



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书

航天科学与工程专著系列

MECHANICAL ANALYSIS METHOD OF 3D BRAIDED COMPOSITES

三维编织复合材料力学性能分析方法

● 梁 军 方国东 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目 · “十二五”

航天科学与工程专著系列

MECHANICAL ANALYSIS METHOD OF 3D BRAIDED COMPOSITES

三维编织复合材料力学性能分析方法

● 梁 军 方国东 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书对三维编织复合材料及其组分材料的力学性能分析方法进行了系统地阐述,并且论述了 C/C 编织复合材料工艺过程中的力学性能和高硅氧/酚醛编织复合材料的高温力学性能分析方法。

本书可作为从事纺织复合材料研制和应用设计人员、复合材料力学工作者及相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三维编织复合材料力学性能分析方法/梁军,方国东编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.3

ISBN 978-7-5603-4492-8

I. ①三… II. ①梁… ②方… III. ①三维编织—复合材料力学—力学性能—分析方法 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 293051 号

策划编辑 张秀华 杨 桦 许雅莹

责任编辑 刘 瑶 何波玲

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21.5 字数 456 千字

版 次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4492-8

定 价 48.00 元



(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

三维编织复合材料既是一种材料,又是一种结构,其最显著的特点就是性能的可设计性,通过纤维在空间不同的几何走向和铺设,可以获得近乎各向同性或某一方向性能更优的结构复合材料,随着现代纺织技术的快速发展及各种大型三维编织机的出现,利用二步法、四步法等工艺制备的三向、四向、五向、七向、细编、均编复合材料越来越多地应用在航空航天、交通运输、石油化工等国民经济的各个领域,发挥着不可替代的作用。

由于三维编织复合材料的力学性能与其细观几何结构、组分材料性能以及界面特性密切相关,并且很难从实验中观测到编织复合材料内部复杂的损伤演化过程,这就使得对其性能的特征与评价非常困难。如何借助计算机数值模拟手段,建立与细观结构相关的力学模型,选取适合的破坏准则,开展三维编织复合材料性能的渐进损伤分析和评价,正是我们撰写这部书的初衷和目的,也是多年来学术界和工程界所关注的热点问题。

本书力图从细观尺度入手,由纤维束和基体性能预报编织复合材料的宏观性能,着重于力学模型和分析方法的介绍。书中第1章介绍了纺织复合材料分类、纤维和基体材料、编织复合成型工艺和编织复合材料的特点及应用;第2章基于单向纤维增强复合材料力学分析方法得到了纤维束的刚度和强度性能;第3章对编织复合材料的几何结构进行分析,给出了预报编织复合材料有效刚度性能的理论及数值分析方法;第4章针对代表体积单胞模型,通过纤维束和基体材料以及界面的损伤分析,建立了一种编织复合材料宏观非线性力学响应的积累损伤分析方法;第5章介绍了复合材料强度理论及分析方法,结合细观累积损伤分析和宏观强度准则对编织复合材料强度特性进行评价;第6章对碳/碳编织复合材料的制备过程进行模拟,揭示了碳基体和纤维束在固化—碳化—石墨化浸渍工艺过程中微结构及力学性能的变化规律,形成了一套预报编织复合材料宏观性能的工艺力学分析方法;第7章介绍了高硅氧/酚醛编织复合材料在高温条件下的表面烧蚀、体积烧蚀和刚度及强度性能的分析方法,重点突出了热—力—氧多场耦合计算在复合材料高温力学响应模拟的重要性。本书在附录中给出了部分数值计算程序,希望能对读者深入学习和研究有所帮助。为了使读者查阅和应用方便,在每章后面均列出了与该章内容有关的参考文献。

这部书所涉及的内容主要是近年来我们课题组在这一方向的研究成果,同时我们也尽力将国内外相关研究展现在读者面前,希望对从事编织复合材料工作的学者有所帮助。本书具体分工如下:第2、5、6章由梁军撰写;第1、3、4章及附录由方国东撰写;第7章由时圣波撰写。

由于作者水平有限,不当之处在所难免,希望读者不吝指正。

作 者

2013年10月

2.3.1	扭曲纤维束的柔度平均法	42
2.3.2	随机函数理论	47
2.4	纤维束强度分析模型	55
2.4.1	纵向拉伸强度	56
2.4.2	纵向压缩强度	59
2.4.3	横向拉伸、压缩和剪切强度	63
2.4.4	Chamis 强度公式	66
2.5	热膨胀系数和湿膨胀系数	67
2.5.1	热膨胀系数	67
2.5.2	湿膨胀系数	68
	参考文献	69
第3章	三维编织复合材料有效性能的分析方法	74
3.1	编织复合材料几何模型及纤维体积分数	76
3.1.1	1×1 四步法编织复合材料的三胞模型	76
3.1.2	二步法编织复合材料	82
3.1.3	三轴圆形编织复合材料	85
3.2	编织复合材料力学分析模型	86
3.2.1	刚度平均化方法	86
3.2.2	最小余能方法	89
3.3	编织复合材料数值分析方法	94
3.3.1	有限元方法	94
3.3.2	多相有限元方法	100
3.3.3	均匀化方法	105
	参考文献	114
第4章	三维编织复合材料的积累损伤模拟方法	118
4.1	各向异性损伤准则	119
4.1.1	Hashin 初始损伤准则	120
4.1.2	纤维横向压缩初始损伤准则	121
4.1.3	纤维纵向压缩初始损伤准则	124
4.2	损伤及损伤演化模型	128
4.2.1	各向异性材料损伤模型	128
4.2.2	损伤演化方程	131
4.2.3	界面损伤模型	132
4.2.4	三维纤维增强复合材料损伤模型	133
4.3	非线性问题数值求解过程	135

