



“十三五”普通高等教育本科部委级规划教材
化纤专业开放教育系列教材



中国化学纤维工业协会·恒逸基金



中国化学纤维工业协会·绿宇基金

高性能化学纤维 生产及应用



GAOXINGNENG HUAXUE XIANWEI
SHENGCHAN JI YINGYONG

张清华 主 编
张国良 朱 波 赵 昕 副 主 编
徐 坚 殷敬华 主 审
中国化学纤维工业协会 组织编写

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
化纤专业开放教育系列教材

高性能化学纤维 生产及应用

张清华 主编

张国良 朱波 赵昕 副主编

徐坚 殷敬华 主审

中国化学纤维工业协会 组织编写

 中国纺织出版社

内 容 提 要

本书主要包括高性能纤维概述、碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维、聚对亚苯基苯并二噁唑纤维、聚酰亚胺纤维、聚四氟乙烯纤维、聚苯硫醚纤维、聚醚醚酮纤维、碳化硅纤维、连续玄武岩纤维、其他高性能纤维以及高性能纤维的分析与检测方法等内容。

本书为高分子材料科学与工程专业的基础教材，同时也可供纺织工程、轻化工程等专业的科研人员参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能化学纤维生产及应用/张清华主编. —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. 化纤专业开放教育系列教材

ISBN 978-7-5180-4928-8

I. ①高… II. ①张… III. ①纤维—高等学校—教材
IV. ①TQ34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 079349 号

策划编辑: 范雨昕
责任校对: 楼旭红

责任编辑: 范雨昕
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: 18

字数: 400 千字 定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

丛书编写委员会

顾 问：郁铭芳 蒋士成 孙晋良 姚 穆 俞建勇

主 编：端小平

副主编：赵 强 邱奕博

委 员（按姓氏笔画排序）：

万 蕾	马小民	尹翠玉	王玉萍	王华平
王 桦	王 锐	兰建武	叶光斗	叶新建
任 杰	刘向阳	吕佳滨	孙玉山	朱 波
朱美芳	许贤文	吴文静	张冬霞	张红光
张国良	张定金	张凌清	张 朔	张清华
李乃强	李东宁	李增俊	李德利	杨占平
杨 涛	汪丽霞	肖长发	陈文兴	陈 龙
林世东	姚菊明	赵庆章	赵 昕	郝新敏
夏延致	徐 坚	徐樑华	殷敬华	钱 军
顾书英	黄玉东	黄 庆	程博闻	靳高岭
戴泽新	臧慧卿			

序

党的十九大报告指出“中国特色社会主义进入了新时代，我国经济发展也进入了新时代”，我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段。高质量发展根本在于经济活力、创新力和竞争力的持续提升，这都离不开高质量人才的培养。

近年来，化纤科技进步快速发展，高性能化学纤维研发、生产及应用技术均取得重大突破，生物基化学纤维及原料核心生产技术取得新进展，再生循环体系建设成效显著，化纤产品高品质和差异化研发创新成果不断涌现，随着化纤行业的科技进步，专业知识爆炸性的增长亟须相应人才的培养以及配套的化纤教材和图书作支撑，专业人才和专业知识是保证行业科技持续发展的源泉。为此，中国化学纤维工业协会携手“恒逸基金”和“绿宇基金”与中国纺织出版社共同谋划组织编写出版“化纤专业开放教育系列教材”，为促进化纤行业技术进步，加快转型升级，实施行业高质量发展和提高人才培养质量等提供智力支持。

该系列教材力求贴近实际，突出体现化纤领域的新技术、新工艺、新装备、新产品、新材料及其应用。这是一套开放式丛书，前期先从《高性能化学纤维生产及应用》《生物基化学纤维生产及应用》《循环再利用化学纤维生产及应用》三本书开始编写，将根据化纤行业技术进步和图书市场的需要，适时增编其他类化学纤维生产技术及应用分册。

该系列教材由纺织化纤领域的专家、学者以及企业一线技术人员共同编写，详细介绍高性能化学纤维、生物基化学纤维、循环再利用化学纤维的原料、生产工艺、装备及其应用，内容翔实，与生产实践结合紧密，具有很强的行业权威性、专业性、指导性和可读性，是一套指导生产及应用拓展的实用教材。

