



国防科技图书出版基金

聚酰亚胺泡沫材料

Polyimide Foam Materials

(第2版)

■ 詹茂盛 王凯 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

聚酰亚胺泡沫材料

Polyimide Foam Materials

(第2版)

詹茂盛 王 凯 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

聚酰亚胺泡沫材料/詹茂盛,王凯编著.—2版.—北京:国防工业出版社,2018.11

ISBN 978-7-118-11663-2

I. ①聚… II. ①詹… ②王… III. ①聚酰亚胺-泡沫塑料 IV. ①TQ323.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第237306号

※

新时代出版社

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 插页2 印张24 1/4

2018年11月第2版第1次印刷 印数1—2000册



(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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 柳荣普

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书 甘茂治

(按姓氏笔画排序) 甘晓华 卢秉恒 巩水利 刘泽金 孙秀冬

芮筱亭 李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威 陆 军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起 郭云飞

唐志共 陶西平 韩祖南 傅惠民 魏炳波

第2版前言

《聚酰亚胺泡沫》一书自2010年4月出版以来,深受业内同行们的关注,经常有同仁咨询购买该书和相关技术问题。

本书出版至今已8年,在此期间,国内外聚酰亚胺泡沫的研发和工业水平取得了很大发展,截至2018年1月,聚酰亚胺泡沫材料中国专利申请数为95件,其中90%是2010年4月第一版《聚酰亚胺泡沫》出版发行后发生的,相关科学研究更加深入,有多家企业实现聚酰亚胺泡沫材料量产,聚酰亚胺泡沫材料在舰船、航空航天、卫星、高铁、汽车、电子仪器等领域的应用不断扩大。聚酰亚胺是轻质、耐热材料领域的引领材料,我国已呈现快速发展态势。鉴于此,我们对该书进行修订、补充再版,为我国聚酰亚胺泡沫材料及其应用再尽绵薄之力。

在本书的再版中,我们将书名改为《聚酰亚胺泡沫材料》,增加了应用研究实例,补充了泡沫研究实例,补充了超临界二氧化碳发泡内容,调整了个别章节顺序,新增了耐更高温聚酰亚胺泡沫材料、电磁屏蔽聚酰亚胺泡沫材料以及附录。《聚酰亚胺泡沫材料》(第2版)由第1章绪论、第2章聚酰亚胺泡沫材料的主要组分与特性、第3章聚酰亚胺泡沫材料的发泡机理与成型工艺及实例、第4章聚酰亚胺泡沫材料的结构与性能、第5章增强聚酰亚胺泡沫材料、第6章耐更高温聚酰亚胺泡沫材料、第7章电磁屏蔽聚酰亚胺泡沫材料、第8章其他功能聚酰亚胺泡沫材料、第9章聚酰亚胺微发泡材料和附录构成。新增内容以自行实验研究结果为主,所述研究方法简化但行业人士可重复。由于聚酰亚胺泡沫材料研发十分活跃,资料收集、信息捕捉的遗漏难免,恳请读者和同行们指教。

詹茂盛和王凯负责修订及新增内容的编写等全部工作,潘玲英和马晶晶分别参与了第6章耐更高温聚酰亚胺泡沫材料和第7章电磁屏蔽聚酰亚胺泡沫塑料的部分编写工作。

本书再版得到了“国防科技图书出版基金”的资助,以及有关专家的荐举和鼓励,在此一并表示感谢,并向书中所有文献的作者表示深深敬意。

作者

2018年2月于北京

第 1 版前言

聚酰亚胺泡沫塑料是一类具有特定化学结构、耐高低温区域($-250\sim 450^{\circ}\text{C}$)最宽、无有害气体释放的轻质多孔材料。聚酰亚胺泡沫塑料种类多样,包括在微观/介观或宏观等不同尺度具有不同孔结构(开孔、闭孔或开/闭孔组合)的软质或硬质泡沫材料,在许多高技术领域可单独作为隔热、吸声或阻燃材料使用,也可用作先进复合材料支撑体和复合材料夹芯。

