



《新型炭材料》丛书

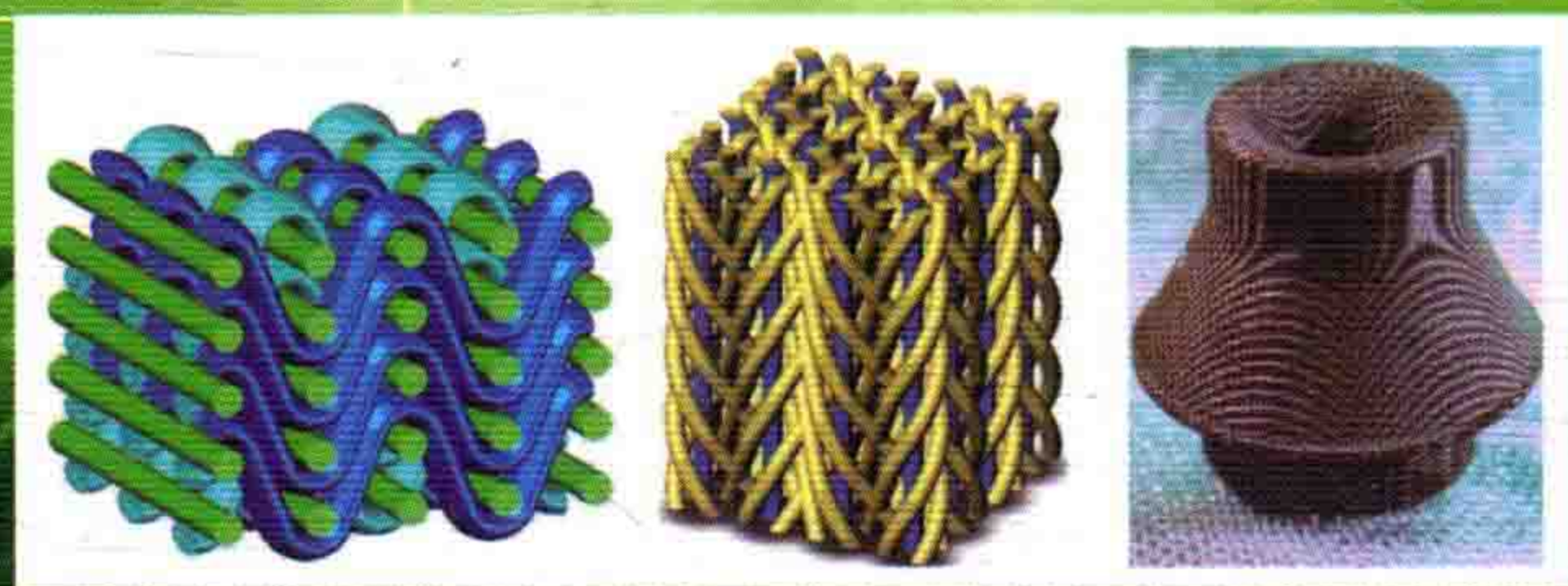
■ 宋怀河 总主编 ■

New Carbon Material Series

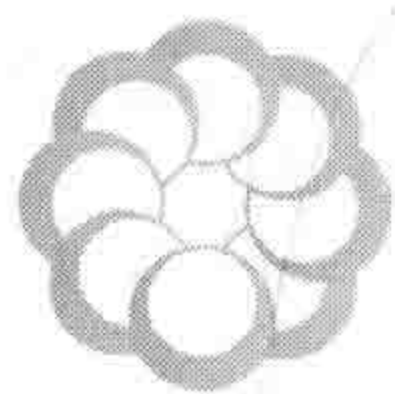
碳纤维复合材料

Carbon Fibers Reinforced Composites

罗瑞盈 编著



化学工业出版社



《新型炭材料》丛书

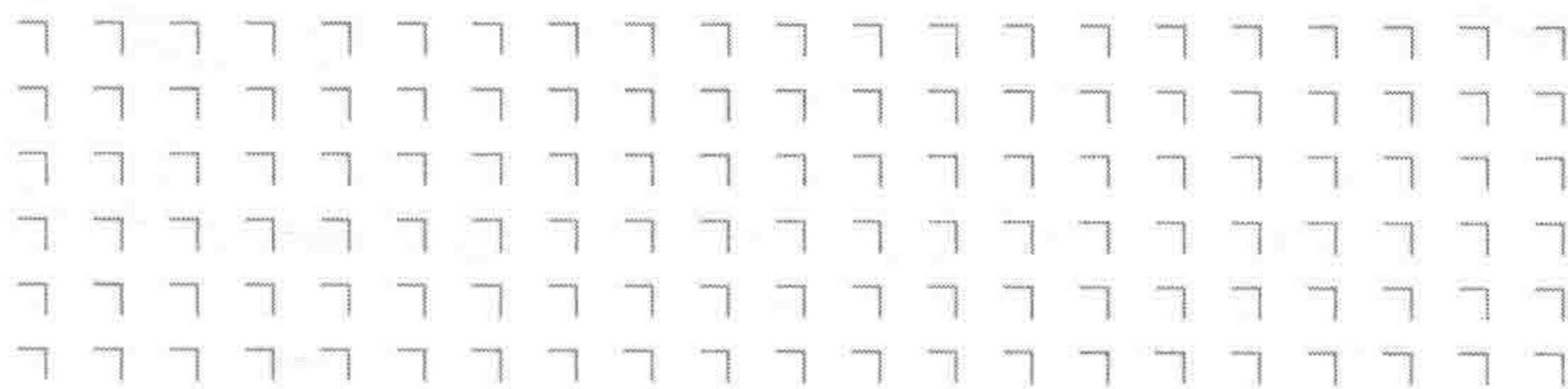
▪ 宋怀河 总主编 ▪

New Carbon Material Series

碳纤维复合材料

Carbon Fibers Reinforced Composites

罗瑞盈 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是编著者多年教学工作及研究成果的总结，其中部分章节参考了国内外相关文献。全书主要内容包括：概述了碳纤维复合材料的定义、分类、制备方法及应用；从增强纤维和基体入手，详细介绍了碳纤维增强树脂基复合材料的制备、应用及修复技术；全面系统地讲述了炭/炭复合材料的制备、高温氧化防护、再生修复等工艺，以及微观结构、力学、热物理和摩擦磨损性能表征方法；分别介绍了碳纤维增强陶瓷、金属及橡胶基复合材料的制备、性能及应用；简述了碳纤维增强生物医学、导电、高温隔热、摩擦和电磁屏蔽等炭基功能材料。

本书可供从事碳纤维复合材料研究的科技人员和高等院校教师参考，也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳纤维复合材料/罗瑞盈编著. —北京: 化学工业出版社, 2017.6

(新型炭材料)

ISBN 978-7-122-29349-7

I. ①炭… II. ①罗… III. ①碳纤维增强复合材料
IV. ①TB334

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 060952 号

责任编辑: 夏叶清

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 22 字数 462 千字 2017 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 128.00 元

版权所有 违者必究

《新型炭材料》丛书 编著人员

丛书高级顾问：成会明 院士

丛书总主编：宋怀河 教授

丛书总副主编：邱介山 教授，康飞宇 教授

分册编著人员：

《炭材料基础》 宋怀河 陈晓红 编著

《纳米炭材料》 邱介山 编著

《多孔炭材料》 郑经堂 黄振兴 编著