在该系列教材的编写过程中，得到了行业内知名专家、学者和行业领导的指导和帮助，同时，得到业内龙头企业的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

中国化学纤维工业协会

2018年6月

前 言

近年来我国纤维产业得到了快速发展，通用纤维的加工量达到了全世界产量的60%以上，高性能纤维产量虽然较小，但其以优异的力学性能、环境稳定性及优良的服役行为，在国民经济发展和国防建设中发挥了重要作用，甚至成为不可或缺的战略新材料。随着国际及国内市场对高性能纤维需求的不断攀升，行业的市场更加广阔，因此我们需完善自主创新体系，增强企业综合竞争力，以下游的应用开发带动纤维制造技术的进步，从而大力推动高性能纤维发展，满足工业领域日益增长的市场需求，为此应中国化学工业协会和中国纺织出版社之约，组织编写了该书。

作为化纤专业开放教育系列教材，这本《高性能化学纤维生产及应用》从国家对高性能化学纤维持续发展的需求出发，介绍了多种重要的高性能化学纤维的发展、制备技术及发展趋势，选择了近年来发展迅速且备受广大科研工作者和工程技术人员广泛关注的重要研究领域，力求突出重要的学术意义和实用价值。该书的出版希望对纤维制造和应用开发等科技人员均有所裨益，更希望能够推动和促进我国高性能化学纤维的研究、开发及化纤工业的快速发展。

高性能纤维品种较多，各品种间有共性问题，也存在较大的科学与工程差异。为确保内容的准确性和前沿性，本书组织了多个团队，分别负责全书十三章的编写工作。第一章高性能纤维概述由东华大学张清华主稿，第二章碳纤维由山东大学朱波和中复神鹰碳纤维有限责任公司刘宣东、张国良主稿，第三章芳香族聚酰胺纤维由四川大学刘向阳、罗龙波和王旭主稿，第四章超高分子量聚乙烯纤维由中国纺织科学研究院李方全和孙玉山主稿，第五章聚对亚苯基苯并二噁唑纤维由哈尔滨工业大学胡祯和黄玉东主稿，第六章聚酰亚胺纤维由东华大学董杰、张清华和江苏奥神新材料股份有限公司王士华主稿，第七章聚四氟乙烯纤维由浙江理工大学郭玉海和张华鹏主稿，第八章聚苯硫醚纤维由中国纺织科学研究院史贤宁、

黄庆和吴鹏飞主稿，第九章聚醚醚酮纤维由吉林大学栾加双和王贵宾主稿，第十章碳化硅纤维由南京航空航天大学马小民主稿，第十一章连续玄武岩纤维由东华大学汪庆卫、王宏志和浙江石金玄武岩纤维有限公司胡显奇主稿，第十二章其他高性能纤维由东华大学赵昕和张清华主稿，第十三章高性能纤维的分析与检测方法由中科院宁波材料所李德宏主稿。此外，还有不少研究生参与文献的调阅工作，在此一并表示诚挚的感谢。感谢徐坚和殷敬华老师对本教材的审稿。本书在编写过程中，得到了中国化学纤维工业协会、纤维材料改性国家重点实验室、中复神鹰碳纤维有限责任公司及其他相关企业等的大力支持和公众的关注，在此一并致谢。

