



“十二五”国家重点出版规划项目

高性能纤维技术丛书

高性能玻璃纤维

High Performance Glass Fiber

祖群 赵谦 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

高性能纤维技术丛书

高性能玻璃纤维

祖群 赵谦 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分7章。首先对高性能玻璃纤维研究与发展进行综述,给出高性能玻璃纤维定义、构成和分类,提出了高性能玻璃纤维关键技术和发展方向;其次对高性能玻璃纤维基础理论、生产技术、性能检验与产品规范和高性能玻璃纤维应用等进行了系统阐述。本书对近年来高性能玻璃纤维和玻璃纤维表界面的基础研究进行了归纳和总结,分析了国内外高性能玻璃纤维基础理论研究动态。对高性能玻璃纤维制造及制品加工生产技术进行了分类描述,有助于全面了解高性能玻璃纤维的制造流程。结合玻璃纤维测试方法及产品标准,阐述了高性能玻璃纤维及制品的物理与化学性能评价技术。基于高性能玻璃纤维典型应用案例,论述了高性能玻璃纤维在结构与功能材料方面的应用优势。

本书内容力求科学严谨,深入浅出,实用可行,反映最新技术进展,给出高性能玻璃纤维研究与发展清晰轨迹。本书可供高性能纤维新材料专业工程技术人员和研究人员参考,也可作为高等学校相关专业参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

高性能玻璃纤维 / 祖群, 赵谦编著. —北京: 国防工业出版社, 2017. 7

(高性能纤维技术丛书)

ISBN 978-7-118-11155-2

I. ①高… II. ①祖… ②赵… III. ①高性能化—
玻璃纤维 IV. ①TQ171.77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 114682 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 37 字数 704 千字

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

高性能纤维技术丛书

编审委员会

指导委员会

名誉主任 师昌绪

副主任 杜善义 季国标

委员 孙晋良 郁铭芳 蒋士成

姚 穆 俞建勇

编辑委员会

主任 俞建勇

副主任 徐 坚 岳清瑞 端小平 王玉萍

委员 (按姓氏笔画排序)

马千里 冯志海 李书乡 杨永岗

肖永栋 周 宏(执行委员) 徐樑华

谈昆仑 蒋志君 谢富原 廖寄乔

秘 书 黄献聪 李常胜

序

Foreword

从 2000 年起,我开始关注和推动碳纤维国产化研究工作。究其原因是,高性能碳纤维对于国防和经济建设必不可缺,且其基础研究、工程建设、工艺控制 and 质量管理等过程所涉及的科学技术、工程研究与应用开发难度非常大。当时,我国高性能碳纤维久攻不破,令人担忧,碳纤维国产化研究工作迫在眉睫。作为材料工作者,我认为我有责任来抓一下。

国家从 20 世纪 70 年代中期就开始支持碳纤维国产化技术研发,投入了大量的资源,但效果并不明显,以至于科技界对能否实现碳纤维国产化形成了一些悲观情绪。我意识到,要发展好中国的碳纤维技术,必须首先克服这些悲观情绪。于是,我请老三委(原国家科学技术委员会、原国家计划委员会、原国家国防科学技术工业委员会)的同志们共同研讨碳纤维国产化工作的经验教训和发展设想,并以此为基础,请中国科学院化学所徐坚副所长、北京化工大学徐樾华教授和国家新材料产业战略咨询委员会李克建副秘书长等同志,提出了重启碳纤维国产化技术研究的具体设想。2000 年,我向当时的国家领导人建议要加强碳纤维国产化工作,中央前后两任总书记均对此予以高度重视。由此,开启了碳纤维国产化技术研究的一个新阶段。

