

# 三维

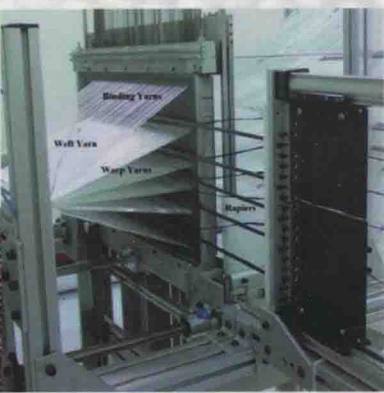
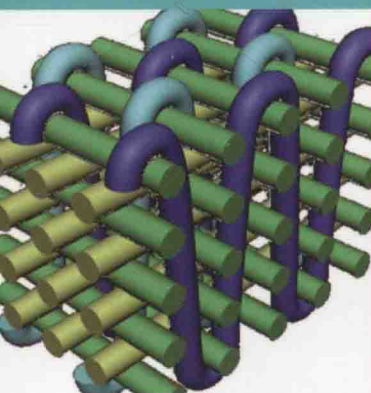
# 机织物


SANWEI JIZHIWU

郭兴峰 主编

NEW

TEXTILES



 中国纺织出版社

# 三维机织物

郭兴峰 主编



中国纺织出版社

## 内 容 提 要

本书详细介绍了三维机织物的组织结构及其织造的原理、设备与技术,并分类介绍了多层织物、型材织物、间隔织物、蜂窝织物、管状织物、预型体织物的设计与织造方法。为了指导三维机织物的设计和应用,还详细介绍了三维机织物的细观结构。作为实际应用,最后介绍了角联织机的工作原理和织物键盘开关的设计与织造。

本书是纺织工程专业研究生教材,可供高等院校纺织工程专业研究生、高年级本科生使用,也可供纺织、复合材料、橡胶及其他织物增强行业从事研究、设计、生产和应用的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

三维机织物/郭兴峰主编. --北京:中国纺织出版社, 2015.9  
ISBN 978-7-5180-1815-4

I. ①三… II. ①郭… III. ①机织物—三维编织  
IV. ①TS105.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第156851号

---

责任编辑:王军锋 责任校对:寇晨晨  
责任设计:何建 责任印制:何建

---

中国纺织出版社出版发行  
地址:北京市朝阳区百子湾东里A407号楼 邮政编码:100124  
销售电话:010—67004422 传真:010—87155801  
<http://www.c-textilep.com>

E-mail: [faxing@c-textilep.com](mailto:faxing@c-textilep.com)

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://weibo.com/2119887771>

北京教图印刷有限公司印刷 各地新华书店经销

2015年9月第1版第1次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:13.25

字数:184千字 定价:68.00元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

机织是将纱线加工成机织物的纺织技术,已有五千多年的发展历史,经历了从原始的手工织布到普通织机、自动织机和无梭织机织布等几个阶段,每一阶段的技术进步都显著提高了织物的生产效率,降低了生产成本。大规模的机械化生产,使机织物从早期主要用于制作服装来御寒蔽体,到现在的服装用、装饰用和产业用纺织品,已成为国民经济的基础材料,是应用最为广泛的一类纺织材料。

产业用纺织品是指经专门设计、具有特定功能,应用于工业、医疗卫生、环境保护、土工及建筑、交通运输、航空航天、新能源、农林渔业等领域的纺织品。虽然美、欧、日等发达国家在传统纺织服装行业不断萎缩,但在产业用纺织品方面的发展势头强劲,垄断了大部分高技术和高附加值产业用纺织品市场。我国近十年来,尽管产业用纺织品获得了长足发展,应用领域不断拓宽,已逐步成为纺织工业新的经济增长点,但与发达国家相比,整体技术水平仍然偏低。因此,加快产业用纺织品的发展,不断开拓新兴应用领域,促进纺织工业结构调整、转型升级,是实现我国纺织工业由大变强的重要举措。