限于时间紧、涉及内容多及主编水平所限，书中疏漏之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

张清华

2018年3月

目 录

第一章 高性能纤维概述	001
第一节 高性能纤维的定义、分类及基本特性	001
一、高性能纤维的定义	001
二、高性能纤维的分类	002
三、高性能纤维的物理机械性能	002
第二节 国内外研究发展史	004
一、高性能纤维的起源	004
二、有机高性能纤维的发展	004
三、无机高性能纤维的发展	007
第三节 国内外的产业状况	008
一、国外高性能纤维的生产状况	008
二、我国高性能纤维的产业状况	009
主要参考文献	010
第二章 碳纤维	012
第一节 引言	012
第二节 碳纤维原丝制备技术	016
一、PAN基碳纤维原丝	016
二、沥青基碳纤维原丝	026
三、黏胶基碳纤维原丝	027
第三节 原丝碳化技术	030
一、PAN基原丝的碳化	030
二、沥青基碳纤维原丝的碳化	040
三、黏胶基碳纤维原丝的碳化	040
第四节 碳纤维复合材料及其应用	041
一、碳纤维增强复合材料的种类	041
二、碳纤维复合材料应用领域	042
第五节 技术展望	046
一、技术发展趋势	046
二、市场前景	047
三、碳纤维发展核心制约因素及对策	048
主要参考文献	049

第三章 芳香族聚酰胺纤维	052
第一节 引言	052
第二节 对位芳纶	052
一、简介	052
二、聚合物的合成与对位芳纶的制备	054
三、对位芳纶的聚集态结构	056
四、对位芳纶的应用领域	058
五、对位芳纶应用研究进展	059
六、共聚芳纶	061
第三节 杂环芳纶	062
一、简介	062
二、聚合物的合成与杂环芳纶的制备	063
三、杂环芳纶的结构与性能	064
四、含氯的杂环芳纶	067
五、杂环芳纶的应用领域	068
六、杂环芳纶应用研究进展	069
第四节 间位芳纶	070
一、简介	070
二、聚合物的合成与间位芳纶的制备	071
三、间位芳纶的结构与性能	072
四、应用领域	073
五、主要生产厂家情况	073
六、PMIA 纤维的应用研究进展	074
第五节 芳纶表面改性及其复合材料性能	075
一、芳纶增强复合材料	075
二、芳纶表面改性常用方法	076
三、芳纶表面改性研究进展	078
第六节 芳纶纸及芳纶纸蜂窝材料	082
一、芳纶纸基本情况	082
二、芳纶纸的制备方法	082
三、芳纶纸的性能特点	084
四、芳纶纸的主要应用领域	084
五、芳纶纸的应用研究进展	084
六、芳纶纸蜂窝材料	085
主要参考文献	086
第四章 超高分子量聚乙烯纤维	090
第一节 引言	090

第二节	聚乙烯纤维的原料	091
一、	常规纤维用聚乙烯	091
二、	高强高模纤维用聚乙烯	092
第三节	超高分子量聚乙烯纤维的制备方法	094
一、	湿法技术	095
二、	干法技术	097
三、	熔融纺丝	099
第四节	超高分子量聚乙烯纤维的结构与性能	100
一、	聚集态结构	100
二、	物理性质	103
三、	化学特性	103
第五节	超高分子量聚乙烯纤维的应用	104
一、	防护装备	104
二、	缆绳	105
三、	医疗器材	105
四、	渔业养殖	106
五、	体育用品	106
六、	纺织服装	106
七、	增强材料	106
八、	雷达天线罩	107
第六节	超高分子量聚乙烯纤维的发展趋势	107
一、	存在的问题	107
二、	未来发展趋势	108
	主要参考文献	109
第五章	聚对亚苯基苯并二噁唑纤维	111
第一节	引言	111
第二节	PBO 的单体合成及其聚合工艺	113
一、	PBO 聚合单体的合成	113
二、	PBO 聚合工艺	117
第三节	PBO 纤维的纺丝工艺	120
一、	纺丝原液的组成	120
二、	纺丝压力	121
三、	纺丝温度	121
四、	空气隙长度	122
五、	凝固浴的组成与温度	122
第四节	PBO 纤维的增强改性技术	123
一、	碳纳米管对 PBO 纤维的增强改性	123

