



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

新型纤维材料及其应用

X

INXING XIANWEI GAILIAO
JIQI YINGYONG

董卫国 主编

中国纺织出版社



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

新型纤维材料及其应用

董卫国 主编

 中国纺织出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了新型纤维材料的制备、结构、性能和应用。主要内容包括新型高性能无机纤维、新型高性能有机纤维、导电纤维、发光纤维、相变纤维、发热纤维、超细纤维和纳米纤维、蛋白质改性纤维、导湿纤维、阻燃纤维、抗菌纤维、吸附型纤维、新型生物质纤维，并对纤维及其复合材料在各领域的开发应用进行了详细介绍。

本书可用于高等院校纺织工程、非织造材料与工程、纺织材料与纺织品设计以及复合材料等相关专业本科或研究生教材，也可以供从事纺织服装业、纤维制造业、复合材料等领域的科研工作者和技术研究人员阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型纤维材料及其应用/董卫国主编. --北京:中国纺织出版社, 2018. 6

“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材

ISBN 978-7-5180-5127-4

I. ①新… II. ①董… III. ①纺织纤维—高等学校—教材 IV. ①TS102

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 119961 号

策划编辑: 朱利锋 责任校对: 楼旭红
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
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 6 月第 1 版第 1 次印刷
开本: 787 × 1092 1/16 印张: 12.25
字数: 243 千字 定价: 52.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

前言

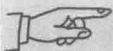
纤维是直径十分细小而长径比很大的物质形态，因而纤维材料具有容易发生弯曲变形、形状适应性好的特点。纤维材料既可以通过相互之间的穿插、纠缠、交织等形成各种纤维集合体材料，如纱线、绳索、二维或三维的机织物、针织物、编织物、非织造布等，也可以与基体材料复合形成复合材料。因此，纤维材料不仅在纺织领域，而且在航空航天、交通运输、建筑、环境保护、通信、能源、体育、医卫等领域得到广泛的应用。随着科学技术的高速发展和纤维材料应用领域的不断扩展，新型纤维材料不断涌现，其发展更趋向于纤维的高性能化、功能化、差异化和环境友好。

本书所阐述的新型纤维材料既包括新开发的纤维材料，也包括传统纤维通过采用新技术、提高性能、大幅度增加附加值而成为的新型纤维材料以及一些不断发展的传统纤维的最新产品。通过本教材的学习，学生能够系统掌握和了解新型纤维材料的结构、性能、应用领域、应用方法以及产品特点、产品评价标准等方面的知识和理论，为未来从事纤维材料的开发与应用奠定理论基础；着重提高学生知识的融合能力和学科交叉创新的能力。

本书共分九章，第一章、第二章、第三章、第五章、第七章、第八章、第九章由天津工业大学董卫国编写，第六章由青岛大学邢明杰编写，第四章由德州学院徐静编写。全书由董卫国负责策划、统稿和校审。

在本书编写过程中得到天津工业大学李亚滨教授的悉心指导，天津工业大学郑襄丹、郑通通、杨新玉、杜雄飞、王明方同学在资料收集和整理方面给予帮助，在此表示衷心的感谢。对中国纺织出版社编辑的审核、加工工作，表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，诚挚希望广大读者批评指正。



课程设置指导

课程设置意义

新型纤维材料及其应用课程是纺织工程、非织造材料与工程、纺织材料与纺织品设计、复合材料等专业的专业课，通过本课程的学习，学生能够系统掌握和了解新型纤维材料的结构、性能、应用领域、应用方法及产品特点、产品评价标准等方面的知识和理论，为未来从事纤维材料的开发与应用奠定理论基础。为拓宽学生的知识面、培养学生的创新思维、扩大学生的就业领域和为学生将来的继续深造提供有益的帮助。

