

吴德隆 沈怀荣 著

纺织结构复合材料 的力学性能



BEHAVIOR OF

TEXTILE

STRUCTURAL COMPOSITES

国防科技大学出版社

纺织结构复合材料的力学性能

BEHAVIOR OF TEXTILE STRUCTURAL COMPOSITES

吴德隆 沈怀荣 著

国防科技大学出版社

湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

纺织结构复合材料的力学性能/吴德隆,沈怀荣著—长沙:国防科技大学出版社,1998.12

ISBN 7—81024—514—7

I 纺织结构复合材料的力学性能

II 吴德隆 沈怀荣

III ①纺织结构 ②复合材料 ③力学性能

IV TQ3

国防科技大学出版社出版发行

电话(0731)4555681 邮政编码:410073

责任编辑:张建军 责任校对:谢小伟

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.625 字数:216千

1998年12月第1版 第1次印刷 印数:850册

定价:20.00元

前 言

纺织结构复合材料是纺织技术和现代复合材料技术结合的产物。所谓的纺织技术不仅是指现代纺织工业中的织造与缝纫技术,而且包含古代就有的传统编织、针织和缝纫技术。纤维束经过纺织工具的织造构成所需结构的形状骨架(预成型),然后进行浸胶固化即制成所需的工程结构或结构的零、部件。正是这种织造工艺的变革,使纺织结构复合材料以一种新型复合材料结构,为航天、航空、交通、建筑、军工、医疗、体育等领域广泛采用。

本书命名为纺织结构复合材料(从物理构造角度应为 Textile Architectural Composites, 而从工程应用角度应为 Textile Structural Composites),意在表征这类材料纤维束的微观构造和两相材料的复合特点。前者对材料的力学行为起主导作用,后者则表明该材料遵循一般复合材料的混合律法则和相应的力学、物理性能。国内外科技界则常称为纺织复合材料(Textile Composites)。和层板复合材料相比,纺织结构复合材料的突出优点是消除了层板复合材料因层的薄弱所带来的诸多弱点,如分层、开裂和损伤容限低等;此外,它具有更优良的可设计性;可自动化高效生产,高质量、低成本和高可靠性等。

现今和下世纪纺织结构复合材料将在结构工程中占据重要地位。为此,作者在总结近十年承担航天预研课题中有关“纺织结构复合材料、航天结构工程研究”和国家自然科学基金有关项目研究成果的基础上,结合参加国内外学术交流的心得著成本书。希望能反映当前国内外的最新研究进展和工程应用现状,并以此推动我国的纺织复合材料的研究与发展。

本书以纺织结构复合材料的设计为目的,从纺织几何学入手,

建立各类纺织构造的模型,得出纺织结构复合材料的本构方程,进行力学和物理性能的分析。以此为基础,在某种程度上就可把纺织结构复合材料转化为普通复合材料来处理。全书共分7章,前3章为必要的知识和基础理论,第4和第5两章分别为二维和三维模型讨论,第6和第7两章分别为实验研究和基本结构分析。本书既注重从方法论上讨论如何研究纺织结构复合材料的力学行为,又突出当前工程界和学术界所关注的一些重要理论问题,力求通俗易懂,深入浅出,富于启发性,以供工程技术人员和科研、教学工作者参考。

在本书的准备过程中,许多专家同仁和课题组的同志提供了宝贵的资料和意见,在此表示衷心的感谢。特别要感谢美国 Drexel 大学 Frank K. Ko 教授和 Delaware 大学 T. W. Chou 教授多次来华讲学,给予我们很大启发和帮助。最后要向国防科技大学出版社张建军副编审表示诚挚的谢意,感谢她自始至终所给予的热情关怀和不遗余力的帮助以及她的同事们所给予的鼎力协助。

尽管作者在本书撰写过程中,殚精竭虑、一丝不苟,但限于水平,难免有疏漏谬误之处,特别是鉴于第一本研究纺织结构复合材料的中文书籍,对一些名词术语,虽经仔细比较和反复推敲,但仍不乏偏颇之处,恳请专家和同仁不吝指正!