从20世纪60年代开始,为了克服传统复合材料的诸多问题,如层间强度低、受冲击后容易损伤、在机械连接孔和几何形状突变处的强度显著下降等,产生了对三维织物的需求。采用三维织物成型高性能纺织复合材料,不仅能降低复合材料的制造成本,并且复合材料整体性能好、力学结构合理、高的损伤容限和抵抗裂纹扩张的能力等特性,为复合材料应用于主承力结构提供了广阔的应用前景。到目前为止,纺织复合材料几乎已渗透到所有的技术领域。

三维机织技术是在借鉴传统机织原理的基础上发展起来的,具有机械化生产程度高、设备投资少、品种适应性广等优点,近年来发展十分迅速,生产的三维机织物除了用作复合材料工业的增强织物以外,还越来越多地应用于医疗卫生、航空航天、交通运输、安全防护、土木工程等领域。随着技术的进步和发展,可以预计,三维机织物的应用会更加广阔。

鉴于至今还没有系统介绍三维机织物的书籍,为使读者对其有一个较为全面的了解,我们编写了此书。书中所涉及的内容,部分来自国内外的文献资料,部分取自作者们多年来的科研成果和实践体会。第一章~第五章由郭兴峰执笔,第六

章由杨建成执笔,第七章由张美玲执笔,全书由郭兴峰修改、定稿。研究生燕春云、王少梅和郭妍参与了部分资料的收集、整理和绘图工作。

本书获天津工业大学研究生优秀教材建设项目支持。

限于作者水平,书中难免有缺点和错误,热忱希望读者批评指正,意见请寄:天津工业大学纺织学院,或 E-Mail:xfguo@tjpu.edu.cn。

编者  
2015年4月

第一章 绪论	1
第一节 纺织复合材料	1
一、复合材料的类型	1
二、纺织结构复合材料	2
第二节 三维机织物的发展	7
第三节 三维机织物的应用	8
一、在复合材料工业的应用	8
二、在医疗卫生的应用	10
三、在土木工程的应用	11
四、在安全防护的应用	11
参考文献	13
第二章 三维机织物的组织结构与轴向	14
第一节 三维机织物的组织结构	14
一、正交组织	14
二、角联锁组织	22
三、三向交织组织	31
第二节 三维机织物的轴向	32
一、二维机织物的轴向	32
二、三维机织物的轴向	33
三、三维机织物的可织性	35
参考文献	36
第三章 三维机织物的织造原理与设备	38
第一节 单梭口织造的原理与设备	38
一、送经机构及其工作原理	38
二、卷取机构及其工作原理	41



第二节 多层梭口织造的原理与设备 .....	43
一、双层梭口织造原理 .....	44
二、三层梭口织造原理 .....	48
三、多层梭口织造原理 .....	50
第三节 圆织机织造的原理 .....	54
一、单层管状织物的圆织机织造 .....	54
二、圆形截面三维织物的织造方法 .....	55
第四节 三维织机织造的原理与设备 .....	59
一、矩形截面三维织物的织造 .....	60
二、双向纱接结三维织物的织造原理 .....	63
三、双向开口织造技术 .....	65
第五节 多轴向织造的原理与设备 .....	70
一、平面多轴向织物的织造 .....	70
二、三维多轴向织物的织造 .....	74
第六节 全自动织造 .....	84
一、圆筒形织物的全自动织造生产原理 .....	84
二、圆筒形织物的全自动织造生产过程和设备 .....	85
三、圆筒形织物产品 .....	87
参考文献 .....	87
第四章 三维机织物的设计与织造 .....	89
第一节 多层织物 .....	89
一、贯穿角联锁组织的织造 .....	90
二、层间角联锁组织的织造 .....	92
三、贯穿正交及其变化组织的织造 .....	93
四、层间正交组织的织造 .....	97
第二节 型材织物 .....	98
一、三维机织物的平面化设计 .....	99
二、型材织物的单梭口织造 .....	105
三、型材织物的多层梭口织造 .....	113
四、型材织物的三维织机织造 .....	114
第三节 间隔织物 .....	117
一、纱线连接的间隔织物 .....	117
二、织物连接的间隔织物 .....	119