此后,国家发改委、科技部、国防科工局和解放军总装备部等相关部门相继立项支持国产碳纤维研发。伴随着改革开放后我国经济腾飞带来的科技实力的积累,到“十一五”初期,我国碳纤维技术和产业取得突破性进展。一批有情怀、有闯劲儿的企业家加入到这支队伍中来,他们不断投入巨资开展碳纤维工程技术的产业化研究,成为国产碳纤维产业建设的主力军;来自大专院校、科研院所的众多科研人员,不仅在实验室中专心研究相关基础科学问题,更乐于将所获得的研究成果转化为工程技术应用。正是在国家、企业和科技人员的共同努力下,历经近十五年的奋斗,碳纤维国产化技术研究取得了令人瞩目的成就。其标志:一是我国先进武器用 T300 碳纤维已经实现了国产化;二是我国碳纤维技术研究已经向最高端产品技术方向迈进并取得关键性突破;三是国产碳纤维的产业化制备与应用基础已初具规模;四是形成了多个知识基础坚实、视野开阔、分工协作、拼搏进取的“产学研用”一体化科研团队。因此,可以说,我国的碳纤维工程

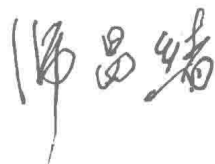
技术和产业化建设已经取得了决定性的突破!

同一时期,由于有着与碳纤维国产化取得突破相同的背景与缘由,芳纶、芳杂环纤维、高强高模聚乙烯纤维、聚酰亚胺纤维和聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维等高性能纤维的国产化工程技术研究和产业化建设均取得了突破,不仅满足了国防军工急需,而且在民用市场上开始占有一席之地,令人十分欣慰。

在国产高性能纤维基础科学研究、工程技术开发、产业化建设和推广应用等实践活动取得阶段性成就的时候,学者专家们总结他们所积累的研究成果、著书立说、共享知识、教诲后人,这是对我国高性能纤维国产化工作做出的又一项贡献,对此,我非常支持!

感谢国防工业出版社的领导和本套丛书的编辑,正是他们对国产高性能纤维技术的高度关心和对总结我国该领域发展历程中经验教训的执着热忱,才使得丛书的编著能够得到国内本领域最知名学者专家们的支持,才使得他们能从百忙之中静下心来总结著述,才使得全体参与人员和出版社有信心去争取国家出版基金的资助。

最后,我期望我国高性能纤维领域的全体同志们,能够更加努力地攻克科学技术、工程建设和实际应用中的一个一个难关,不断地总结经验、汲取教训,不断地取得突破、积累知识,不断地提高性能、扩大应用,使国产高性能纤维达到世界先进水平。我坚信中国的高性能纤维技术一定能在世界强手的行列中占有一席之地。



2014年6月8日于北京

师昌绪先生因病于2014年11月10日逝世。师先生生前对本丛书的立项给予了极大支持,并欣然做此序。时隔三年,丛书的陆续出版也是对先生的最好纪念和感谢。——编者注

前言

Preface

玻璃纤维发明于 20 世纪 30 年代,普通玻璃纤维(E 玻璃纤维,又称无碱玻璃纤维)商业化制造始于 40 年代初,随后用玻璃纤维增强聚酯树脂产生了纤维增强塑料工业,国内早期命名为玻璃钢,表明玻璃纤维增强的复合材料具有钢一样的力学性能。与金属材料相比,纤维增强复合材料(简称复合材料)的比强度和比模量大、可设计性强,而由玻璃纤维增强的复合材料占全球复合材料总量的 90% 以上。随着复合材料结构力学性能不断提高,功能性不断拓展和加强,对增强纤维的性能也提出了更高要求,高性能玻璃纤维在复合材料科学与技术发展的推动下,无论是在产品种类还是产业规模上,都成为近十年发展最快的一种高性能纤维。高性能玻璃纤维是指与传统玻璃纤维相比,某些使用性能有显著提高,能够在外部力、热、光、电等物理,以及和酸、碱、盐等化学作用下具有更好的承受能力,它保留了传统玻璃纤维耐热、不燃、耐氧化等共性,更有着传统玻璃纤维所不具备的优异性能和特殊功能。这些高性能玻璃纤维包括高强度、高模量、R 改性高强高模、低介电透波、耐(酸或碱)腐蚀、耐高温、耐辐照、高效保温隔热、导电、传光传像、生物相容、超细柔性等种类。

