

高性能结构材料技术丛书

# 材料先进制备与 成形加工技术

---

谢建新 等著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

高性能结构材料技术丛书

# 材料先进制备与成形加工技术

谢建新 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书围绕“十五”863计划新材料技术领域高性能结构材料技术主题的六个重要研究专题之一——“材料先进制备、成形与加工技术”的研究工作，选择取得重要进展的20个有代表性的课题，由课题负责人结合国内外技术前沿与发展趋势撰写。主要内容包括传统材料的高性能低成本制备与加工技术、特殊外场作用下的制备与加工技术、成分-工艺-组织性能一体化控制技术、材料设计、制备与成形加工一体化技术、结构材料表面处理和改性技术等。

本书可以作为材料科技学者在科学研究、技术开发、工程实践和人才培养等工作方面的参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料先进制备与成形加工技术 / 谢建新等著. —北京: 科学出版社, 2007  
(高性能结构材料技术丛书)

ISBN 978-7-03-017994-4

I. 材… II. 谢… III. 工程材料-成形-加工-研究 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 104874 号

责任编辑: 姚庆爽 田士勇 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 刘士平 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 36 1/2

印数: 1—3 000 字数: 691 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈长虹〉)

“十五”国家 863 计划新材料技术领域  
《高性能结构材料技术丛书》编委会

顾 问 (以姓氏拼音字母为序)

杜善义 冯纪春 海锦涛 何天白 黄伯云  
廖小罕 刘久贵 刘治国 乔金梁 劭力勤  
王新林 吴以成 肖定全 许 京 殷庆瑞  
郑燕康 周 廉

主 任 徐 坚

副主任 谢建新 李建保

编 委 (以姓氏拼音字母为序)

卞曙光 丁文江 董 瀚 傅殿霞 傅正义  
黄世兴 姜振华 李建保 刘 兵 瞿金平  
田志凌 王琦安 谢建新 熊柏青 徐 坚  
薛忠民 朱衍平 左 良

## 《材料先进制备与成形加工技术》编委

(以姓氏汉语拼音字母为序)

邓安元	东北大学
韩静涛	北京科技大学
赫冀成	东北大学
赫晓东	哈尔滨工业大学
黄 勇	清华大学
黄卫东	西北工业大学
金泉林	北京机电研究所
李 周	北京航空材料研究院
李晓谦	中南大学
李益民	中南大学
李元元	华南理工大学
刘黎明	大连理工大学
孙冬柏	北京科技大学
田世藩	北京航空材料研究院
王恩刚	东北大学
王华明	北京航空航天大学
王自东	北京科技大学
肖荣诗	北京工业大学
肖志瑜	华南理工大学
谢建新	北京科技大学
徐 骏	北京有色金属研究总院
徐可为	西安交通大学
杨金龙	清华大学
杨思泽	中国科学院物理研究所
姚广春	东北大学
张国庆	北京航空材料研究院
赵永庆	西北有色金属研究院
郑永挺	哈尔滨工业大学

## 《高性能结构材料技术丛书》序

材料是人类赖以生存和发展的物质基础,也是社会现代化和高新技术发展的先导。高性能结构材料技术有力地支撑着现代交通运输、能源动力、资源环境、化工、建筑、航空航天、国防军工以及国家重大工程等领域的可持续发展,带动传统产业和支柱产业的升级改造与产品更新换代,促进包括新材料产业在内的高新技术产业的形成与发展。

“十五”期间,国家 863 计划新材料技术领域高性能结构材料技术主题紧密结合国民经济和社会发展重大需求,开展了战略性和前瞻性研究。研究内容主要包括高性能金属材料、先进陶瓷材料、高性能高分子材料、高性能低成本复合材料、先进建筑材料,以及先进制备、成形与加工技术等六个专题和研究开发环境(基地)建设。通过认真调研,制定战略规划,精心组织项目,严格管理规范,以及项目承担单位与研究人员的共同努力,突破了一批结构材料制备关键技术,产生了一批在国内外有较大影响、具有自主知识产权的新材料技术成果,在提升传统产业和支柱产业的国际竞争力,形成新的产业和新的经济增长点,培育具有开拓创新能力、能胜任国家重大攻关任务的新材料技术研发队伍,提高国家综合科技实力、巩固现代国防、保障重点工程建设、提高人民生活质量和促进社会可持续发展等方面,做出了重大贡献。