聚酰亚胺泡沫塑料发明于 20 世纪 60 年代,伴随着液化天然气管道、船舶运输、火箭、导弹、航天飞机、高速列车的牵引机车、坦克发动机及低温燃料储箱等高新技术领域对绝热保温、吸声等轻质复合材料需要的出现和增长而发展,21 世纪各高新技术领域对耐高低温轻质多孔材料的迫切需求进一步推动了聚酰亚胺泡沫塑料技术的发展与应用。目前,已有数十个国家将聚酰亚胺泡沫塑料作为海军舰船专用隔热、吸声材料;空客公司采用 Rohacell[®] IG 与 Rohacell[®] S 自熄型泡沫塑料制作 A380 副翼和气密隔板;我国第一代支线客机 ARJ21-700 采用 Rohacell[®] 刚性 PMI 泡沫塑料作为小翼和襟翼的芯材,采用 Solimide 软质聚酰亚胺泡沫塑料作为绝缘材料。

近 3 年来,发达国家致力于聚酰亚胺泡沫塑料的“低成本技术”研究,包括聚酰亚胺泡沫塑料单体的低成本和泡沫塑料成型产业化技术的低成本,事实表明:深度开发聚酰亚胺泡沫塑料综合技术是实现其低成本的基本保证。

聚酰亚胺泡沫及其复合材料涉及聚酰亚胺分子结构、泡孔结构设计、成型工艺、性能与功能设计和表征,以及发泡过程可视化等方面的研究,是近年来耐高温轻质聚合物材料领域的热点发展方向之一。目前,我国关于低密度、高强度和低成本聚酰亚胺泡沫塑料的技术开发仍处于起步阶段,为推动我国聚酰亚胺泡沫塑料的产业化发展和实际应用,解决诸多技术关键问题,对聚酰亚胺泡沫塑料的基础数据和资料进行归纳和提炼尤其重要。

作为多年从事航空航天、国防等聚酰亚胺材料科研和教学的总结,本书对作者自身相关特色研究成果和国内外同行最新研究文献进行了系统阐述,目的是通过聚酰亚胺泡沫塑料组分设计、制备工艺、性能与应用的介绍,进一步促进我国聚酰亚胺泡沫塑料方面科学与技术的发展。

本书内容包括:第 1 章绪论。主要简述聚酰亚胺泡沫塑料的概念、种类、技术

发展历史和趋势,以及聚酰亚胺泡沫塑料在航空航天和武器装备等领域的应用实例。第2章聚酰亚胺泡沫塑料的主要组分与特性。重点介绍热塑性和热固性聚酰亚胺泡沫塑料的材料组成及特性。第3章聚酰亚胺泡沫塑料的发泡机理与工艺。详细解说热塑性和热固性聚酰亚胺泡沫塑料的粉末发泡工艺与发泡机理。第4章聚酰亚胺泡沫塑料的结构与性能。比较系统地介绍了聚酰亚胺泡沫塑料聚集态结构与性能及其表征方法。第5章增强聚酰亚胺泡沫塑料。详细地介绍了微粒子、纤维和蜂窝增强聚酰亚胺泡沫塑料。第6章功能聚酰亚胺泡沫塑料。介绍了聚酰亚胺泡沫塑料的隔热、吸声降噪、低介电、电磁屏蔽、防辐射功能与表征方法。第7章聚酰亚胺微发泡材料。介绍了聚酰亚胺微发泡材料的组成与特性、发泡工艺、聚集态结构与性能等。在各章的最后均指出了拟解决的关键问题。在本书撰写工作中,詹茂盛负责封面和章节设计、参与全书撰写和全书审核,王凯参与第1章和第7章的撰写及部分修改工作,潘玲英参与第2章和第3章的撰写,沈燕侠参与第4章和第5章的撰写,李光珠参与第6章的撰写,全书由詹茂盛教授校对。

聚酰亚胺泡沫塑料是一种发展中的新材料,作者立足于聚酰亚胺泡沫塑料设计和成型工艺,同时注重发泡原理、泡孔结构与泡沫塑料性能,努力将本书编成具有资料收藏价值的参考书,限于作者水平,不足之处恳请读者和同行斧正。

本书撰写的内容得益于国家十一五“863”计划新材料技术领域“高性能结构材料专题项目”(2006AA03Z562)和多项航天基金项目的研究成果,以及某配套项目的推动;本书的出版得到了“国防科技图书出版基金”的资助,以及有关专家的荐举和鼓励。在此一并表示感谢,并向书中所有参考文献的作者表示深深敬意。

