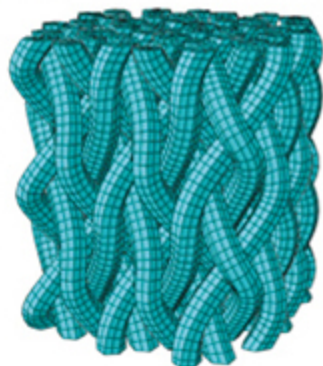


高新纺织材料研究与应用丛书



先进纺织 复合材料

XIANJIN FANGZHI
FUHE CAILIAO

高晓平 著



中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

高新纺织材料研究与应用丛书

先进纺织复合材料

高晓平 著

 中国纺织出版社有限公司

内 容 提 要

本书简要介绍复合材料定义、分类、特性和应用领域,阐述常用高性能纤维(如玻璃纤维、碳纤维、芳纶等)的物理、化学和力学性能及主要应用领域。以纺织结构复合材料为研究对象,系统阐述增强体特别是三维结构增强体制备技术、树脂基复合材料成型工艺及其对力学性能的影响、复合材料界面改性技术。研究纺织复合材料的强度特性及纺织结构和增强体纤维束取向排列对复合材料力学性能影响机理,分析复合材料力学性能的温度效应。同时,基于有限元数值模拟,研究纺织复合材料细观尺度拉伸性能。

本书旨在为复合材料的研究及应用提供理论指导和技术支持。内容有助读者深入了解复合材料发展概况,熟练掌握树脂基复合材料成型及固化工艺,熟悉复合材料试样制备及测试、分析,特别是不同增强体结构强度特性比较,掌握纺织复合材料力学性能有限元建模及分析。

本书可供从事复合材料研究的科研人员和企业工程技术人员、相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进纺织复合材料 / 高晓平著. -- 北京: 中国纺织出版社有限公司, 2020.10
(高新纺织材料研究与应用丛书)
ISBN 978-7-5180-7685-7

I. ①先… II. ①高… III. ①纺织纤维—复合材料—研究 IV. ①TS102.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第133262号

责任编辑: 符 芬 责任校对: 楼旭红 责任印制: 何 建

中国纺织出版社有限公司出版发行
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
中国纺织出版社天猫旗舰店
官方微博 http: //weibo.com/2119887771
北京通天印刷有限责任公司印刷 各地新华书店经销
2020年10月第1版第1次印刷
开本: 710×1000 1/16 印张: 13
字数: 204千字 定价: 128.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

前言

复合材料的历史可以追溯到古代，最早的汉长城就是利用稻草或麦秸增强黏土复合而成，随着人类科技的发展，复合材料的种类与功能也日益繁多。复合材料被认为是除金属材料、无机非金属材料和高分子材料之外的第四大类材料，它是金属材料、无机非金属材料和高分子材料等单一材料发展和应用的必然结果。20 世纪 40 年代，航空工艺的蓬勃发展，催生出了玻璃纤维增强复合材料，其后以碳纤维、石墨纤维和硼纤维等高模量纤维为增强体的复合材料登上舞台，纺织复合材料的发展迎来新的篇章。

纺织复合材料是通过纺织的方法将纤维束按照一定的交织规律，如机织、针织、编织和缝编等方法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，也称为纺织预成型件，再与基体结合形成的复合材料，是现代纺织材料技术和复合材料技术的集成与创新，也称作先进或高级复合材料。根据不同的纺织加工方法，纺织预成型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明显的差异。纺织复合材料具有显著的抵抗应力集中、冲击损伤和裂纹扩展的能力，而且还能实现复合材料结构件的近净成型加工。近年来，纺织复合材料受到航空、航天、国防等领域的重视，成为国家防御、航空航天、能源环境、交通运输等领域的重要基础材料。

