



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

纺织复合材料



ANGZHI FUHE
CAILIAO

钱 坤 主 编

曹海建 俞科静 副主编



国家一级出版社



中国纺织出版社

全国百佳图书出版单位



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

纺织复合材料

钱 坤 主 编

曹海建 俞科静 副主编

 中国纺织出版社
49725

内 容 提 要

本书主要介绍了常用高性能纤维的物理及化学特性、复合材料预制件的结构和制备技术、常用聚合物基体种类及基本性能、聚合物基复合材料界面相关知识、聚合物基复合材料成型工艺,以及纺织复合材料的性能和测试方法等方面内容。在保证具有相当学术深度的同时,又具有较强的可读性和实践指导性。

本书适用于纺织科学与工程、材料科学与工程专业的本科生作为教材使用,也可供纺织复合材料相关行业、企事业单位从业人员参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

纺织复合材料 / 钱坤主编. —北京: 中国纺织出版社, 2018.4

“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

ISBN 978-7-5180-4887-8

I. ①纺… II. ①钱… III. ①纺织纤维—复合材料—高等学校—教材 IV. ①TS102

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第069912号

策划编辑: 符 芬 责任编辑: 沈 靖
责任校对: 王花妮 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

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://weibo.com/2119887771>

北京玺诚印务有限公司印刷 各地新华书店经销

2018年4月第1版第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.25

字数: 307千字 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

纺织复合材料是一门以材料、纺织等为基础的交叉学科，涵盖多种新兴交叉学科知识。纺织复合材料的发展会对国防、航天航空与现代化建设起到重要的推动作用，对复合材料行业发展具有重要的促进作用。

本书为“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材，由江南大学、南通大学的专业教师共同参与编写而成。编写以更好地服务于纺织科学与工程、材料科学与工程等专业的教育教学改革，服务于我国四个现代化建设，密切联系纺织复合材料生产的实际，大力推进精品教材的建设为主导思想。书中分别介绍了常用高性能纤维的物理及化学特性、复合材料预制件的结构和制备技术、常用聚合物基体种类及基本性能、聚合物基复合材料界面相关知识、聚合物基复合材料成型工艺，以及纺织复合材料的力学性能和测试方法等。

本教材的编写人员包括：

主 编：钱 坤

副主编：曹海建 俞科静

参 编：孙 洁 卢雪峰 张典堂

本书在编写、出版过程中得到了中国纺织出版社的大力支持与帮助，在此表示衷心的感谢！同时，本书中借鉴引用了其他学科著作和期刊上的资料，对这些资料的作者表示真诚的谢意！

由于编者水平有限，难免有错漏之处，恳请专家、读者批评指正。

钱 坤

2018年3月

第一章	绪论	1
第一节	纺织复合材料的概念	1
第二节	高性能纤维	1
第三节	纺织复合材料预制件	2
第四节	树脂基体	3
第五节	成型工艺	3
第六节	纺织复合材料的性能特征	4
第七节	纺织复合材料的应用	6
第二章	纺织复合材料用增强纤维	8
第一节	纺织纤维及其集合体的结构参数指标	8
第二节	碳纤维	11
第三节	芳香族聚酰胺纤维	23
第四节	超高分子量聚乙烯纤维	41
第五节	玻璃纤维	47
第六节	其他纤维	53
第三章	纺织复合材料预制件	66
第一节	概述	66
第二节	纺织复合材料预制件的结构	68
第三节	纺织复合材料预制件的制备技术	81
第四章	聚合物基体材料	95
第一节	概述	95
第二节	树脂基体的性能及工艺	95
第三节	热固性树脂	103
第四节	热塑性树脂	114

第五章	聚合物基复合材料的界面	121
第一节	概述	121
第二节	界面的形成与结构	122
第三节	界面的作用机理与破坏机理	124
第四节	界面改性	133
第五节	界面设计与改性技术	140
第六节	纤维的表面处理	146
第七节	界面分析方法	157
第六章	聚合物基复合材料成型工艺	162
第一节	概述	162
第二节	常用复合成型工艺	168
第三节	热塑性聚合物基复合材料的加工成型	188
第七章	纺织复合材料的性能与测试	199
第一节	纤维及其集合体的性能与测试	199
第二节	树脂基体的性能与测试	213
第三节	复合材料的界面性能与测试	217
第四节	复合材料的性能与测试	225
参考文献		235