课程教学建议

纺织工程、非织造材料与工程、纺织材料与纺织品设计、复合材料等专业以及上述各专业不同的专业方向在使用本教材时应根据需要对教学内容进行取舍。

建议理论教学课时数为 30~60 学时。

课程教学目的

通过本课程的学习，掌握纤维开发及应用的基本理论和方法，使学生对新型纤维的结构、性能以及应用有全面系统的掌握和了解，提高学生对知识融合创新的能力。

目录

第一章 无机高性能纤维	001
第一节 高性能碳纤维	001
一、概述	001
二、碳纤维的结构与性能	003
三、碳纤维织物及其碳纤维复合材料	007
四、碳纤维的应用	009
第二节 石墨烯纤维	013
一、石墨烯纤维的结构和性能	013
二、石墨烯纤维制备方法	014
三、石墨烯连续纤维的应用	017
第三节 玄武岩纤维、碳化硅纤维及氧化铝纤维	018
一、玄武岩纤维	018
二、碳化硅纤维	023
三、氧化铝纤维	028
参考文献	031
第二章 高性能有机纤维	033
第一节 芳香族聚酰胺纤维	033
一、对位芳纶（芳纶 1414）	033
二、间位芳纶	037
第二节 超高分子量聚乙烯纤维	040
一、超高分子量聚乙烯纤维生产工艺及国内外生产状况	040
二、UHMWPE 纤维的分子结构和超分子结构特点	041
三、UHMWPE 纤维性能	042
四、UHMWPE 纤维的应用	044
第三节 PBO 纤维	045
一、概述	046
二、PBO 纤维的结构	046
三、PBO 纤维的性能	047
四、PBO 纤维的应用	049
五、存在的问题	050

第四节	PPS、PEEK、PTFE 及 PI 纤维	050
一、	PPS 纤维	050
二、	PEEK 纤维	053
三、	PTFE 纤维	057
四、	聚酰亚胺 (PI) 纤维	061
参考文献	064
第三章	导电纤维	065
第一节	导电纤维概述	065
一、	导电纤维的定义和分类	065
二、	导电纤维抗静电及其电磁屏蔽作用机理	065
三、	导电纤维的用途	069
第二节	导电纤维分类	071
一、	金属纤维	071
二、	碳素导电纤维	074
三、	有机导电纤维	074
第三节	不锈钢纤维和镀银纤维	075
一、	不锈钢纤维	075
二、	镀银纤维	079
参考文献	082
第四章	新型彩色发光纤维、相变纤维、发热纤维	083
第一节	新型彩色发光纤维	083
一、	稀土发光纤维发光机理	083
二、	稀土发光纤维的制备方法	084
三、	稀土发光纤维的性能	084
四、	发光纤维在纺织领域的应用	088
第二节	相变调温纤维	090
一、	相变纤维调温机理和性能	090
二、	相变纤维制备方法	091
三、	Outlast 调温纤维的调温性能	091
四、	相变纤维的用途	093
第三节	发热纤维	094
一、	发热纤维种类	094
二、	发热纤维在应用中存在的问题	096
三、	发热纤维的发展趋势	097
参考文献	097

第五章 超细纤维和纳米纤维	099
第一节 超细纤维	099
一、超细纤维的制备方法	099
二、纤维结构、性能与纤维线密度的关系	102
三、超细纤维制品的性能特点	106
四、超细纤维的应用	107
第二节 纳米纤维	109
一、纳米纤维的制备方法	110
二、静电纺纳米纤维	111
参考文献	120
第六章 蛋白质改性纤维	121
第一节 大豆蛋白纤维	121
一、大豆蛋白纤维的制造过程	122
二、大豆蛋白纤维的形态结构与性能	122
第二节 牛奶纤维	125
一、牛奶纤维的生产过程	125
二、改性牛奶蛋白纤维的形态与性能	127
三、牛奶蛋白纤维的产品开发	128
第三节 蚕蛹蛋白/黏胶纤维	129
一、蚕蛹蛋白/黏胶纤维的组成结构与形态	129
二、蚕蛹蛋白/黏胶纤维的性能	130
三、蚕蛹蛋白/黏胶纤维应用	131
参考文献	132
第七章 导湿纤维	133
第一节 纤维导湿改性方法	133
一、物理改性	133
二、化学改性	135
第二节 导湿纤维开发	135
一、异形导湿纤维	135
二、WELLKEY 纤维	135
三、挥汗纤维	135
四、Sophista 纤维	136
五、高吸放湿性尼龙	136
六、其他纤维	136