4.3.1	初始边值问题的有限元解	135
4.3.2	纤维增强复合材料积累损伤非线性分析的数值求解过程	139
4.4	三维四向编织复合材料损伤演化分析	140
4.4.1	几何模型及有限元模型	140
4.4.2	周期边界条件	141
4.4.3	数值仿真结果	141
	参考文献	153
第 5 章	三维编织复合材料破坏分析及强度理论	157
5.1	利用二元模型对纺织复合材料失效分析	158
5.1.1	组分材料本构关系	159
5.1.2	二元模型中耦合弹簧的本构关系	160
5.1.3	三维角联锁机织复合材料破坏分析	162
5.2	利用积累损伤模型对编织复合材料强度预报	168
5.3	破坏理论	171
5.3.1	蔡-希尔强度准则	171
5.3.2	蔡-吴张量多项式准则	173
5.3.3	强度比方程	181
5.3.4	基于 Kelvin 模式的多维各向异性材料准则	182
	参考文献	187
第 6 章	碳/碳复合材料工艺力学性能分析方法	190
6.1	C/C 复合材料工艺过程的数值模拟	191
6.1.1	C/C 复合材料碳基体的原材料	191
6.1.2	液相浸渍制备工艺过程	192
6.1.3	制备工艺过程中组分转化数学分析模型	193
6.1.4	沥青先驱体 C/C 复合材料制备工艺过程模拟	195
6.2	C/C 复合材料基体在工艺过程中的力学性能	199
6.2.1	工艺过程中基体弹性性能	199
6.2.2	工艺过程中基体强度性能	202
6.2.3	工艺过程中基体热膨胀系数	205
6.2.4	C/C 复合材料基体在工艺过程中力学性能的求解	205
6.3	单向纤维增强 C/C 复合材料在工艺过程中的力学性能	206
6.3.1	工艺过程中单向复合材料弹性性能	208
6.3.2	工艺过程中单向复合材料强度性能	211
6.4	C/C 编织复合材料在工艺中的力学性能	216
6.4.1	编织复合材料的弹性性能	217

6.4.2	编织复合材料的强度性能	219
6.4.3	C/C 编织复合材料算例	222
6.5	不同石墨化次数对 C/C 复合材料力学性能影响的实验研究	224
	参考文献	227
第 7 章	高硅氧/酚醛复合材料高温力学性能分析方法	230
7.1	高硅氧/酚醛复合材料烧蚀机理及表面烧蚀理论	231
7.1.1	高硅氧/酚醛复合材料烧蚀机理	231
7.1.2	表面烧蚀模型	237
7.1.3	烧蚀性能的理论计算结果与实验测量结果	244
7.2	高硅氧/酚醛复合材料的体积烧蚀性能	248
7.2.1	单侧热流荷载下的一维热响应模型	248
7.2.2	一维热响应计算结果与讨论	257
7.3	高硅氧/酚醛复合材料多场耦合条件下的热-力学行为	265
7.3.1	温度/扩散/变形耦合问题的多物理场耦合分析模型	265
7.3.2	多场耦合条件下热-力学响应的有限元计算	268
7.3.3	非接触高温热变形测量实验	272
7.3.4	多场耦合分析模型计算结果的分析及讨论	273
7.4	高硅氧/酚醛复合材料的高温刚度和强度性能衰减分析	280
7.4.1	高温压缩强度测试及压缩模量计算	280
7.4.2	高温刚度性能衰减分析	283
7.4.3	高温强度性能衰减分析	289
	参考文献	292
附录 A	局部基矢量的展开系数	300
附录 B1	坐标转换矩阵	304
附录 B2	热应力方法中的用户子程序 UEXPAN()	306
附录 B3	边界力方法中的用户子程序 UTRACLOAD()	307
附录 C	编织复合材料积累损伤分析 ABAQUS 内嵌 UMAT 子程序	309
	名词索引	333