三、带加强筋织物的织造	127
第四节 蜂窝板材织物	129
一、传统蜂窝板材	130
二、整体蜂窝织物的织造	131
第五节 管状织物	133
一、等截面管状织物	133
二、变截面管状织物	140
第六节 壳体织物	146
一、卷取辊非均匀卷取法织造	147
二、组织结合法织造	152
第七节 预成型织物	153
一、管接头织物	153
二、分叉管织物	155
三、变厚度织物	157
四、带连接孔的三维织物	159
五、盒子角织物	160
参考文献	161
第五章 三维机织物的细观结构	164
第一节 复合材料的密度和组分材料的含量	164
第二节 纱线的纤维体积含量	166
一、长丝纱的参数	166
二、纱线的纤维体积含量	166
第三节 三维机织物的细观结构	168
一、纱线的形态模型	168
二、纱线截面为限定形状的正交组织机织物细观结构	171
三、纱线截面为跑道模型的三维机织物细观结构	177
参考文献	181
第六章 三维角联织机	183
第一节 三维角联织机的织造过程	183
第二节 开口机构	185
第三节 引纬机构	185
一、剑杆传动装置	186



二、升降装置 .....	186
三、引纬辅助装置 .....	187
第四节 打纬机构 .....	188
第五节 卷取机构 .....	189
第六节 送经机构 .....	190
一、纱轴送经的原理 .....	190
二、经纱张力及补偿装置 .....	191
三、送经机构的控制 .....	192
参考文献 .....	193
第七章 织物键盘开关的设计与织造 .....	194
第一节 概述 .....	194
第二节 织物键盘开关的三维整体结构 .....	195
第三节 织物键盘开关的结构设计与织造 .....	197
一、原料选择 .....	197
二、支撑部分的结构设计 .....	197
三、孔洞部分的结构设计 .....	201
四、织物键盘开关的上机织造要点 .....	204
参考文献 .....	204

# 第一章 绪论

三维织物是伴随着高性能复合材料而发展起来的一类产业用纺织品,目前应用的领域已经很广泛,不再仅仅局限于复合材料。为了本书的方便,首先对复合材料进行简要地介绍。

## 第一节 纺织复合材料

材料是人类生存和发展的物质基础,现代科技的发展,对材料的性能提出了高标准、多样化甚至是相互矛盾的要求,任何单一材料都难以满足这些要求,于是复合材料便应运而生。复合材料是材料领域的后起之秀,它的出现带来了材料领域的重大变革,从而形成了金属材料、无机材料、高分子材料和复合材料多角共存的局面。

复合材料是由两种或多种不同性能、不同形态的组分材料,通过复合工艺组合而成的、比其组成材料性能更优异的新材料。从复合材料的组成和结构来看,复合材料是由基体和增强材料两部分组成,基体是连续相,增强材料是分散相,被基体所包容。

### 一、复合材料的类型

#### (一) 复合材料的类型

按照不同的标准和要求,复合材料通常有以下几种分类方法。

**1. 按使用性能不同分类** 根据使用性能的不同,复合材料分为结构复合材料和功能复合材料。

利用复合材料的各种良好力学性能来制造结构的材料,称为结构复合材料,它主要由基体材料和增强材料两种组分组成。其中增强材料主要提供复合材料的强度和刚度,基本决定其力学性能;基体材料固定和保护增强纤维,传递纤维间载荷,并可改善复合材料的某些性能。