作 者

1998年9月于北京

目 录

1	绪 论	
1.1	纺织复合材料的发展和应用	(1)
1.2	纺织复合材料的组分	(5)
1.3	预成型与制造工艺	(14)
1.4	纺织复合材料的力学行为研究	(17)
	参考文献	(19)
2	纺织复合材料的预成型方法	
2.1	二维纺织预成型	(21)
2.1.1	二维机织	(21)
2.1.2	二维针织	(24)
2.1.3	二维编织	(25)
2.1.4	二维预成型的方向性	(28)
2.2	三维纺织预成型	(29)
2.2.1	三维机织	(29)
2.2.2	三维针织	(33)
2.2.3	穿刺	(35)
2.2.4	三维编织	(35)
2.3	纺织几何学分析	(41)
2.3.1	细胞中纤维束的几何特征	(43)
2.3.2	纤维束的方向性	(48)
2.3.3	纤维束联结处的相互作用	(50)
	参考文献	(55)
3	纺织复合材料力学性能的分析基础	
3.1	刚度矩阵与柔度矩阵	(58)

3.2	纤维束的工程弹性常数	(62)
3.3	经典层合板理论	(65)
3.4	损伤分析基础	(71)
3.4.1	连续介质损伤力学方法	(73)
3.4.2	微观力学方法	(75)
3.4.3	概率统计方法	(80)
3.5	强度分析基础	(83)
3.5.1	复合材料的基本强度	(83)
3.5.2	Tsai-Hill 和 Tsai-Wu 强度准则	(85)
3.5.3	单层板的强度预测	(88)
	参考文献	(89)
4	二维纺织复合材料的分析模型	
4.1	二维编织模型	(92)
4.2	二维针织模型	(95)
4.3	二维机织模型	(102)
4.3.1	镶嵌模型	(103)
4.3.2	弯曲模型	(109)
4.3.3	桥连模型	(113)
4.4	二维分析模型的应用	(118)
4.4.1	混杂纺织复合材料的镶嵌模型分析	(118)
4.4.2	三向机织复合材料的热弹性分析	(121)
	参考文献	(126)
5	三维纺织复合材料的分析模型	
5.1	纤维填充系数和纤维体积分数	(127)
5.1.1	纤维在纱线中的排列	(127)
5.1.2	编织复合材料的纤维体积分数	(132)
5.1.3	多层纺织结构的纤维体积分数	(139)
5.2	三维纺织复合材料的力学行为分析	(141)

5.2.1	弹性应变能法	(141)
5.2.2	倾角模型	(150)
5.2.3	大单胞模型	(156)
5.2.4	三细胞模型	(161)
5.2.5	选择平均模型	(172)
	参考文献	(180)
6	纺织复合材料力学性能的实验方法	
6.1	拉伸	(183)
6.2	压缩	(189)
6.2.1	纵向压缩	(189)
6.2.2	横向压缩	(195)
6.3	弯曲	(201)
6.4	剪切与扭转	(202)
6.4.1	方板测剪切模量	(202)
6.4.2	圆管扭转测剪切模量	(204)
6.4.3	剪切强度	(205)
6.5	断裂	(208)
6.5.1	平面断裂	(208)
6.5.2	层间断裂	(211)
6.5.3	整体编织 5 D 复合材料的断裂韧性	(215)
6.6	冲击	(219)
	参考文献	(221)
7	纺织复合材料结构分析	
7.1	梁的屈曲与振动	(224)
7.1.1	梁的高阶剪切理论	(224)
7.1.2	矩型截面梁的实验与分析比较	(229)
7.1.3	工字型截面梁的实验与分析比较	(233)
7.2	曲板非线性分析	(237)

7.2.1	几何非线性和高阶剪切理论	(238)
7.2.2	材料非线性	(240)
7.2.3	曲板非线性广义本构方程	(242)
7.3	杆系结构分析	(244)
7.3.1	圆管构件的压缩强度	(244)
7.3.2	杆系结构件的轴压承载能力	(247)
7.4	纺织复合材料结构的开孔分析	(252)
7.4.1	基本方程	(252)
7.4.2	保角映射求解	(256)
7.4.3	开孔补强	(259)
7.4.4	算例及讨论	(261)
	参考文献	(263)