21 世纪以来,玻璃纤维产业从小到大,也经历了十多年的快速发展,2000 年我国玻璃纤维产量约占全球的 8.6%,2010 年我国玻璃纤维产量占全球的 54.2%,成为玻璃纤维制造大国。与此同时,我国高性能玻璃纤维也在国家高科技发展计划的支持下,由小品种到多品种、由小批量到规模化迅速发展,十多年来产业规模增加了近 80 倍,成为新能源、化工、建筑、交通等领域高性能复合材料的重要组成。高性能玻璃纤维不仅在纤维材料性能或功能上表现突出,其规模化生产技术水平也在不断创新发展。高性能玻璃纤维的生产与应用是以先进制造技术为基础,通过采用新技术,突破高性能玻璃熔制与纤维成形技术难点,实现高性能玻璃纤维规模化制造,较好地满足了应用市场对玻璃纤维高性能和低成本的要求。

高性能玻璃纤维研发涉及多学科,包括材料科学、有机化工、无机化工、建筑材料与工程、航空航天科学与工程、化学、核科学技术、环境科学与资源利用等,这也说明高性能玻璃纤维发展需要跨学科、跨行业合作。目前,由于国际上对高性能玻璃纤维还没有给出统一的定义或量化指标,使得高性能玻璃纤维在应用领域出现许多模糊或错误的认识,甚至存在以次充好的市场乱象。对高性能玻璃纤维及其特性进行系统研究,阐明高性能玻璃纤维功能及其应用优势,成为编著本书的初衷。建立玻璃纤维知识桥梁,达成对高性能玻璃纤维认知共识,共同推动高性能玻璃纤维健康持续发展,则是编著本书的期望。

本书首先给出高性能玻璃纤维定义、构成和分类,整理了现有高性能玻璃纤维特性参数,提出其分类的量化依据,便于读者了解高性能玻璃纤维种类及其功能;随后从高性能玻璃纤维及其表界面理论基础研究入手,介绍高性能玻璃纤维结构与性能的相关性。本书对高性能玻璃纤维及制品的生产技术进行了全面论述,同时结合国家标准和国际标准化要求,阐述了高性能玻璃纤维及制品的物理与化学性能评价方法。结合具体的应用案例,论述了高性能玻璃纤维在结构与功能材料方面的应用优势。

本书由南京玻璃纤维研究设计院组织从事高性能玻璃纤维设计、研发、制造、评价和应用等工作的专业技术和研究人员撰写,并邀请业内专家对本书内容进行了审核。本书作者具有丰富的科研和生产实践经验,在编写过程中查阅了大量国内外文献资料,结合自己多年的研究成果和实践总结,对涉及高性能玻璃纤维的科学理论、生产制造、性能评价和应用开发等多个主题进行了系统的归纳和总结。

本书参与编写人员如下:

第1章:祖群、赵谦、叶鼎铨、姜肇中。

第2章:张焱、祖群、黄松林、刘劲松、陈洋、王宏志、宋伟。

第3章:李佳、尹苗、徐彦、周诚、王烽屹、王宏志、秦岩、夏涛。

第4章:唐秀凤、陈世超、黄健健、朱湘官、吴嘉培、张健辉、袁美芹、孙振海、陈洋、严洁、王蓉、江源、张焱、刘俊龙、唐宇、朱方、付良恩、孙鸣、曹春来、徐晓莉。

第5章:赵谦、周拥民、张立泉、鲍红权、马翠梅、郭洪伟、唐亦囡、朱梦蝶、乔志炜、董伟锋、匡宁、严洁、沈维海、范凌云、王志明、王蓉、江源。

第6章:师卓、黄英、万乐生、刘杨、黄松林。

第7章:祖群、肖永栋、唐泽辉、郭仁贤、姚远、韩利雄、宋伟、刘劲松、刘俊龙、张焱、李永艳、陈阳、王蓉、江源、刘红影、胡政芳、张琦。

本书编写过程中,北京玻璃钢复合材料有限公司肖永栋在前期组织撰写人员和素材收集方面做了大量工作;重庆国际复合材料有限公司姚远和武汉理工大学秦岩及他们所带领的团队为本书编写提供了相关资料。南京玻璃纤维研究设计院陈士洁组织专业团队制订本书各章节提纲,姜肇中、陈尚、陈世超、葛敦世、叶鼎铨、王健等玻璃纤维行业专家对稿件提出了宝贵的修改意见和建议。对此,特向所有对本书编著给出无私支持和帮助的专家、学者和领导们致以衷心的感谢!