《炭基能源材料》 康飞宇 杜鸿达 黄正宏 编著

《高性能碳纤维》 吕永根 编著

《碳纤维复合材料》 罗瑞盈 编著

《沥青基炭材料》 王成扬 编著

《特种石墨材料》 杨俊和 等编著

《超硬炭材料》 王艳辉 臧建兵 编著

《炭材料分析与表征》 杨全红 李峰 编著

总序

炭材料是一种既古老又新颖的材料。自 19 世纪以来,炭材料已广泛应用于钢铁、汽车、电子、化工、能源、医疗、航空航天、国防等领域,石墨电极、炭黑、焦炭、活性炭、碳纤维及其复合材料等材料早已大规模工业化生产。近 30 年来,以富勒烯、碳纳米管、石墨烯为代表的纳米炭材料在世界范围内引领着纳米材料的发展,在众多领域的应用日益受到关注,将为新技术革命奠定材料基础。炭及其复合材料将成为继金属、陶瓷、聚合物之后的人类所必需的一大类原材料。

鉴于国内外新型炭材料的发展十分迅速、学界和企业界热切期望一部能够全面反映新型炭材料发展现状的图书,化学工业出版社特别组织国内长期从事新型炭材料教学、研究和开发的中青年专家共同编写了《新型炭材料》丛书(共十册),包括《炭材料基础》、《纳米炭材料》、《多孔炭材料》、《炭基能源材料》、《高性能碳纤维》、《碳纤维复合材料》、《沥青基炭材料》、《特种石墨材料》、《超硬炭材料》和《炭材料分析与表征》。该丛书的主要特点如下。

(1) 内容丰富 既包含碳科学基础理论知识、炭材料性能及表征分析方法等方面的内容,又有特种石墨材料、多孔炭材料、碳纤维及其复合材料、沥青基炭材料、纳米炭材料等按照炭材料类别的专论,同时并没有忽略碳的一个主要同素异形体—— sp^3 型金刚石材料。基于炭材料在能源存储和转化领域的优越性能和广泛应用,本丛书还特别编写了《炭基能源材料》专册,介绍新型炭材料在一次电池、二次电池、电化学电容器、燃料电池、氢气和甲烷储存、催化、核能等领域的最新应用进展。

(2) 资料齐全、新颖 本丛书各分册既有基本原理和基础知识的介绍,又反映了编著者多年来在该领域的科研成果和经验积累。同时所引用的文献包括了本领域最新发表在国内外重要期刊的资料,代表了该领域的最新进展,权威性高,数据可信。

(3) 适用读者群广泛 既可作为大学高年级学生和研究生的教学用书,又可作为科研人员的参考用书,并对在企业中从事炭材料工程技术和产品开发的人员具有重要的指导价值。该书还可作为高端科普读物,引导对新型炭材料科学与技术感兴趣的读者深入学习。

炭材料与资源、能源、环境、健康等人类最关心的根本问题息息相关。我们预期这套丛书的出版将对炭材料领域的原始创新、技术进步及国民经济的发展发挥积极的促进作用,进一步提升我国炭材料研究与开发的国际地位,推动

炭材料学科的全面发展。我们相信本系列丛书的出版必将吸引更多有志之士参与到炭材料的教学、科研、开发和生产中来，共同推进这种既古老又新颖材料的更大发展，为人类的科技进步做出更大贡献。