目 录

第 1 章 三维编织复合材料结构特点及其应用	1
1.1 预制体形式及编织工艺	2
1.1.1 预制体的形式	2
1.1.2 纱线	4
1.1.3 编织工艺	6
1.2 编织复合材料主要成型工艺	14
1.2.1 模压成型技术	14
1.2.2 树脂浸渍技术	14
1.2.3 树脂传递模塑成型技术	15
1.3 纤维材料	17
1.3.1 碳纤维	17
1.3.2 玻璃纤维	18
1.3.3 芳纶纤维	19
1.3.4 硼纤维	20
1.3.5 PBO 纤维	21
1.4 基体材料	21
1.4.1 热固性树脂基体	22
1.4.2 热塑性树脂基体	23
1.4.3 陶瓷基体	24
1.5 编织复合材料的特点	24
1.6 编织复合材料的应用	25
参考文献	28
第 2 章 纤维束的刚度及强度性能预报	30
2.1 纤维束的纤维填充因子	30
2.2 整齐笔直排列纤维束有效性能	31
2.2.1 Mori-Tanaka 方法	32
2.2.2 Hashin-Rosen 同心圆柱模型	36
2.2.3 桥联模型	37
2.2.4 几种简单预测纤维束有效性能的方法	39
2.3 扭曲纤维束有效性能	41

第 1 章 三维编织复合材料 结构特点及其应用

与金属合金材料(如钢和铝合金等)相比,纤维增强复合材料具有高比刚、高比强、好的抗疲劳性能、优良的抗腐蚀能力和可设计性等,在第二次世界大战以后得到了深入的发展。现在,纤维增强复合材料广泛应用在航空、航天、航海、交通运输、医疗、体育和土木工程等领域,特别是在结构重量有严格限制时表现出独特的优势。由于容易简单铺设成形和制造成本低,纤维增强层板复合材料首先得到了广泛的应用。层合板是一种连续纤维增强复合材料,但增强纤维的方向主要铺设在面内,没有沿面外厚度方向的增强纤维。由于缺少沿厚度方向的增强纤维,在厚度方向的刚度和强度主要由力学性能较差的基体及纤维基体界面决定,所以层合板在厚度方向的力学性能与面内的力学性能相比相差甚远。另外,由于层合板在厚度方向的强度较差,当受到低速冲击荷载作用时,层合板容易产生分层损伤破坏。

为了加强纤维增强层板材料在厚度方向的性能,最直接的方法是在厚度方向布置纤维,利用纺织技术实现纤维在空间的合理布置形成预纺织件,然后采用树脂传递模塑成型或树脂膜渗透等成型工艺进行浸胶固化,最后形成复合材料结构。纺织复合材料不但是一种材料更是一种结构,是通过纺织技术,包括机织、针织、编织或缝合技术,为实现在最大限度上发挥材料优良的力学性能,在主要承载方向上布置纤维形成复合材料预成形件。纺织复合材料是在 20 世纪 60 年代为了满足航天部件和结构抵抗多向应力以及热应力的需求提出的,主要应用在航天飞机的鼻锥和机翼的前沿、火箭发动机喷管喉衬、导弹端头帽和军用飞机等,并在 20 世纪 90 年代得到迅速发展^[1]。NASA 在 1989 年开始制订了先进复合材料技术计划(ACT 计划),分析和评估了纺织复合材料的性能,主要是为了进一步提高纺织复合材料的力学性能并且降低材料的制作成本,使纺织复合材料成为复合材料结构候选的主要材料结构^[2]。近年来,随着纺织工艺的逐步成熟,纺织复合材料在制备过程中完全实现自动化,于是大型的复杂的结构部件也能够实现整体成型,不但降低了生产成本,而且提高了材料的损伤容限。编织复合材料是纺织复合材料体系中重要的一类材料,由于编织构件的整体性好,能够生成净截面构件,因此,在汽车、土木建筑以及航空、航天、航海行业中逐步由次要承力部件过渡到主要承力部件。

本章对编织复合材料的预制件、编织形式及成型工艺做一个简单的介绍,然后对主要的纤维和基体材料进行总结及归纳,最后给出编织复合材料的特点及相关应用。

1.1 预制体形式及编织工艺

1.1.1 预制体的形式

目前,有很多预制体适合制作纺织复合材料,这些预制体都表现出面内具有多轴增强相、厚度增强相和净成形工艺等特点。根据纤维的状态和构造不同可以把纤维增强复合材料分为4大类:离散型、连续型、平面型及三维一体型,见表1.1^[3]。对纤维织构的详细分类如图1.1所示。

表 1.1 复合材料纤维构造

增强体系	纤维构造	纤维长度	纤维取向
离散型	短切纤维	离散型	自由的
线性型	纤维长丝	连续型	线性
平面型	简单织物	连续型	平面
三维一体型	高级织物	连续型	三维