本书编著历经数载,从章节构架到书中内容几易其稿,多次推敲,逐步更新补充,力求完善;但仍局限于现有的水平和有限的资料,书中尚有不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2016年5月

目录

Contents

第1章 绪论	001
1.1 引言	001
1.2 高性能玻璃纤维的种类及其特性	001
1.2.1 高力学性能玻璃纤维	003
1.2.2 良好介电性能玻璃纤维	005
1.2.3 耐高温玻璃纤维	006
1.2.4 耐辐照玻璃纤维	007
1.2.5 光导玻璃纤维	007
1.2.6 耐化学腐蚀玻璃纤维	008
1.2.7 其他高性能玻璃纤维	008
1.3 高性能玻璃纤维的开发历程	009
1.3.1 高强度玻璃纤维	012
1.3.2 高模量玻璃纤维	014
1.3.3 改性高模量高强度玻璃纤维	014
1.3.4 低介电玻璃纤维	016
1.3.5 耐辐照玻璃纤维	017
1.3.6 耐酸腐蚀玻璃纤维	017
1.3.7 耐碱腐蚀玻璃纤维	018
1.3.8 耐高温玻璃纤维	019
1.3.9 玄武岩纤维	020
1.4 高性能玻璃纤维的技术关键	021
1.4.1 纤维玻璃成分设计技术	021
1.4.2 高性能纤维玻璃熔制技术	024
1.4.3 高性能玻璃纤维成形技术	026
1.4.4 自动控制技术	027

1.4.5	玻璃纤维表面处理技术	028
1.4.6	玻璃纤维制品制造技术	029
1.4.7	玻璃纤维及制品评价技术	029
1.5	高性能玻璃纤维产业特点	030
1.6	高性能玻璃纤维发展方向	032
1.6.1	玻璃成分多样化及纤维高性能化	032
1.6.2	纤维系列化及制品定制化	034
1.6.3	产业信息化及制造智能化	035
1.6.4	制造绿色化	036
	参考文献	038

第2章 纤维玻璃基础 039

2.1	概述	039
2.2	纤维玻璃结构	041
2.2.1	玻璃结构的理论基础	041
2.2.2	纤维玻璃结构	044
2.3	纤维玻璃的基本性能	049
2.3.1	玻璃的物理性能	049
2.3.2	玻璃的化学性能	060
2.3.3	玻璃纤维的力学性能	066
2.3.4	影响纤维成形的玻璃性能	070
2.4	纤维玻璃成分	078
2.4.1	玻璃中阳离子分类与作用	078
2.4.2	高性能玻璃纤维成分	080
2.4.3	纤维玻璃成分设计	082
2.5	玻璃形成	091
2.5.1	玻璃形成的模型	091
2.5.2	玻璃形成经典热力学基本定律	093
2.5.3	玻璃熔体的黏度	096
2.5.4	玻璃的分相	100
2.5.5	玻璃的析晶	103
2.5.6	玻璃形成缺陷	106
2.6	连续玻璃纤维成纤过程	110
2.6.1	玻璃纤维的成纤特性	110

2.6.2	连续玻璃纤维成纤方式	113
2.6.3	连续玻璃纤维成纤原理	115
2.6.4	连续玻璃纤维成纤主要影响因素	119
	参考文献	123
第3章	玻璃纤维表界面	127
3.1	概述	127
3.2	表面处理及表征技术	128
3.2.1	玻璃纤维表面特性	128
3.2.2	玻璃纤维界面特性	130
3.2.3	界面的基本表征	135
3.2.4	复合材料界面力学表征	138
3.3	浸润剂	145
3.3.1	浸润剂作用与种类	145
3.3.2	增强型浸润剂	150
3.3.3	纺织型浸润剂	173
3.3.4	玻璃纤维生产工艺条件对浸润剂应用效果的影响	179
3.4	表面涂覆	181
3.4.1	表面涂覆方法	181
3.4.2	偶联剂表面处理	181
3.4.3	接枝表面处理	183
3.4.4	等离子体表面处理	185
3.4.5	稀土改性处理	185
3.4.6	酸碱刻蚀表面处理	186
3.5	黏结剂	187
3.5.1	非织造织物黏结剂种类	187
3.5.2	毡用粉末黏结剂	189
3.5.3	毡用乳液黏结剂	192
	参考文献	195
第4章	玻璃纤维制造技术	197
4.1	概述	197
4.2	原料与配合料	198
4.2.1	玻璃纤维生产所用原料	198

