

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

XINXING CAILIAO KEXUE YU JISHU

新型材料
科学与技术
金属材料卷

主 编 李元元
副主编 朱 敏 陈维平



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

国家“十二五”重点出版物出版规划项目

XINXING CAILIAO KEXUE YU JISHU

新型材料 科学与技术

金属材料卷

主 编 李元元
副主编 朱 敏 陈维平



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

新型材料科学与技术. 金属材料卷/李元元主编. —广州:华南理工大学出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-5623-3494-1

I. ①新… II. ①李… III. ①材料科学②金属材料 IV. ①TB3②TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 156450 号

新型材料科学与技术. 金属材料卷

李元元 主编

出版人: 韩中伟

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scute13@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

出版策划: 范家巧 潘宜玲

策划编辑: 潘宜玲

技术编辑: 杨小丽

责任编辑: 赖淑华 詹志青 赵鑫 欧建岸 何丽云 吴翠微 王建洲

印刷者: 广州家联印刷有限公司

开本: 889mm × 1194mm 1/16 印张: 62.25 字数: 1936 千

版次: 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 1 000 册

定价: 298.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

目 录

第一篇 材料成形与加工技术篇

1 先进的材料成形技术	3
1.1 引言	3
1.1.1 概述	3
1.1.2 材料成形工艺类型与特点	3
1.1.3 发展历史和现状	3
1.1.4 材料成形技术的发展趋势	4
1.1.5 主要内容	4
1.2 快速凝固非平衡材料制备技术	5
1.2.1 概述	5
1.2.2 金属材料快速凝固技术的原理	5
1.2.3 快速凝固工艺	8
1.2.4 典型的快速凝固材料	13
1.2.5 快速凝固技术的应用	13
1.3 电磁铸造	14
1.3.1 概述	14
1.3.2 电磁铸造原理和特点	15
1.3.3 电磁铸造基本理论	16
1.3.4 电磁铸造工艺	18
1.3.5 铸件的组织和性能	19
1.3.6 电磁铸造装置	20
1.4 金属半固态加工技术	21
1.4.1 概述	21
1.4.2 半固态金属组织形成机理与影响因素	23
1.4.3 半固态金属的制备方法	24
1.4.4 半固态金属触变成形	27
1.4.5 半固态金属流变成形	31
1.5 等通道转角挤压	36
1.5.1 概述	36
1.5.2 等通道转角挤压的工艺特点和原理	36
1.5.3 等通道转角挤压的工艺过程	38
1.5.4 等通道转角挤压材料的显微组织特征及其力学性能	40
1.5.5 等通道转角挤压材料与应用	42
1.6 超塑性成形	43

1.6.1	概述	44
1.6.2	超塑性变形理论	45
1.6.3	超塑性材料	47
1.6.4	超塑性成形工艺	50
1.6.5	超塑性成形的应用	51
	参考文献	53
2	粉末冶金技术	60
2.1	引言	60
2.2	金属雾化制粉技术	60
2.2.1	概述	60
2.2.2	雾化金属粉末的主要特征	61
2.2.3	水雾化法	63
2.2.4	气体雾化法	67
2.2.5	离心雾化法	74
2.2.6	其他新型雾化方法	77
2.2.7	雾化制粉的发展趋势	80
2.3	粉末冶金成形新技术	82
2.3.1	温压技术	82
2.3.2	流动温压技术	86
2.3.3	注射成形技术	90
2.3.4	模壁润滑技术	93
2.3.5	动磁压制技术	95
2.3.6	高速压制技术	98
	参考文献	103
3	激光材料加工技术	107
3.1	引言	107
3.2	激光切割	108
3.2.1	激光切割的原理及特点	108
3.2.2	激光切割设备	109
3.2.3	激光切割工艺	109
3.2.4	激光切割的应用	113
3.3	激光焊接	113
3.3.1	激光焊接的原理及特点	113
3.3.2	激光焊接设备	114
3.3.3	激光焊接工艺	115
3.3.4	激光焊接的应用	117
3.4	激光表面改性技术及应用	119
3.4.1	国内外激光表面改性技术发展概况	119
3.4.2	几种主要的激光表面改性技术简介	120
3.4.3	其他激光表面改性技术	127
3.5	激光快速成形	132
3.5.1	概述	132