作者

2009年9月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 聚酰亚胺泡沫材料的种类	1
1.2 聚酰亚胺泡沫材料发展情况	2
1.3 聚酰亚胺泡沫材料的应用研究实例	8
1.3.1 航天领域应用研究实例	8
1.3.2 航空领域应用研究实例	12
1.3.3 交通运输领域应用研究实例	16
1.3.4 武器装备领域应用研究实例	18
1.3.5 其他领域应用研究实例	19
1.4 聚酰亚胺泡沫材料的发展与挑战	22
1.4.1 聚酰亚胺泡沫材料的高性能化	23
1.4.2 聚酰亚胺泡沫材料的低成本化	23
1.5 其他高性能泡沫材料简介	23
1.5.1 有机硅泡沫材料	23
1.5.2 聚苯并咪唑泡沫材料	24
1.5.3 MAA/AN 泡沫材料	25
参考文献	26
第 2 章 聚酰亚胺泡沫材料的主要组分与特性	30
2.1 概述	30
2.2 热塑性聚酰亚胺泡沫材料的组分及特性	30
2.2.1 热塑性聚酰亚胺泡沫材料基体材料	30
2.2.2 热塑性聚酰亚胺泡沫材料发泡剂	34
2.2.3 表面活性剂	41
2.3 热固性聚酰亚胺泡沫材料的组分及特性	41
2.3.1 PMI 泡沫材料	41
2.3.2 BMI 泡沫材料	51
2.3.3 异氰酸酯基聚酰亚胺泡沫材料	52
参考文献	53

第3章 聚酰亚胺泡沫材料的发泡机理与成型工艺及实例	57
3.1 概述	57
3.2 热塑性聚酰亚胺泡沫材料	57
3.2.1 粉末发泡成型工艺	58
3.2.2 粉末发泡机理	63
3.2.3 其他成型工艺	84
3.3 热固性聚酰亚胺泡沫材料	87
3.3.1 PMI 泡沫材料的发泡机理与成型工艺	87
3.3.2 BMI 泡沫材料的发泡机理与成型工艺	91
3.3.3 异氰酸酯基聚酰亚胺泡沫材料的发泡机理与成型工艺	94
3.4 实例	102
3.4.1 固相发泡泡沫实例	102
3.4.2 液相发泡泡沫实例	112
3.5 拟解决的关键问题	117
参考文献	117
第4章 聚酰亚胺泡沫材料的结构与性能	124
4.1 概述	124
4.2 聚酰亚胺泡沫材料的化学结构	124
4.3 聚酰亚胺泡沫材料的物理结构	127
4.3.1 聚酰亚胺泡沫材料的聚集态结构	127
4.3.2 聚酰亚胺泡沫材料的泡孔结构	129
4.4 聚酰亚胺泡沫材料的力学性能	138
4.4.1 聚酰亚胺泡沫材料力学性能表征	138
4.4.2 典型热塑性聚酰亚胺泡沫材料的力学性能	140
4.4.3 典型热固性聚酰亚胺泡沫材料的力学性能	146
4.5 聚酰亚胺泡沫材料的回弹性能	150
4.5.1 泡沫回弹性能的表征方法	150
4.5.2 典型聚酰亚胺泡沫材料的回弹性能	151
4.6 聚酰亚胺泡沫材料变形机制	151
4.6.1 聚酰亚胺泡沫材料的压缩变形机制	152
4.6.2 聚酰亚胺泡沫材料的拉伸变形机制	156
4.7 聚酰亚胺泡沫材料的耐热性能	157
4.7.1 聚酰亚胺泡沫材料的 DMTA 测试	158
4.7.2 聚酰亚胺泡沫材料的 DSC 测试	159
4.7.3 聚酰亚胺泡沫材料的 TG 测试	160