二、石墨烯对 PBO 聚合物的增强改性	130
三、PBO 纤维第三单体共聚改性技术	131
第五节 PBO 纤维的特性及应用	133
一、PBO 纤维的特性	133
二、PBO 纤维的应用领域	134
主要参考文献	135
第六章 聚酰亚胺纤维	138
第一节 引言	138
第二节 聚酰亚胺的合成	139
一、单体	139
二、两步法合成聚酰亚胺	140
三、一步法合成聚酰亚胺	142
第三节 聚酰亚胺纤维的制备方法	145
一、湿法(干湿法)纺丝	145
二、干法纺丝成形	150
三、其他纺丝方法	151
第四节 聚酰亚胺纤维的结构与性能	152
一、凝聚态结构	152
二、性能	154
第五节 聚酰亚胺纤维的产业化与应用	155
一、产业化发展状况	155
二、应用及其前景	156
主要参考文献	157
第七章 聚四氟乙烯纤维	161
第一节 概述	161
第二节 聚四氟乙烯树脂的种类	161
一、聚四氟乙烯悬浮树脂	162
二、聚四氟乙烯分散树脂	162
三、聚四氟乙烯分散液	163
第三节 聚四氟乙烯纤维的制备	163
一、膜裂法制备聚四氟乙烯纤维	164
二、乳液纺丝制备聚四氟乙烯纤维	165
三、糊料挤出法制备聚四氟乙烯纤维	166
四、三种加工技术的特点对比	167
第四节 聚四氟乙烯纤维的性能	168
一、聚四氟乙烯纤维的物理性能	168

二、聚四氟乙烯纤维的耐腐蚀性和耐候性	169
第五节 聚四氟乙烯纤维的应用领域	170
一、过滤材料	170
二、密封和润滑材料	171
三、建筑材料	172
四、医疗卫生材料	172
五、高性能绳索	172
六、其他应用	172
主要参考文献	173
第八章 聚苯硫醚纤维	175
第一节 引言	175
第二节 聚苯硫醚树脂	176
一、化学结构	176
二、流变行为	176
三、结晶性能	176
第三节 聚苯硫醚纤维的制备方法	177
一、聚苯硫醚长丝的制备	177
二、聚苯硫醚短纤维生产工艺	178
第四节 聚苯硫醚纤维的制备工艺与性能	179
一、纺丝工艺对初生纤维性能的影响	179
二、牵伸工艺对纤维性能的影响	180
三、热定型工艺对纤维性能的影响	181
四、聚苯硫醚纤维的性能	181
第五节 聚苯硫醚纤维的应用和发展	183
主要参考文献	183
第九章 聚醚醚酮纤维	185
第一节 引言	185
第二节 聚醚醚酮纤维的性质	186
一、物理性质	186
二、物理机械性能	186
三、化学稳定性	187
四、热稳定性	188
五、尺寸稳定性	188
第三节 聚醚醚酮纤维的制备方法	189
一、聚醚醚酮单丝及其制备方法	189
二、聚醚醚酮复丝及其制备方法	190

三、中空聚醚醚酮纤维及其制备方法	191
四、聚醚醚酮超细纤维及其制备方法	191
第四节 聚醚醚酮纤维的应用	194
一、传送带领域	194
二、过滤网布领域	195
三、高温滤材领域	196
四、医学领域	196
五、纤维混杂复合材料	196
六、其他领域	196
第五节 聚醚醚酮纤维的产业化与展望	197
主要参考文献	197
第十章 碳化硅纤维	199
第一节 引言	199
第二节 碳化硅材料的结构及性质	200
一、碳化硅的结晶形态和晶体结构	200
二、碳化硅的基本特性	201
第三节 碳化硅纤维的制备方法	203
一、化学气相沉积法	203
二、粉末烧结法	203
三、化学气相反应法	204
四、先驱体转化法	204
第四节 先驱体转化法连续 SiC 纤维的制备	205
一、SiC 先驱体的合成	206
二、先驱体纤维的纺丝成型	207
三、不熔化处理	208
四、SiC 纤维的制备	211
五、SiC 纤维的发展	213
第五节 连续 SiC 纤维的应用与展望	215
一、SiC 纤维的主要应用	215
二、碳化硅纤维的发展前景	221
主要参考文献	222
第十一章 连续玄武岩纤维	223
第一节 引言	223
第二节 玄武岩纤维制备工艺	224
一、原料	224
二、熔融工艺	225