第三节 纤维及其集合体导湿理论	136
一、湿传递过程及其湿传递指标	137
二、纱线、织物导湿模型	139
三、导湿面料开发	140
参考文献	145
第八章 阻燃纤维、抗菌纤维及吸附型纤维	146
第一节 阻燃纤维	146
一、改性阻燃纤维	146
二、本质阻燃纤维	148
三、阻燃纤维混纺时应注意的问题	150
四、阻燃纺织品的性能评价方法	151
第二节 抗菌纤维	151
一、改性抗菌纤维概述	152
二、几种改性抗菌纤维	154
三、抗菌纤维的抗菌性能评价	156
四、抗菌纺织品的安全性问题	158
第三节 吸附型纤维	159
一、活性炭纤维	159
二、竹炭纤维	163
参考文献	165
第九章 新型生物质纤维	167
第一节 新型生物质原生纤维	167
一、汉麻纤维的成分与结构	167
二、汉麻纤维的性能	168
三、汉麻纤维的加工与开发	170
四、汉麻纤维的应用	171
第二节 新型生物质再生纤维	171
一、新型再生纤维素纤维	171
二、甲壳素纤维	173
三、海藻纤维	176
第三节 新型生物质合成纤维	179
一、聚乳酸纤维	179
二、PTT 纤维	184
参考文献	186

第一章 无机高性能纤维

第一节 高性能碳纤维

随着科学技术的进步和社会的发展,碳纤维的性能不断提高,应用领域不断扩展,本节主要介绍高性能碳纤维的结构性能和应用,而具有吸附功能的活性碳纤维在本书第八章第三节中介绍。

一、概述

碳纤维(carbon fiber,简称CF)是纤维状的碳材料,其化学组成中,碳元素占总质量的90%以上。碳纤维具有一般碳素材料的特性,如耐高温、耐摩擦、导电、导热及耐腐蚀等,但与一般碳素材料不同的是,其外形有显著的各向异性,柔软,可加工成各种织物。

含碳量在95%以上的高强度、高模量的碳纤维是经炭化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料,因而也称为石墨纤维。

(一) 碳纤维分类

1. 根据所用原料分类 根据所用原料的不同,可将碳纤维分为聚丙烯腈基碳纤维、沥青基碳纤维、纤维素基碳纤维、酚醛基碳纤维、其他有机纤维基碳纤维。

2. 根据制造条件和方法分类 根据制造条件和方法,可将碳纤维分为普通碳纤维(碳化温度在800~1600℃时得到的纤维)、石墨纤维(碳化温度在2000~3000℃时得到的纤维)、活性碳纤维、气相生长碳纤维(包括晶须状纳米碳纤维)。

3. 根据碳纤维的力学性能分类 根据碳纤维的力学性能可将其分为通用级碳纤维和高性能碳纤维。

(1) 通用级碳纤维:拉伸强度 $<1.4\text{GPa}$,拉伸模量 $<140\text{GPa}$ 。

(2) 高性能碳纤维:高强度(强度 $>2\text{GPa}$ 、模量 $>250\text{GPa}$)、高模型(模量 $>300\text{GPa}$)、超高强度(强度 $>4\text{GPa}$)、超高模型(模量 $>450\text{GPa}$)。

4. 根据碳纤维的用途分类 根据碳纤维的用途可将其分为受力结构用碳纤维、耐焰用碳纤维、导电用碳纤维、润滑用碳纤维、耐磨用碳纤维、活性碳纤维。

5. 根据碳纤维丝束的大小分类 PAN基碳纤维有小丝束和大丝束之分。小丝束一般是指1~24K(1K表示碳纤维束中有1000根单丝)的碳纤维,大丝束是指48~540K的碳纤维。两者之间并无严格的科学分类,只是按丝束中单丝数目的多少来分。

(二) 碳纤维的制造过程

1. 碳纤维制造工艺 绝大部分碳纤维的制造工艺都涉及如下几个主要步骤。

(1) 稳定化处理（也称不熔化处理或预氧化处理）。使先驱丝变成不熔的，以防止在后来的高温处理中熔融或粘连。

(2) 炭化热处理。通过高温除去先驱丝中半数以上的非碳元素。

(3) 石墨化热处理。通过更高温度加热，使碳变成石墨结构，以改善在第（2）步中所获得的碳纤维的性能。石墨化处理不是每种碳纤维都必需的。

为了使碳纤维具有高模量，需要改善石墨晶体或石墨层片的取向。这就需要在每个步骤中严格控制牵伸处理。如果牵伸不足，不能获得必要的择优取向；但如果施加的牵伸力过大，则会造成纤维过度伸长和直径缩小，甚至引起纤维在生产过程中断裂。