4.8	聚酰亚胺泡沫材料的燃烧性能	165
4.8.1	聚酰亚胺泡沫材料的氧指数	165
4.8.2	聚酰亚胺泡沫材料的辉光电线点燃性能	167
4.8.3	聚酰亚胺泡沫材料的水平/垂直燃烧性能	167
4.8.4	聚酰亚胺泡沫材料的辐射加热板测试	169
4.8.5	聚酰亚胺泡沫材料的锥形量热测试	171
4.9	聚酰亚胺泡沫材料的其他性能	173
4.9.1	聚酰亚胺泡沫材料的 LOX 力学冲击性能	173
4.9.2	聚酰亚胺泡沫材料的单轴拉伸性能	175
4.10	拟解决的关键问题	176
	参考文献	177
第5章	增强聚酰亚胺泡沫材料	180
5.1	概述	180
5.2	微粒子增强聚酰亚胺泡沫材料	180
5.2.1	在聚酰亚胺前驱体溶液中加入微粒子	180
5.2.2	在聚酰亚胺前驱体粉末中加入微粒子	183
5.2.3	在聚酰亚胺泡沫材料中加入微粒子	184
5.2.4	纳米微粒子原位增强聚酰亚胺泡沫材料	185
5.3	纤维增强聚酰亚胺泡沫材料	186
5.3.1	在聚酰亚胺前驱体溶液中加入纤维	186
5.3.2	在聚酰亚胺前驱体粉末中加入纤维	187
5.3.3	在纤维毡上沉积聚酰亚胺前驱体粉末	188
5.4	蜂窝增强聚酰亚胺泡沫材料	191
5.4.1	蜂窝材料简介	191
5.4.2	聚酰亚胺前驱体填充蜂窝	192
5.4.3	聚酰亚胺前驱体粉末填充蜂窝	194
5.4.4	聚酰亚胺前驱体微球填充蜂窝	194
5.5	拟解决的关键问题	206
	参考文献	207
第6章	耐更高温聚酰亚胺泡沫材料	210
6.1	概述	210
6.2	更高 T_g 的 α -BPDA 基聚酰亚胺泡沫材料	211
6.2.1	酰亚胺化温度对 α -BPDA 基聚酰亚胺泡沫性能的影响 ..	211
6.2.2	催化剂 2-乙基-4-甲基咪唑对 α -BPDA 基聚酰亚胺 泡沫性能的影响	214

6.2.3	表面活性剂对 α -BPDA基聚酰亚胺泡沫性能的影响	217
6.2.4	二胺结构对 α -BPDA基耐高温聚酰亚胺泡沫性能的影响	218
6.3	纳米蒙脱土填充固相发泡法耐高温聚酰亚胺泡沫材料	221
6.3.1	纳米蒙脱土填充 α -BPDA二酐聚酰亚胺泡沫材料	221
6.3.2	纳米蒙脱土填充 α -BPDA/ <i>p</i> -PDA聚酰亚胺泡沫材料的结构与性能	221
6.3.3	纳米蒙脱土填充 α -BPDA/ <i>m</i> -PDA聚酰亚胺泡沫材料的结构与性能	224
6.4	拟解决的关键问题	227
	参考文献	227
第7章	电磁屏蔽聚酰亚胺泡沫材料	229
7.1	概述	229
7.2	电磁屏蔽理论	230
7.2.1	电磁屏蔽基本原理	230
7.2.2	电磁屏蔽理论分析	231
7.3	电磁屏蔽聚酰亚胺泡沫材料的结构与性能	235
7.3.1	银纳米线杂化聚酰亚胺泡沫板的电磁屏蔽效能	235
7.3.2	银纳米球、线、片分别杂化聚酰亚胺泡沫板的电磁屏蔽效能	246
7.3.3	Ag-Fe ₃ O ₄ 核壳纳米线杂化聚酰亚胺泡沫板的电磁屏蔽效能	252
7.3.4	聚酰亚胺泡沫薄片的电磁屏蔽性能	255
7.3.5	低发泡倍率对聚酰亚胺泡沫电磁波透过率的影响	261
7.4	拟解决的关键问题	262
	参考文献	263
第8章	其他功能聚酰亚胺泡沫材料	265
8.1	概述	265
8.2	隔热聚酰亚胺泡沫材料	265
8.2.1	泡沫材料隔热原理与表征方法	266
8.2.2	聚酰亚胺泡沫材料隔热性能影响因素	268
8.2.3	几种聚酰亚胺泡沫材料的隔热性能	271
8.3	吸声聚酰亚胺泡沫材料	274
8.3.1	闭孔泡沫材料的吸声原理	274
8.3.2	开孔泡沫材料的吸声原理	275

