

New Hot Processing Technology

精密热加工新技术

■ 苑世剑 等著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

精密加工技术

New Hot Processing Technology

苑世剑 等著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

精密热加工新技术 / 苑世剑等著. —北京:国防工业出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-118-10838-5

I. ①精… II. ①苑… III. ①热加工 IV. ①TG306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 079938 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 23¼ 字数 520 千字

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 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

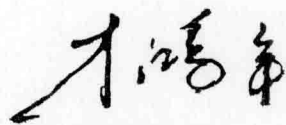
发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

我应金属精密热加工国防科技重点实验室创始人赵连城院士的邀请,担任该实验室学术委员会主任。给我留下深刻印象的是实验室主任苑世剑教授及其带领的团队不仅在金属精密热加工领域基础理论扎实、治学严谨,而且具有很强的创新精神,能紧密围绕航空航天等国防装备的重大需求,结合热加工领域的学术前沿,不断地研发热加工新技术、新工艺及新装备。特别是,近年来以“凝热聚力、工艺精湛”的理念,不断拓展研究的深度,取得了一批高水平的研究成果。最近,苑世剑教授给我寄来由他组织编写的《精密热加工新技术》一书初稿,希望作序,我欣然应允。

该书具有两个显著的特点,一是具有新颖性和原创性。系统地介绍了13项热加工新技术,包括轻量化整体复杂结构、轻质耐热材料(TiAl 金属间化合物等)及超高温材料(NiAl/NbSi 金属间化合物等)热加工技术,这些技术均是近年来热加工领域的最新科研成果。作者把获得的实验数据和亲身的体会总结撰写成书,这有别于将文献汇总或综述,使得该书具有很强的原创性。二是学术性和应用性结合紧密。不仅介绍了每一种新技术的基本原理、特点及适用范围,结合典型件介绍了关键技术及工艺参数的确定,而且重点介绍了相关的基础科学问题,包括应力与组织演变规律、缺陷形成机理、材料模型等,对于从事相关热加工工作的设计、工艺和研究人员具有很好的参考价值。

目前,我国正在实施《中国制造2025》行动计划,我相信《精密热加工新技术》一书的出版,会对我国这一领域的新技术研发与成果转化发挥良好的推动作用,为制造强国贡献一份力量。我借此机会祝愿金属精密热加工国防科技重点实验室不断取得更多的科研成果,为国防科技的发展做出新的贡献。



2015年7月

前言

精密热加工技术是制造高性能复杂形状构件的关键技术,是先进制造技术的重要组成部分。精密热加工技术鲜明的特点是在获得近净复杂形状构件的同时,通过从原材料到最终构件的全工艺过程调控,改善构件内部组织,从而提高构件的综合力学性能。近年来,随着航空、航天等高端装备向长寿命、高可靠性、超高速飞行和隐身方向的发展,新结构新材料不断出现,直接推动了新型热加工技术的研发。本书重点介绍了面向轻质高强材料、轻质耐高温/超高温材料、轻量化结构、整体化结构及结构功能一体化发展的精密热加工新技术,这些新技术已显示出具有良好的发展前景和应用价值。

本书第1章由苑世剑编写;第2章由苑世剑、何祝斌、刘钢编写;第3章由何祝斌、凡晓波、苑世剑编写;第4章由徐永超、苑世剑编写;第5章由卢振编写;第6章由苏彦庆、王亮编写;第7章由孔凡涛编写;第8章由王宏伟、邹鹑鸣编写;第9章由丁宏升编写;第10章由骆良顺、苏彦庆、王亮编写;第11章由黄陆军、耿林编写;第12章由姜建堂、邵文柱编写;第13章由高智勇编写;第14章由唐光泽编写。苑世剑拟定全书编写提纲,组织编写,对全书进行统稿和文字润色。张跃冰副研究员和卢振副教授承担了书稿的整理工作。

本书作者均长期工作在教学科研第一线,在热加工技术领域有着多年的科研实践,在编写中以自己的第一手科研成果为主。本书采用的科研成果主要为金属精密热加工国防科技重点实验室基金和国家自然科学基金资助的课题,很多研究结果和数据来源于众多研究生的学位论文,作者在此表示衷心感谢。书中还引用了国内外学者的相关研究成果,也向他们致以谢意。

由于时间紧张和水平所限,书中难免有疏漏与不妥之处,敬请同行和读者批评指正,在此表示衷心感谢。

编著者
2015年10月

目 录

第1章 绪 论

1.1 精密热加工技术种类与重要性	1
1.2 航空航天领域热加工技术发展趋势	3
1.2.1 轻量化结构精密热加工技术	3
1.2.2 整体化结构精密热加工技术	4
1.2.3 结构功能一体化精密热加工技术	5
1.2.4 超高温材料构件精密热加工技术	6
参考文献	7