本专著研究内容得到了国家自然科学基金（11462016/51765051）资助。本书共分为 7 个章节：第 1 章系统概述复合材料定义、分类及特性，高性能纤维及环氧树脂；第 2 章主要介绍二维、三维纺织复合材料预制件织造技术；第 3 章主要阐述几种树脂基复合材料成型工艺；第 4 章主要介绍几种复合材料界面改性机理；第 5 章详细阐述多轴向经编和三维机织两种立体织物制备的复合材料的准静态力学性能、疲劳特性；第 6 章分析温度对复合材料力学性能的影响规律；第 7 章是基于细观尺度建立双轴向经编和三维机织复合材料有限元模型，数值模拟其拉伸特性。本书旨在为复合材料的研究及应用提供理论指导和技术支持，促进复合材料的广泛应用。本书可为从事复合材料技术研究的科研人员和企业工程技术人员提供参考。

本专著内容是作者基于近年来研究及所指导研究生李丹曦、王欣欣、马亚运、陶楠楠、杨晓日、王聪等所取得的实验成果所撰写。在著作的撰写、资料

整理过程中，得到了陶楠楠、杨晓日、王聪及刘策等学生的协助，并参考了一些专家的著作、文献等内容，在此一并致以谢意！

学无止境，书中有不妥之处恳请读者和专家批评指正。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of the characters '高' (Gao) and '晖' (Hui) written in a cursive, flowing style.

2020 年 5 月

目 录

1	复合材料概述	001
1.1	复合材料的定义、分类及特性	001
1.1.1	复合材料的定义	001
1.1.2	复合材料的分类	001
1.1.3	复合材料的特性	002
1.2	增强材料	005
1.2.1	增强材料分类	005
1.2.2	增强材料的性能	006
1.2.3	玻璃纤维	007
1.2.4	碳纤维	009
1.2.5	高强高模聚乙烯纤维	010
1.2.6	芳纶	012
1.3	树脂基体	014
1.3.1	基体概述	014
1.3.2	基体的种类	014
1.3.3	基体的作用	015
2	纺织复合材料预制品成型	016
2.1	纺织复合材料	016
2.1.1	概述	016
2.1.2	复合材料的结构	016
2.1.3	复合材料的性能	017
2.1.4	纺织结构预成型件	017
2.2	二维纺织预成型件制备技术	017
2.2.1	机织技术	017
2.2.2	编织技术	019
2.2.3	针织技术	021
2.3	三维纺织预成型件制备技术	023

2.3.1	机织技术	023
2.3.2	编织技术	026
2.3.3	针织技术	032
2.3.4	缝编技术	036
3	树脂基复合材料成型工艺	039
3.1	手糊成型工艺	039
3.1.1	概述	039
3.1.2	特点	039
3.1.3	原材料的选择	039
3.1.4	手糊成型工艺过程	041
3.2	喷射成型工艺	043
3.2.1	概述	043
3.2.2	喷射成型工艺控制	044
3.2.3	喷射成型设备	044
3.3	模压成型工艺	044
3.3.1	概述	044
3.3.2	特点	045
3.3.3	模压成型工艺分类	045
3.3.4	模压料	046
3.3.5	层压成型工艺	048
3.3.6	SMC 成型工艺	048
3.4	缠绕成型工艺	049
3.4.1	概述	049
3.4.2	分类	050
3.4.3	特点	050
3.4.4	原材料	050
3.4.5	应用范围及发展	050
3.5	拉挤成型工艺	051
3.5.1	概述	051
3.5.2	特点	052
3.5.3	原材料	052
3.5.4	主要应用领域	052
3.6	液体模塑成型工艺	053
3.6.1	树脂传递模塑	053

