时每个进气道减轻重量 36kg,降低成本至少 20 万美元。

3D 机织复合材料还被用于制造火箭头锥,可提供比传统 2D 层压板更优异的高温性能、抗分层和抗烧蚀性能。估算表明,3D 机织复合材料头锥制造成本只有传统头锥的 15%,显著节省了制造成本。3D 机织夹层复合材料被用于制造速度为 8 马赫 (约 2600 米/秒) (Kandero, 2001) 的超音速喷气冲压发动机的原型机。其中的 3D 材料是陶瓷基复合材料,由碳纤维和碳化硅用 3D 机织工艺制造而成。这种材料主要用于冲压发动机的燃烧室。这里使用 3D 机织复合材料的关键好处是:整个燃烧室可以用 3D 机织工艺一次制造成型,相对于传统工艺,这样大大减少了连接问题和泄漏问题。

除了航天上的应用,关于 3D 机织复合材料的应用还有以下一些零星的报道:用于修理损伤的船体,德国某地滑雪场升降座椅设施的房顶工字梁 (Müller 等, 1994),检修孔盖,运动器械 (如攀登用的护具和头盔),警用或军用防弹衣 (Mouritz 等, 1999) 等。3D 机织复合材料当前还不是医用材料,但有研究表明其在肢体修复方面具有应用潜力 (Limmer 等, 1996)。

1.2.2 3D 编织复合材料的应用

3D 编织工艺与许多领域中使用的制造标准 2D 编织碳布或玻璃布的工艺类似,这些 2D 纤维布多年来被用于各种各样的高技术项目,如高尔夫球棒,飞机螺旋桨和游艇桅杆等 (Popper, 1991)。3D 编织预成型件比 2D 编织预成型件或预浸带有许多重要的优点,包括适应性、悬垂性、扭转稳定性和结构完整性。而且,3D 编织工艺可以制造外形复杂的部件,可以制造变截面形状的部件,如锥型件、开孔、分叉件等等。

表 1.2 3D 编织复合材料验证部件

机体梁, 机身框和机身筒
尾翼轴
C 型, T 型和 J 型加筋板
火箭头锥和发动机喷管
连接杆
舰船螺旋桨叶片
生物医学设备

表 1.2 列出了 3D 编织复合材料在航空航天领域的潜在应用,其中包括机体梁、F 型截面机身框、机身圆筒、尾翼轴、肋加筋板、火箭头锥和火箭尾喷管等 (Dexter, 1996; Brown, 1991; Mouritz 等, 1999)。还有各种 3D 编织复合材料制造的验证性部件,包括 I 型梁 (Yau 等,

1986; Brown, 1991; Chiu 等, 1994; Fukuta, 1995; Wulfhorst 等, 1995), 分叉梁 (Popper 和 McConnell, 1987), 连接杆 (Yau 等, 1986) 和 C 型、J 型、T 型截面壁板 (Ko, 1984; Crane 和 Camponesch, 1986; Macander 等, 1986; Gause 和 Alper, 1987; Popper 和 McConnell, 1987; Malkan 和 Ko, 1989; Brookstein, 1990; Brookstein, 1991; Fedro 和 Willden, 1991; Gong 和 Sankar, 1991; Brookstein, 1993; Dexter, 1996)。

在非航空航天领域中, 3D 编织复合材料被用于制造海军登陆艇的推进器叶片 (Maclander 等, 1986; Maclander, 1992)。3D 编织复合材料在轮船上也有潜在应用, 如推进器轴和螺旋推进器 (Mouritz 等, 2001)。3D 编织复合材料被用于轻质军用桥梁的桁架面板, 以承受坦克和油罐车 (Loud, 1999)。其他一些潜在应用包括军用着陆场、堤坝、连接预应力混凝土的公路桥结构。因为其质量比断裂韧性和防撞性能相似的钢制部件轻 50% (Brandt 和 Drechsler, 1995), 3D 编织复合材料还可用于汽车的车身、底盘和传动轴。3D 编织复合材料也被用于制造许多生物医药设备 (Ko 等, 1988)。

1.2.3 3D 针织复合材料

3D 针织复合材料有许多优于 2D 层压板的特点, 特别是具有很高的可褶性和较好的冲击损伤阻抗。除了这些优点, 3D 针织复合材料也有一些缺点限制了其应用。许多航空结构用 3D 针织复合材料制造来验证材料的适用性, 比如机翼纵梁 (Clayton 等, 1997), 机翼壁板 (Dexter, 1996), 喷气发动机叶片 (Gibbon, 1994; Sheffer 和 Dias, 1998), T 型连接件 (King 等, 1996) 和 I 型梁 (Sheffer 和 Dias, 1998)。这种复合材料正在被研究用于制造新型空中客车 A380 上的后压力舱壁 (Hinrichsen, 2000)。3D 机织复合材料在非航空领域的应用包括保险杠, 汽车地板和车门 (Hamilton 和 Schinske, 1990), 方向舵尖整流罩, 医用修复材料 (Mouritz 等, 1999), 摩托车头盔 (Verpoest 等, 1997) 等。