三、拉丝工艺	225
四、纤维表面处理	226
第三节 玄武岩纤维的结构与性能	226
一、主要成分	226
二、主要性能	227
三、玄武岩纤维的产品形式	229
第四节 玄武岩纤维的应用	229
一、混凝土复合材料	229
二、聚合物基复合材料	230
三、金属基复合材料	230
四、编织用玄武岩纤维	231
五、其他	231
第五节 玄武岩纤维的发展	231
一、产业现状	231
二、主要难题	232
三、发展方向	232
主要参考文献	233
第十二章 其他高性能纤维	235
第一节 新型碳基纤维	235
一、碳纳米管纤维	235
二、石墨烯纤维	237
第二节 其他无机纤维	240
一、玻璃纤维	240
二、陶瓷纤维	242
第三节 芳杂环纤维	247
一、M5 纤维	247
二、聚苯并咪唑纤维	248
三、聚醚酰亚胺纤维	248
四、芳香族聚酯	249
第四节 生物质高性能纤维	250
一、蜘蛛丝及其仿生纤维	250
二、高性能纤维素纤维	250
主要参考文献	251
第十三章 高性能纤维的分析与检测方法	256
第一节 通用条件	256
一、实验室环境条件	256

二、数值修约与极限数值的表示和判定	256
三、取样方法	256
第二节 碳纤维分析检测方法	256
一、外观检测	256
二、上浆剂含量的测定	256
三、复丝线密度测试方法	257
四、密度测试方法	258
五、复丝拉伸性能的测试方法	259
六、直径和根数的检测	261
七、单丝的力学性能测定	262
八、单向纤维增强塑料层间剪切强度试验方法	264
九、碳含量的测定	264
十、热稳定性的测定	264
十一、体积电阻率的测定	265
十二、含水率和饱和吸水率试验方法	266
十三、碳纤维中硅、钾、钠、钙、镁和铁含量的测定	266
十四、灰分含量的测定	267
第三节 碳化硅纤维、玄武岩纤维等无机纤维分析检测	267
一、高温强度保留率测试方法	267
二、玄武岩纤维耐温性的测定	268
三、玄武岩纤维耐碱性的测定	268
第四节 高性能有机纤维的分析检测	268
一、高强化纤长丝拉伸性能试验方法	268
二、间位芳纶干热收缩率试验方法	269
三、芳纶 1414 纤维的测试方法	269
四、浸胶芳纶纱线、线绳和帘线拉伸性能的试验方法	269
五、芳纶复丝拉伸性能测试方法 (浸胶法)	269
六、超高分子量聚乙烯纤维	270
七、聚酰亚胺短纤维的测试	270
八、聚苯硫醚短纤维强力保留率试验方法	270
主要参考资料	270

第一章 高性能纤维概述

新材料技术、信息技术和生物技术被认为是 21 世纪三大支柱高新技术，也是当前全球高度关注的最为重要、发展最快的科技领域之一。高性能纤维是新材料的重要组成部分，是国民经济、国家安全、航天航空、科技进步等方面不可或缺的战略物资，已成为支撑国防现代化建设和国家经济发展的重要材料。

自 20 世纪 30~40 年代开始，各种合成纤维不断研发出来，部分品种得到了规模化生产，其所具有的新性能不仅满足了日常服装、装饰及工业的需求，而且推动了制造业的不断升级。在工业应用的早期，纤维主要用作劳动工具，如制作渔线、渔网和绳索等，而汽车工业的快速发展带动了人造纤维、特别是化学合成纤维工业的迅猛崛起。技术纤维及纺织品的发展历程中都有类似的发展阶段，即由天然纤维到再生纤维，再到化学合成纤维。随着纤维材料在高端制造业、航空航天、武器装备等领域的广泛应用，各种高性能纤维应运而生^[1,2]。