利用复合材料的物理、化学和生物学的功能作为主要用途的,称为功能复合材料。例如摩擦复合材料、隐身吸波复合材料、阻尼复合材料、压电复合材料、防热复合材料、磁性复合材料、导电复合材料、生物功能复合材料等,有些复合材料同时兼



有多项功能,如耐热、透波、承载等。

**2. 按基体材料不同分类** 按基体材料的不同,复合材料可分为聚合物基、金属基、无机非金属基复合材料。这三种复合材料中,以聚合物基复合材料应用最广、产量最大,约占复合材料总量的90%以上。

聚合物基复合材料是以有机聚合物(主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶)为基体制成的复合材料。热固性树脂在固化前一般是流动的液体,相对分子质量不高,在成型过程中发生化学反应而交联固化,形成网状结构,固化后刚性大、硬度高,再加压加热也不能软化或流动,若温度过高则会分解或炭化。常用的热固性树脂有环氧树脂、不饱和聚酯树脂、酚醛树脂等。热塑性树脂在常温下为高分子量固体,在成型加工过程中,树脂经加压加热即软化和流动,不发生化学交联,可以在模具内赋形,经冷却定型制得所需形状的制品。与热固性复合材料相比,热塑性复合材料突出的优点是成型周期短,韧性好,可回收利用;但树脂熔体黏度高,在低沸点溶剂中溶解能力差或根本不溶解,给热塑性树脂浸渍纤维以及成型加工带来困难。以橡胶为基体可制成柔性复合材料,如轮胎、充气筏、传送带、矿山用导风筒、篷面材料等,织物与橡胶构成的纺织复合材料在柔性材料中占有相当大的比重。

金属基复合材料是以金属为基体制成的复合材料,如铝基复合材料、铁基复合材料、铜基复合材料、镁基复合材料等。

无机非金属基复合材料是以陶瓷、玻璃、水泥、碳材料为基体制成的复合材料。

**3. 按增强材料的形态分类** 按增强材料的形态不同可分为颗粒增强复合材料、短纤维或晶须增强复合材料、片状材料增强复合材料、连续纤维增强复合材料和织物增强复合材料。

**4. 按增强纤维类型分类** 按增强纤维的类型不同,可分为碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、玄武岩纤维复合材料、芳纶复合材料、超高分子量聚乙烯纤维复合材料、硼纤维复合材料、陶瓷纤维复合材料等。

## (二)复合材料的命名

复合材料的命名以其“相”为基础,将增强相(或分散相)材料放在前,基体相(或连续相)材料放在后,最后缀以“复合材料”。如由碳纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“碳纤维环氧复合材料”。通常为了书写简便,可在增强相材料与基体相材料之间加符号“-”或“/”,再加“复合材料”,如上面的碳纤维环氧复合材料可写成“碳纤维-环氧复合材料”,更简化地写成“碳-环氧”或“碳/环氧”。

## 二、纺织结构复合材料

如果增强纤维是由经过纺织加工的纤维、纱线或织物构成,则称为纺织复合材料。

### (一) 纺织结构增强材料的类型

**1. 短纤维** 将短切纤维与树脂混合,经复合后可制成各种复合材料制品。这种复合材料构件不宜用于承力较大的场合,因纤维不连续,相互间的结合较差,排列方向也不确定,但制造工艺比较简单,生产效率高,生产成本低,适合大规模生产,因而近年来应用很广。

片状模塑料(SMC)是用短纤维与不饱和聚酯树脂、填料等混合制成的片状半成品,在使用时只需撕掉两面的聚乙烯薄膜,按成品相应尺寸裁剪、叠层,然后放入模具中加热加压固化,即得到需要的复合材料制品。块状模塑料(BMC)是在不饱和聚酯树脂中加入短纤维和填料制成的块状半成品,因成型流动性好,可采用高效率的注射工艺成型小型电器元件。块状模塑料和片状模塑料在成分上没有多少差异,只是块状模塑料的纤维含量和纤维长度比片状模塑料的小,而且块状模塑料在制造过程中的纤维损伤较严重,故其制品的力学性能要比片状模塑料低。