成会明
中国科学院院士
第三世界科学院院士
中国科学院金属研究所研究员
《新型炭材料》高级顾问
《Carbon》副主编
《Energy Storage Materials》主编
2015年5月28日

前言

进入工业社会以来，材料科学技术与信息技术、生物技术和能源技术一起被公认为是总揽人类全局的高技术。人们曾以天然材料、人工材料、合成材料和复合材料来划分人类文明时代的四次重大突破。复合材料以其优异的性能在国民经济建设和国防建设中占据举足轻重的地位。

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成的一种新型固体材料，主要组分是增强体和基体。复合材料最主要的增强体是纤维，其中，碳纤维复合材料以其独特的性质及用途在复合材料中占据十分重要的位置，现已广泛应用于航空、航天、船舶、建筑、汽车、体育用品、机械电子和医疗器械等领域。

碳纤维复合材料是一种高性能复合材料，具有高比强度、高比模量、可整体成型等特性，可用来制造强而轻、刚而薄的构件，是影响航空航天工业等高科技产业发展的关键材料。随着科学技术的发展以及市场需求的变化，对碳纤维复合材料的功能特性要求越来越高，如导电性、耐热性、抗氧化性、耐磨性以及屏蔽电磁波性等。因此，该类材料的研究、开发及应用对军事和民用工业发展的意义重大，本书将针对国内外在碳纤维复合材料领域取得的发展提供必要的基础知识与相关的前沿信息。

全书共分五章：第1章、绪论，系统介绍了碳纤维复合材料的基本知识和理论；第2章、碳纤维增强树脂基复合材料，介绍高性能增强碳纤维、树脂基体以及碳纤维增强树脂基复合材料的制备、应用及修复技术；第3章、炭/炭复合材料，介绍炭/炭复合材料的制备技术、结构表征与性能及应用，同时介绍了炭/炭复合材料的高温氧化防护技术、再生修复及发展趋势；第4章、碳纤维增强其他基体复合材料，介绍以陶瓷、金属及橡胶作为基体的碳纤维增强复合材料；第5章、炭基功能材料，从炭基材料的功能性方面介绍炭基复合材料的应用。本书内容丰富，取材广泛，既涵盖基础理论知识，又注重工艺与应用，运用大量图表对现有的碳纤维复合材料进行较全面地介绍。不仅可作为高等院校材料科学专业学生的教材，也可供从事材料科学与工程研究的技术人员和高等院校教师参考。

本书引用了许多参考文献，在此对所引用文献的作者表示衷心感谢。

本书是由北京航空航天大学罗瑞盈教授编著，由于编著者水平有限，存在的缺点和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

2017年1月

目 录

第 1 章

绪论

1

1.1 碳纤维复合材料的定义、分类	1
1.1.1 碳纤维	1
1.1.2 碳纤维复合材料	2
1.2 碳纤维复合材料的制备	3
1.2.1 碳纤维增强树脂基复合材料	3
1.2.2 炭/炭复合材料	4
1.2.3 碳纤维增强陶瓷基复合材料	6
1.2.4 碳纤维增强金属基复合材料	7
1.2.5 碳纤维增强橡胶基复合材料	9
1.3 碳纤维复合材料的应用	9
1.3.1 在航空航天领域中的应用	9
1.3.2 在隐身领域中的应用	10
1.3.3 在电磁屏蔽领域中的应用	11
1.3.4 在生物领域中的应用	11
1.3.5 在建筑工程领域中的应用	11
1.3.6 在交通运输领域中的应用	12
1.3.7 在体育器械领域中的应用	13
1.3.8 在其他领域中的应用	13
参考文献	13

第 2 章

碳纤维增强树脂基复合材料

16

2.1 概述	16
2.2 高性能增强碳纤维	16
2.2.1 概述	16
2.2.2 聚丙烯腈基碳纤维	17
2.2.3 沥青基碳纤维	40
2.2.4 黏胶基碳纤维	50
2.3 高性能树脂基体	56

2.3.1	概述	56
2.3.2	热固性树脂	56
2.3.3	热塑性树脂	61
2.3.4	碳纤维增强树脂基复合材料	64
2.4	先进碳纤维增强树脂基复合材料制备技术	73
2.4.1	概述	73
2.4.2	预浸料的工艺和性能	74
2.4.3	碳纤维增强树脂基复合材料的成型工艺	78
2.5	碳纤维增强树脂基复合材料的应用	94
2.5.1	在航空航天领域的应用	94
2.5.2	在航海、海洋方面的应用	101
2.5.3	在交通运输业的应用	103
2.5.4	在建筑方面的应用	104
2.5.5	在能源工业的应用	105
2.5.6	在体育用品方面的应用	106
2.5.7	在其他领域的应用	107
2.6	先进碳纤维增强树脂基复合材料修复技术	108
2.6.1	概述	108
2.6.2	树脂基复合材料缺陷和损伤种类及来源	108
2.6.3	树脂基复合材料缺陷和损伤的检测	110
2.6.4	树脂基复合材料的修复	112
2.6.5	树脂基复合材料修复模拟	114
2.7	先进碳纤维增强树脂基复合材料发展趋势	120
2.7.1	碳纤维增强树脂基复合材料低成本化	120
2.7.2	碳纤维增强树脂基复合材料设计验证规范化	121
2.7.3	碳纤维增强树脂基复合材料结构安全与可靠性 评价	121
	参考文献	121