“十五”期间,863 计划高性能结构材料技术主题研究工作取得的主要成果包括:

申请专利 1412 项,其中发明专利 1195 项,国外发明专利 8 项,拟立的新材料技术标准和规范 10 项;

发表论著 5475 篇,主编或参与编写专著 30 部;

获得国家技术发明二等奖 4 项,国家科技进步二等奖 2 项,省、市科技进步奖一等奖 4 项、二等奖 3 项;

培养研究生 1845 名,一批中青年课题负责人成长为各个单位的学术带头人和技术骨干;

70%以上的课题有企业参与,在 200 家以上企业进行了工程化和产业化,7 项课题进入产业化示范工程项目;新材料产值达到 100 亿元以上,牵引社会资源和间接经济效益超过 200 亿元。

为了总结、展现上述成果,推动相关技术的进一步发展和产业化,高性能结构材料技术主题专家组组织部分取得代表性研究成果的课题负责人,编辑出版

《高性能结构材料技术丛书》，包括《先进钢铁材料》、《高性能变形镁合金及加工技术》、《镁合金科学与技术》、《先进聚合物基复合材料技术》、《先进陶瓷及无机非金属材料》、《高分子科学与工程》、《材料先进制备与成形加工技术》七个分册，是一件非常有意义的工作。希望这套丛书的出版，能为广大材料科技工作者提供有益的参考。

“十五”863 计划新材料技术领域专家委员会主任

中南大学校长、教授

中国工程院院士

中国科协副主席

黄伯云

2006 年 10 月

## 前 言

20世纪70年代开始,人们把信息、能源和材料誉为人类文明的三大支柱,把材料的重要性提高到了一个前所未有的高度。20世纪80年代以来又把新材料技术与信息技术、生物技术一起列为高新技术革命的重要标志。事实上,新材料和新材料技术的研究、开发与应用,反映着一个国家的科学技术与工业化水平。微电子技术、通信技术、超导技术、航空航天技术等,几乎所有的高新技术的发展与进步,都以新材料和新材料技术的发展和突破为前提。

关于材料先进制备、成形与加工技术的研究和开发,是目前材料科学技术中最活跃的领域之一。材料先进制备、成形与加工技术的发展,既对新材料的研究开发、应用和产业化具有决定性的作用,同时又可有效地改进和提高传统材料的使用性能,对传统材料产业的更新改造具有重要作用。发展材料先进制备、成形与加工技术,对于提高综合国力,保障国家安全,改善人民生活质量,促进材料科学技术自身的进步与发展具有重要作用,也是国民经济和社会可持续发展的重大需求。

材料先进制备、成形与加工技术是“十五”863计划新材料技术领域高性能结构材料技术主题的六个重要研究专题之一。该专题紧密结合国民经济和社会发展重大需求,重点开展了传统材料的高性能低成本制备与加工技术、特殊外场作用下的制备与加工技术、成分-工艺-组织性能一体化控制技术、材料设计、制备与成形加工一体化技术、制备与成形加工过程模拟与组织性能预报技术、结构材料表面处理和改性技术、先进评价与表征技术等方向的具有战略性和前瞻性的研究,突破了一批高性能结构材料制备与成形加工关键技术,发展了一批具有重要应用价值的实用化先进技术,为我国结构材料向高性能化、复合化、多功能化,以及短流程化、清洁化、低成本化生产方向发展提供了技术支撑。