3.6.2	真空辅助树脂传递模塑	055
3.6.3	树脂膜渗透工艺	057
3.6.4	西曼树脂浸渍模塑	059
4	复合材料界面改性	061
4.1	改性前处理	061
4.1.1	热处理	062
4.1.2	溶剂浸泡处理	062
4.1.3	酸碱刻蚀处理	063
4.2	等离子体改性织物	063
4.2.1	等离子体处理	063
4.2.2	改性效果分析	064
4.3	硅烷偶联剂改性对复合材料力学性能的影响	065
4.3.1	硅烷偶联剂水溶液处理	066
4.3.2	最优化硅烷偶联剂质量分数确定	067
4.3.3	弯曲性能分析	070
4.3.4	改性效果分析	074
4.4	纳米粒子改性对复合材料力学性能的影响	080
4.4.1	纳米黏土改性环氧树脂	080
4.4.2	改性效果分析	081
4.4.3	拉伸性能测试	086
4.4.4	弯曲性能测试	092
4.4.5	压缩性能测试	097
5	纺织复合材料动态力学性能	104
5.1	多轴向经编复合材料拉—拉疲劳性能	104
5.1.1	试样制备及实验测试	104
5.1.2	拉—拉疲劳性能分析	105
5.1.3	拉—拉疲劳剩余强度测试	111
5.2	三维正交机织物弯曲疲劳性能	113
5.2.1	试样制备及实验测试	113
5.2.2	弯曲疲劳性能分析	114
5.2.3	弯曲疲劳剩余强度测试	117

6	复合材料力学性能的温度效应	121
6.1	材料准备及试样制备	121
6.1.1	材料准备	121
6.1.2	试样制备	122
6.2	拉伸性能	122
6.2.1	实验方法	122
6.2.2	应力—应变曲线	123
6.2.3	拉伸性能对比	124
6.2.4	非线性拟合曲线	126
6.2.5	失效形态分析	127
6.3	弯曲性能	129
6.3.1	实验方法	129
6.3.2	应力—应变曲线	129
6.3.3	弯曲性能对比	131
6.3.4	非线性拟合曲线	132
6.3.5	失效形态分析	133
6.4	压缩性能	135
6.4.1	实验方法	135
6.4.2	应力—应变曲线	136
6.4.3	压缩性能对比	137
6.4.4	非线性拟合曲线	139
6.4.5	失效形态分析	140
7	纺织复合材料有限元模拟	143
7.1	双轴向经编复合材料拉伸性能有限元模拟	143
7.1.1	双轴向经编复合材料细观模型简化	143
7.1.2	FE 模型建立	143
7.1.3	单向复合材料弹性参数的确定	143
7.1.4	材料参数	147
7.1.5	有限元模拟过程	148
7.1.6	求解及数据后处理	152
7.2	四轴向经编复合材料拉伸性能温度效应有限元模拟	157
7.2.1	建立几何模型	157
7.2.2	拉伸性能模拟	159
7.2.3	拉伸模拟分析	162

7.2.4	四轴向经编复合材料宏观拉伸试样模拟	164
7.2.5	结果分析	165
7.3	三维正交机织复合材料拉伸性能有限元模拟	167
7.3.1	软件分析平台	168
7.3.2	构建几何模型	168
7.3.3	材料属性模型	171
7.3.4	材料损伤准则	172
7.3.5	拉伸性能模拟	173
7.3.6	拉伸模拟分析	174
参考文献		179

1 复合材料概述

1.1 复合材料的定义、分类及特性

1.1.1 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。不仅保持原组分的部分优点，而且获得原组分所不具备的新性能。通过对原材料的选择、各组分分布的设计和工艺条件的保证等，使原组分材料的优点互相补充，同时，利用复合材料的复合效应使之具备新的性能，最大限度地发挥优势。

纺织复合材料是纤维增强复合材料的一种高级形式，是以纺织材料（纤维、纱线、织物）作为增强体与基体结合形成的复合材料，是现代纺织材料技术与复合材料技术的集成与创新，称作先进或高级复合材料。

纺织复合材料预制件是通过纺织的方法，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。根据不同的纺织加工方法，可分为机织、针织、编织和缝编等。纺织预成型件中的纤维取向和交织方式具有完全不同的特征，性能存在明显的差异。