第一章 绪论

第一节 纺织复合材料的概念

复合材料是由两种或两种以上的单一材料，用物理或化学的方法经过复合而成的一种固体材料。如果复合材料的组分中含有纤维、纱线或织物，则称作纺织复合材料。纺织复合材料是以纺织纤维及其结构体实现增强的先进复合材料，其制备过程包括纤维织物结构的制备和纤维与基体的复合工艺，因此，在微观结构上，它是一种不均匀材料，具有明显的纤维与基体界面。纤维与基体在界面上存在着力的相互作用。

纺织复合材料既保留了纤维和基体的主要优点，又克服或减少了纤维和基体的许多缺点，还可产生纤维与基体所没有的一些优异性能。通过不同纤维、不同纤维织物以及不同基体的选择，再加以不同的复合工艺，可以获得高性能、多功能的复合材料。

第二节 高性能纤维

复合材料主要由基体材料和增强体两大部分组成。一般来说复合材料增强体应该具有以下特征：具有能明显提高基体某种所需性能的特性；具有良好的化学稳定性；与基体之间具有良好的润湿性。

一、增强体的分类

(1) 按几何形状划分。有颗粒状（简称零维）、纤维状（简称一维）、薄片状（简称二维）和由纤维编织的三维立体结构。

(2) 按属性划分。有无机增强体和有机增强体，其中有合成材料也有天然材料。

二、增强纤维的特点

复合材料最主要的增强体是纤维状的，统称为增强纤维，增强纤维有如下特点。

(1) 与同质地的块状材料相比，纤维状材料的强度要高得多。

(2) 纤维状材料具有较高的柔曲性。

(3) 纤维状材料具有较大的长径比（ l/d ），这使得它在复合材料中比其他几何形状更容易发挥固有的强度。

三、增强纤维的品种

复合材料中增强纤维的品种很多,其中既包括已广泛应用的玻璃纤维、各种植物纤维,也包括各种新型的高性能增强纤维,如有机纤维中的对位芳酰胺(芳纶)、聚芳酯、聚苯并噁唑(PBO)和超高分子量聚乙烯(UHMWPE)等纤维,以及无机纤维中的碳纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维和特种玻璃纤维等。20世纪90年代后,为满足先进复合材料高性能(高强度、高弹性模量)化、多功能化、小型化、轻量化、智能化及低成本化的发展需要,各种新技术和新设备已被开发,从而大大推动了高性能纤维的发展。

第三节 纺织复合材料预制件

以纤维束为复合材料的增强体时,通过纺织工艺将纤维束按照一定的交织规律加工成二维或三维形式的纺织结构,使之成为柔性的、具有一定外形和内部结构的纤维集合体,称之为纺织复合材料预制件。根据不同的纺织加工方法,如机织、针织、编织和非织造等,纺织复合材料预制件中的纤维取向和交织方式具有完全不同的特征,导致其所体现出的性能存在着明显的差异。为此,采用不同的纺织预制件增强所制备的纺织复合材料时,通常在其名称前标以纺织方法以示区别,如机织复合材料、针织复合材料、编织复合材料等。

根据纺织结构的几何特征,纺织复合材料有二维纺织复合材料和三维纺织复合材料两种方式。

一、二维纺织复合材料

由于纤维的交织或缠结,纺织结构在面内的两个正交方向上的尺寸远大于其在厚度方向上的尺寸,以此为增强形式所获得的复合材料称为二维纺织复合材料。二维纺织结构中,由纤维通过加捻或合并组成的纱线(称为纤维束)在平面内相互交织。