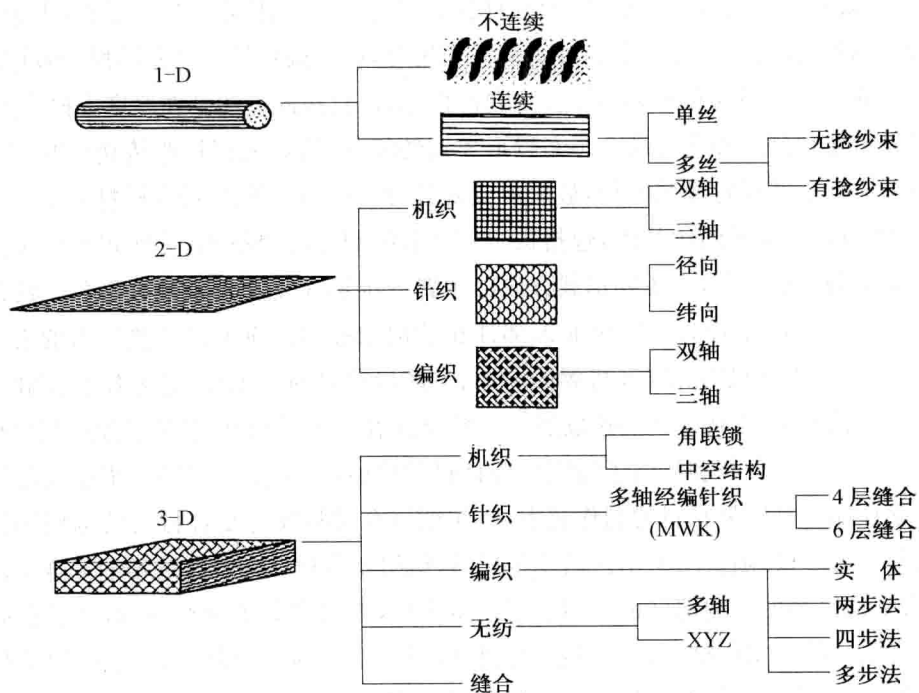


图 1.1 纤维织构的分类

(1) 离散型

离散型复合材料纤维不连续,纤维的方向和位置随机分布,如晶须或纤维弥散增强复合

材料等。由于纤维的增强方位很难控制,所以该离散型复合材料的强度相对较低。

(2) 连续型

连续型复合材料纤维连续并且排列整齐,纤维方向呈线形,如单向纤维增强复合材料。由于纤维在一个方向增强,该复合材料表现低的抗分层能力。

(3) 平面型

平面型复合材料的纤维连续并在平面内相互交叠,通过层合使材料达到一定的厚度,如简单织物层板复合材料。由于缺少在厚度方向的增强相,该复合材料的层间强度主要由基体及纤维/基体界面性能控制。

(4) 三维一体型

三维一体型复合材料在面内和面外都有纤维增强,纤维以纤维束的形式利用一些纺织工艺(如机织、针织、编织和缝合等)整体成型,如三维正交复合材料、机织复合材料和三维编织复合材料等。这些三维织物除了纤维束在空间的取向不同会影响复合材料的性能外,织物的结构形式在成型过程中基体表现不同的渗透性也同样会影响复合材料的性能。

织物预制件可以通过纤维—织物工艺、纱线—织物工艺或两种工艺结合得到。1988年,Olry 开发了 Noveltex 方法,利用纤维针刺得到了针刺织物。1989年,日本 Fukuta 也利用流体射流代替针得到与 Noveltex 方法相似的针刺织物。纱线—织物工艺与纤维—织物工艺相比,这种利用平直纱线或扭曲纱线得到织物的形式更普遍。图 1.2 为利用纱线—织物的机织、针织、编织和非织造工艺得到的织物预制体^[4]。织物通过巧妙的设计,能够满足复合材料构件稳定性、适应性和可成型性等要求。

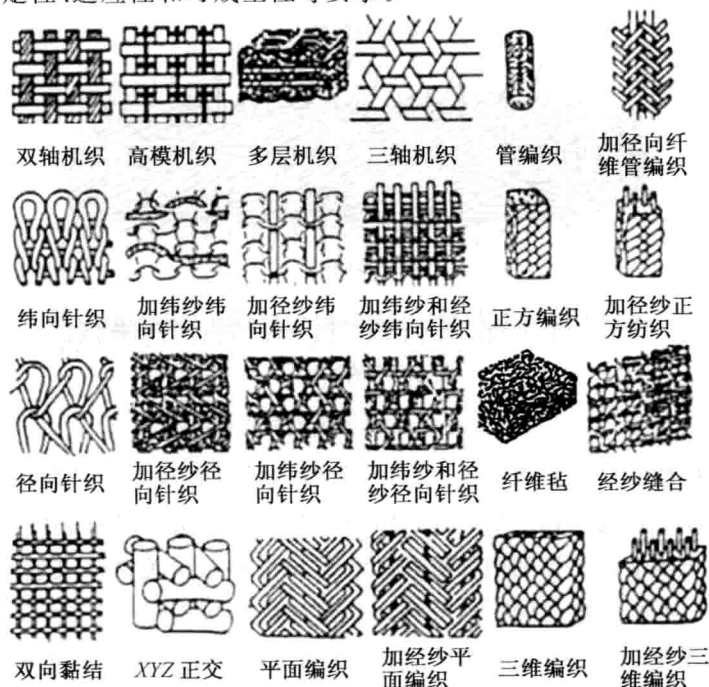


图 1.2 不同类型织物结构^[5]