第3章 炭/炭复合材料

3.1	概述	133
3.2	炭/炭复合材料制备技术	134
3.2.1	概述	134
3.2.2	增强炭纤维的选择	134
3.2.3	预制体的制备	135
3.2.4	炭/炭复合材料致密化工艺	138
3.2.5	高温热处理工艺	150

3.3	炭/炭复合材料高温氧化防护技术	152
3.3.1	概述	152
3.3.2	炭/炭复合材料的氧化机理	152
3.3.3	炭/炭复合材料基材改性技术	153
3.3.4	炭/炭复合材料抗氧化涂层技术	156
3.4	炭/炭复合材料的微观结构表征	163
3.4.1	概述	163
3.4.2	热解炭偏光分析	163
3.4.3	热解炭扫描电镜分析	165
3.4.4	热解炭透射电镜分析	167
3.4.5	炭/炭复合材料 X 射线衍射分析	169
3.4.6	热解炭结构其他表征方法	171
3.5	炭/炭复合材料性能及表征方法	172
3.5.1	炭/炭复合材料力学性能及表征	172
3.5.2	炭/炭复合材料热物理性能	178
3.5.3	炭/炭复合材料摩擦磨损性能	189
3.6	炭/炭复合材料的再生修复	199
3.6.1	概述	199
3.6.2	高温胶黏剂制备技术	199
3.6.3	炭/炭复合材料的修复技术	203
3.7	炭/炭复合材料的应用	204
3.7.1	概述	204
3.7.2	在制动材料方面的应用	204
3.7.3	在耐烧蚀材料方面的应用	205
3.7.4	在高温结构材料方面的应用	206
3.7.5	在热场材料方面的应用	207
3.7.6	在其他方面的应用	208
3.8	炭/炭复合材料的发展趋势	209
	参考文献	209

第 4 章

碳纤维增强其他基体复合材料

215

4.1	概述	215
4.2	碳纤维增强陶瓷基复合材料	215
4.2.1	概述	215
4.2.2	陶瓷基体的种类	216
4.2.3	碳纤维增强陶瓷基复合材料制备工艺	225
4.2.4	碳纤维增强陶瓷基复合材料增韧机制	239

4.2.5	碳纤维增强陶瓷基复合材料抗氧化涂层技术	241
4.2.6	碳纤维增强陶瓷基复合材料的应用	243
4.3	碳纤维增强金属基复合材料	249
4.3.1	概述	249
4.3.2	碳纤维增强金属基复合材料的界面及界面优化	252
4.3.3	金属基体的类型	257
4.3.4	碳纤维增强金属基复合材料的制备方法	263
4.3.5	碳纤维增强金属基复合材料的增强机理	268
4.3.6	碳纤维增强金属基复合材料的应用	270
4.4	碳纤维增强橡胶基复合材料	272
4.4.1	概述	272
4.4.2	碳纤维增强橡胶基复合材料的制备	274
4.4.3	碳纤维增强橡胶基复合材料的性能	276
4.4.4	碳纤维增强橡胶基复合材料的应用	281
	参考文献	283

第 5 章

炭基功能材料

291

5.1	概述	291
5.1.1	炭基功能复合材料的类别	291
5.1.2	炭基功能复合材料的设计	292
5.1.3	炭基功能复合材料的发展趋势	293
5.2	碳纤维增强生物医学复合材料	293
5.2.1	概述	293
5.2.2	碳纤维增强生物医学复合材料	294
5.2.3	碳纤维增强生物医学复合材料的性能评价	297
5.2.4	炭基生物医学材料的发展	298
5.3	碳纤维增强导电复合材料	298
5.3.1	概述	298
5.3.2	碳纤维增强聚合物基导电复合材料	299
5.3.3	碳纤维增强炭基导电复合材料	301
5.3.4	碳纤维增强水泥基导电复合材料	304
5.3.5	碳纤维增强陶瓷基导电复合材料	307
5.3.6	炭系导电复合材料发展趋势	307
5.4	碳纤维增强高温隔热材料	307
5.4.1	概述	307
5.4.2	碳纤维增强树脂基隔热复合材料	309
5.4.3	炭/炭隔热复合材料	310

5.4.4	炭/炭热场复合材料	312
5.5	碳纤维增强摩擦复合材料	313
5.5.1	概述	313
5.5.2	摩阻复合材料	316
5.5.3	减摩复合材料	318
5.6	碳纤维增强电磁屏蔽材料	318
5.6.1	电磁屏蔽机理	318
5.6.2	电屏蔽复合材料	320
5.6.3	吸波材料	321
5.6.4	透波材料	324
5.7	碳纤维增强其他功能材料	325
5.7.1	防静电材料	325
5.7.2	抗辐射功能复合材料	327
5.7.3	阻尼功能复合材料	329
	参考文献	335

第 1 章

绪 论

1.1 碳纤维复合材料的定义、分类

1.1.1 碳纤维

碳纤维 (carbon fiber, CF), 是纤维状的炭素材料, 含碳量在 90% 以上, 其中含碳量高于 99% 的称为石墨纤维。与传统的玻璃纤维 (GF) 相比, 抗拉模量是其 3 倍多; 与凯芙拉纤维 (KF-49) 相比, 不仅抗拉模量是其 2 倍左右, 而且在有机溶剂、酸、碱中不溶不胀, 耐蚀性出类拔萃, 特别是在 2000℃ 以上高温惰性环境中, 是唯一强度不下降的材料, 因此碳纤维在国际上被称为继石器和钢铁等金属之后的“第三代材料”。碳纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维是当今世界三大高性能纤维。碳纤维是军民两用新材料, 属于技术密集型和政治敏感的关键材料。