根据不同的纺织加工方法,纱线在平面内的交织方式和取向有很多种形式。对于机织结构,取向分别为 0° 和 90° 的经纬两组纱线相互交织,形成稳定的二维结构;对于针织结构,纱线之间在经向或纬向以成圈的方式相互嵌套,构成针织物;对于编织结构,纱线之间按照与织物轴向偏移一定角度的取向相互编结交织而成;而对于以非织造方法加工而成的织物,纤维通常以散纤维的状态分布在平面内的各个方向上,通过机械或黏结的方法固结成织物,面内准各向同性的特征。

二、三维纺织复合材料

对于三维纺织结构而言,厚度方向(Z向)上的尺寸和纤维交织形式不可忽略。在厚度方向上引入纱线而形成立体的纤维交织结构,从而获得优秀的结构整体性,是三维纺织结构特点。

类似于二维纺织结构,不同纺织方法所获得的三维纺织结构也具有鲜明的纺织加工

特征。同时,引入Z向纤维的方式也有很大区别,如三维机织结构通过接结经纱(或纬纱)引入Z向纤维,三维针织结构通过线圈嵌套方法将层平面结构结合在一起,而三维编织结构则通过编织纱的三维空间运动而获得。根据基本的织物结构特征,三维纺织复合材料也可划分为三维机织复合材料、三维针织复合材料,三维编织复合材料等。各种类型的材料所体现出的性能也因纤维交织方式的不同而各具特点。可根据产品的性能要求,选择不同形式的三维纺织结构作为预型件,以设计出符合使用要求的纺织复合材料。

第四节 树脂基体

复合材料中除了高性能纤维,还有树脂基体。树脂基体为连续相,把单个纤维黏成一个整体,使材料中的所有纤维共同承载,发挥增强材料的特性。

一、树脂基体的作用

(1) 在复合材料受力时,力通过树脂基体传递给纤维,也就是说,树脂基体起着均衡载荷、传递载荷的作用。一根绳子可以承受拉力,但不能承受压力,甚至不能立起来,纤维只有在树脂基体的支撑下才能承受压力,同时树脂基体可防止纤维屈曲。

(2) 在复合材料的生产与应用中,树脂基体起着保护纤维、防止纤维磨损的作用。

二、树脂基体的种类

目前,树脂基体的种类很多,包括热固性树脂基体、热塑性树脂基体等。

三、树脂基体对纺织复合材料性能的影响

对于纺织复合材料,树脂基体的黏度、适用期直接影响增强材料的浸渍、复合材料的铺层和预浸料的储存等。此外,纺织复合材料材料的力学、物理性能除了与纤维增强材料的种类及含量、纤维的排列方向、铺层次序和层数等有关外,还与所用的树脂基体密切相关。纺织复合材料的使用温度、耐环境性、力学性能和其他特定的某些功能性能(如阻燃性、抗辐射、耐腐蚀性等)等在很大程度上取决于所用的树脂基体的性能。因此,树脂基体的性能直接影响复合材料的性能,更为重要的是,复合材料的成型方法与工艺参数的选择主要是由基体的工艺性质决定的。

第五节 成型工艺

纺织复合材料的性能在纤维与树脂体系确定后,主要决定于成型固化工艺。成型固化工艺包括三个方面的内容:预浸料等半成品的制备、增强材料的预成型得到的接近制品形状的毛坯、复合材料的固化成型。在不同的工艺方法中这三个方面可能同时或分别

进行,但都要完成树脂与纤维的复合、浸渍、固化和成型;在同一个加工过程,复合材料的材料和产品(或结构)一次同时完成。由于树脂分为热塑性和热固性两种,即初始状态为固态和液态两种形式,因此,不同形式的树脂,其复合工艺不同,但都需要先将固态转变成液态,具有流动性后才能浸渍纤维。目前,纺织复合材料的复合工艺主要包括手糊法成型、真空袋成型、气压室(压力袋)成型、热压罐成型、模压成型、树脂传递模塑成型(RTM)、树脂膜熔渗成型(RFI)、吸胶成型、增强反应性注射成型(RRIM)、拉挤成型等由于不同的工艺方法采用的温度、压力等参数的差异较大,即使是同一种树脂,采用不同的复合工艺方法,其复合材料的性能也会呈现出明显的性能差异。因此,要根据材料性能、产品质量要求、生产批量大小、供应时间、预定价格和经济效益选择不同的复合成型工艺。