用吸附法将短纤维制成与复合材料制品的结构、形状和尺寸相似的预成型坯,然后在模具内与树脂混合,在一定的温度和压力下压制成型。这种方法适用于批量生产大型、高强、异形,尤其是深拉制品的制造,材料成本低,容易实现自动化。

**2. 纱线** 为使短纤纱具有一定的强力,克服纤维间的滑移,通常都对其施加一定的黏度;长丝纱可以加捻,也可以不加捻。两根或多根单纱再通过合股加工,可以得到股线。纱线的捻度和合股数影响纱线的性能,Hearle 给出了纱线模量  $E_y$ 、纤维模量  $E_f$ 和捻角  $\theta$  之间的关系。

$$\frac{E_y}{E_f} = \cos^4 \theta$$

捻角系指纤维在纱线中的倾斜方向与纱线轴线的夹角。由公式可以看出,当捻度增加、捻角增大时,纱线的模量会降低。表 1-1 是纱线捻度和合股数对弹力玻璃纱性能的影响,实验采用 734tex 的弹力玻璃纤维单股纱。从表中可以看出,随着纱线捻度和合股数的增加,纱线的强度和模量均会相应降低。这是由于捻度增加后,当纱线承受拉伸力作用时,因为纤维间侧向分力的存在,使纤维的强度利用率降低。纱线中股数的增多,增加了纱线承受外力时纤维受力的不均匀性,亦即纤维不能同时承受外力,因此降低了纤维的强度利用率。

表 1-1 捻度及合股数对弹力玻璃纱性能的影响

合股数	捻度(捻/m)	平均应力(cN/tex)	平均应变(%)	模量(cN/tex)
1	20	44.22	2.70	17.64
1	60	21.17	1.60	16.93
3	10	13.23	1.32	12.35

续表

合股数	捻度(捻/m)	平均应力(cN/tex)	平均应变(%)	模量(cN/tex)
3	20	12.79	1.37	10.67
3	40	11.03	1.28	8.47
5	10	12.79	1.43	11.03
5	20	11.03	1.33	9.26
5	40	8.20	1.28	6.97

鉴于加捻对纤维强度的利用造成不利影响,复合材料常采用无捻或弱捻长丝纱与树脂浸渍、固化成复合材料制品。例如,缠绕工艺将浸渍过树脂的长丝通过缠绕方法制造管道和容器,拉挤成型工艺牵引浸渍过树脂的长丝纱通过模具,经固化后得到各种截面的实心棒材或空心管材(工形、方形、圆形等)。

连续长丝具有高的线性度,纤维强度利用程度高,使复合材料在纤维方向上具有很高的强度和模量,适合于承受拉力的场合。但复合材料在垂直于纤维方向的强度和模量较低,易发生横向开裂和脱层问题,所以拉挤工艺常采用纤维毡、布带和三维织物来提高横向强度。由布带拉挤成型的复合材料制品,其拉伸强度、横向强度都非常好,但成本较高。将三维织物用于拉挤工艺,不仅克服了传统增强纤维制品层间剪切强度低、易于分层等缺点,其层间性能也相当理想。

**3. 平面织物** 按照纱线加工成织物原理的不同,用作增强复合材料的平面结构织物有机织物、针织物、编织物和非织造布等。

目前,用于复合材料的增强织物大多数为机织物,它由经纱和纬纱以 $90^\circ$ 相互交织而成,常用的织物组织有平纹组织、方平组织、斜纹组织和缎纹组织等。机织物具有良好的结构可设计性,在经向、纬向稳定性好。但机织物的面内抗剪切能力差,各向异性,纱线的屈曲降低了纱线与织物拉伸强度的转化系数。