2. PAN 基碳纤维制造过程中纤维结构的变化 图 1-1 为 PAN 基碳纤维制造过程以及每个过程纤维化学结构的变化。

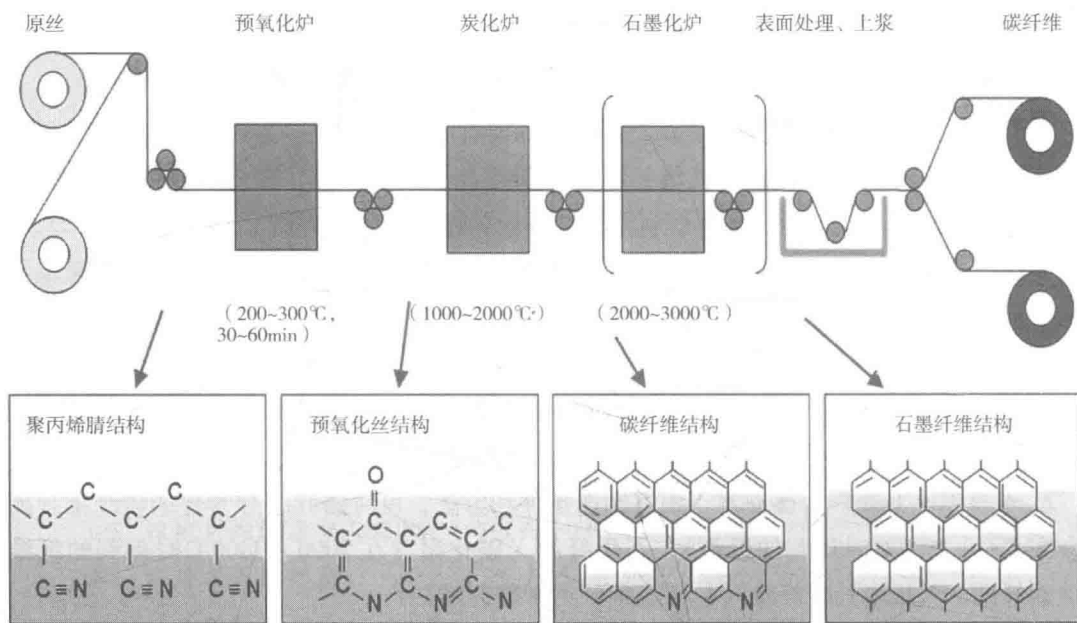


图 1-1 PAN 基碳纤维制造过程以及每个过程纤维化学结构的变化

(1) 预氧化。在 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 下氧化气氛中（空气），在受张力的情况下进行，使线型分子链转化成耐热梯形六元环结构，以使 PAN 纤维在高温炭化时不熔不燃，保持纤维形态，从而得到高质量的 CF。

(2) 炭化。炭化在 $1000\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 的惰性气氛中进行。在炭化过程中，纤维中非 C 原子（如 N、H、O）被大量除去，炭化后含碳率达 95% 左右。

预氧化时形成的梯形大分子发生脱 N 交联，转变为稠环状，形成了 CF。

炭化时施加一定的张力，不仅使纤维的取向度得到提高，而且使纤维致密化，并避免大量孔隙的产生，可制得结构较均匀的高性能碳纤维。

(3) 石墨化。惰性气体保护下（多使用高纯氩气 Ar，也可采用高纯氦气 He）施加张力在 2000~3000℃ 温度下进行。石墨化过程中，结晶碳含量不断提高，可达 99% 以上；纤维结构不断完善，乱层石墨结构过渡为类似石墨的层状结构，石墨化晶体与纤维轴方向的夹角进一步减小（取向度提高）。

(4) 表面处理。通过表面处理，增加纤维的抗氧化性、集束性或增加与基体材料的黏合性。

二、碳纤维的结构与性能

碳纤维的结构主要介绍其结构单元、皮芯结构、缺陷结构；碳纤维的性能主要介绍力学性能、基本物理性能及热学性能。

(一) 碳纤维结构

1. 碳纤维的结构单元 碳纤维的基本结构单元是六角网平面。它的结构缺陷、尺寸大小以及取向状态决定了碳纤维性能。

图 1-2 所示为碳纤维的理想结构模型，原纤沿纤维轴向平行排列，且由完整的六角网平面构成。这种碳纤维的理论拉伸模量应为 1020GPa，理论拉伸强度应为 180GPa。