第六节 纺织复合材料的性能特征

在进行二维和三维机织复合材料力学性能的分析 and 计算时,其理论基础为经典层合理论。

一、经典层合理论

层合板是由两层或两层以上的单向板黏合在一起而形成的整体受力结构元件。各单向板的材料、厚度和弹性主方向等可以互不相同。适当的改变这些参数,就可以设计出能有效地承受各种特定外载荷的结构元件。

经典层合理论采用弹性板壳理论中的直线法假设,其理论分析结果与实际测试结果能很好的吻合。

这里的单向板指的是单向纤维经复合而成的薄板状复合材料。在宏观上,它属于各向正交异性材料。单向板的正轴弹性特性,可以通过实验测定,也可由组分材料的性能通过计算而获得,这方面的理论已很成熟。单向板的偏轴特性,可通过应力转换公式而求得,通过经典层合理论计算出层合板的力学性能。

二、二维机织复合材料的力学性能

二维机织复合材料的力学性能的计算,可采用三种模型,分别是镶嵌模型、卷曲模型和桥式模型,这三种模型均用于研究复合材料的刚度性能。

经典层合理论是其分析基础,镶嵌模型用于粗略估计复合材料的弹性性能,将连续的复合材料理想化为相互独立的复合材料集合体的串联与并联,仅用于预测复合材料刚度的范围,适应面相对较小。

卷曲模型适用于平纹织物,在平纹机织复合材料中,纱线卷曲较为剧烈,而卷曲模型所模拟的卷曲情况与实际情况甚为吻合,该方法用于平纹机织复合材料力学性能的预测时,获得了理想的预测效果。

桥式模型适用于缎纹织物。平纹织物在交织区周围不存在直纤维区,当无弯曲时,在平纹织物的载荷方向上,每根纱线面内刚度的分布是相等的,故没有桥的作用发生,每根纱线承受一样的面内力,因此,纤维卷曲模型能提供相当好的预测结果。

三、三维机织复合材料的力学性能

(一) 概述

早期的纺织复合材料多数是平面织物经层合而形成的,虽工艺简单、便于制作,但外力超过其极限强度时,最先破坏的地方总是发生在层间界面,亦即层间强度低,因而其发展前景不甚乐观。解决这一问题的最好办法之一就是利用纺织技术织造三维织物,然后进行复合。三维织物具有良好的稳定性,其破坏容限和抗冲击能力均有了显著的提高,整体性和横向抗剪切性能大大改善。由于采用了纺织工艺的成型方法,在构造上具有对较复杂外形的适应性。

在三维机织复合材料构件中,纱线配置有多种方案,如角联锁、三向正交、波形正交配置等,其分析模型主要有层合板模型、能量法模型和平均法模型。

层合板理论是预测复合材料弹性性能的经典方法,把层合板理论应用到三维复合材料,只限于分析面内弹性特性,因为该理论是在板壳理论的基础上建立起来的。在能量法中,纱线伸长、弯曲和侧向压缩所产生的应变能量,在弹性性能的预测中均予以考虑;由于该方法考虑了纱线间的相互作用,所以比复合材料的特性曲线更适合于分析其性能。在平均法中,以合适的角度进行张量转换并进行刚度平均,可以得到纱线分布于空间的复合材料的刚度;该方法最突出的优点在于它可以处理厚截面试件,也可处理纱线结构复杂的部件。

三向正交结构中,纱线的配置共有三种情况:经纱、缝经纱和纬纱,其中经纱几乎处于伸直状态。复合时由于模具的压力,经纱进一步趋于平直,纬纱基本上是垂直的,与此相反,缝经纱则完全处于卷曲状态。