1.1.2 纱线

纱线由纺织纤维组成,具有一定的力学性质、细度和柔软性的连续细长条。按纱线的形成方法,可以分为连续长丝纱线、短纤维纱线和复合纱线。多数的高性能纱线是连续长丝纱线。连续长丝纱线由单根或多根连续纤维组成的纤维互相平行顺直,具有一定的方向性,其可以无捻也可以有捻。短纤维纱线是指经纺纱工艺由不连续的短纤维得到,通常该纱线有一定的捻度。复合纱线由连续纤维和短纤维或两种以上的纤维丝混合组成。按纱线的结构外形,可以分为单丝、复丝、捻丝、复合捻丝、变形丝、单纱和股线等。图 1.3 是几种细丝纱线的结构形式。

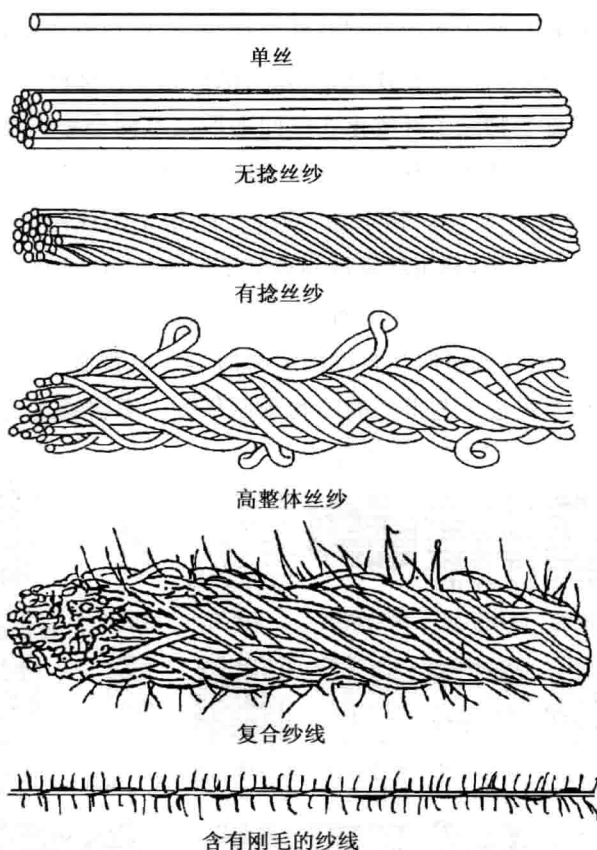


图 1.3 细丝纱线的几何结构^[6]

纱线的结构特性主要由纱线细度、捻度和纤维内外转移决定。纱线的细度指标分为直接指标与间接指标。直接指标是指直径、截面积、周长等。对于纤维和纱线来说,直接指标测量较为麻烦。间接指标是指利用纤维和纱线的长度和质量关系来表达细度的,有特克斯(号数)、公制支数、英制支数、旦数等,分为定长制和定重制两种。定长制是指一定长度的纤维和纱线的标准质量,包括线密度和纤度;定重制是指一定质量的纤维和纱线所具有的长度,包括公制支数和英制支数。纱线的线密度(tex)是指 1 000 m 长的纱线在公定回潮率时

的质量克数,单位为特克斯(tex)。纤度(Ndenier,旦尼尔)是9 000 m长的纤维和纱线所具有的公定质量克数。所有的纤维及纱线均应采用线密度和纤度来表示其粗细,特克斯和纤度越大,纱线越粗。公制支数(N)是每克纤维或纱线在公定回潮率下的长度米数。英制支数(S)是在英制公定回潮率时,每磅重的纱线所具有的840码的倍数。具体的计算公式如下。

$$\text{特克斯(tex):} \quad 1 \text{ tex} = 1\,000 \times G/L \quad (1.1)$$

$$\text{分特克斯(dtex):} \quad 1 \text{ dtex} = 10\,000 \times G/L \quad (1.2)$$

$$\text{旦尼尔(D):} \quad D = 9\,000 \times G/L \quad (1.3)$$

$$\text{公制支数(N):} \quad N = L/G \quad (1.4)$$

$$\text{英制支数(S):} \quad S = L'/(G \times 840) \quad (1.5)$$

式中 G ——纱线的质量,g;

L ——纱线的长度,m;

L' ——纱线的长度,码。

纱线加捻程度的指标有捻度、捻回角、捻幅、捻系数、捻向和捻缩。捻度是单位长度的纱线所具有的捻回数。纱线的两个截面产生一个 360° 的角位移,称为一个捻回,即通常所说的转一圈。捻回角是指表层纤维与纱轴的夹角,可用来表示不同粗细纱线的加捻程度。若把纱线截面看作圆形,则处在不同半径处的纤维与纱线轴向的夹角是不同的。捻幅是指纱条截面上的一点在单位长度内转过的弧长,实际上是这一点的捻回角的正切。为了比较不同细度纱线的加捻程度,定义了一个结合细度表示加捻程度的相对指标捻系数。捻向是指纱线的加捻方向。它是根据加捻后纤维或单纱在纱线中的倾斜方向来描述的。纤维或单纱在纱线中由左下往右上倾斜方向的称为Z捻向(又称反手捻),因这种倾斜方向与字母Z字倾斜方向一致;同理,纤维或单纱在纱线中由右下往左上倾斜的,称为S捻向(又称顺手捻)。一般单纱为Z捻向,股线为S捻向。加捻后,纱的长度缩短,产生捻缩。捻缩的大小通常用捻缩率来表示。捻缩率是指加捻前后纱条长度的差值占加捻前长度的百分率。单纱的捻缩率,一般直接在细纱机上测定。