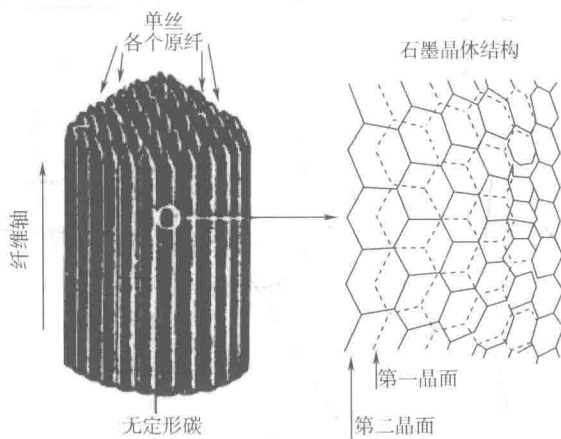


图 1-2 碳纤维的理想结构模型

目前 PAN 基碳纤维的最高拉伸强度为 7.02GPa (T1000)，最高拉伸模量为 690GPa (M70J)，与理论值相差甚远，尤其是拉伸强度差得更远。说明碳纤维的结构模型并不是图 1-2 所示的理想结构模型，与理想结构存在很大差异。

实际上，碳纤维属于乱层石墨结构 (turbostratic graphite structure)，二维较有序，三维无序。最基本的结构单元是石墨片层，二级结构单元是石墨微晶（由数张或数十张石墨片层组成），三级结构单元是石墨微晶组成的原纤维，直径在 50nm 左右，弯曲，彼此交叉的许多条带状组成的结构。

2. 碳纤维的皮芯结构 在皮层，石墨片层大而有序排列，且沿纤维取向；在芯部，石墨层小而排列紊乱，蜿蜒曲折，且有许多孔。

碳纤维中预氧丝的皮芯结构要“遗传”给碳纤维，且在炭化或石墨化过程中进一步加深。皮芯结构是制约碳纤维性能提高的主要结构因素，严重制约了碳纤维拉伸强度的提高。如何消除预氧化过程中产生的皮芯结构是提高碳纤维拉伸强度和拉伸模量的主要技术途径。

随着热处理温度的提高，皮芯结构越来越严重。

3. 碳纤维的缺陷结构 石墨的理论密度为 2.266g/cm^3 ，高强度碳纤维密度在 $1.80 \sim 1.85\text{g/cm}^3$ 之间。两者之差就是孔隙所占比例。对于高强度碳纤维，要求孔隙率在 18.2% 以下，最好在 17.6% 以下。

研制高性能碳纤维不仅要关注孔隙率，而且要研究孔的大小、孔的形状和孔的空间分布状态。显然，孔隙率越小，碳纤维性能越好。

碳纤维中的缺陷主要来自两方面：

(1) 原丝带来的缺陷。炭化过程中可能消失小部分，但大部分将保留下来，变成碳纤维的缺陷。

(2) 炭化过程带来的缺陷。炭化过程中，大量非 C 元素以气体形式逸出，使纤维表面及内部形成空穴和缺陷。

4. 碳纤维的结构特点 由于石墨材料的结构具有显著的各向异性，碳六角网平面内是强的共价键，层面之间是弱的范德瓦耳斯力，赋予其力学性能和热性能也具有各向异性。

(二) 碳纤维的性能

1. 力学性能

(1) 拉伸曲线。应力应变曲线是一条直线，在断裂前是完全的弹性体，回复为 100%，因而碳纤维无蠕变，耐疲劳性好；碳纤维拉伸断裂伸长小（一般小于 2%），拉伸曲线是直线，断裂功较小，其耐冲击性较差，容易损伤。其单丝拉伸曲线如图 1-3 所示。