(二) 假设

为研究方便,作如下假设。

(1) 纤维与基体间存在着理想的黏结,以至在界面上不发生滑脱;整个复合材料结构单元除了纤维外均被树脂充满,无空隙。

(2) 递增的载荷作用于材料上时,材料呈线性变形。

(3) 经纱为直线,纬纱为直线,缝经纱呈折线。

(4) 所有纱线截面均呈圆形。

(三) 力学性能的计算

通过以上假设不难看出,三维正交机织复合材料可视为横向、纵向和两个斜向的层合板组合而成的集合体。传统的层合板理论在这里推广为倾斜层合板理论,利用这一方法可以预测三向正交机织复合材料的力学性能。其他结构的机织复合材料的弹性性能的预测方法与此类似,只是层合板的交叉方法与之有所不同。

第七节 纺织复合材料的应用

不同的纺织复合材料, 造价与性能不同, 应用领域也不同。由碳纤维加强的复合材料, 因其高昂的价格和优异的性能, 主要应用于航空航天中, 该领域要求构件具有最佳的质量和最优异的性能, 而且对减重效果倍加重视。纺织复合材料率先在航天航空领域的应用, 对在其他领域的应用起到了启迪与促进作用, 到目前为止, 纺织复合材料几乎渗透到所有的技术领域。

一、航空航天工业

早期的纺织复合材料主要应用于民用飞机, 多用作承力不大的构件, 如内装修板等。经过几十年的试验, 目前飞机的许多构件都可以用纺织复合材料制作, 如雷达罩、电子设备舱、前缘壁板、舱门、翼尖、尾锥、升降舵、发动机叶片、发动机外壳等。纺织复合材料减震效果好, 膨胀系数小, 亦适于制作喷气发动机的运动部件, 轻重量的转子可降低负载, 提高工作效率。用纺织复合材料制作的直升飞机桨叶, 比同等价格的金属桨叶寿命高, 金属桨叶的使用期限一般为1500h, 而复合材料桨叶可超过3000h。利用模压技术制作复合材料桨叶, 优化设计的外形可以提高气动效率。结构复杂的零件直接复合而成, 可减少零件个数和联接件, 降低重量, 节约成本。目前航天飞机的货舱门多采用碳纤维与环氧树脂复合的蜂窝状结构材料制作。

宇宙飞船的机械手长臂用碳纤维复合材料层合板制作, 在太空中, 由于材料刚度较大, 变形较小, 保证了动作的精度。为了使长臂具有较大的扭转刚度, 材料中部分纤维呈 $\pm 45^\circ$ 排列。在太空中, 一般的温度范围是 $-200 \sim 80^\circ\text{C}$, 装备应该具有小的热膨胀系数, 才能正常工作。在卫星上使用的天线反射器、太阳能隔栅壁板、反射镜支架、光学望远镜、工作台架等, 都要求具有较低的热膨胀系数。许多研究表明, 混合使用不同膨胀系数的纤维制成的复合材料具有理想的热膨胀系数。

二、船舶工业

利用纺织复合材料造船, 多以玻璃纤维为原料, 为了弥补玻璃纤维模量较低的不足, 可以混入一定比例的碳纤维, 利用玻璃纤维与碳纤维交织的织物制作复合材料, 扩大了其在船舶工业中的应用。一只竞赛用的独木舟, 使用227g碳纤维, 舟的重量可从15.9kg降至10kg。在造船业中, 分别使用或混合使用玻璃纤维、碳纤维、芳纶制作的复合材料, 产品包括划艇、帆船、快艇、游艇、高速马达船、救生船、水警艇、巡逻艇、深海渔船等。纺织复合材料船体吸震性好, 抗冲击能力强, 耐海水及海洋生物侵蚀, 且成型方便, 便于维护, 比钢材更适应海洋环境。

三、汽车工业

用碳纤维复合材料做车身的福特GT40型赛车在拉力赛中夺魁。此后, 纺织复合材料在汽车工业领域的用量稳步上升。车身、座椅、油箱、车门的制作材料, 逐渐由复合材料取代。利用层合板制作的板簧, 延长了使用寿命。

用纺织复合材料制作的赛车车身及后盖, 由于刚度较高, 高速行驶时不易形变, 能继续保持其流线型的外形。而用传统金属材料制作的车身, 高速行驶时由于空气压力而产生车身变形, 接口处出现缝隙, 噪声增大, 空气阻力增加。