针织物具有相互穿套的纱圈结构,根据织物中纱线的走向和线圈的结构,针织物可分为经编织物和纬编织物两类。针织物的纱圈结构为其在各方向提供了相当大的延伸性,使其比机织物具有较大的成形范围,因此,能很好地适应于深冲压成型的复合材料。针织物可以在纵向和横向置入呈直线状态的衬经纱和衬纬纱,衬经和衬纬起增强作用,提高了织物尺寸和结构的稳定性。进一步在织物的倾斜方向引入一组或多组纱线,可以获得多轴向针织物,织物的抗剪切性能好。

编织物是由三根或多根纱线,从一端开始各自按一定的规律同时运动,从而实现相互交叉编织形成织物。传统的二维编织机分立式和卧式两种,编织物有扁形

和圆形。由于二维编织机所能控制的纱线根数有限,一般不宜生产像机织、针织那样幅宽较大的织物,主要生产绳、带、管等织物,如扁形编织带常用于服装装饰,圆形编织物用作鞋带、电线外包的绝缘布、套管的骨架织物等。由于复合材料发展的需要,编织技术特别是三维编织技术得到迅速发展,除了能生产绳、带、管等类型的织物外,还可以生产各种异形织物,即所谓的预成型织物,也称零件织物。

适用于复合材料应用的非织造布包括纤维毡、缝编和黏合织物等,非织造布具有良好的各向同性,但短纤维增强强力较低。

**4. 三维织物(3D 织物)** 对三维织物的大量需求来自于20世纪60年代的航空航天领域。为了克服传统层合板复合材料层间强度低、层间产生剥离或开裂的问题,需要采用层间也存在纤维或纱线的三维整体织物作增强材料。三维织物的生产技术推动了纺织技术的发展,目前三维织物已成为纺织复合材料、特别是高性能复合材料制造技术的发展方向。由于三维织物中纤维连续且多方向连接,使构件的整体性和可靠性大大提高,层间剥离现象不易产生。

尽管对三维织物的研究和应用已有多年,但一直还没有一个明确的定义。在2008年的第一届三维织物国际会上,三维织物被定义为“由多层纱线构成的高厚度织物,或具有复杂形状的中空结构或三维薄壳结构织物”。按照织造方法的不同,三维织物可分成三维机织物、三维编织物、三维针织物、三维缝合织物等,本书讨论的是三维机织物。图1-1是一种三维机织物的结构图,它由多层的经纱1和多层的纬纱2与穿过织物厚度方向的接结纱3相互交织而成。

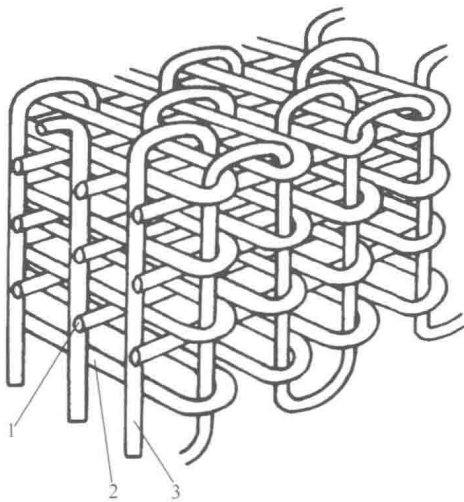


图1-1 三维机织物结构图

1—经纱 2—纬纱 3—接结纱

## (二) 纺织复合材料的特点

**1. 比强度高、比模量大** 复合材料的最大优点是比强度高、比模量大。比强度是指材料的强度与密度之比,比模量为材料的模量与密度之比。例如碳纤维增强环氧树脂复合材料的比强度比钢高 5 倍,比铝合金高 4 倍,比钛合金高 3.5 倍,比模量是钢、铝、钛的 4 倍。比强度、比模量说明了复合材料在“轻质高强”方面的优越性,它意味着可制成性能好而又质量轻的结构,对于航空航天结构部件和汽车、火车、舰艇等的运动结构有重要意义。