1 绪 论

纺织结构复合材料是纺织技术和现代复合材料技术结合的产物,它与普通复合材料具有较大的区别。普通复合材料是通过把纤维束按一定的角度和一定的顺序进行铺层或缠绕而制成的,基体材料和纤维材料于铺层或缠绕同时组合而成,形成层状结构,因此也称层合(压)复合材料。而纺织结构复合料是利用纺织技术,首先以纤维束织造成所需结构的形状,形成预成型结构件(简称预成型),然后以预成型作为增强骨架进行浸胶固化而直接形成复合材料结构。正是这种工艺的变革,使纺织结构复合材料与普通复合材料相比具有了许多突出的优点。本章主要介绍纺织结构复合材料组成成分、成型特点、发展及应用情况。

1.1 纺织复合材料的发展和应用

材料、能源和食品既是人类赖以生存的三大要素,又是人类与自然界作斗争所追求的三大目标,由它们组成的某个时代的物质世界就是人类历史演进的标志。按当代历史观点,纺织结构复合材料的出现,是近世纪材料科学发展的重大进步之一。而按纺织复合材料的定义,可以追溯到中国古代用编成排的秫秸混合粘土做成的墙体,这是纺织结构复合材料在建筑领域的最早应用。另一个例子就是用铜丝编织成的陶瓷基容器(图 1.1)。可以考证,早在中国明朝(1368—1644)就可精制此类景泰蓝^[1]。从这两个例子可知,人类很早就熟知纺织结构复合材料的优点:织造的纤维网络具有优越的整体增强作用。因而纺织复合材料的出现和发展是一个悠久

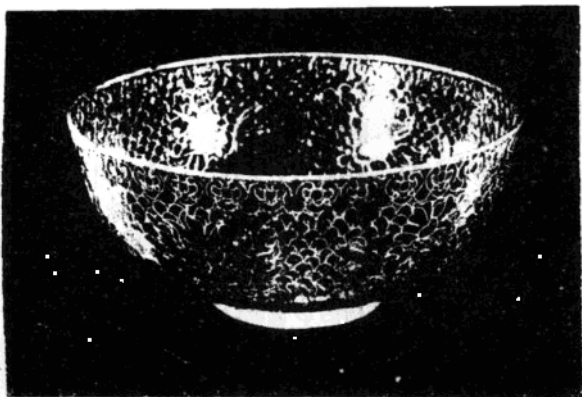


图 1.1 铜丝编织成的陶瓷基容器

的历史过程^[2]。

在 20 世纪 20 年代,波音公司(Boeing Aircraft Co.)就使用纺织结构来增强飞机的机翼。50 年代,美国通用电器公司(General Electric)也选择纺织结构作为碳/碳复合材料鼻锥的增强形式。70 年代初,在缠绕工艺的影响下,二维编织工艺被引入复合材料领域。随着复合材料的发展,二维编织工艺也得到了迅速的发展,并为制造复杂形状复合材料开辟了一条成功之路。80 年代,通过纺织界与复合材料界的合作,编织技术由二维发展到三维,从而为制造高性能复合材料提供了新的途径^[3]。三维编织结构复合材料由于其增强体为三维整体结构,大大提高了其厚度方向的强度和抗冲击损伤的性能,因而倍受重视并获得迅速发展。创造不补充加油而连续环球飞行一周记录的“航行者”(Voyager)飞机与美国比奇公司的“星舟”(Starship)1 号公务机,都采用了一些编织结构

件。英国道蒂公司的复合材料螺旋桨,其桨叶为编织结构,获得1991年英国女王技术成果大奖。美国航空航天局(NASA)大力开展三维编织结构复合材料研究工作。计划中包括开发编织技术、自动化加工和开发热塑性树脂等重要内容。