8.3.3	泡沫材料吸声性能的代表方法	279
8.3.4	聚酰亚胺泡沫材料吸声性能影响因素	280
8.3.5	典型聚酰亚胺泡沫材料的吸声性能	282
8.4	低介电聚酰亚胺泡沫材料	285
8.4.1	泡沫材料的介电性能与表征方法	285
8.4.2	影响聚酰亚胺泡沫材料介电性的因素	286
8.4.3	聚酰亚胺泡沫材料介电常数的估算	290
8.5	防辐射聚酰亚胺泡沫材料	291
8.5.1	泡沫材料防辐射原理与表征方法	291
8.5.2	聚酰亚胺泡沫材料的防辐射性能	292
8.6	拟解决的关键问题	293
	参考文献	293
第9章	聚酰亚胺微发泡材料	296
9.1	概述	296
9.2	热分解法	297
9.2.1	原理	297
9.2.2	基体材料	297
9.2.3	可热分解材料	300
9.2.4	共聚聚酰亚胺的合成路线	302
9.2.5	成型工艺	306
9.2.6	聚集态结构表征	307
9.2.7	典型聚酰亚胺微发泡材料的性能与研究实例	312
9.3	超临界 CO ₂ 发泡法	321
9.3.1	超临界 CO ₂ 作发泡剂的聚酰亚胺微发泡泡沫	321
9.3.2	超临界 CO ₂ 作干燥剂的聚酰亚胺气凝胶	324
9.4	其他方法的聚酰亚胺纳米多孔材料	338
9.4.1	相反转法聚酰亚胺纳米多孔材料	338
9.4.2	添加笼形聚倍半硅氧烷粒子法聚酰亚胺纳米多孔材料	344
9.4.3	刻蚀法和萃取法聚酰亚胺纳米多孔材料	348
9.5	商品化聚酰亚胺微发泡多孔材料	350
9.6	拟解决的关键问题	352
	参考文献	352
附录		359
附录 1	典型聚酰亚胺泡沫材料品牌与性能	359
附录 2	材料名称缩写对照表	364

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Type of polyimide foams	1
1.2 Brief history of polyimide foams	2
1.3 Applications of polyimide foams	8
1.3.1 Astronautic applications	8
1.3.2 Aeronautic applications	12
1.3.3 Transportation applications	16
1.3.4 Military applications	18
1.3.5 Other applications	19
1.4 Development and challenge of polyimide foams	22
1.4.1 Performance increasing of polyimide foams	23
1.4.2 Cost decreasing of polyimide foams	23
1.5 Brief introduction of other high performance foams	23
1.5.1 Silicon foams	23
1.5.2 Polybenzimidazole foams	24
1.5.3 AN/MAA co-polymer foams	25
References	26
Chapter 2 Components and characteristics of polyimide foams	30
2.1 Introduction	30
2.2 Components and characteristics of thermoplastic polyimide foams	30
2.2.1 Thermoplastic polyimide matrix for polyimide foams	30
2.2.2 Blowing agents for thermoplastic polyimide foams	34
2.2.3 Surfactants	41
2.3 Components and characteristics of thermosetting polyimide foams	41
2.3.1 Polymethacrylimide (PMI) foams	41
2.3.2 Bismaleimide (BMI) foams	51
2.3.3 Polyimide foams based on isocyanate	52
References	53

Chapter 3 Mechanism and process of polyimide foaming	57
3.1 Introduction	57
3.2 Process and foaming mechanism for thermoplastic polyimide foams	57
3.2.1 Powdered precursors process	58
3.2.2 Foaming mechanism of powdered precursors process	63
3.2.3 Other processes	84
3.3 Foaming mechanism and process for thermosetting polyimide Foams	87
3.3.1 Foaming mechanism and process for PMI foams	87
3.3.2 Foaming mechanism and process for BMI foams	91
3.3.3 Foaming mechanism and process for polyimide foams based on isocyanate	94
3.4 Examples	102
3.4.1 Examples of solid phase foaming foams	102
3.4.2 Examples of liquid phase foaming foams	112
3.5 Problems	117
References	117
Chapter 4 Structure and properties of polyimide foams	124
4.1 Introduction	124
4.2 Chemical structure of polyimide foams	124
4.3 Physical structure of polyimide foams	127
4.3.1 Solid-state structure of polyimide foams	127
4.3.2 Cell structure of polyimide foams	129
4.4 Mechanical properties of polyimide foams	138
4.4.1 Characterization for mechanical properties	138
4.4.2 Mechanical properties of typical thermoplastic polyimide foams	140
4.4.3 Mechanical properties of typical thermosetting polyimide foams	146
4.5 Resilience of polyimide foams	150
4.5.1 Characterization	150
4.5.2 Resilience of typical thermoplastic polyimide foams	151
4.6 Deformation mechanism of polyimide foams	151
4.6.1 Compression deformation mechanism	152