四、体育用品

用挤拉法生产的复合材料制作的空心或实心渔竿, 改善了渔竿的性能; 用树脂浸渍织物滚压制作的渔竿, 重量更轻, 弹性更好。用碳纤维复合材料整体设计制作的高尔夫球杆, 杆身轻而硬, 重量集中在杆头部, 击球时能量与弹性可以最大限度地转移到头部, 使球的飞行距离增加20~30m。用碳纤维复合材料制作的网球拍、乒乓球拍、雪橇、撑杆跳高用撑杆、滑雪板、冰球杆等运动器材, 使许多运动项目进入了一个新的时代。时至今日, 几乎所有知名自行车运动员的用车是由纺织复合材料制作。

五、军事工业

某些纺织复合材料能被电磁波穿透, 因而在潜水艇、隐形飞机上得到广泛应用。用纺织复合材料制作的潜水艇, 表面没有磁性, 传统的磁性水雷不会对其造成威胁。用纺织复合材料制作的导弹外壳, 可以防止高速飞行时过热熔融。

目前, 战火火箭、反坦克导弹、防护装甲、大口径火炮、火箭弹体、火箭发动机、发射管、坦克复合装甲、坦克负重轮等已开始用纺织复合材料制作。

用纺织复合材料制作的移动式天线, 减轻了重量, 提高了部队的机动能力。用纺织复合材料制作的拆装式舟桥、头盔、子弹箱等已有实战应用的例子。

六、医疗卫生行业

用玻璃纤维复合材料制作的外科夹板, 可直接模塑出病人的躯干形状, 减轻患者的痛苦。用层合板制作的人工呼吸器, 轻便耐用。

以聚丙烯腈为原料的碳纤维具有生物相容性, 可以用来修复韧带、制作假肢。碳纤维复合材料的杨氏模量与人骨相似, 与血和软组织的适应性较好。

七、其他行业

纺织复合材料的应用范围涉及各行各业。纺织工业中, 许多高速运动的零件可以用复合材料制作, 从而降低重量, 提高生产效率。如用纺织复合材料制作的纺纱转杯, 转速由原来的45000r/min增至200000r/min; 在剑杆织机上, 用碳纤维复合材料制作的剑杆、剑带、弹簧片等, 改善了织机的性能。

第二章 纺织复合材料用增强纤维

第一节 纺织纤维及其集合体的结构参数指标

一、细度指标

(一) 纤维的细度指标

纤维细度是指以纤维的直径或截面面积的大小来表达纤维的粗细程度。在更多情况下,常因纤维截面形状不规则及中腔、缝隙、孔洞的存在而无法用直径、截面面积等指标准确表达,习惯上使用单位长度的质量或单位质量的长度来表示纤维。纤维的细度指标分为直接指标和间接指标两类。

1. **直接指标** 直接指标主要是指直径、截面积和宽度等纤维的几何尺寸表达。常用于羊毛及其他动物毛等圆形化学纤维的细度表达。测量时通过光学显微镜或电子显微镜观测直径 d 和截面积 A 。由于纤维很细,常以微米为单位。对近似圆形的纤维,其截面积可近似采用 $A=\pi d^2/4$ 计算。

2. 间接指标

(1) **线密度**。我国法定的线密度单位为特克斯(tex),简称特。有些品种由于纤维细度较细,用特数表示时数值过小,常采用分特(dtex)或毫特(mtex)表示纤维的细度。且 $1\text{dtex}=10^{-1}\text{tex}$, $1\text{mtex}=10^{-3}\text{tex}$ 。

(2) **旦尼尔**。丹尼尔(Denier)简称旦,又称纤度 N_d ,纤度较多地用于蚕丝和化纤长丝的细度表示中。

(3) **公制支数**。按计量制不同可分为公制支数、英制支数。

(二) 纤维细度不匀及其指标

1. **细度不匀** 纤维的细度不匀主要包括两方面,一是纤维之间的粗细不匀,二是纤维本身沿长度方向上的粗细不匀。

2. 细度不匀指标

(1) **不匀率指标**。对细度不匀较为合理的表达应为线的直径或线密度的差异。也就是说通过纤维的平均直径及其离散指标或者平均线密度及其离散指标来表示纤维细度不匀是最有效的,相关的离散指标主要包括直径或线密度的标准差及其变异系数CV值。