由此可见,现代纺织结构复合材料是在普通复合材料高度发展和广泛应用于各工业领域的基础上产生和发展起来的,通过吸收纺织学科各类织造技术,形成了机织、针织、编织等类别的纺织结构复合材料。值得指出的是,在过去40年里,还主要是以层板复合材料应用最广,特别是在航空航天、军事工业、交通等领域占据重要地位。复合材料的出现和发展对20世纪的结构工程产生了巨大的推动作用,并形成全球性的先进纤维材料的市场。在这种应用背景下,层板复合材料因存在“层”而带来力学性能的弱点:如分层、开裂敏感和损伤扩展快,垂直结构厚度方向强度低,抗冲击性能差等都显露出来。由此古代纺织结构复合材料的思想必然被人们接受用来消除复合材料的“层”。在常规复合材料成熟的设计分析方法、织造工艺以及高效的纺织织造技术的前提下,现代纺织结构复合材料以惊人的速度蓬勃发展,已波及美国、法国、英国、德国、俄罗斯、拉脱维亚、芬兰、比利时、中国、日本、韩国等国^[4]。其重要原因之一,就是纺织构造的优越力学性能,特别是不同的织造技术所形成的纤维束的微观构型,适应了十分广泛的载荷环境作用下的工程结构的要求。

在航空航天领域,高温、烧蚀和高速冲刷的导弹头锥、火箭发动机的喉衬采用三维整体编织结构复合材料。发动机裙和导弹弹体(或火箭箭体)以及飞机机身则采用二维编织或机织结构复合材料。目前对空间飞行器,特别是对那些长时间在轨道运行的空间站、空间实验室和重复使用的太空运输系统,正在进行一类智能型纺织结构复合材料的研究。这类结构是将诸如光纤(传感)、压电(驱动)等元件埋入材料内部,以监控制造过程中的质量和运行中

结构的健康状况或控制结构的动力学行为^[6~7]。

在交通运输领域,从自行车到汽车、舰艇、高速火车和军用战车,都可以找出用纺织结构复合材料制成的零部件和主体构架,甚至整机都是复合材料的,只是不同部件采用不同类型的纺织结构复合材料而已^[8]。如形状复杂的螺旋桨、曲轴就采用整体编织结构复合材料。

在建筑领域,可分为两类:一类是刚性复合材料构件,如梁、柱、骨架等;一类则是柔性纺织复合材料构件,如体育馆、停车场和车站的屋顶、野营帐篷等。前者大多采用三维织造类结构复合材料,后者则用二维织造类结构复合材料(图 1.2)^[9]。

体育用品如高尔夫球杆,医疗用品如人造血管、骨骼等都可用三维织造类结构复合材料。

从上述广泛的应用领域,不难看出,现代纺织结构复合材料与人类的生活是多么密切相关,对现代结构工程的发展将产生极大的推动作用。其原因就在于它的独特优点,总结如下:

(1) 高强度、高模量,特别是包括厚度方向、横向的全方位增强,使材料具有高损伤容限、高断裂韧性、耐冲击、抗分层、开裂和疲劳等;

(2) 优良的可设计性,可按加载方向增加纤维束数,以及按实际需要(整体)织造复杂形状的零部件和一次完成组合件,如加筋壳、开孔结构的制造等;

(3) 可自动化高效率生产和接近实际产品形状的制造,使加工量和连接大大减少。因而经济性好、成本低、制造周期短;

(4) 易于在预成型和复合前安放机敏类材料,如光纤、压电等,从而实现对复合工艺质量监控、产品在服务期间的寿命监测、振动控制等,这样既提高了产品质量又增加了可靠性。



图 1.2 柔性纺织复合材料结构

1.2 纺织复合材料的组分

众所周知,有选择地组合不同材料形成的复合材料,可以得到比各单个成分优越的综合性能。自然界本身就创造了许多复合材料结构,如动物的机体组织,植物的茎叶,它们都是由纤维(束)和基体两部分材料组成。纤维(束)又常常构造成网状结构,以增强整个机体。从上一节的介绍中,我们可以发现纺织结构复合材料更加类似于自然界经过优胜劣汰的生物组织。所不同的是纤维束的种种构造是经过现代纺织技术制造成形的,通常称为预成型。预成型后的纤维束网络骨架充填以基体材料,经固化就制成纺织结构复合材料。它与常规复合材料的区别就在于纤维(束)的几何构造不同。常规复合材料的纤维是平行的、互不交叠的。图 1.3 示出纺织