4.2.2	原料性能指标要求	199
4.2.3	配合料的制备	201
4.3	连续玻璃纤维制造技术	204
4.3.1	高性能纤维玻璃的熔制	204
4.3.2	连续玻璃纤维拉丝技术	237
4.3.3	浸润剂配制及输送	252
4.3.4	石英纤维拉丝技术	255
4.3.5	光纤制造技术	261
4.3.6	其他纤维成形方法	268
4.4	玻璃微纤维制造技术	271
4.4.1	火焰法生产工艺与装备	273
4.4.2	离心法生产工艺与装备	275
4.5	自动控制	279
4.5.1	配料控制系统	279
4.5.2	池窑拉丝控制系统	282
4.5.3	拉丝机控制系统	293
4.5.4	浸润剂自动配制	294
4.5.5	纺织设备控制	296
4.5.6	自动化物流	300
4.5.7	玻璃纤维制造信息化	302
4.6	节能与环保	303
4.6.1	节能减排	303
4.6.2	环保保护	305
4.7	工厂设计	310
4.7.1	工厂组成	310
4.7.2	工厂布局	311
4.7.3	设计要点	311
	参考文献	312

第5章 玻璃纤维制品及制造技术 315

5.1	概述	315
5.2	连续玻璃纤维制品	316
5.2.1	连续纱线	316
5.2.2	机织物	320

5.2.3	缝编织物	327
5.2.4	非织造织物	330
5.2.5	高硅氧玻璃纤维及制品	335
5.3	高性能纤维立体织物	335
5.3.1	立体织物分类	335
5.3.2	三维编织物	337
5.3.3	2.5D 机织物	340
5.3.4	2.5D 编织物	343
5.3.5	正交三向织物	345
5.3.6	缝合织物	346
5.3.7	三维机织中空织物	348
5.4	玻璃微纤维制品	349
5.4.1	微纤维制品生产方法	349
5.4.2	玻璃微纤维吸附性隔板	352
5.4.3	湿法 VIP 芯材	353
5.4.4	空气滤纸	354
5.4.5	玻璃微纤维液体滤纸	355
5.4.6	隔热隔声毡	356
5.5	表面涂覆织物	357
5.5.1	织物涂覆	357
5.5.2	表面涂覆材料	358
5.5.3	涂层织物应用	361
5.6	覆膜滤料	361
5.6.1	基体织物制备	362
5.6.2	ePTFE 膜的制备	364
5.6.3	热压复合覆膜	366
5.6.4	滤袋缝制	367
5.6.5	覆膜滤料应用	368
5.7	镀金属玻璃纤维制品	371
5.7.1	化学镀金属	372
5.7.2	热浸镀铅	375
5.7.3	镀金属玻璃纤维应用	378
5.8	光纤及其制品	379
5.8.1	多组分玻璃光纤	380