1.1.2 复合材料的分类

1. 按作用分类

复合材料按作用分为结构复合材料和功能复合材料。

（1）结构复合材料是制造工程结构可承受外载荷的复合材料。例如，承力梁、接头等。这里，基体相起黏结和传递应力的作用，而增强相起承受应力的作用。

（2）功能复合材料是具有各种独特的物理性质的复合材料。例如，换能特性、阻尼特性、摩擦特性、导磁特性、导电特性、耐高温特性、耐烧蚀特性等。

2. 按基体分类

复合材料按基体分为树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和水泥基复合材料（图 1-1）。

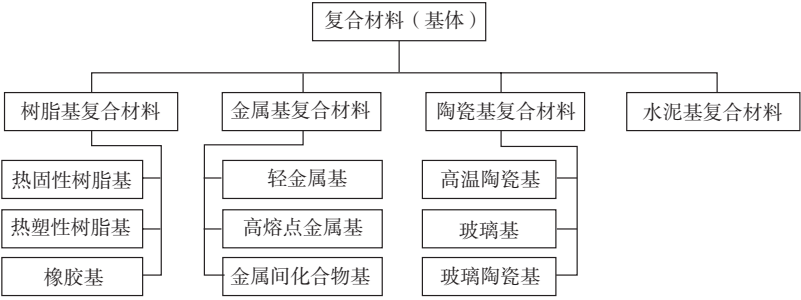


图1-1 复合材料按基体分类

3. 按增强体分类

如图 1-2 所示，复合材料按增强体分为颗粒、晶须、纤维（短纤维、长纤维）、织物（又可分为二维织物、三维织物）类复合材料。

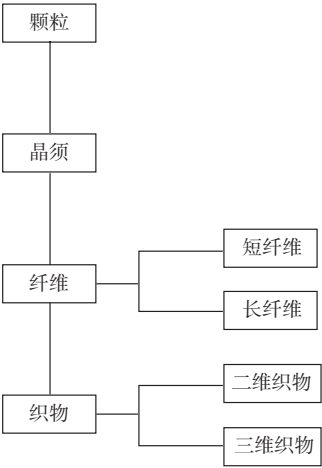


图1-2 复合材料按增强体分类

二维织物：织物的厚度不超过纱线直径的 3 倍，包括机织物、针织物、编织物等。

三维织物：用于结构复合材料的三维织物是一个完全整体的连续纤维组合体。在这个组合体中，纤维沿多个方向取向，包括在平面内取向和穿过平面取向。

1.1.3 复合材料的特性

复合材料是由多种组分组成，许多性能优于单一组分材料。例如，纤维

增强的树脂基复合材料，具有质量轻、强度高、可设计性好、耐化学腐蚀、介电性能好、耐烧蚀及容易成型加工等优点。设两种材料的各自特征为 A 和 B ，由这两种材料组成的复合材料的特性为 x ，则：

$$x=f(A,B)$$

根据两种材料的优缺点，通过选择设计，可以获得性能优异的复合材料。

1.1.3.1 高比强度、高比模量

$$\text{比强度} = \text{拉伸强度 (MPa)} / \text{密度 (g/cm}^3\text{)}$$

在质量相等的前提下，比强度用于衡量材料承载能力。

$$\text{比模量} = \text{弹性模量 (GPa)} / \text{密度 (g/cm}^3\text{)}$$

在质量相等的前提下，比模量为刚度特性指标。一般比强度越大，原料自重就越小；比模量越大，零件的刚性就越大。据估计，与高强度钢相比，用复合材料制成具有相同强度的零件时，其重量可减轻 70% 左右，这对于需要减轻材料重量的构件具有重要意义。