预成型的各种织造技术。

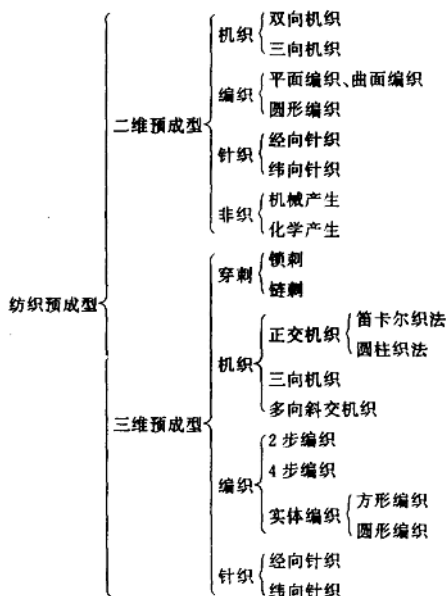


图 1.3 纺织预成型的各种织造技术

由图可见,纺织结构复合材料就是指由二维层状织物和三维整体织物增强的复合材料(为了简单,图中略去由针织、机织、非织及穿刺等组合产生的二维和三维结构)。从纤维增强复合材料增强体系的空间结构形式看,一般可以分为四类,如表 1.1 所示。纺织结构复合材料主要是研究后两类增强形式。

因此,可把纺织结构复合材料定义为用纺织技术制成的纤维预成型网络结构(预成型)作为增强骨架的一类先进的复合材

料⁽¹⁰⁾。

表 1.1 复合材料增强体系的分类

类型	增强系统	增强结构	纤维长度	纤维取向	纤维缠结
1	不确定	短纤维	不连续	随机	无
2	线状	纤维纱	连续	直线	无
3	层板	二维织物	连续	平面	平面
4	整体	三维整体	连续	三维空间	三维

纤维束是制造纺织预成型的基本元素。所谓纤维束是指具有纺织特性的多根连续纤维组成的纱束,具有合适的强度和柔韧性。单根连续纤维称为长丝。纱束也可以由短纤维组成,但需要被高度地扭转和缠结起来以克服纤维间的滑动。由短纤维组成的纱束称为纺纱。两个或多个纱束能够被捻到一起形成合股纱。合股纱能进一步交捻形成多股纱。先进的纺织结构复合材料大多数都是基于由连续的长丝组成的合股纱。在不涉及纱束的具体结构时,本书不加区分地把纤维纱束称为纤维纱、纺线、纺纱、纱等。图 1.4 示出各种可用作纺织结构复合材料纤维纱的典型材料。

这些纤维材料极为丰富,其性能如表 1.2 所列。此外还有二维织物布商品,如碳纤维织物(表 1.3 和表 1.4),凯夫拉织物(表 1.5),玻璃纤维织物(加捻的纱织物)(表 1.6 和 1.7)。这表明纺织结构复合材料还以二维织物预成型的半成品形式大量供应市场⁽¹¹⁾。

表 1.2 可用作纤维纱的典型材料

纤维种类	纤维直径 μm	密 度 (g/cc)	强 度 (MPa)	延伸率 (%)	模 量 (GPa)
聚酯(植物)	9.5—18	1.52	400—680	3—10	4.8—11
蛛丝(天然)	3—5	1.25	476	10—25	8.97
尼龙(人造)	20	1.14	300—1000	15—40	2.8—8.3
聚酯(人造)	20	1.35	360—950	15—25	6.9—12.4
Teflon(人造)	20	2.2	240	15—35	2.4—2.8
Nomex(人造)	20	1.38	610—670	22	17.2
玻璃(人造)	7	2.56	680—3390	3—5	69—89.7
Asbestos(天然)	25	2.25—2.75	290—2870	1.3	28.3—172
碳(人造)	6	1.4—1.6	390—2120	0.5—2	48—386
钢(无机)	25	7.9—8.4	1000—1790	1—7	46
Kevlar 29(DuPont)	12.1	1.44	2800		58
Kevlar49(DuPont)	12.0	1.45	2800		120
Spectra1000	27	0.97	3090	2.7	172
SP-100CM	23—101	1.4	2500	1.9	62—86
FP(DuPont)	21	3.9	1.38		380
Nextel312(3M)	12	2.7	1.55		150
SCS-6(Textron)	140	3.05	3.45		410
Astro-Quartz	9	2.2	3.45		69
T300R(Amoco)	10	1.8	2.76		276
E(Owens-Corning)	10	2.54	3.8		79
S(Owens-Corning)	10	2.48	4.5		83