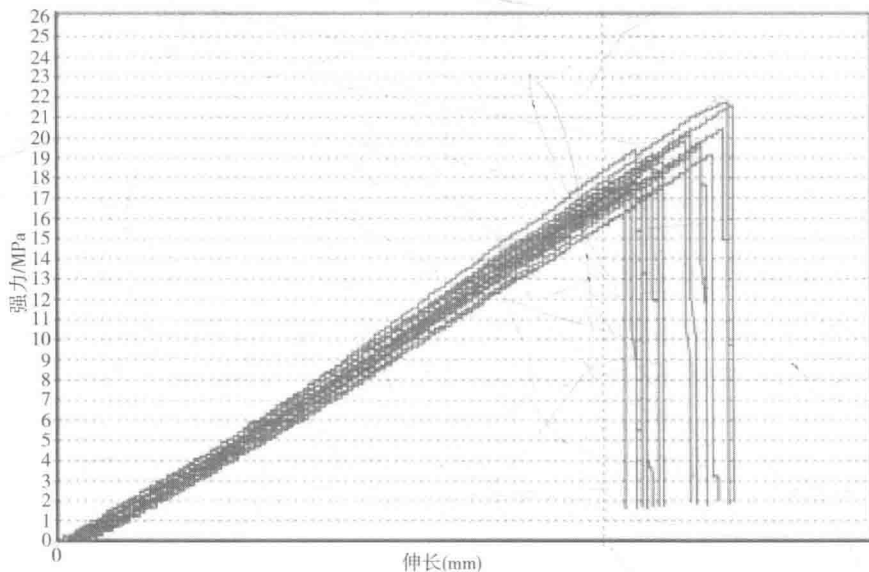


图 1-3 碳纤维单丝拉伸曲线

(2) 拉伸断裂强度和拉伸模量。碳纤维的拉伸强力与微晶的大小有关,与纤维中的缺陷有关,微晶直径大,裂纹的数目和大裂纹多,强力会减小。

碳纤维的模量与微晶的取向度有关,取向度越高,模量越大。

东丽已经商品化的 PAN-CF T1000,强度为 6.37GPa, PAN-CF T1100 强度为 6.6GPa,目前正研制强度高达 60GPa 的超高强度 PAN-CF T2000, T2000 的强度各相当于 T1000 和 T1100 的 9.5 倍和 9 倍。

据报道, PAN-CF 的理论强度为 180GPa, T2000 的强度仅为理论值的 1/3,因此还有很大的提升空间,关键是能否找到实用化的工艺技术解决方案。

通用级碳纤维和高性能碳纤维的性能比较见表 1-1,而主要型号碳纤维的性能见表 1-2。

表 1-1 通用级碳纤维和高性能碳纤维的性能

项目	普通型	高强型		高强中模量型			高强高模量型 (MJ 系列)				
	T300	T800	T1000	M40	M46	M50	M40J	M46J	M50J	M60J	M65J
拉伸强度 (MPa)	3530	5590	7060	2740	2550	2450	4410	4210	3920	3920	3600
拉伸模量 (GPa)	230	294	294	392	451	490	377	436	475	588	640
断裂伸长率 (%)	1.5	1.9	2.4	0.6	0.6	0.5	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6
密度 (g/cm^3)	1.76	1.81	1.82	1.81	1.88	1.91	1.77	1.84	1.88	1.94	1.98

表 1-2 主要型号碳纤维的性能

公司产品型号	密度 (g/cm^3)	拉伸强度 (GPa)	拉伸模量 (GPa)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)
Avacarb99	1.74	1.90	262	11.0
T300	1.76	3.33	230	
T300J	1.78	4.21	230	
T300H	1.80	4.41	250	
T700S	1.80	1.90	230	
T800H	1.81	5.49	294	
T1000G	1.80	6.37	294	
M35J	1.75	4.70	343	
M40J	1.77	4.41	377	
M46J	1.84	4.21	436	
M50J	1.88	4.12	175	
M55J	1.91	4.02	540	
M60J	1.94	3.92	588	
M30	1.70	3.92	294	
M30S	1.73	5.49	294	
M30G	1.73	5.10	294	
M40	1.81	2.74	392	
PANEX33	1.78	3.60	228	14.0

2. 物理性能

(1) 耐热性。在不接触空气或氧化性气氛时，碳纤维具有突出的耐热性，在高于 1500℃ 下强度才开始下降。

(2) 热膨胀系数。碳石墨材料结构各向异性十分显著，碳六角网平面内是强共价键，原子的热振动小，热膨胀系数也小，为负值，约为 $1.2 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ ；层间是范德瓦耳斯力，热胀大，热膨胀系数也大，高达 $28 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 两者相差甚远。

(3) 热导率。金属热传导以电子为主，石墨非金属材料以声子进行热传导为主。石墨的结构具有显著的各向异性，使其热导率也呈现出各向异性。密度越低，孔隙率越高，热导率越低。其原因是孔隙对声子产生散射，使热阻增大，热导率下降。石墨的理论密度为 2.266g/cm^3 ，因为存在孔隙率，实际石墨材料的密度要低于此值。表 1-3 为石墨与金刚石的基本物理性能，图 1-4 为石墨的密度与热导率的关系，图 1-5 为碳纤维的热导率与电阻率的关系。