3.5.2	立体光刻快速成形	134
3.5.3	选区激光烧结快速成形技术	143
3.5.4	送粉激光熔覆快速成形技术	148
3.5.5	选区激光熔化快速成形技术	151
	参考文献	159

第二篇 结构材料篇

4	新一代高性能结构钢	165
4.1	引言	165
4.1.1	概述	165
4.1.2	钢铁材料的发展	165
4.1.3	本章的主要内容	166
4.2	高性能钢的物理冶金基础	167
4.2.1	晶粒细化	167
4.2.2	贝氏体组织控制与细化	173
4.2.3	微合金化原理	179
4.3	高性能钢的工艺技术与性能	183
4.3.1	低碳贝氏体钢	183
4.3.2	高性能管线钢	190
4.3.3	先进高强度汽车用钢板	197
4.3.4	现代铁素体不锈钢	203
	参考文献	208
5	新型钛合金	213
5.1	引言	213
5.1.1	钛合金的发展历史和现状	213
5.1.2	钛的基本性质	213
5.1.3	钛合金中的其他元素	215
5.1.4	钛合金的分类	217
5.2	钛合金的相变与合金组织	218
5.2.1	钛合金的相变	218
5.2.2	钛合金组织对合金性能的影响	223
5.3	钛合金的熔炼、铸造及其后处理	225
5.3.1	钛合金的真空熔炼理论	225
5.3.2	钛合金的真空熔炼技术	226
5.3.3	钛合金的铸造成形	228
5.3.4	钛合金铸件的后处理	230
5.3.5	塑性成形技术	230
5.4	阻燃钛合金	233
5.4.1	阻燃钛合金的基础理论	233
5.4.2	Ti-V-Cr 系阻燃钛合金	234

5.4.3	Ti-Al-Cu 系阻燃钛合金	239
5.4.4	Ti-45Nb 合金	241
5.5	高温钛合金	241
5.5.1	高温钛合金的基础理论	241
5.5.2	TC4 合金	243
5.5.3	TC11 合金	244
5.5.4	IMI829 合金	245
5.5.5	Ti55 合金	246
5.5.6	Ti633G 合金、Ti53311S 合金和 Ti60 合金	247
5.5.7	Ti600 合金	248
5.5.8	7715D 合金	249
5.5.9	Ti1100 合金和 IMI834 合金	251
5.5.10	BT36 合金	252
5.5.11	BT25 合金	253
5.5.12	BT25Y 合金	256
5.5.13	Ti18 合金	257
5.6	耐蚀钛合金	260
5.6.1	耐蚀钛合金的基础理论	260
5.6.2	Ti31 合金	263
5.6.3	Ti-2Al-2.5Zr 合金和 Ti631 合金	264
5.6.4	β -C TM 合金	265
5.6.5	TB19 合金	268
5.6.6	CPI15 合金	268
5.6.7	Ti500 合金	271
5.6.8	Ti12 合金	273
5.6.9	新型耐蚀钛合金	273
5.7	医用钛合金	278
5.7.1	医用钛合金的基础理论	278
5.7.2	TMZF 合金	280
5.7.3	Ti-5Al-2.5Fe 合金	281
5.7.4	Ti-6Al-7Nb 合金	282
5.7.5	Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金和 Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr 合金	284
5.7.6	Ti-Nb-X 合金和 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金	285
5.7.7	Ti75 合金	287
5.7.8	TLM 合金	288
5.7.9	TLE 合金	290
5.7.10	TZNT 合金	291
5.7.11	TAMZ 合金、Ti-12Mo-6Zr-2Fe 合金	292
5.8	强韧钛合金	293
5.8.1	Ti-15-3 合金	293
5.8.2	β -21S 合金	298
5.8.3	TB2 合金	300