随着纤维在纱中所处半径的增大,向心力也增大,即处在外层的纤维的张力和向心力较大,容易向纱芯挤入(向内转移);而处在内层的纤维张力和向心力较小,被外层纤维挤到外面(向外转移),形成新的内外层关系,这种现象称为内外转移。一根纤维在加捻三角区中可以发生多次这样的内外转移,从而形成复杂的圆锥形螺旋线结构。纤维发生内外转移现象,必须克服纤维间的阻力。这种阻力的大小,与纤维粗细、刚性、弹性、表面性状以及加捻三角区中须条的紧密程度等因素有关:长纤维易向内转移;细纤维易向内转移;初始模量大的纤维易向内转移,分布在纱的内层;圆形截面纤维易分布在纱的内层;一般摩擦因数大的纤维不易向内转移;卷曲少的纤维易分布在纱的内层;纺纱张力提高,纤维变形增加,造成向心压力上升,内外转移加剧;随着捻度的增加,纤维在加捻三角区停留期越长,内外转移程度上升,加捻三角区是产生内外转移的决定性因素,没有加捻三角区,就没有内外转移。

纱线是纤维在纺织复合材料中的主要形式,但不同几何结构的纱线强度都低于原纤维的强度,因此在纱线工艺设计和加工等方面尽量保持原纤维的性能。同时在对编织复合材料进行分析时,首先需要考虑纤维和纱线在外力荷载作用下的力学性能。纱线的几何形态及性能直接影响利用细观方法预报的编织复合材料的力学性能。表 1.2 给出了典型的纱线质量及尺寸。

表 1.2 典型的纱线质量及尺寸^[7]

纤维	丝数	纱线的横截面积 /mm ²	纤维填充因子为 0.75 的纱线圆截 面直径/mm	纤度 /[g · (9 000 m) ⁻¹]
Hercules AS4 直径 7.1 μm 密度 1.85 g/cm ³	3k	0.12	0.45	1 990
	6k	0.24	0.65	3 980
	12k	0.48	0.90	7 960
	30k	1.19	1.42	19 900
	75k	2.98	2.25	49 800
Hercules IM6 直径 5.6 μm 密度 1.8 g/cm ³	3k	0.07	0.35	1 190
	6k	0.15	0.50	2 380
	12k	0.29	0.71	4 770
	30k	0.74	1.12	11 900
	75k	1.84	1.77	29 800
杜邦 Kevlar 49 直径 11.9 μm 密度 1.44 g/cm ³	1k	0.11	0.44	1 450
	2k	0.22	0.62	2 900
	3k	0.34	0.75	4 350
	4k	0.45	0.87	5 800

1.1.3 编织工艺

编织是一种基本的纺织工艺,能够使两条以上纱线在斜向或纵向互相交织形成整体结构的预制件。与机织和针织工艺相比较,编织工艺的速度一般较慢,但是制成的织物强度高,整体性好。这种工艺通常能够制造出复杂形状的预制件,但其尺寸受设备和纱线尺寸的限制。目前,针对该技术的研 究主要集中在编织的生产设备上,最终目的是实现完全的自动化。该工艺技术一般分为两类:一类是二维编织,另一类是三维编织。

1. 二维编织工艺

二维编织物的编织机构简单,工艺不复杂,简单的草帽辫就属于二维编织。早在 18 世纪,德国和法国就制造出了二维编织机。二维编织机按编织物成形的方向分为编织物按竖

直方向成形的竖直式编织机和编织物按水平方向成形的水平式编织机。典型的二维编织机包括载纱器、纱线交织机构和提取机构,其结构如图 1.4 所示。交织机构主要由角导轮、角齿轮、轨道盘和成纱器组成。角导轮是安装在角齿轮上的一个周边有凹槽的角状金属盘。相邻两个角状金属盘的凹槽在角齿轮相对运动中会交汇到一起,从而这些凹槽完成载纱器从一个角齿轮到另一个角齿轮的转移。轨道盘就是载纱器的运动路径。载纱器转移过程的顺利完成是编织工艺的关键。成纱器是一个中间有导纱孔的装置,它安装在载纱器和提取机构之间^[8]。