表 1-1 所示为一些常用材料及纤维复合材料的比强度和比模量。

表 1-1 一些常用材料及纤维复合材料的比强度、比模量

材料	密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拉伸强度 / GPa	弹性模量 / GPa	比强度 / ($\times 10^6 \text{cm}$)	比模量 / ($\times 10^6 \text{cm}$)
钢	7.8	1.03	2.1	1.3	2.7
铝合金	2.8	0.47	0.75	1.7	2.6
钛合金	4.5	0.96	1.14	2.1	2.5
玻璃纤维复合材料	2.0	1.06	0.4	5.3	2.0
碳纤维 II / 环氧树脂材料	1.45	1.50	1.4	10.3	9.7
碳纤维 I / 环氧树脂材料	1.6	1.07	2.4	6.7	15
有机纤维 / 环氧树脂材料	1.4	1.40	0.8	1.0	5.7
硼纤维 / 环氧树脂材料	2.1	1.38	2.1	6.6	10
硼纤维 / 铝基复合材料	2.65	1.0	2.0	3.8	7.5

由表 1-1 可知，复合材料的高比强度和高比模量取决于增强纤维的高性能和低密度。碳纤维树脂基复合材料具有较高的比模量和比强度。在强度和刚度相同的情况下，结构质量可以减轻，或尺寸减小。这在节省能源、提高构件的使用性能方面是现有其他材料所不能比拟的。

高性能纤维是指对外部的作用不易产生反应，并具有高弹性模量、高强度、耐热、耐摩擦、耐化学药品、适应性强的纤维。其密度小，强度和模量高，对复合材料性能有重要影响。

1.1.3.2 抗疲劳性能好

疲劳是指零件或结构件在应力大小或应力方向交替（循环）变化下，经一段时间工作后，产生突然断裂的现象。

一般金属材料的疲劳破坏是无明显预兆的突发性破坏，而纤维复合材料具有良好的抗疲劳性。增强纤维的缺陷少，抗疲劳性好，基体的塑性好，能减小或消除应力集中区域的尺寸及数量，使源于基体、纤维缺陷处或界面上的疲劳难以萌生，抑制微裂纹的出现，即使形成微裂纹，基体（如聚合物基）的塑性形变也能使裂纹尖端钝化，减缓其扩展。

在裂纹的缓慢扩展过程中，基体的纵向拉压将引起其横向收缩，而在裂纹尖端的前缘造成基体与纤维分离，所以，经过一定应力循环后，裂纹由横向改为沿纤维与基体间的界面纵向扩展。

由于基体中分布着大量纤维，裂纹的扩展常常经历非常复杂和曲折的路径，其疲劳破坏从纤维的薄弱环节开始，逐步扩展到界面上，破坏前有明显的前兆，所以，纤维复合材料的疲劳强度比较高（表 1-2）。

表 1-2 不同材料在不同循环次数时的应力 单位：MPa

循环次数	碳纤维复合材料	玻璃钢	铝合金
3	1500	900	500
4	1400	700	300
5	1300	600	200
6	1200	500	150
7	900	450	120

1.1.3.3 良好的阻尼减振性能

复合材料具有良好的阻尼减振性，主要源于复合材料的高比模量，所以，它的自振频率很高，不容易因共振而出现快速脆断。另外，复合材料中的基体界面具有吸震能力，使材料的振动阻尼很高，一旦振起来，在较短的时间内也可以停下来。

鉴于复合材料具有特殊的振动阻尼特性，可减振和降低噪声、抗疲劳性能好，损伤后易修理，便于整体成型，故可用于制造汽车车身、受力构件、传动轴、发动机架及其内部构件。

共振会严重影响结构的安全，甚至会造成破坏。而共振是外载振动频率与结构自振频率相同时产生的现象。如果能提高结构的自振频率（固有频率），就能有效地防止共振。自振频率除了与结构形状和质量有关外，还与结构材料的比模量平方根成正比。由于纺织复合材料比模量高，故振动的衰减速度要比