5.8.4	Ti-44528S 合金	301
5.8.5	Ti-10-2-3 合金	303
5.8.6	Ti-5523 合金	304
5.8.7	Ti-6-22-22S 合金	307
5.8.8	BT22 合金	308
5.8.9	TC21 合金	310
5.8.10	SP-700 合金	313
5.9	钛合金的应用	313
5.9.1	钛合金在航空航天及军事上的应用	313
5.9.2	钛合金在化工、汽车及能源等工业上的应用	314
5.9.3	钛合金在日常生活领域中的应用	315
	参考文献	316
	附录 钛合金的生产厂家	321
6	高性能镁合金	322
6.1	引言	322
6.1.1	镁合金的发展历史与现状	322
6.1.2	镁合金的物理性能和加工性能	323
6.1.3	镁的合金化及组织设计	325
6.1.4	镁合金系列	330
6.1.5	镁合金的研究与发展方向	332
6.2	阻燃镁合金	333
6.2.1	镁的合金化阻燃机理	333
6.2.2	阻燃镁合金的主要合金系	337
6.3	耐热镁合金	339
6.3.1	提高镁合金耐热性能的机理	339
6.3.2	合金元素对镁合金耐热性能的影响	340
6.3.3	耐热镁合金的主要合金系	342
6.4	高强镁合金	349
6.4.1	镁合金的强化机理	349
6.4.2	高强镁合金的主要合金系	349
6.4.3	高强镁合金的制备工艺	351
6.5	变形镁合金	351
6.5.1	镁合金的塑性变形机理	352
6.5.2	变形镁合金的主要合金系	352
6.5.3	变形镁合金的加工性能	354
6.5.4	镁合金的塑性加工技术	355
6.6	快速凝固镁合金	361
6.6.1	快速凝固镁合金的强化机制	361
6.6.2	快速凝固镁合金的组织及性能特征	362
6.6.3	镁合金的快速凝固工艺及快速凝固镁合金产品	364
6.7	镁合金的熔炼与铸造	368
6.7.1	镁熔体与周围介质的作用	368

6.7.2	镁合金的熔炼	369
6.7.3	镁合金的铸造成形工艺	372
6.7.4	镁合金压铸设备	376
6.8	镁合金的应用	376
6.8.1	镁合金在汽车上的应用	376
6.8.2	镁合金在电子工业中的应用	377
6.8.3	镁合金在国防军事工业的应用	378
6.8.4	镁合金在其他行业的应用	379
6.8.5	我国的镁合金发展战略	379
	参考文献	379
7	高性能铝合金	386
7.1	引言	386
7.1.1	铝合金的发展历史与现状	386
7.1.2	铝合金的分类及其特点	387
7.1.3	铝合金的合金化与合金相	390
7.1.4	铝合金的强化及其应用	395
7.1.5	铝合金的研究与发展方向	397
7.2	超高强度铝合金	399
7.2.1	超高强度铝合金研究概况	399
7.2.2	超高强度铝合金的强化机理	402
7.2.3	超高强度铝合金热处理新技术	405
7.2.4	主要的超高强度铝合金	407
7.3	耐损伤铝合金	413
7.3.1	耐损伤铝合金研究概况	413
7.3.2	耐损伤铝合金的合金化机理与微观结构特征	414
7.3.3	微观结构对航空铝合金疲劳损伤行为的影响	419
7.3.4	主要的耐损伤铝合金	420
7.4	耐热铝合金	426
7.4.1	耐热铝合金研究概况	426
7.4.2	耐热铝合金的合金化	428
7.4.3	耐热铝合金的耐热机理	429
7.4.4	主要的耐热铝合金	430
7.5	铝锂合金	437
7.5.1	铝锂合金研究概况	437
7.5.2	铝锂合金的合金化与微合金化机理	439
7.5.3	改善铝锂合金性能的主要途径	441
7.5.4	主要的铝锂合金	443
7.6	铝钪合金	450
7.6.1	铝钪合金研究概况	450
7.6.2	钪与铝合金中合金元素的相互作用	451
7.6.3	钪对铝合金组织与性能的影响	453
7.6.4	主要的铝钪合金	454