第二次世界大战后，美国为确保其军事、尖端科学和支柱产业在全球的领先地位，将高性能纤维的研发和应用作为其重要的技术支撑严格掌控。20 世纪 60 年代末，研究者发现了芳香族聚酰胺的溶致性液晶现象，经过数十年的发展，最终实现了 Kevlar 纤维（DuPont）和 Twaron 纤维（Akzo Nobel）工业化生产与应用。70 年代中期以后，出现了高强的聚苯并噁唑（PBZT）和聚对亚苯基苯并二噁唑（PBO）纤维，之后通过知识产权的转移由日本东洋纺（Toyobo）进行商业化生成。70 年代末，荷兰帝斯曼（DSM）公司发明了凝胶纺丝方法（Gel spinning），促成了超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维的成功产业化。80 年代后期，特别是进入 21 世纪以来，日本靠不断壮大具有世界领先水平的碳纤维产业，从而确立了当今世界高性能纤维的领先地位^[3]。

作为新兴经济体之一，我国通过几个五年计划的布局 and 投入，先后突破了芳纶、超高分子量聚乙烯纤维、碳纤维三大高性能纤维的关键技术，实现了工业化生产，打破了发达国家的技术垄断，基本满足了我国国民经济和国防建设的需要，部分产品出口海外。

第一节 高性能纤维的定义、分类及基本特性

一、高性能纤维的定义

高性能纤维，顾名思义在于“高性能”，是指具有特殊的结构、性能和用途，或具有某些特殊功能的化学纤维。高性能纤维早期定义的依据是力学性能，往往指断裂强度超过 15cN/dtex 的纤维，比如碳纤维、对位芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等，但该定义在实际生产和应用中有一定的局限性；广义上，具有耐高温、耐辐照、耐腐蚀等特性的纤维，也称为高

性能纤维，比如间位芳纶、聚四氟乙烯纤维、聚苯硫醚纤维等，这些产品主要特点在于耐热性和阻燃性等方面。

二、高性能纤维的分类

高性能纤维可根据材料的属性进行分类，包括金属纤维、无机纤维和有机纤维。金属纤维因其密度高、比强度低等特点，在高性能纤维家族中的规模相对较小。无机纤维的主要特点是耐高温、耐腐蚀、优良的力学性能，在航空航天、武器装备等领域应用广泛，包括碳纤维、碳化硅纤维、氮化硼纤维、硅硼氮纤维、氧化铝纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维等。

有机高性能纤维品种较多，根据大分子链的特性可分为柔性链纤维和刚性链纤维。柔性链有机纤维的典型代表是超高分子量聚乙烯纤维、高强聚乙烯醇纤维等，其大分子主链由—CH₂—组成，因分子链的高度取向使纤维的力学性能得到明显提升。刚性链纤维包括芳香族聚酰胺纤维（即芳纶）、聚芳酯纤维、聚酰亚胺纤维、聚对亚苯基苯并噁唑纤维（PBO）、聚苯并咪唑纤维等，其中后三种纤维又称为芳杂环类纤维。另外，也可依据纤维的典型特性对有机高性能纤维进行分类，如高强高模纤维（如对位芳纶、高强聚酰亚胺纤维、PBO纤维、超高分子量聚乙烯纤维等）、耐高温纤维（间位芳纶、聚苯并咪唑纤维、聚醚酰亚胺纤维等）等。

三、高性能纤维的物理机械性能

无机纤维除了具有优良的力学性能外，耐热性好是其明显的优势，无机纤维还具有韧性低、密度高、制备相对复杂等特点，几种典型的无机纤维的性能见表 1-1。

表 1-1 部分无机纤维和金属纤维的力学性能

纤维名称	断裂强度 (GPa)	初始模量 (GPa)	断裂延伸率 (%)	密度 (g/cm ³)	软化温度 (°C)
E 玻璃纤维	3.5	72	4.8	2.54	1316
S 玻璃纤维	4.8	85	5.4	2.49	1650
碳纤维 T300	3.5	230	1.5	1.76	—
碳纤维 T700	4.9	230	2.1	1.80	—
SiC 纤维	~3.0	~200	~1	3.2	~1500
玄武岩纤维	3.0~4.8	79~100	3.2	~2.8	960
钢纤维	2.8	200	1.8	7.81	1621

注 数据来自相关产品说明书。

与无机纤维相比，有机高性能纤维不仅具有优良的力学性能，而且其低密度、高韧性的特点，使其在轻质复合材料领域得到广泛应用，部分有机高性能纤维的特性见表 1-2。