碳纤维按原材料的不同主要分为聚丙烯腈基 (PAN) 碳纤维、沥青基碳纤维和黏胶基碳纤维。按力学性能的不同分为通用型纤维和高性能型纤维。通用型碳纤维强度为 1000MPa、模量为 100GPa 左右。高性能型碳纤维又分为高强型 (强度 2000MPa, 模量 250GPa) 和高模型 (模量 300GPa 以上)。强度大于 4000MPa 的又称为超高强型; 模量大于 450GPa 的称为超高模型。在聚丙烯腈基碳纤维中, 日本东丽公司的碳纤维为国际公认的代表性产品, 分为 T 系列 (炭化产品)、M 系列 (石墨化产品), 规格有 T300 (抗拉强度大于 3000MPa)、T700 (抗拉强度大于 4500MPa)、T800 (抗拉强度达到 5490MPa) 和 T1000 (抗拉强度大于 7000MPa) 等, 如图 1.1 所示。

根据产品规格的不同, 碳纤维目前被划分为工业级和宇航级两类, 亦称为大丝束碳纤维和小丝束碳纤维。通常把 48K 以上碳纤维称为大丝束碳纤维, 包括 48K、60K、120K、360K 和 480K 等。小丝束碳纤维初期以 1K、3K、6K 为主, 后来逐渐发展为 12K 和 24K。

碳纤维主要有四种产品形式 (如图 1.2 所示): 碳纤维、炭布、预浸料坯和短

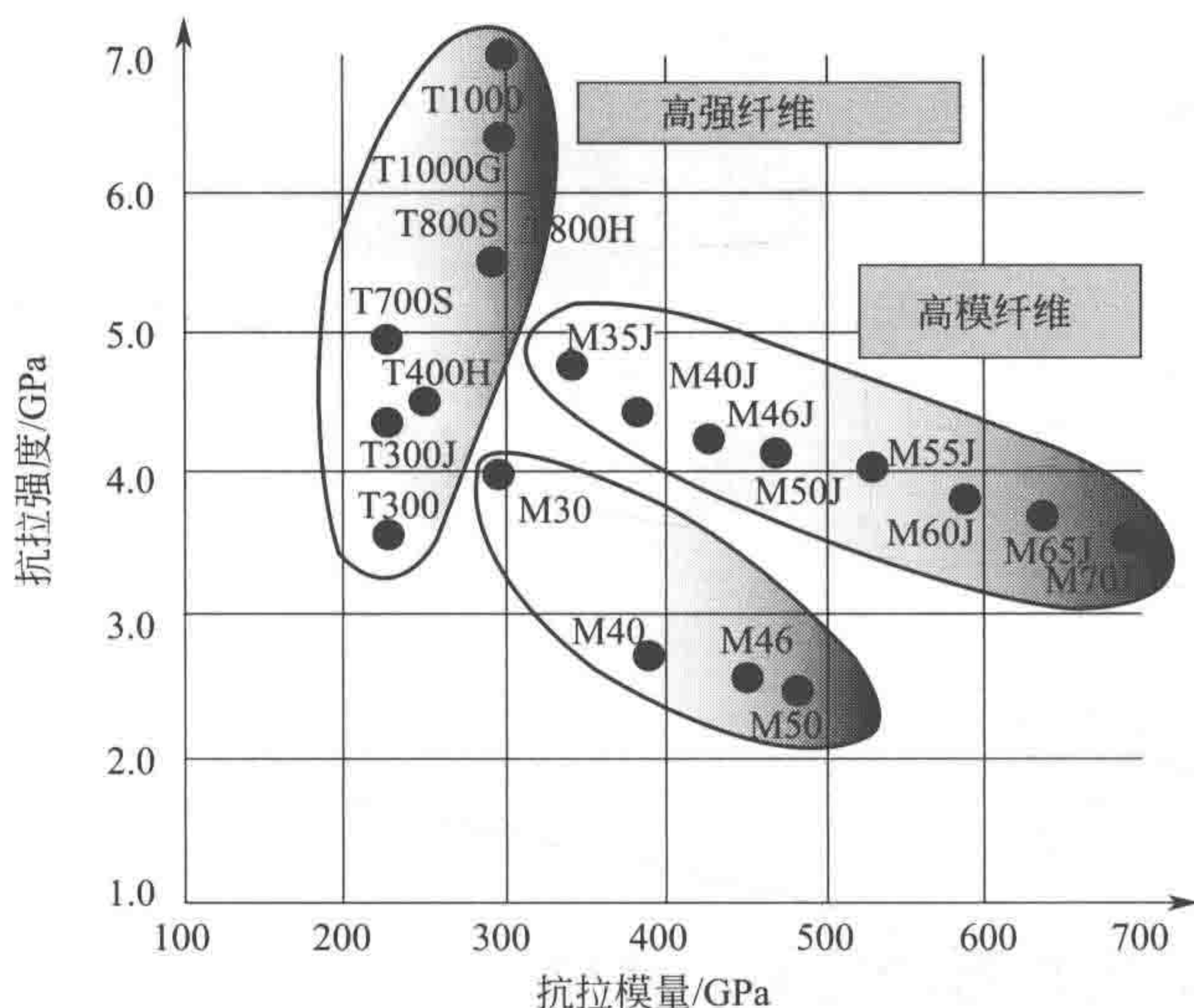
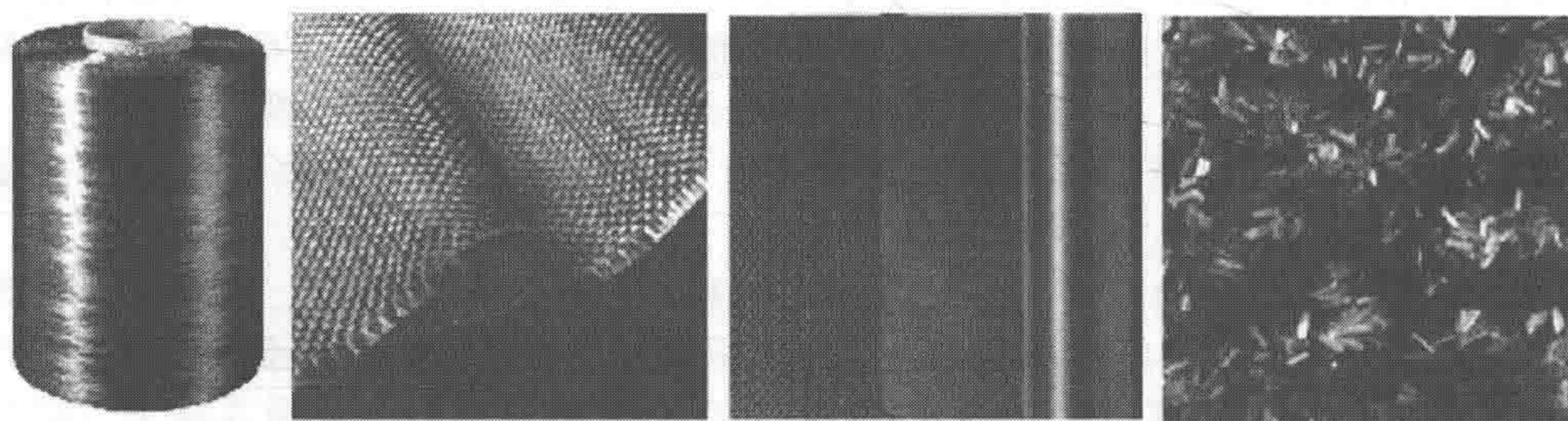