7.7	高性能铝合金制备新技术	470
7.7.1	喷射成形技术	470
7.7.2	机械合金化技术	473
7.7.3	挤压铸造技术	474
7.8	铝合金的主要应用	475
7.8.1	在航空航天领域中的应用	475
7.8.2	在交通运输领域中的应用	476
7.8.3	在建筑与桥梁结构上的应用	476
7.8.4	在机械制造业中的应用	476
7.8.5	在电力电子和电器工业中的应用	477
7.8.6	在包装和容器工业中的应用	477
	参考文献	478
8	耐磨钢铁材料	484
8.1	引言	484
8.1.1	概述	484
8.1.2	耐磨钢铁材料基本原理	484
8.1.3	耐磨白口铸铁的基本特点	486
8.2	耐磨钢铁材料制备技术	488
8.2.1	铸造	488
8.2.2	热处理	489
8.2.3	耐磨白口铸铁焊接与机加工	497
8.3	耐磨钢铁材料分类	497
8.3.1	耐磨白口铸铁分类	497
8.3.2	耐磨球墨铸铁分类	514
8.3.3	耐磨铸钢分类	516
8.4	耐磨钢铁材料应用和我国耐磨钢铁件企业	520
8.4.1	耐磨白口铸铁的应用	520
8.4.2	耐磨球墨铸铁的应用	521
8.4.3	耐磨铸钢的应用	521
8.4.4	我国部分耐磨钢铁材料生产企业	522
	参考文献	523
9	耐磨锌合金	525
9.1	引言	525
9.1.1	概述	525
9.1.2	发展历史和现状	525
9.1.3	本章的主要内容	526
9.2	锌合金基本知识	526
9.2.1	锌的结构及其物理与化学性质	526
9.2.2	锌合金中常用元素的基本性能及其对合金性能的影响	528
9.2.3	锌铝合金的类型及特性	530
9.3	主要的耐磨锌合金	533

9.3.1	ZA27 合金	533
9.3.2	ZA11 合金	536
9.3.3	ZA43 合金	537
9.4	耐磨锌合金的主要特性	537
9.4.1	力学性能	537
9.4.2	摩擦磨损特性	542
9.4.3	工艺性能	543
9.5	耐磨锌合金的应用	547
9.5.1	衬瓦	547
9.5.2	托轮瓦	548
9.5.3	轴套	549
9.5.4	螺母	551
	参考文献	552
10	金属基复合材料	553
10.1	引言	553
10.1.1	概述	553
10.1.2	发展历史和现状	553
10.2	金属基复合材料基础知识	557
10.2.1	金属基复合材料的分类及其特点	557
10.2.2	复合材料设计原则	560
10.2.3	增强体及其预处理	570
10.2.4	金属基复合材料的界面	579
10.2.5	强韧化机制与失效准则	587
10.3	制备方法及加工技术	595
10.3.1	固相制备工艺	596
10.3.2	主要的液相制备工艺	597
10.3.3	原位反应合成及其他技术	599
10.4	铝基复合材料的应用及性能	605
10.4.1	铝基复合材料的应用	605
10.4.2	连续纤维增强铝基复合材料的性能	607
10.4.3	短纤维/晶须增强铝基复合材料的性能	617
10.4.4	颗粒增强铝基复合材料的性能	621
10.5	镁基复合材料的应用及性能	624
10.5.1	镁基复合材料的应用	624
10.5.2	连续纤维增强镁基复合材料的性能	626
10.5.3	短纤维/晶须增强镁基复合材料的性能	627
10.5.4	颗粒增强镁基复合材料的性能	628
10.6	钛基复合材料的应用及性能	632
10.6.1	钛基复合材料的应用	632
10.6.2	连续纤维增强钛基复合材料的性能	632