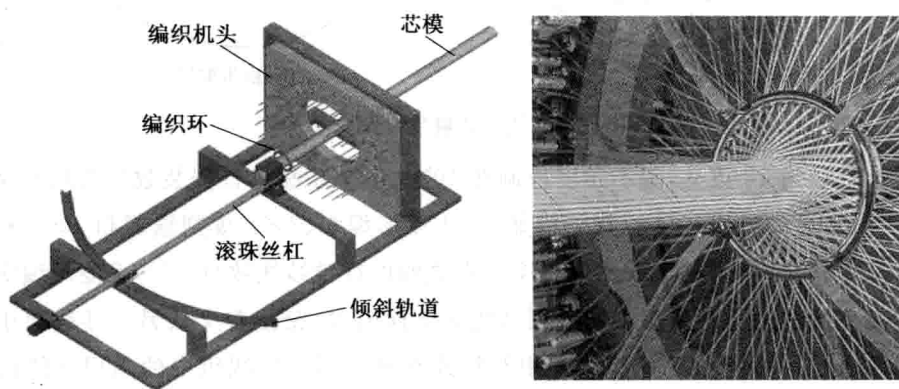


图 1.4 典型的二维编织机

编织物的组织结构、外形尺寸和纱线的取向可以通过选择角导轮上凹槽的数目、载纱器在轨道盘上的运动速度与提取机构的运动速度比、纱线的直径和芯模的几何形状来确定。例如,饰带编织技术是简单的二维编织技术,有两个角齿轮,可以携带 3 个、5 个、7 个、9 个、11 个、13 个或 17 个载纱器,图 1.5 所示为 3 个载纱器的饰带编织技术。圆形(或管状)编织机有偶数个载纱器,最少 8 个,可以以 4 的倍数递增,载纱器形成一个圆环,如图 1.6(a)所示。对于扁带编织机,它的载纱器则不与圆形编织机相同,在两端的角导轮有奇数个凹槽,如图 1.6(b)所示,在这种情况下载纱器到两端时又按相反的路径转移,从而完成扁带的编织。

二维编织机的织物厚度不会超过 3 组纱线直径的总和,在很多情况下,织物厚度要求远超过 3 组纱线直径的总和,一层织物的厚度难以满足制件所需增强体的厚度要求。为解决该问题,人们最开始采用重复叠加编织过程,即在已经编织好的织物上重复编织几层,形成二维多层编织物。

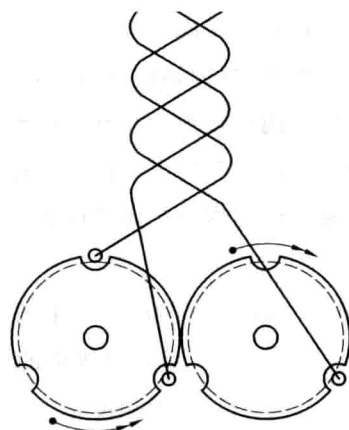
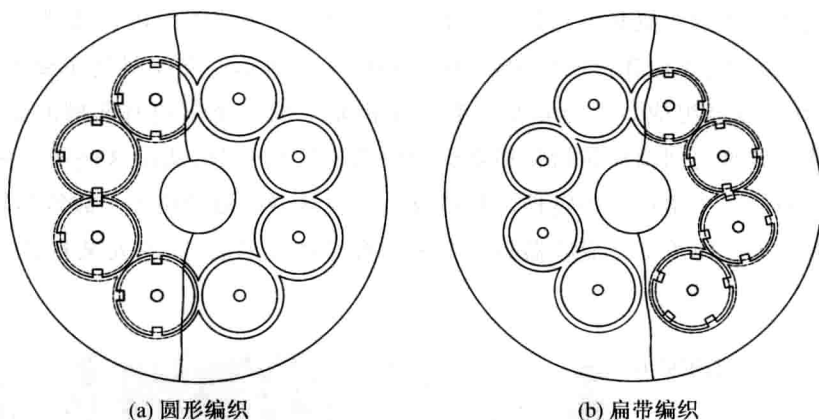


图 1.5 饰带编织技术

传统二维二轴编织纱线系统由两组编织纱组成。两组纱线在轨道盘上相向运动,同一组中的纱线在织物的任一平面内保持相互平行,两组纱线则有规律地相互交叉,但这两组纱线不会相互交织。两组编织纱与编织物成形方向所夹的角度相同,方向相反,以 $\pm\theta$ 表示,

图 1.6 圆形和扁带编织技术^[8]

芯模的最大直径为 12 英寸, 编织角度控制在 $10^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。根据纱锭安装数目及运转路线的不同, 可编织出常见的二维二轴织物结构如 1×1 菱形编织、 2×2 规则编织和 3×3 赫格利斯编织^[9,10]。其中, 1×1 中的 1 表示纤维交叉点之间的纤维纱线数目。 1×1 菱形编织为一根纱线连续交替地从另一纱线组中的一根纱线的下面通过, 紧接着又从另一纱线组中的一根纱线的上面通过。 2×2 规则编织为一根纱线连续地从另一纱线组中的两根纱线的下面通过, 然后又从另一纱线组中的两根纱线的上面通过, 这样交替地进行交织。 3×3 赫格利斯编织为一根纱线连续地从另一纱线组中的 3 根纱线的下面通过, 然后又从另一纱线组中的 3 根纱线的上面通过, 这样交替地进行交织。