为了认真总结“十五”863计划有关材料先进制备、成形与加工技术的研究开发经验与成果,推动相关技术的进一步发展和产业化,主题专家组选择了该研究专题中取得重要进展的20个有代表性的课题,邀请课题承担人员执笔,编写了《材料先进制备与成形加工技术》。各章内容是相关课题承担人员针对本领域的发展现状与前沿趋势,在进行了较为仔细深入的文献调研的基础上,结合课题研究进展撰写,具有较好的深度和广度。除执笔人员自身的研究成果之外,书中引用了国内外专家学者大量宝贵的研究成果资料,除尽可能在各章末尾参考文献中明示之外,谨在此一并表示崇高的敬意和衷心的感谢。

各章的执笔人员在文前和各章的末尾列出。全书由谢建新负责统稿。作者衷



心地希望,本书的出版能为我国材料科技工作者在科学研究、技术开发、工程实践和人才培养等方面发挥有益的参考作用。但由于作者水平的限制,各章的内容可能存在不完善之处,恳请读者予以指正。

谢建新

2006·中秋

# 目 录

## 《高性能结构材料技术丛书》序

### 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 材料制备与成形加工技术的作用与地位 .....	1
1.2 国内外发展现状 .....	2
1.2.1 快速凝固 .....	2
1.2.2 半固态成形 .....	3
1.2.3 无模成形 .....	3
1.2.4 超塑性成形技术 .....	5
1.2.5 金属粉末材料成形加工 .....	6
1.2.6 陶瓷胶态成形 .....	7
1.2.7 激光快速成形 .....	8
1.2.8 电磁场附加制备与成形加工 .....	9
1.2.9 先进连接技术 .....	10
1.2.10 表面改质改性 .....	12
1.3 主要发展方向.....	12
参考文献 .....	15
<b>第 2 章 铝电磁场快速连续铸轧</b> .....	18
2.1 前言.....	18
2.2 电磁场快速铸轧技术原理.....	20
2.2.1 组合磁场的形成原理 .....	21
2.2.2 电磁场快速铸轧电控系统.....	27
2.2.3 电磁场对快速铸轧凝固变形区组织形成与演变的影响 .....	28
2.3 电磁场快速铸轧的技术特点.....	31
2.3.1 电磁场快速铸轧的磁场形态特征 .....	31
2.3.2 电磁场快速铸轧的正弦扰动波对凝固界面的作用特征 .....	33
2.3.3 电磁场的参数匹配及其对快速铸轧金属结晶凝固的影响 .....	35
2.3.4 电磁场对铝合金快速铸轧组织细化与性能提高的实际效果 .....	36
2.4 最新研究进展.....	41
2.4.1 新型铝合金电磁场快速铸轧控制系统与装置.....	41

2.4.2	铝合金电磁场快速铸轧快凝环境的形成 .....	45
2.4.3	铝合金液固态组织在复合磁场与快凝环境下形成与演变的行为机理 .....	47
2.5	应用前景 .....	49
	参考文献 .....	50
<b>第3章</b>	<b>电磁软接触连铸 .....</b>	<b>51</b>
3.1	前言 .....	51
3.2	电磁软接触连铸技术的原理及工艺特点 .....	52
3.3	电磁软接触连铸技术的发展历史与现状 .....	53
3.4	电磁软接触连铸技术的最新研究进展 .....	55
3.4.1	方坯电磁软接触连铸技术 .....	55
3.4.2	矩形坯电磁软接触连铸技术 .....	61
3.4.3	圆坯电磁软接触连铸技术 .....	65
3.5	发展与应用前景 .....	69
	参考文献 .....	70
<b>第4章</b>	<b>钛合金连铸连轧技术 .....</b>	<b>73</b>
4.1	前言 .....	73
4.2	钛连铸连轧技术的发展 .....	73
4.3	钛连铸连轧技术国内研究进展 .....	74
4.3.1	钛的连铸连轧技术前期的基础研究进展 .....	74
4.3.2	半固态加工的力学性能 .....	83
4.3.3	钛的连铸连轧实现思路及设计 .....	87
4.4	发展前景 .....	87
	参考文献 .....	88
<b>第5章</b>	<b>高性能金属材料喷射成形技术 .....</b>	<b>89</b>
5.1	前言 .....	89
5.2	喷射成形技术原理和工艺 .....	89
5.2.1	技术原理 .....	89
5.2.2	工艺过程 .....	90
5.2.3	工艺特点 .....	91
5.2.4	雾化沉积规律 .....	92
5.3	喷射成形技术关键和装置 .....	95
5.3.1	装置结构(沉积器)布局 .....	95
5.3.2	雾化喷嘴系统 .....	96
5.3.3	喷射成形装置 .....	98
5.4	喷射成形材料特性 .....	99