(2) **纤维间细度不匀的分布**。在纤维分组测量的基础上,将纤维直径的测试结果用直方图表示,不但可以反应出纤维细度的分布状况,还可以计算出纤维细度的离散系数。典型的分布曲线如图2-1所示。

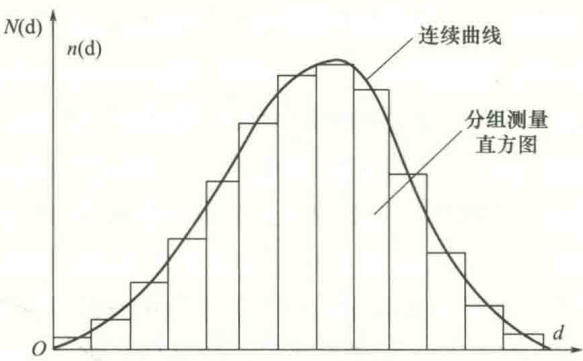


图2-1 纤维直径分布直方图及分布示意图

(三) 纱线的细度指标

表征纱线细度的指标与纤维类似，有线密度 T_t 、旦尼尔 N_d 、公制支数 N_m 、英制支数 N_e 。股线的细度表示方法按表2-1所示方法表示。

表2-1 股线的细度表示方法

细度表示方法		单纱情况	表示方法	示例
定长制	线密度	线密度相同	股线公称线密度=单纱公称线密度×股数	14tex×2
		线密度不同	股线公称线密度=各单纱公称线密度相加	(16+18) tex
	纤度	纤度相同	股线公称纤度=单丝股数/单丝公称纤度	2/20旦长丝
		纤度不同	股线公称纤度=各单丝公称纤度相加	70旦×1涤纶+50旦×1锦纶
定重制	公支或英支	支数相同	股线的公称支数=单纱公称支数/股数	72/2公支 60/2英支
		支数不同	股线公称支数=(1/ N_1 +1/ N_2 +...+1/ N_k)	(1/60+1/40) 公支

(四) 细度不匀率指标

(1) 平均差系数 U 。指各数据与平均数之差的绝对值的平均值对数据平均值的百分比。

(2) 变异系数 CV 。又称离散系数，指均方差与平均值的百分比。

(3) 极差系数 p 。指数据中最大值与最小值之差（极差 R ）对平均值的百分比。

$R=x_{\max}-x_{\min}$ ； $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为测试数据中的最大和最小值。

(4) 纱条理论不匀。如纤维粗细不匀，则可用著名的马丁代尔（Martin-dale）纱条极限（理论）不匀率公式表示。

二、长度指标

纤维长度是确定纺纱设备和纺纱工艺参数的依据，也是决定纱线质量的重要因素，因此，纤维长度是衡量纤维品质的重要指标。化学纤维的长度可以人为控制，天然纤维的长度都是自然天成，所以尤为重要。

1. **计数加权长度** 以纤维计数加权平均所得到的长度值称为计数平均长度, 此值又称豪特长度, 国际上用 H 表示。

2. **计重加权长度** 一般由分组称重法测得, 此值又称为巴布长度, 国际上常用 B 表示。

3. **主体长度** 指一束纤维试样中根数最多或者质量最大的一组纤维的长度, 称计数或计重主体长度。

4. **品质长度** 品质长度是用来确定纺纱工艺参数的纺织纤维长度指标, 又称右半部平均长度或上半部平均长度, 不同测试方法得出的品质长度不同, 目前, 主要指可见光扫描式长度分析仪测得的比平均长度长的那一部分纤维的计数加权平均长度。计重主体长度以上平均长度也称右半部平均长度。