钢快。

固有频率 f (Hz):

$$f = \frac{\omega_{dl}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \times 1.015 \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-1)$$

式中: h 为试件的厚度; l 为试件的长度; E 为试件的模量; ρ 为试件的密度。

1.1.3.4 良好的耐高温性能

由于增强纤维(除玻璃纤维以外)的熔点(或软化点)都比较高,因此,由它们构成的复合材料在高温下的强度和模量都有所提高。例如:铝合金的温度从室温升到 400 ℃ 时,强度从 500 MPa 下降到 30 ~ 50 MPa,弹性模量接近于零,但经过碳纤维或硼纤维增强后,在 400 ℃ 时,强度和模量则可以保持室温水平;航天飞机头锥温度可达 2760 ℃,机翼前缘温度可达 1930 ℃,无法采用金属材料结构,但碳/碳复合材料、陶瓷复合材料在航空、航天领域的耐高温方面却有着很重要的应用。

1.1.3.5 优良的透电磁波特性

透电磁波性能是指电磁波的透过率要高,同时,波的畸变度要小。此特性和承力特性相结合,可使复合材料用于制备机载雷达天线罩和信标机天线罩,同时,又是一部分机体结构的通用材料。这种物理特性也可用于隐形飞机和巡航导弹的结构。

1.1.3.6 可设计性强

通过改变纤维、基体的种类及相对含量、纤维集合形式及排列方式、铺层结构等可以满足对复合材料结构与性能的各种设计要求。复合材料制品的制造始于整体成型,一般不需焊、铆、切割等二次加工,工艺过程比较简单。

除此之外,某些特定的纤维复合材料还具有其他特点,如电绝缘性好、耐摩擦、耐腐蚀、抗冲击、耐高低温以及特殊的光、电、磁性能等。由于上述种种优越性,复合材料的应用范围将越来越广,用量将越来越多。

1.2 增强材料

增强材料是复合材料中能提高基体力学性能的组分,是主要承力组分,是复合材料的重要组成部分。增强材料可分为纤维、晶须和颗粒。

1.2.1 增强材料分类

1.2.1.1 纤维

纤维不仅能使材料显示出较高的抗张强度和刚度,而且能减小收缩,提高

热变形温度和低温冲击强度等。复合材料的性能在很大程度上取决于纤维的性能、含量及使用状态。

高性能增强纤维有玻璃纤维、碳纤维、高强高模聚乙烯纤维、芳纶、玄武岩纤维、纳米纤维。可分为有机纤维和无机纤维。

有机纤维：芳纶、聚乙烯纤维和聚酰胺纤维等。

无机纤维：玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、氧化铝纤维、碳化硅纤维、氮化硼纤维及其他纤维。

1.2.1.2 晶须

晶须是在人工控制条件下，以单晶形式生长成的一种纤维。晶须的直径一般为几微米，长几十微米。由于晶须的直径非常小，所以，没有在大晶体中常出现的缺陷，因而强度接近于完整晶体的理论值。近年来，晶须作为一种新型增强材料而倍受青睐。晶须没有显著的疲劳效应，切断、磨粉或其他的施工操作都不会降低其强度。晶须在复合材料中的增强效果与其品种、用量关系极大。

晶须一般都是一维线形针状体，主要用作复合材料增强体，生产成本很高，不易推广使用。晶须复合材料由于其价格昂贵，目前主要用在空间和尖端技术上，在民用方面主要用于合成牙齿、骨骼及直升机的旋翼等。

1.2.1.3 颗粒

用以改善复合材料力学性能，提高断裂性、耐磨性和硬度，增进耐腐蚀性的颗粒状材料，称为颗粒增强体。

颗粒增强体的特点：选材方便，可根据不同的性能要求选用不同的颗粒增强体；颗粒增强体成本低，易于批量生产。

颗粒增强体的平均尺寸为 $3.5 \sim 10 \mu\text{m}$ ，最细的为纳米级（ $1 \sim 100 \text{ nm}$ ），最粗的颗粒粒径大于 $30 \mu\text{m}$ 。目前使用的颗粒增强体有碳化硅、氧化铝、氮化硅、碳化钛、石墨、碳酸钙等。