5.8.2	石英光纤制品	382
5.8.3	其他特种光纤制品	384
参考文献		386
第6章	玻璃纤维性能测试与评价	388
6.1	概述	388
6.2	玻璃纤维测试技术	390
6.2.1	基础物理性能	390
6.2.2	力学性能	398
6.2.3	化学性能	400
6.3	玻璃纤维制品性能评价方法与标准	408
6.3.1	纱线的性能	409
6.3.2	织物的性能	413
6.3.3	缝编织物的性能	416
6.3.4	立体织物结构参数	417
6.3.5	非织造制品的性能	426
6.3.6	微纤维玻璃棉的性能	428
6.4	玻璃纤维制品应用性能	433
6.4.1	复合材料性能	433
6.4.2	导热性能	440
6.4.3	吸声性能	444
6.4.4	过滤性能	449
6.4.5	其他性能	453
6.5	玻璃纤维标准化	454
6.5.1	国内外标准化概述	454
6.5.2	玻璃纤维测试方法标准	456
6.5.3	玻璃纤维产品标准	457
6.5.4	玻璃纤维基础标准	459
参考文献		459
第7章	高性能玻璃纤维应用	462
7.1	概述	462
7.2	高力学性能玻璃纤维的应用	463
7.2.1	高力学性能玻璃纤维制品	463

7.2.2	高力学性能玻璃纤维应用实例	470
7.3	耐热性能应用	496
7.3.1	石英玻璃纤维	496
7.3.2	高硅氧玻璃纤维	498
7.3.3	玄武岩纤维	504
7.3.4	其他耐热玻璃纤维	506
7.4	介电性能应用	507
7.4.1	雷达罩透波应用	507
7.4.2	印制电路板应用	515
7.5	玻璃纤维电绝缘性能的应用	516
7.6	耐辐照性能应用	518
7.6.1	玻璃纤维耐辐照性能	518
7.6.2	耐辐照玻璃纤维应用	520
7.7	光纤光学性能的应用	522
7.7.1	传光、传能及光信息传输	522
7.7.2	传像	529
7.7.3	传感	532
7.8	高性能玻璃纤维耐腐蚀性能的应用	536
7.8.1	耐酸玻璃纤维	536
7.8.2	耐碱玻璃纤维	539
7.8.3	玻璃纤维在海洋环境下的应用	546
7.9	生物医学应用	554
7.9.1	医用一次性使用耗材	554
7.9.2	骨修复材料	560
7.10	超细及特种截面玻璃纤维制品应用	561
7.10.1	超细玻璃纤维制品	561
7.10.2	特殊截面的玻璃纤维	566
7.11	高性能玻璃纤维应用开发趋势	567
	参考文献	570

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

玻璃是“由熔融物冷却硬化而得的非晶态固体”，广义的玻璃是指单质玻璃、无机玻璃和有机玻璃，狭义的玻璃是指无机玻璃，组分以阳离子氧化物为主，如硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃等。玻璃纤维属无机玻璃的一种形态，是将熔融玻璃借助外力拉伸、吹制或离心甩成极细的纤维。玻璃纤维有连续玻璃纤维和定长玻璃纤维两种。连续玻璃纤维主要用于复合材料增强材料，可制成纱线、织物、连续毡，或切割成短纤维。定长玻璃纤维用于保温、隔热或隔音等材料，如棉毡、棉板等。玻璃纤维发明于 20 世纪 30 年代，随着科学与技术的发展，玻璃纤维生产技术水平不断提升，生产能力快速增长，2012 年，全球连续玻璃纤维年产量达到 530 万 t，定长玻璃纤维（棉）达到 1000 万 t 以上。玻璃纤维种类中 E 玻璃（我国称无碱玻璃）纤维和 C 玻璃（我国称中碱玻璃）纤维开发较早，其中 E 玻璃纤维应用量大、面广，称为传统玻璃纤维，在玻璃纤维生产技术及玻璃纤维的市场需求的推动下，具有特定性能或特殊功能的高性能玻璃纤维增长迅速，虽目前总量不高，但对推动玻璃纤维行业技术进步、促进国民经济发展发挥重大作用。

本章对高性能玻璃纤维种类及特性和开发历程进行阐述，对高性能玻璃纤维的关键技术及发展进行综述，结合玻璃纤维行业状况分析高性能玻璃纤维产业特点，进一步提出高性能玻璃纤维发展方向。

1.2 高性能玻璃纤维的种类及其特性

高性能玻璃纤维是指与传统玻璃纤维相比，某些使用性能有显著提高，能够在外力、热、光、电等物理，以及酸、碱、盐等化学作用下具有更好的承受能力，它保留了传统玻璃纤维耐热、不燃、耐氧化等共性，更有着传统玻璃纤维所不具