10.6.3 颗粒增强钛基复合材料的性能	634
10.7 铁基复合材料及高温用金属基复合材料	636
10.8 其他基体的金属基复合材料	639
参考文献	642

第三篇 功能材料篇

11 稀土磁性材料	651
11.1 引言	651
11.1.1 物质磁性的来源和分类	651
11.1.2 发展历史和现状	653
11.2 硬磁材料	655
11.2.1 稀土永磁材料的特性	655
11.2.2 Co 基稀土永磁材料的新技术与新进展	667
11.2.3 第三代稀土永磁材料——Nd-Fe-B 永磁材料	674
11.2.4 稀土合金化高性能铁氧体永磁材料及其研究进展	678
11.2.5 纳米复合高性能稀土永磁材料	687
11.2.6 稀土永磁薄膜材料	694
11.3 软磁材料	698
11.3.1 软磁材料的分类和应用特性	698
11.3.2 高频低功耗软磁材料	708
11.3.3 高磁导率软磁材料	714
11.3.4 高 B_s 、高 DC - Bias 特性软磁材料	728
11.3.5 高 B 高 Q 低 THD 软磁材料	730
11.3.6 其他软磁材料及薄膜软磁材料	731
参考文献	733
12 形状记忆合金	738
12.1 引言	738
12.1.1 概述	738
12.1.2 形状记忆效应和超弹性效应	738
12.1.3 主要的形状记忆合金材料	739
12.2 合金形状记忆效应的基本原理	740
12.2.1 形状记忆效应与马氏体相变	740
12.2.2 超弹性效应与应力诱发马氏体相变	742
12.2.3 形状记忆效应和超弹性效应的晶体学机制	743
12.2.4 双程记忆效应与全程记忆效应的机制	746
12.2.5 具有非热弹性马氏体相变的合金的形状记忆机制	747
12.3 形状记忆合金材料的组织与性能关系	748
12.3.1 NiTi 基记忆合金	748
12.3.2 Cu 基记忆合金	762
12.3.3 Fe 基记忆合金	773
12.3.4 多孔形状记忆合金	778

12.4	形状记忆合金的制备方法以及加工技术	784
12.4.1	熔炼和铸造	785
12.4.2	热加工和冷加工	788
12.4.3	机械加工与切割	791
12.4.4	定型处理(热处理)	792
12.5	形状记忆合金的应用	793
12.5.1	工程应用	793
12.5.2	医学应用	797
12.5.3	航天和军事应用	800
12.5.4	微机械(MEMS)	801
	参考文献	802
13	金属储氢材料	807
13.1	引言	807
13.1.1	概述	807
13.1.2	储氢合金的发展历史与现状	807
13.1.3	金属储氢材料的分类	808
13.2	金属储氢的基本原理	809
13.2.1	金属储氢的热力学	809
13.2.2	储氢合金吸、放氢过程的动力学	811
13.2.3	储氢合金中界面的作用	813
13.2.4	储氢合金中应力场的作用	815
13.3	储氢合金的制备方法	815
13.3.1	高温熔炼法	816
13.3.2	机械合金化方法	817
13.3.3	燃烧合成法	823
13.3.4	烧结法	825
13.3.5	气相沉积法	825
13.4	主要的储氢合金材料及其储氢特性	827
13.4.1	对储氢合金的基本要求	827
13.4.2	主要的储氢合金及其基本性能特点	828
13.4.3	非平衡结构储氢合金及其性能特点	851
13.4.4	改善储氢合金性能的方法	857
13.5	储氢合金材料的应用	868
13.5.1	储氢合金做电池负极材料	868
13.5.2	金属氢化物热泵	871
13.5.3	储氢合金燃料箱	876
13.5.4	氢的回收、提纯与精制	877
13.5.5	用作催化剂	878
	参考文献	880
14	电子封装和光子封装用金属材料	898
14.1	电子封装工程简介	898
14.1.1	电子封装的层次和要求	899