5. **手扯长度** 在手感目测的检验方法中, 用手扯尺量法测得的棉纤维长度称为手扯长度。各国的手扯长度值不同的, 根据各国使用的仪器长度来定义。

三、其他指标

(一) 纱线的加捻指标

1. **捻度** 加捻使纱线的两个截面产生相对回转, 两截面的相对回转数称为捻回数。捻度是单位长度纱线上的捻回数。

2. **捻系数** 粗细不同的纱线, 单位长度上施加一个捻回所需的扭矩是不同的, 因此, 捻度不能用来比较不同粗细纱线的加捻程度。加捻后表层纤维与纱条轴线的夹角, 称为捻回角, 捻回角虽然能表征纱线加捻紧密程度, 可用于比较不同粗细纱线的捻紧程度, 但由于测量、计算等都很不方便, 实际中较少应用。在实际生产中, 用捻系数来表示纱线的加捻程度。

3. **捻向** 纱线加捻时扭转的方向称为捻向。单纱中的纤维或者股线中的单纱在加捻后, 其捻回的方向由下而上、自右向左的称为S捻(顺手捻、正手捻)。自下而上、自左而右的称为Z捻(反手捻)。

4. **捻幅** 单位长度纱线加捻时, 纱线截面上任意一点在该截面上相对转动的弧长, 称为捻幅。

(二) 吸湿指标

1. **回潮率与含水率** 纤维及其制品吸湿后, 含水量的大小可用回潮率或含水率表示。回潮率是指纤维材料中所含水分的质量占纤维干重的百分数; 含水率是指纤维材料中所含水分的质量占纤维湿重的百分数。

回潮率和含水率之间的关系为:

$$W = \frac{100M}{100-M} \text{ 或 } M = \frac{100W}{100+W}$$

式中: W ——回潮率;

M ——含水率。

2. **标准状态下的回潮率** 在统一的标准大气条件下（我国规定温度为20℃，相对湿度为65%），吸湿过程达到平衡时的回潮率称为标准回潮率。

3. **公定回潮率** 在贸易和成本计算中，纺织材料并不处于标准状态，为了计量和核价的需要，各国依据各自的具体条件，对各种纺织材料的回潮率作统一规定，称为公定回潮率。

4. **平衡回潮率** 平衡回潮率是指纤维材料在一定大气条件下，吸湿、放湿作用大于吸湿平衡时的回潮率。

（三）化纤长丝的规格

化纤长丝的规格用线密度（tex或dtex）和组成复丝的单丝根数组合表征，如165dtex/30f，表示复丝总线密度为165dtex，单丝根数为30根。化纤长丝的总特克斯数和复丝根数都是标准化的系数数值，参见表2-2，一般，纤维生产企业不生产系列以外的产品。但产业用化学纤维却有许多其他规格，例如，复丝根数有1000、3000、6000、12000、24000等。

表2-2 常用化纤长丝的规格

线密度（dtex）	22.2、33.3、44.4、55.6、75、83.3、111.1、133.3、166.7、222.2、277.8、333.3、345、389等
复丝根数（根）	2、3、12、24、36、48、72、96、144、196、248等

（四）纤维单位体积含量

纤维单位体积含量属于复合材料概念，织物中不用纤维体积含量而用孔隙率、透孔率或者未充满系数来表示。

第二节 碳纤维

一、分类

碳纤维是由90%以上的碳元素组成的纤维。碳原子结构排列最规整的物质是金刚石，碳纤维结构近乎石墨结构，比金刚石结构规整性稍差。主要以高温下无熔点的有机纤维，通过固相碳化去除非碳元素的方法来制取。

碳纤维的种类较多，牌号繁杂，性能各异，用途不同，但是，主要按其原料种类、碳纤维性能与功能以及碳纤维束丝K数有三种分类。

（一）按原料种类分类

目前，工业生产碳纤维的原丝主要有三大类，即聚丙烯腈（PAN）原丝、沥青纤维和黏胶丝。由这三大类原丝生产出的碳纤维分别叫作PAN基碳纤维（PAN基CF）、沥青基碳纤维（Pitch基CF）和黏胶基碳纤维（Rayon基CF）。

黏胶基碳纤维是最早问世的一种，是宇航工业的关键性材料，但是其产量在碳纤维