表 1-3 石墨和金刚石的密度及热电性能

项目	石墨	金刚石
密度 (g/cm^3)	2.3	3.5
线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)	0.4×10^{-5}	0.12×10^{-5}
比热容 [$\text{cal}/(^\circ\text{C} \cdot \text{g})$]	0.17	0.12
热导率 [$\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$]	0.038	0.33
电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10^{-3}	10
硬度	1~2	

注 石墨密度应为 2.266g/cm^3 ，金刚石在空气中 700°C 以上燃烧， $1 \text{cal} = 4.184 \text{J}$ 。

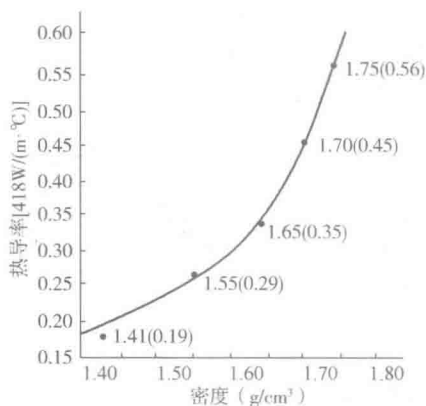


图 1-4 石墨材料密度与热导率的关系

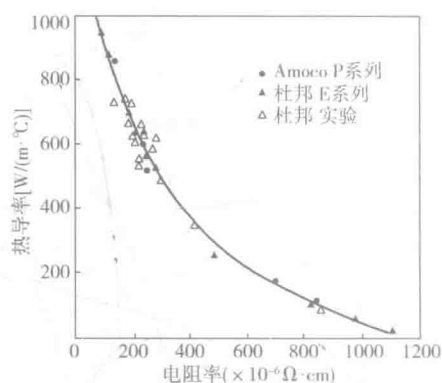


图 1-5 碳纤维的热导率与电阻率的关系 (300K)

从图 1-5 中可知，热导率随电阻率的下降而增大，呈现出反比关系。这也就是说，石墨层面越发达，取向度越高，是热导率高和电阻率小的原因所在。

(4) 密度。 ρ 在 $1.5 \sim 2.0 \text{g/cm}^3$ 之间，密度与原丝结构、炭化温度有关。

(5) 电阻率。碳纤维是电的良导体，它的导电性能虽然没有传统的金属导体银、铜、铝好，但作为非金属导体备受人们的青睐。金属导电主要靠电子，碳石墨材料主要靠非定域 π 电子，即大 π 键的非定域电子。

碳纤维的石墨化程度高，电阻率低，碳纤维制造时处理温度越高电阻率越低。T1000G 碳纤维的电阻率为 $1.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3. 化学性能、碳纤维的化学性质与碳相似，它除能被强氧化剂氧化外，对一般碱性是惰性的。在空气中温度高于 400°C 时则出现明显的氧化，生成 CO 与 CO_2 。碳纤维对一般的有机溶剂、酸、碱都具有良好的耐腐蚀性，不溶不胀，耐蚀性出类拔萃，完全不存在生锈的问题。当碳纤维复合材料与铝合金组合应用时会发生金属炭化、渗炭及电化学腐蚀现象。因此，碳纤维在使用前须进行表面处理。

三、碳纤维织物及其碳纤维复合材料

(一) 碳纤维织物

碳纤维经各种织造工艺和设备生产出二维、三维以及多维的中间预成型体，用来制造不同类型和用途的复合材料。纺织织造工艺主要有机织、编织、非织造、针织和缝织。

最常用的机织物是平纹布和斜纹布。编织织物是用二维或三维编织机编织出的中间预成型体。这些编织物可以是绳、带、管以及各种异形织物。针织物按其生产工艺可分为经编针织物和纬编针织物两种类型。无论是经编或纬编针织物，可在经向或纬向织入增强衬纱，并与针织纱捆绑在一起，使织物形成一个整体结构。多轴向缝编针织物将纱线或纤维束按设计要求沿不同方向铺层，铺好的多层纤维在通过捆绑区时被捆绑纱线绑在一起，成为一个整体的缝编针织物。