5.4.1 晶粒组织	99
5.4.2 气体含量	99
5.4.3 宏观偏析	100
5.4.4 热塑性	100
5.4.5 力学性能	101
5.4.6 适用性	102
5.5 喷射成形材料的研究与应用	102
5.5.1 发展概况	102
5.5.2 喷射成形技术应用	104
5.5.3 喷射成形技术发展趋势和应用前景	108
参考文献	110
<b>第6章 轻合金半固态加工技术</b>	<b>112</b>
6.1 前言	112
6.2 半固态金属成形基本原理与方法	113
6.2.1 半固态金属成形基本原理	113
6.2.2 半固态金属成形方法	113
6.3 半固态金属触变成形技术	115
6.3.1 半固态金属浆料的制备	115
6.3.2 半固态金属坯料的二次加热	119
6.3.3 半固态金属的触变成形	122
6.4 半固态金属流变成形技术	124
6.4.1 国外研究进展	124
6.4.2 国内研究进展	128
6.5 半固态成形用铝合金材料	132
6.5.1 概述	132
6.5.2 半固态用传统铝合金的研究与应用	133
6.5.3 半固态用新型铝合金的研究与开发	135
6.5.4 半固态成形用合金的设计及热力学计算方法	138
6.6 半固态压铸技术及新型合金的应用与发展前景	144
6.6.1 半固态铝合金触变压铸工艺参数控制	144
6.6.2 工业化应用	148
6.7 结束语	149
参考文献	150
<b>第7章 泡沫铝材料制备</b>	<b>157</b>
7.1 前言	157

7.1.1	泡沫铝材料的特性	157
7.1.2	泡沫铝材料的用途	160
7.2	泡沫铝材料的发展状况	167
7.2.1	国外泡沫铝材料的研究进展	167
7.2.2	国内泡沫铝材料的研究现状	168
7.2.3	泡沫铝材料的发展趋势	169
7.3	泡沫铝材料制备的基础理论	169
7.3.1	TiH <sub>2</sub> 热分解	170
7.3.2	熔体的黏度	173
7.3.3	泡沫熔体的表面张力	174
7.3.4	液体中气泡特性	175
7.4	熔体直接发泡法制备泡沫铝材料技术	181
7.4.1	直接发泡法制备泡沫铝材料的国内外研究现状	181
7.4.2	直接发泡法制备泡沫铝材料的基本原理	182
7.4.3	熔体直接发泡制备泡沫材料的主要方法	183
7.4.4	直接发泡法制备泡沫材料工艺	184
7.4.5	工程化中易出现的问题与抑制措施	202
	参考文献	205
<b>第8章</b>	<b>钢质蜂窝夹芯板扩散-轧制复合</b>	<b>208</b>
8.1	前言	208
8.2	扩散-轧制复合技术基础	208
8.2.1	碳钢间无填充料扩散轧制复合模拟试验	209
8.2.2	碳钢间瞬间液相扩散复合模拟试验	213
8.2.3	钢板复合工艺试验	215
8.3	减振板开发	220
8.3.1	蜂窝夹芯减振板结构设计准则	220
8.3.2	蜂窝夹芯减振板结构设计变量的选取及目标函数的确定	220
8.3.3	多目标优化理论在蜂窝夹芯减振板结构设计中的应用	221
8.3.4	蜂窝夹芯减振板多目标优化程序设计	223
8.3.5	蜂窝夹芯减振板的试验研究	224
8.4	冷却壁用夹芯衬板	226
8.4.1	结构设计	226
8.4.2	冷却衬板芯体加工	226
8.4.3	冷却壁用夹芯衬板换热性能分析和测试	227
8.5	防弹板开发	231