14.1.2	电子封装材料概述	900
14.1.3	电子封装与光电子封装	901
14.2	芯片和元器件中所用金属材料	903
14.2.1	微连接金属引线	904
14.2.2	引线框架金属	905
14.2.3	金属浆料	906
14.2.4	金属及金属基复合材料基板材料	907
14.2.5	陶瓷基板表面金属化材料	909
14.2.6	印制线路板中的金属材料	911
14.2.7	导电黏结剂中的金属材料	912
14.2.8	散热片用金属材料	914
14.3	电子封装用钎焊材料	915
14.3.1	微连接及表面组装钎焊工艺及材料	915
14.3.2	传统的锡-铅钎料	916
14.3.3	无铅钎料	918
14.4	光电子系统封装及材料	924
14.4.1	概述	924
14.4.2	光子系统构成	926
14.4.3	光电子器件封装	928
14.4.4	光电子封装技术需求与新材料	933
14.4.5	光电子封装钎焊技术与材料	939
14.5	现代封装技术发展趋势及对封装材料的要求	944
14.5.1	电子封装技术的发展趋势	944
14.5.2	封装材料面临的挑战	954
14.6	封装材料及封装结构可靠性的典型问题	956
14.6.1	低介电常数材料的应用与封装	956
14.6.2	微凸点与凸点下金属化层层间反应	958
14.6.3	焊点电迁移问题	962
	参考文献	969

第一篇 材料成形与加工技术篇

1 先进的材料成形技术

1.1 引言

1.1.1 概述

材料科学是现代文明的三大支柱之一，是国民经济及其他高新技术发展的基础和先导。因此，新材料被列为我国重点资助的四大研究领域之一。新材料科学技术的目标是人工制造耐超高温、超高压、超高强度、高速信息传输和常温下表现超导等特殊性能的材料。在材料加工领域，开发新技术、采用新工艺是制备新材料的前提。

材料成形加工是制造业的重要组成部分，是发展高新技术产业和传统工业更新换代的重要科学基础和共性技术，对我国国民经济的发展和国防力量的增强有重要作用。由于近代科学技术的发展，特别是材料科学和制造科学的发展，出现了许多新一代材料制备成形加工技术，而轻量化及近净成形加工技术则是重要的发展趋势。根据材料的服役效能来调整成分、组织、结构，进而对材料的制备工艺进行设计，将使材料在强韧性、抗摩擦、抗冲击、抗腐蚀等方面的性能大大提高，对材料科学的全面发展起关键的促进作用。

1.1.2 材料成形工艺类型与特点

按照加工过程中材料质量的变化情况，材料成形过程可分为三类。第一类是质量减少过程，加工过程中原材料经过加工后成为产品与工艺废料两部分，如机械切削加工；第二类是质量增加过程，加工过程中产品由几部分组合而成，如焊接、组装、连接工艺；第三类为质量不变过程，加工过程中原材料与产品的质量相等或相近，如凝固成形、塑性成形等。

按照加工材料的形态变化，生产中一般将材料加工工艺分为两类，即机械加工艺和材料成形工艺。机械加工艺主要是指利用刀具或磨具对立体形原材料进行切削加工的工艺过程；而材料成形工艺主要是指利用材料的塑性变形、流变特征进行的加工工艺过程和针对板状材料进行的切割、连接工艺过程。

1.1.3 发展历史和现状

过去的20年，制造业的水平发生了巨大变化。新科技、新材料的出现促使材料成形加工技术的进一步发展及深刻变革，全新的成形加工方法与工艺不断涌现，传统加工方法不断改进并走向工艺综合，材料成形加工技术则逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。

目前国外铸造领域的研究热点是以凝固理论为基础，研制新型铸造合金、开发传统合金的改性，并落实在先进精密成形工艺与装备方面。从国际上看，大部分凝固理论的基本概念和观点都是外国学者提出来的；在半固态成形方面，奠基性的理论是由MIT的学者提出来的；在塑性成形领域，国际上在航空、航天、精密仪器和医疗器械等行业，虽然广泛应用了超塑性技术，但在变形和成形的力学