在复合材料中，颗粒增强体的体积含量通常为 $15\% \sim 20\%$ ，特殊的也可达 $5\% \sim 75\%$ 。

常见增强材料性能见表 1-3。

对于不同种类的增强材料，其价格、性能大不相同，因此，在选择增强材料时，要从最终应用角度充分考虑，从而选择合适的增强材料。

1.2.2 增强材料的性能

（1）能明显提高基体某种所需特性的性能。如高的比强度、比模量、高热导率、耐热性、耐磨性、低热膨胀等赋予树脂基体某种所需的特性和综合性能。

表 1-3 常见增强材料性能

纤维 / 材料	直径 / μm	密度 / (g · cm ³)	拉伸强度 / MPa	拉伸模 量 /GPa	比强度 (σ/ρ)	比模量 (E/ρ)	CTE/ (×10 ⁻⁴ K ⁻¹)	熔点 / ℃	断裂伸 长率 /%
E- 玻璃纤维	7	2.54	3.45	70	1.35	27	约 8.5	540+	4.8
S- 玻璃纤维	15	2.50	4.50	86	1.8	34.5	0.31	540+	5.7
碳纤维, HM	7.5	1.9	1.8	400	0.9	200	3.2 ~ 12.1	>3500	1.5
碳纤维, HS	7.5	1.7	2.6	240	1.5	140	—	>3500	0.8
硼纤维	130	2.6	3.5	400	1.3	155	—	2300	—
Kevlar-29	12	1.44	2.8	60	1.9	41.7	—	500 (D)	3.5
Kevlar-49	12	1.45	2.8	134	1.9	92.4	—	500 (D)	2.5
铜	—	7.8	0.34 ~ 2.1	208	0.04 ~ 0.27	27	—	1480	5 ~ 25
铝合金	—	2.7	0.14 ~ 0.62	69	0.05 ~ 0.23	26	—	600	8 ~ 16

(2) 良好的化学稳定性。在复合材料制备和使用过程中, 结构和性能不发生明显的变化和退化, 与基体有良好的化学相容性, 不发生严重的界面反应。

(3) 与基体有良好的润湿性。通过表面处理, 能与基体达成良好的润湿, 以保证增强体与基体良好的复合, 并且分布均匀。

1.2.3 玻璃纤维

玻璃纤维 (GF) 是以玻璃为原料, 在高温熔融状态下拉丝而成, 其直径在 0.5 ~ 30 μm。玻璃纤维是复合材料目前使用量最大的一种增强材料。玻璃纤维具有不燃、耐热、电绝缘、拉伸强度高、化学稳定性好等优良性能。至今, 以不饱和聚酯为基体、以玻璃纤维增强的复合材料 (玻璃钢) 已遍及世界各地, 应用范围几乎涉及所有的工业部门。

1.2.3.1 玻璃纤维分类

(1) 按不同的含碱量分类。

① 无碱玻璃纤维 (E- 玻璃纤维): 指化学成分中碱金属氧化物含量 < 1% (国内 < 0.5%) 的铝硼硅酸盐玻璃纤维。具有优异的电绝缘性、耐热性、耐候性和力学性能。

② 中碱玻璃纤维 (C- 玻璃纤维): 指化学成分中碱金属氧化物含量为 2% ~ 6% 的钠钙硅酸盐玻璃纤维。其特点是: 耐酸性好, 但绝缘性差, 强度和模量低, 机械强度约为无碱玻璃纤维的 75%。由于其原料丰富, 所以, 成本比无碱玻璃纤维低, 可用于耐酸而又对电性能要求不高的复合材料。广泛用于玻璃钢的增强以及过滤织物、包扎织物等。