**2. 材料性能具有可设计性** 复合材料的力学、热、光、电、防腐、抗老化等物理、化学性能,都可按照使用要求和环境条件要求,通过组分材料的选择和匹配、铺层设计和界面控制等手段,最大限度地达到预期目的,以满足工程设备的使用性能。例如,通过安排纤维的排列方向、层数和次序,使复合材料达到设计的强度,这是金属材料所不能比拟的;通过综合发挥各种组成材料的优点,使一种材料具有多种材料的性能,比如玻纤/环氧复合材料,达到强度似钢材、耐腐蚀性似塑料的目的。

**3. 抗疲劳性能好** 疲劳破坏是材料在交变载荷作用下,由于微观裂纹的形成和扩展而造成的低应力破坏。金属材料的疲劳破坏是由里向外突然发展的,往往事先无征兆;而纤维复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹的扩展,其疲劳破坏总是从材料的薄弱环节开始,逐渐扩展,破坏前有明显的征兆。大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的 40% ~ 50%,碳纤维复合材料则达 70% ~ 80%。

**4. 减震性能好** 复合材料中的纤维与树脂基体界面有较大的吸振能力,致使材料的振动阻尼高,可避免共振引起的破坏。曾对形状、尺寸相同的铝合金梁和碳纤维/环氧复合材料梁做过振动试验,前者需 9s 才停止振动,后者仅需 2.5s。

**5. 耐化学腐蚀性好** 常见的玻璃纤维增强热固性树脂基复合材料(俗称热固性玻璃钢),一般都耐酸、稀碱、盐、有机溶剂、海水并耐湿。玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料(俗称热塑性玻璃钢)的耐化学腐蚀性较热固性好,一般而言,耐化学腐蚀性主要决定于基体。

**6. 成型工艺性优越** 可根据产品的结构和使用要求及生产数量,灵活合理地选择原辅材料及成型工艺。由于制品与需要的最终产品接近,复合材料不需或仅需极少的后加工,与金属产品比较,能减少零部件的数量,避免多次加工,降低制造成本。

## 第二节 三维机织物的发展

早在 1898 年的橡胶传动带生产中,就出现了三维机织物。人们生产布层与布层间具有联结纱线的多层传动带,可以有效地消除布层间的滑动和脱层。以后,使用垂直于布层的接结纱(垂纱)来增强多的层织物得到应用。例如,多层的输送带织物、多层的造纸用毛毯、多层拉带、多层衬衣领的内衬等。

20 世纪 60 年代末期,航空工业需要在高温条件下能承受多向拉伸的纤维增强复合材料,为此,法国、美国、日本的航空航天工业中发展了多维碳纤维织物。1963 年报道了罗瑟等用提花开口织机织造圆锥形三维织物,1964 年美国专利 3132671 号报道了三维织物成形的织造工艺。

1970 年德国制造了能够织制圆形、椭圆形截面织物的织机,这种织机利用了极坐标的织造方法,专用于织造柱形、锥形的三维织物。1972 年法国布罗彻发明了“全自动织造”设备,并于 1986 年完成了 BR900 型和 BR2000 型全自动设备的设计和安装,整套设备采用计算机控制生产的过程和各种工艺参数的计算,能够生产圆柱筒体、圆锥筒体织物,用来制造火箭发动机进气喉管、锥形排气管及火箭头等重要机件,织物是由径向、轴向、周向三组纱线交错而成。1974 年日本福多等发明了三维方柱体织物的织造设备,生产的织物由三个相互呈垂直状态的纱线组成。1977 年金(King)等创造了另一种三维柱体的织造设备,用于生产方柱和圆柱形织物,织物也是由三个相互垂直的纱线组成,所不同的是经纱是预先固化的刚性纤维棒。