图 1.1 东丽公司生产的碳纤维性能分布图^[1]

切纤维。炭布指的是由碳纤维制成的织品；预浸料坯是将碳纤维按照一个方向一致排列，并将碳纤维或布料经树脂浸泡使其转化成片状；短切纤维指的是碳纤维短丝。



(a) 碳纤维

(b) 炭布

(c) 预浸料坯

(d) 短切纤维

图 1.2 碳纤维产品形式

1.1.2 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料 (carbon fibers reinforced composites)，是以碳纤维作为增强体，炭、树脂、陶瓷和金属等作为基体所形成的一种新型固体材料^[2]。

碳纤维复合材料不仅密度低，比强度大、比模量高、高温性能好和热稳定性高，而且具有可设计性。它们按照用途可以分为结构型、功能型、结构功能型和智能型碳纤维复合材料。

按照基体的种类可以分为碳纤维增强聚合物基（热固性树脂基、热塑性树脂基）、碳纤维增强炭基、碳纤维增强陶瓷基、碳纤维增强金属基（包括轻金属基，

高熔点金属基与金属间化合物基)、碳纤维增强橡胶和碳纤维增强水泥基复合材料。

1.2 碳纤维复合材料的制备

1.2.1 碳纤维增强树脂基复合材料

碳纤维增强树脂基复合材料具有高比强度、耐腐蚀、导热性能好、易于成型等优点,在冶金、国防、电子、能源及石油化工行业得到广泛应用。其制备方法很多,按基体材料的不同分为两类,一类是热固性复合材料的制备方法,主要包括热压罐成型法、树脂传递模塑成型法、真空热压成型法、连续缠绕成型法和连续拉挤成型法等;另一类是热塑性复合材料的制备方法,类似于热固性复合材料的制备方法,主要有树脂传递模塑成型法、缠绕成型法、真空模压成型法、注射成型法和拉挤成型法等^[3]。

1.2.1.1 热压罐成型工艺

热压罐成型工艺是碳纤维增强树脂基复合材料的主要成型技术,该工艺是利用热压罐的专用设备,将预浸料铺覆在模具中,通过加热、真空、以及加压等使其致密固化形成构件的工艺方法,其优点是成型的构件性能高,质量稳定并适合大型复杂外形制件的成型,缺点是设备投资大,能耗高^[4]。

1.2.1.2 树脂传递模塑成型工艺

树脂传递模塑(RTM)是一种适宜多品种、中批量、高质量复合材料构件的低成本制备技术,它有许多优点:能够制造高精度、低孔隙率、高纤维含量的复杂复合材料构件,不需胶衣树脂也可获得光滑的双表面,构件从设计到投产时间短,生产效率高。目前发达国家复合材料工业已由“产量大、消费大”步入“个性化、高级化、产量中等”阶段,该技术正是适合此要求的工艺,已得到广泛应用^[5]。