1.2.4 3D 缝合复合材料

将层压板用高强度缝线进行厚度方向缝合是一种简单而低成本的制造 3D 复合材料的工艺。缝纫通常是用工业级缝纫机将铺设好的纤维预浸带或织物用纤维缝线 (一般为碳纤维, 玻璃纤维或凯夫拉纤维) 缝合。缝合复合材料厚度方向的增强纤维含量一般在 1% ~ 5%, 这与 3D 机织、编织和针织复合材料类似。

缝纫增强了复合材料 z 向性能, 使得缝合复合材料比传统 2D 层压板有更好的分层阻抗和冲击损伤容限。缝纫也可以将许多分离的复合材料部件连接起来以构造形状复杂的三维构件。这可以取代铆钉、螺钉、螺栓等机械紧固件, 从而减小了结构重量, 而且可能降低制造成本。如果需要, 可以只在需要厚度增强的局部区域

进行缝合,如复合材料部件的边缘、孔边、切口或接头等。

许多 3D 复合材料结构都是用缝纫工艺制造的,最重要的缝合结构是搭接接头,加筋板和机翼到梁的接头 (Cacho-Negrete, 1982; Hole, 1992; Lee 和 Liu, 1990; Lou, 1990; Sawyer, 1985; Tada 和 Ishikawa, 1989; Tong 等, 1998; Whiteside 等, 1985)。使用缝纫工艺连接和增强大型商用飞机的机翼和机身壁板的可行性已经在 ACT 计划中得到验证 (Palmer 等, 1991; Dexter, 1992; Deaton 等, 1992; Jackson 等, 1992; Kullerd 和 Dow, 1992; Markus, 1992; Suarez 和 Dastin, 1992; Jegley 和 Waters, 1994; Smith 等, 1994)。

在制造欧洲战斗机中机身蒙皮时进行了缝纫加工工艺的评估 (Bauer, 2000)。缝纫工艺可以用作把加强筋连接到欧洲战斗机机身壁板上,目标是与预浸带层压板制造的加筋板相比,降低构件成本 50%。在制造空中客车 A380 的后压力舱时也进行了缝纫工艺的评估,此部件的尺寸有 $5.5\text{m} \times 6.2\text{m}$ (Hinrichsen, 2000)。

1.2.5 3D z 向销钉增强复合材料

20 世纪 90 年代初, Aztex 公司发展了一种称为 “Z-fiberTM” 的专利技术,用于在厚度方向增强 2D 层压板 (Freitas 等, 1994)。“Z-fiberTM” 是一种用金属丝或拉挤成型复合材料制造的销钉,它可以插入未固化的预浸带或干的织物来制成 3D 复合材料。

z 向销钉增强技术是一种相对较新的技术,其丰富的潜力和用途正在研究当中。帽型和 T 型加筋板复合材料结构的突缘区域使用了 “Z-fiberTM” 以验证 z 向销钉增强技术对连接强度的增强效果。使用 “Z-fiberTM” 对突缘和接头进行局部增强可以替代紧固件或铆钉,而且在连接区域的载荷分布更均匀。 z 向销钉增强技术也在 F/A-18 超级大黄蜂战斗机上被用于增强进气道蒙皮壁板和把帽型加筋连接到特定复合材料壁板上。

第2章 3D 纤维预成型件制造

2.1 引言

虽然 3D 复合材料在厚度方向性能和抗冲击性能上的一些优点已经得到验证,但是这些材料仍然没有广泛地应用。这种有限的使用与制造预成型件的工艺成熟性有关,也与特定应用的设计要求及对工艺的理解与控制有关。制造复合材料结构的 3D 预成型件可以有很多的办法,但所有的用于制造复合材料的方法都源自以下四种传统纺织工艺:机织、编织、针织和缝纫。

本章的目的不是要详尽描述每种制造工艺,而是介绍在复合材料工业中发展和使用的不同技术,及其优点和局限性。

2.2 机织

机织方法在复合材料工业中已经得到广泛的使用,现在复合材料的增强材料,如单层、宽面碳布或玻璃布,绝大多数都是用这种方法制造的。同样的机织设备还可以用于制造具有三维结构的,更复杂的网状预成型件。为了了解 3D 预成型件的制造过程,有必要先了解传统的 2D 机织工艺。

2.2.1 传统机织工艺

机织本质上是用经纱和纬纱两种纱线交错制造织物的过程。基本的机织工艺如图 2.1 所示。经纱在织机方向上(0 度方向)运动,由纱线轴送入织机。纱线轴可以由很多框架(线轴架)上的独立线卷组成,或者由一个或几个已经预先缠好足够纱线的圆筒轴(织轴)组成。经纱穿过一系列杆或辊子以保持线之间的相对距离并有一定的张紧力,最后都送进一个升降机构,这在整个机织工艺中是最重要的一步。升降机构可能是机械的也可能是电动的,它可以有选择地控制任何单独的纱线(提花机)或同时控制一组纱线(带提升轴的织机,如图 2.1 所示)。最重要的一点是升降机构选择并提起需要的纱线,形成空间(梭口),这样纬纱可以从经纱右边(90 度方向)穿过。经纱被提升的次序控制了经纬纱的交织从而决定了所织布的式样(见图 2.2)。式样决定了织物的许多性能,如力学性能、悬垂性和纤维体积含量等。因此,为了制造合适的 2D 或 3D 预成型件,理解设计升降方式会产生什么样的纤维结构是采用这种工艺最重要的一点。