1988 年美国穆罕默德等发明的三维多层织物织造方法和设备,可织造矩形、T 形、工字形断面织物,织物由经纱、纬纱、垂纱立体正交织成。

2009 年,世界上第一台工业化生产的三维织机在瑞典投入运转,该机在两个相互垂直的方向上形成供纬纱引入的梭口,最大经纱根数 3600 根,排列成  $60 \times 60$  的行与列,可织制的织物形状相当灵活,除了板状、管状结构的织物以外,还能织造十字形、 $\pi$  形、H 形、T 形、L 形、J 形等多种截面形状的类型织物。

对纺织复合材料进行系统研究的是美国国家航空航天局(NASA)。在 1976 ~ 1985 年,NASA 进行了“the Aircraft Energy Efficiency Program”(简称 ACEE 计划)。随后的 1985 ~ 1997 年,NASA 又进行了“Advanced Composites Technology Program”(ACT 计划)。三维机织复合材料是研究内容的核心之一,得到了比较系统的研究结果,为以后三维织物的实际应用奠定了基础。

1991 年,澳大利亚政府资助成立了“Cooperative Research Center For Aerospace Structures”(CRC - AS),该研究中心主要由科研单位、工业界和大学的有关机构组





成,致力于纺织复合材料在航空航天方面的应用研究。该中心在 1994 年更名为“Cooperative Research Center For Advanced Composite Structures”(CRC - ACS),扩大了纺织复合材料在其他领域的应用研究,以培育澳大利亚工业在 21 世纪的国际竞争力。

我国自 20 世纪 80 年代开始到现在,对三维机织复合材料进行了大量的研究工作,初步完成了相应设备的改造或研制,积累了织物设计和生产的许多宝贵经验,能够加工多种形式的立体机织物,并复合成型。对三维机织复合材料细观结构、力学性能、计算机模拟等也进行研究,获得了有益的研究成果,为复合材料的设计和应用提供理论指导。但总的来讲,我国机织复合材料的研究还不系统,应用的领域和范围还有待扩大。

### 第三节 三维机织物的应用

#### 一、在复合材料工业的应用

纺织复合材料所具有的重量轻、强度和刚度大、抗疲劳性好等特点,使其率先在航空航天领域得到应用。经过几十年的发展,目前航空、航天飞行器的许多部件都已经采用纺织复合材料,使用范围从初期的次承力部件(构件)发展到主承力部件(构件)。资料报道,美国军用飞机从 F16、F18 到 F22,复合材料的用量分别为 3.4%、12.1% 和 26%,使用量逐步扩大。随着主承力结构复合材料在军用飞机上的成功应用,民用飞机上应用的复合材料也越来越多,如波音 B767、B777 复合材料用量分别为 3%、11%,到 B787 的用量已达到 50%;空客 A320、A340 的复合材料用量为 5.5%、8%,而 A380 采用了 25% 的复合材料。在航天飞行器中,复合材料的应用更为广泛。例如美国“北极星 A-3”潜地导弹采用复合材料后比原先的金属结构质量减轻 50%~60%,飞马座火箭的三级固体火箭发动机采用的复合材料已占其构件质量的 94%。由于高性能复合材料的应用,尽管卫星的尺寸和有效载荷日益增加,卫星的结构质量占整星质量的比例日益减小,由过去的 13%~20% 向 10% 以下发展。

纺织复合材料在航空航天成功应用,对其他领域的应用起到启迪和促进作用。到目前为止,纺织复合材料已渗透到几乎所有的技术领域,如建筑、交通运输、石油化工、体育器材、医疗卫生、海洋工程、纺织等。

由传统平面织物增强的复合材料层合板,存在抗冲击性能差,层间强度低,易分层破坏的缺点;在制造过程中存在手工操作多、劳动强度大、零部件多等问题,使高性能复合材料成本很高。三维织物的应用,可使这些问题得到明显解决,下面是几个三维机织物实际应用的例子。