1.2.1.3 拉挤成型工艺

拉挤成型是将浸有树脂的碳纤维连续通过一定型面的加热口模,挤出多余树脂,在牵引条件下进行固化。拉挤成型的最大特点是连续成型,构件长度不受限制,力学性能优异,尤其是纵向力学性能突出,结构效率高,制造成本低,自动化程度高,制品性能稳定,生产效率高,原材料利用率高,不需要辅助材料。它是制造高纤维体积含量、高性能低成本复合材料的一种重要方法^[6]。

1.2.1.4 缠绕成型工艺

纤维缠绕成型是将浸渍树脂的纤维丝束或带,在一定张力下,按照一定规律缠绕到芯模上,然后在加热或常温下固化形成构件的方法。纤维缠绕成型的主要特点是,纤维能保持连续完整,构件线型可按制品受力情况设计,结构效率高,制品强度高;可连续化、机械化生产,生产周期短,劳动强度小;构件不需机械加工,但设备复杂,技术难度高,工艺质量不易控制^[7]。

1.2.1.5 模压成型工艺

模压成型是将一定量的预混料或预浸料加入金属对模内，经加热、加压固化成型的一种方法。模压成型工艺的主要优点是生产效率高，便于实现专业化和自动化生产，可有效降低制造成本；产品尺寸精度高，重复性好；表面光洁，无须二次修饰，能一次成型结构复杂的制品。不足之处在于模具制造复杂，投资较大，再加上受压机限制，最适合于批量生产中小型复合材料构件^[8]。

1.2.1.6 注射成型工艺

注射成型工艺 (IM) 是指将固态物料混合熔融后，通过压力以一定的速度将熔融状态的物料注入模具型腔内而成型的方法，主要用于热塑性塑料的成型，也可用于热固性塑料的成型。其中成型过程中伴随化学变化的反应注射成型 (RIM) 和增强反应注射成型 (RRIM) 是重要的新兴成型技术，其突出特点是生产效率高、能耗低。RRIM 是在 RIM 基础上发展起来的，在单体中加入增强材料，即反应单体与增强材料一同通过混合头注入模具型腔制备复合材料构件。由于原料在较小压力下即能快速充满模腔，在模具内反应固化成型，所以大大降低了合模力和模具造价，特别适用于生产大面积构件。

1.2.2 炭/炭复合材料

炭/炭复合材料即碳纤维增强炭基复合材料，它由碳纤维或其织物、编织物等增强炭基复合材料构成。炭/炭复合材料主要由炭组成，即由纤维炭与树脂炭、沥青炭和渗积炭等组成。炭/炭复合材料最早由美国 Chance Vought 航空公司于 1958 年研制成功，是目前世界上高技术领域重点研究和开发的一种新型先进材料。具有以下一系列优良特点：

① 炭/炭复合材料整个体系均由碳元素构成，由于碳原子彼此间具有极强的亲和力，炭/炭复合材料无论在低温还是在高温下，都有很好的稳定性，抗热冲击性好，耐腐蚀，导热性能好，热膨胀系数低。

② 炭/炭复合材料密度小 ($<2.0\text{g/cm}^3$)，仅为镍基高温合金的 1/4、陶瓷材料的 1/2，这一点对许多结构或装备要求轻型化至关重要。

③ 该材料的高温力学性能极佳，且温度升高时 (可达 2200°C) 其强度不仅不降低，甚至比室温时还高，这一独特性能是其他材料所无法比拟的。

④ 该材料抗烧蚀性能好，烧蚀均匀，可以抗 3000°C 的高温，在应用于航天工业使用的火箭发动机喷管、喉衬等短时间烧蚀的环境中具有无与伦比的优越性。

⑤ 炭/炭复合材料摩擦磨损性能优异，摩擦系数适中，摩擦性能稳定，磨损率低，是各种耐磨和摩擦部件，如飞机刹车盘的最佳候选材料。

⑥ 同时具有其他复合材料的优异特性，如高强度、高模量、良好的断裂韧性和抗蠕变性能等。

炭/炭复合材料的制备工艺主要包括三大部分：碳纤维预制体的成型；预制体的致密化；高温热处理、机械加工和质量检测。而就其致密化工艺来说，目前主要分为两大类，即树脂 (或沥青) 液相浸渍炭化工艺及化学气相渗积 (CVI) 工艺，