随着编织技术由扁带编织技术发展到了包覆编织技术, 按芯模形状包覆起来形成一定异形截面形状的织物, 如方形编织织物(横截面为矩形)或异形组合织物(T 形、I 形和 L 形)等。近些年又研制出二维三轴编织技术, 即编织织物除包含传统的两组编织纱线以外, 沿织物成形方向(即轴向)引进第三组衬纱线, 形成轴向纱系统, 如图 1.7 所示。轴向纱的引入在不影响两组编织纱相互交织形式的情况下, 不仅可以提高编织织物形状的稳定性的, 而且明显改善织物及其所形成的复合材料在轴向方向上的抗拉、抗压强度及模量等力学性能。二维三轴编织织物的具体结构表示方法为

$$[0^{\circ}_{a_K} / \pm \theta^{\circ}_{b_K}] F_a \%$$

式中 a_K —— 轴向纤维束的纤维合股数;

b_K —— 编织纤维束的纤维合股数;

θ —— 编织角度;

F_a —— 轴向纱在预成型体中所占的体积分数^[11]。

由于利用这种二维编织物受到编织纱线数量、尺寸和编织角的限制, 得到的编织物的尺寸不能过大, 一般这种编织形式适合编织窄条平板或小管径的管状编织物, 而不适合编织体积较大的织物。因此, 它的研究主要集中在研发自动化编织机来减少生产成本和扩大应用范围, 关键技术包括质量控制、纤维方向和分布、芯模设计等, 在航空工业中的应用包括制造

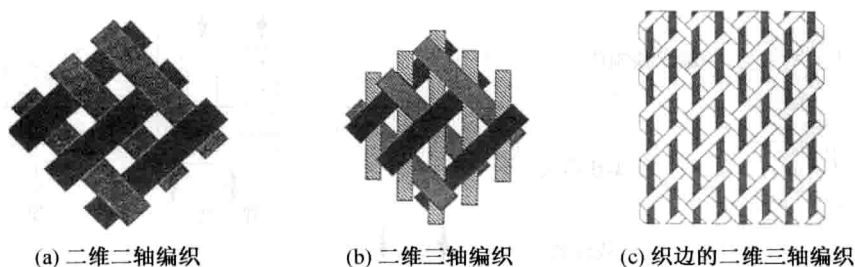


图 1.7 二维编织复合材料

飞机进气道和机身J形隔框。该技术通常与RTM和RFI技术结合使用,另外也可以与挤压成型和模压成型联合使用。洛克希德-马丁公司生产的F-35战斗机的进气道制造中最能体现这项技术的先进性,加强筋与进气道壳体是整体结构,减少了95%的紧固件,提高了气动性能,并简化了装配工艺^[12]。

2. 三维编织工艺

利用传统的二维角状齿轮编织机可以编织出三维织物,但受到载纱器数量(不大于24个)的限制不能生产大体积的织物,同时也很难生产几何形状复杂的构件。三维编织技术从20世纪60年代逐渐发展起来,经历了四步编织、二步编织和实体编织技术,适合编织一些几何形状复杂的构件,但该技术同样受到设备尺寸限制。目前,一般的编织机只能生产小于100 mm截面的预制件,而飞机零件的大型化则需要大尺寸且昂贵的编织设备。随着三维编织机的发展,其在未来飞机制造中仍具有很大应用潜力。

(1) 四步法编织

四步法编织于1982年由R. A. Florentine发明^[13]出来,该项编织技术得到最广泛的应用。这种编织工艺发明之初,所有的纱线都参与编织,且全部编织纱都在空间3个方向内发生相对运动,因此这种编织方法是一种真正的三维编织工艺^[14]。具体编织过程如图1.8所示,该编织过程没有插入轴向纱。在第一步和第二步中所有的行和列的载纱器如图1.8中箭头所指的方向移动,在第三步和第四步中载纱器移动与第一步和第二步相反,虽然各个载纱器已经改变了它们的位置,但在第四步结束时完成了一个机器循环,纱器的位置与初始构形时的相同,纱线的运动取决于它在机器底座上的初始位置。在一个编织周期,载纱器需要完成4个动作,因为在每步中所有的行或列走了相等的距离,因此该编织方式称作1×1的四步法编织工艺。每次机器循环后,织物提高一个节距,重复这个运动过程就能得到需要的织物长度。四步法工艺可进一步得到其他的编织方案,如1×3和1×5等,这取决于行和列之间移动位置的相对关系,并且需要不同的编织机底座结构。四步法编织工艺可用来制作矩形截面的预成形织物,如T形梁、I字梁和盒形梁等。如图1.9所示,由于结构中所有纱线在空间中的分布只有4个不同的方向,因此制成的复合材料被称为三维四向编织复合材料。

以1×1的四步法编织工艺为例,给定一个矩形的纱线排列,它包括内部和外部的纱线,