这种整体缝编针织物的优点是纱线强度的利用率高，结构稳定，成型体的层间不易剥离分层，使用寿命长。图 1-6 ~ 图 1-9 为几种结构的碳纤维织物。

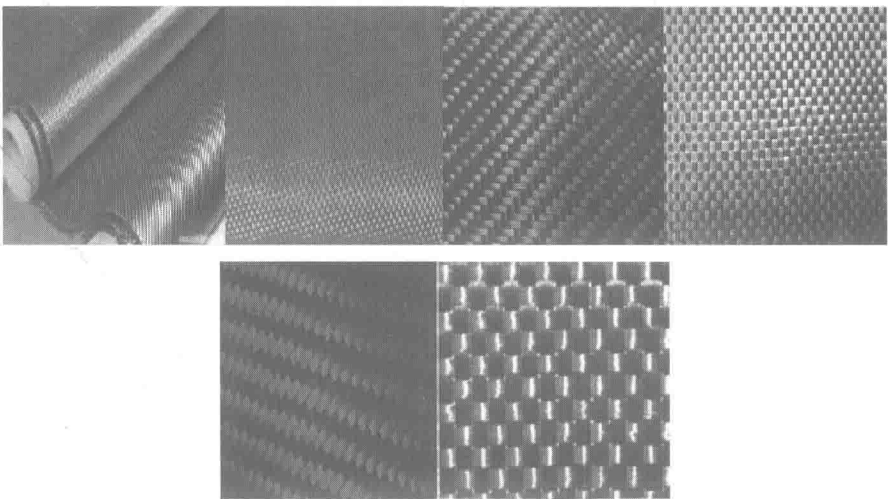


图 1-6 碳纤维机织物

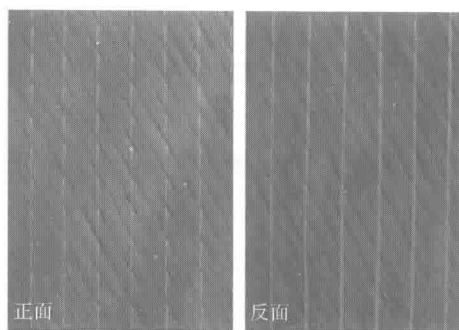


图 1-7 碳纤维双轴向经编织物

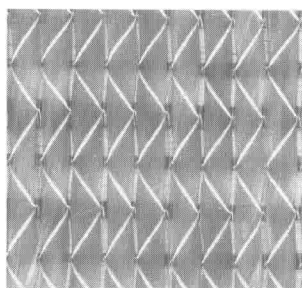


图 1-8 碳纤维正交经编织物

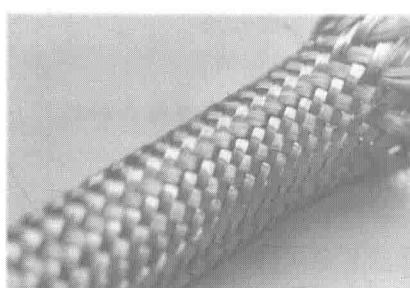


图 1-9 碳纤维管状编织物

(二) 碳纤维复合材料

1. 碳纤维增强树脂基复合材料

(1) 热固性树脂基体碳纤维增强复合材料。作为高性能纤维增强复合材料，所用基体树脂主要有环氧树脂和不饱和聚酯树脂，热固性树脂只能一次加热和成型，在加工过程中发生固化，形成不熔和不溶解的网状交联型高分子化合物，因此不能再生。

(2) 热塑性树脂基体碳纤维增强复合材料。热塑性复合材料 (FRT) 具有密度低 ($1.1 \sim 1.6 \text{g/cm}^3$)、强度高、抗冲击好、抗疲劳性好、可回收、加工成型快、造价低等突出特点，属于高性能、低成本、绿色环保的新型复合材料。已部分替代价格昂贵的工程塑料、热固性复合材料 (FRP) 以及轻质金属材料 (铝镁合金)，在飞机、汽车、火车、医疗、体育等方面有广阔应用前景。

因而近年来高性能热塑性复合材料 (HPTPC) 得到长足发展，进入实用阶段。

市场上已有系列产品销售。所用热塑性树脂主要有聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺、ABS、聚碳酸酯、聚醚酰亚胺、聚砜、聚醚酮、聚醚醚酮和热塑性聚酰亚胺等。在碳纤维增强热塑性粒料 (CFRTP) 中，碳纤维占 $10\% \sim 30\%$ (质量分数) 为宜。碳纤维含量越高，制品性能越好；但含量太高，加工和成型的困难也大。例如，东丽公司用碳纤维增强尼龙 66 的粒料，碳纤维含量分别为 10% 、 20% 和 30% 三类产品。

2. 碳/碳复合材料 碳纤维增强碳基复合材料 (carbon fiber reinforced carbon matrix composites) 简称碳/碳复合材料 (carbon/carbon composite, C/C 复合材料)。C/C 复合材料可