8.5.1 钢/陶瓷/钢复合靶板的设计 .....	232
8.5.2 钢板/陶瓷/钢型复合装甲的结构参数探讨 .....	234
参考文献 .....	239
<b>第9章 金属超细丝材制备技术</b> .....	241
9.1 前言 .....	241
9.2 技术原理与工艺特点 .....	241
9.3 发展历史与最新研究进展 .....	244
9.3.1 发展历史 .....	244
9.3.2 最新研究进展 .....	247
参考文献 .....	252
<b>第10章 铝镁合金超塑性成形</b> .....	256
10.1 前言 .....	256
10.2 铝合金汽车覆盖件的超塑性成形 .....	256
10.2.1 铝合金汽车覆盖件超塑性成形技术的发展 .....	257
10.2.2 最新研究进展 .....	257
10.2.3 应用与发展前景 .....	264
10.3 镁合金超塑成形技术 .....	264
10.3.1 镁合金超塑成形技术的发展 .....	265
10.3.2 最新研究进展 .....	267
10.3.3 应用与发展前景 .....	277
参考文献 .....	277
<b>第11章 超细陶瓷粉末燃烧合成</b> .....	279
11.1 前言 .....	279
11.2 先进陶瓷超细粉末的合成方法 .....	280
11.2.1 气相法 .....	280
11.2.2 液相法 .....	281
11.2.3 固相法 .....	281
11.2.4 燃烧合成 .....	281
11.3 碳氮化钛超细粉体的还原法燃烧合成制备技术 .....	282
11.3.1 热力学分析 .....	283
11.3.2 燃烧合成反应机理研究 .....	284
11.3.3 工艺规律 .....	290
11.3.4 规模化产业化技术突破 .....	297
11.3.5 Ti(C,N)超细粉末在工业上的应用 .....	298
11.4 超细粉末合成技术发展展望 .....	299

参考文献	300
<b>第 12 章 粉末注射成形</b>	<b>303</b>
12.1 前言	303
12.2 金属粉末注射成形技术原理和工艺特点	305
12.2.1 金属粉末注射成形技术基本原理及其技术特点	305
12.2.2 金属注射成形的基本工艺过程	307
12.3 粉末注射成形的发展历史与最新进展及应用	323
12.3.1 粉末注射成形技术产业的发展与技术进展	323
12.3.2 粉末注射成形技术产业应用	325
参考文献	327
<b>第 13 章 陶瓷胶态注射成型新工艺</b>	<b>329</b>
13.1 前言	329
13.1.1 传统陶瓷成型工艺的特点	329
13.1.2 陶瓷原位凝固胶态成型工艺	331
13.2 胶态注射成型技术原理和工艺特点	334
13.3 胶态注射成型的最新研究进展	336
13.3.1 陶瓷浓悬浮体制备技术	336
13.3.2 陶瓷悬浮体的最佳固相体积分数	337
13.3.3 陶瓷浆料的可控固化	339
13.3.4 内应力的产生与消除	343
13.4 发展前景	345
参考文献	346
<b>第 14 章 粉末温压成形</b>	<b>349</b>
14.1 前言	349
14.2 温压成形技术及其特点	349
14.2.1 温压成形技术概况	349
14.2.2 温压工艺的特点	350
14.3 温压成形技术的发展历史与最新研究进展	352
14.3.1 温压成形技术的发展历史	352
14.3.2 温压成形技术的最新研究进展	352
14.3.3 温压成形技术的发展	367
参考文献	368
<b>第 15 章 激光快速成形</b>	<b>372</b>
15.1 前言	372
15.2 激光快速成形技术的发展历史和现状	373