4.6.2	Tensile deformation mechanism	156
4.7	Thermal properties of polyimide foams	157
4.7.1	DMTA for polyimide foams	158
4.7.2	DSC for polyimide foams	159
4.7.3	TGA for polyimide foams	160
4.8	Combustion properties of polyimide foams	165
4.8.1	Oxygen index	165
4.8.2	Glow wire ignition	167
4.8.3	Horizontal/vertical combustion properties	167
4.8.4	Radiant heat panel	169
4.8.5	Core calorimetry	171
4.9	Other properties of polyimide foams	173
4.9.1	Lox mechanical impact properties	173
4.9.2	Uniaxial tension properties	175
4.10	Problems	176
	References	177
Chapter 5	Reinforced polyimide foams	180
5.1	Introduction	180
5.2	Microparticle reinforced polyimide foams	180
5.2.1	Adding microparticle to polyimide precursor solution	180
5.2.2	Adding microparticle to polyimide precursor powder	183
5.2.3	Adding microparticle to polyimide foam	184
5.2.4	Nano-particles in situ reinforced polyimide foam	185
5.3	Fiber reinforced polyimide foams	186
5.3.1	Adding fiber to polyimide precursor solution	186
5.3.2	Adding fiber to polyimide precursor powder	187
5.3.3	Fiber mat reinforced polyimide precursor powder by deposition	188
5.4	Honeycomb reinforced polyimide foams	191
5.4.1	Introduction of honeycomb	191
5.4.2	Honeycomb filled with polyimide precursor foam	192
5.4.3	Honeycomb filled with polyimide precursor powder	194
5.4.4	Honeycomb filled with polyimide precursor microsphere	194
5.5	Problems	206
	Reference	207

Chapter 6 Resistance to supreme temperature polyimide foam	210
6.1 Introduction	210
6.2 α -BPDA based polyimide foams with high T_g	211
6.2.1 Influence of imidization temperature on properties of α -BPDA based Polyimide Foams	211
6.2.2 Effect of catalyst 2-ethyl-4-methyl imidazole on foam properties of α -BPDA based polyimide	214
6.2.3 Effect of surfactant on properties of α -BPDA based polyimide foam	217
6.2.4 Effect of structure of diamine of α -BPDA based high temperature resistant polyimide foam	218
6.3 Nanomontmorillonite filled solid phase foaming high-temperature polyimide foams	221
6.3.1 Nano montmorillonite filled with α -BPDA polyimide foam	221
6.3.2 Structure and properties of α -BPDA/ <i>p</i> -PDA polyimide foam filled with nano montmorillonite	221
6.3.3 Structure and properties of α -BPDA/ <i>m</i> -PDA polyimide foam filled with nano montmorillonite	224
6.4 Problems	227
Reference	227
Chapter 7 Electromagnetic interference shielding polyimide foam plastics	229
7.1 Introduction	229
7.2 Theoretical analysis of electromagnetic interference (EMI) shielding	230
7.2.1 Principle of EMI shielding	230
7.2.2 Theoretical analysis of EMI shielding	231
7.3 Structure and properties of EMI shielding polyimide foam	235
7.3.1 EMI shielding effectiveness of silver nanowire hybrid polyimide foam board	235
7.3.2 EMI shielding effectiveness of polyimide foam board mixed with silver nanospheres, wires and sheets	246
7.3.3 EMI shielding effectiveness of Ag-Fe ₃ O ₄ core-shell nanowire hybrid polyimide foam board	252