如图 1.3 所示。

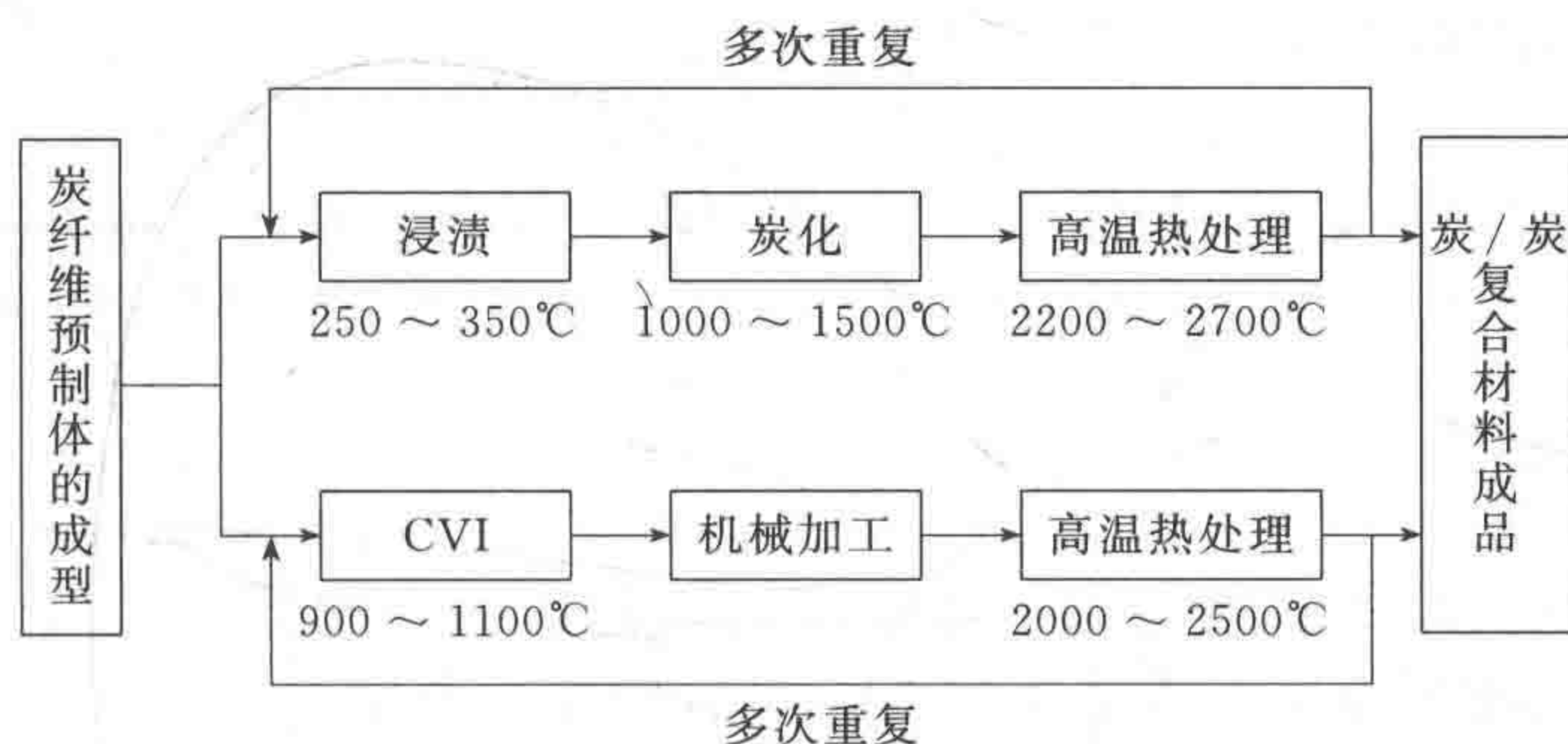


图 1.3 炭/炭复合材料的制备工艺流程

1.2.2.1 液相浸渍炭化工艺

液相浸渍炭化工艺是将碳纤维预制体置于浸渍罐中，抽真空后充惰性气体加压，使浸渍剂向预制体内部渗透，然后进行固化以及在高温下炭化，一般需重复浸渍和炭化 5~6 次甚至更多次才能完成致密化过程，因而生产周期很长^[9]。液相浸渍炭化工艺的优点是容易制得致密且密度较均匀、尺寸较稳定的制品。缺点是纤维与基体结合不好，这是由于炭化时，沥青或树脂分解产生大量气体，气体逸出基体收缩，于是产生裂纹、孔隙及分层等缺陷。根据 Schmidt^[10] 报道，CVI 炭与纤维之间的结合强度可达 27MPa，而与树脂结合强度一般在 10MPa 以下。因此一般不单独使用液相浸渍炭化法制备炭/炭复合材料。

1.2.2.2 化学气相渗积工艺

CVI 工艺^[8]是将碳纤维预制体放入专用的 CVI 炉中，加热至所要求的温度，通入碳氢气体（如 CH₄、C₂H₄、C₃H₆、C₃H₈ 等），这些气体在高温真空的条件下在碳纤维上热解形成渗积炭，以填充多孔预制体中的孔隙。

CVI 法具有以下优点：

- ① 渗积过程对纤维骨架几乎无损伤作用，制备的构件内部应力小，从而保证了材料结构的完整性和高强度；
- ② CVI 法可以控制材料当量配比、晶体结构及晶体取向，可以制备出很纯的材料，特别是围绕纤维渗积出的基体没有凝固时的收缩现象，因此大大减缓了材料内部应力；
- ③ 可以制备出形状复杂、纤维体积分数高的构件。

CVI 是制备高性能炭/炭复合材料的首选增密方法，因为 CVI 增密不仅可以实现基体炭与纤维骨架间最紧密、最牢固的结合，还可以控制材料的内部结构，以达到所需性能要求。传统的 CVI 工艺包括等温法、热梯度法和压差法等^[11]。针对炭/炭复合材料制备工艺中存在的不足，各国不断改进工艺，相继开发出了快速定向流动^[12~14]、压力强制流动^[15~17]、复合感应加热热梯度^[18~20]、液相气化^[21~25]和直热^[26,27]等快速 CVI 工艺。