15.3	高性能复杂结构钛合金零件的激光快速成形 .....	376
15.3.1	激光快速成形装备 .....	376
15.3.2	激光快速成形工艺性 .....	380
15.3.3	激光快速成形 TC4 钛合金组织 .....	385
15.3.4	激光快速成形钛合金零件的力学性能 .....	388
15.4	激光快速成形技术在钛合金结构件成形和修复中的应用 .....	388
15.4.1	飞机筋板类钛合金零件 .....	388
15.4.2	口腔医学应用 .....	389
15.4.3	激光快速修复 .....	390
15.5	激光快速成形技术的发展前景 .....	391
	参考文献 .....	391
<b>第 16 章</b>	<b>铝合金激光焊接 .....</b>	<b>394</b>
16.1	前言 .....	394
16.2	铝合金激光焊接基础 .....	395
16.2.1	铝合金激光深熔焊接功率密度阈值 .....	395
16.2.2	铝合金激光焊接光致等离子体的行为与控制 .....	398
16.2.3	焊接气孔 .....	401
16.2.4	焊接裂纹 .....	402
16.2.5	接头强度 .....	403
16.3	铝合金激光焊接工艺技术与装备 .....	406
16.3.1	采用填充焊丝的铝合金激光焊接 .....	406
16.3.2	采用填充粉末的铝合金激光焊接 .....	409
16.3.3	厚板铝合金窄间隙激光焊接 .....	414
16.3.4	采用辅助电流的铝合金激光焊接 .....	416
16.4	应用前景 .....	419
	参考文献 .....	419
<b>第 17 章</b>	<b>镁合金焊接技术 .....</b>	<b>422</b>
17.1	前言 .....	422
17.2	国内外发展现状及趋势 .....	424
17.2.1	国外发展现状 .....	424
17.2.2	镁合金焊接技术的发展趋势 .....	428
17.3	最新研究进展 .....	432
17.3.1	焊接工艺及装备 .....	432
17.3.2	镁合金焊接材料 .....	438
17.4	应用与发展前景 .....	441



参考文献	444
<b>第 18 章 模具表面渗注镀复合强化</b>	447
18.1 前言	447
18.2 技术原理与工艺特点	447
18.3 发展历史与最新研究进展	449
18.3.1 国内外发展历史与现状	449
18.3.2 渗注镀复合技术	451
18.3.3 复杂型腔模具内表面强化技术	459
18.3.4 工业应用	463
18.4 应用前景	465
参考文献	466
<b>第 19 章 金属管件内壁等离子体强化技术</b>	467
19.1 前言	467
19.2 等离子体源离子注入	467
19.3 栅极增强等离子体源离子注入方法工作原理	469
19.3.1 方法的提出	469
19.3.2 工作原理	471
19.4 GEPSII 方法的可行性数值计算研究	474
19.4.1 计算方法	474
19.4.2 计算结果与分析	476
19.5 45 号钢样品内表面等离子体源离子注入改性	479
19.5.1 实验方法	479
19.5.2 测试结果及讨论	480
19.6 栅网阴影效应及其改善	484
19.6.1 阴影效应	485
19.6.2 Monte Carlo 计算	487
19.6.3 阴影效应的改善	488
19.7 等离子体电解氧化管件内壁陶瓷化处理方法	490
19.7.1 管子内部电位分布对内壁等离子体电解沉积行为的影响	491
19.7.2 钢铁管件内壁陶瓷化处理方法	494
19.7.3 钢铁表面热浸镀铝陶瓷层的生成	496
19.8 发展历史与最新研究进展	500
19.9 应用前景	501
参考文献	501