第2章 轻合金管材热态内压成形技术

2.1 概述	8
2.2 铝合金管材热油介质成形技术	9
2.2.1 热油介质成形设备	9
2.2.2 热油介质等温成形	11
2.2.3 热油介质差温成形	15
2.3 铝合金管材热态气压成形技术	18
2.3.1 热态气压成形设备	18
2.3.2 铝合金管热态胀形成形性能	20
2.3.3 铝合金空心变截面构件热态气压成形	22
2.4 镁合金管材热态内压成形技术	25
2.4.1 镁合金管环向及自由胀形性能	25
2.4.2 镁合金空心变截面构件热态内压成形	28
2.5 钛合金管材高压气胀成形技术	31
2.5.1 TA18 钛合金管材高温力学性能	31
2.5.2 钛合金变径管高压气胀成形	33
2.5.3 补料量对变径管壁厚分布的影响	35
2.5.4 高压气胀成形变径管微观组织	36
参考文献	38

第3章 铝合金板材冷热复合模成形技术

3.1 概述	40
3.2 冷热复合模成形技术原理与特点	41

3.2.1	冷热复合模成形技术原理	41
3.2.2	冷热复合模成形技术特点	43
3.3	固溶态铝合金板材变形行为	43
3.3.1	高温变形机制	43
3.3.2	高温力学性能	44
3.3.3	高温胀形性能	45
3.3.4	高温断裂行为	46
3.4	冷热复合模成形过程强化规律	47
3.4.1	可热处理强化铝合金	47
3.4.2	强度变化规律	48
3.4.3	析出相演变规律	50
3.5	冷热复合模成形装置关键技术	52
3.6	冷热复合模成形技术应用	53
	参考文献	54

第4章 轻合金板材背压温热拉深成形技术

4.1	概述	56
4.1.1	板材背压温热拉深成形原理	56
4.1.2	板材背压温热拉深成形的特点	57
4.1.3	板材背压温热拉深的适用范围	57
4.1.4	板材背压温热拉深的国内外研究现状	57
4.2	板材温热背压拉深成形装置	58
4.2.1	板材温热背压拉深模具	58
4.2.2	板材温热背压拉深压力控制系统	60
4.2.3	板材温热背压拉深加热系统	61
4.3	温热背压拉深缺陷形式与形成机制	62
4.3.1	破裂缺陷	62
4.3.2	起皱缺陷	64
4.3.3	表面缺陷	65
4.4	5A06 铝合金筒形件背压温热拉深成形	65
4.4.1	试件材料及尺寸	65
4.4.2	温度对壁厚及缺陷的影响	66
4.4.3	颗粒大小及颗粒介质背压对表面质量的影响	68
4.4.4	温热背压拉深成形温度与背压的匹配	70
	参考文献	71

第5章 NiAl 合金电脉冲辅助热塑性成形技术

5.1	概述	73
5.2	NiAl 合金材料电脉冲辅助快速制备技术	75

5.2.1	NiAl 粉体的机械合金化	75
5.2.2	NiAl 合金材料电脉冲辅助快速制备工艺	78
5.3	NiAl 合金电脉冲辅助高温变形规律及微观组织演变	83
5.3.1	电流作用下 NiAl 合金高温变形行为	83
5.3.2	电流辅助 NiAl 合金高温变形过程微观组织演变	87
5.4	NiAl 合金构件电脉冲辅助塑性成形工艺与性能	89
5.4.1	NiAl 合金前缘电脉冲辅助塑性成形工艺	89
5.4.2	电脉冲辅助塑性成形前缘力学性能及其强化机制	90
5.4.3	电脉冲辅助塑性成形 NiAl 合金高温抗氧化性能表征及控制	94
	参考文献	98

第6章 铝合金行波磁场铸造技术

6.1	概述	100
6.2	行波磁场对合金熔体产生的电磁力	102
6.2.1	行波磁场位置对电磁力的影响	102
6.2.2	电流安匝数对电磁力的影响	106
6.2.3	电流频率对电磁力的影响	108
6.2.4	实验验证	111
6.3	行波磁场作用下铝合金凝固组织细化	112
6.4	行波磁场作用下铝合金致密化凝固	116
6.4.1	行波磁场对铝合金凝固组织中气孔的影响	117
6.4.2	行波磁场对铝合金凝固组织微观孔洞的影响	119
6.5	行波磁场铸造成形的实验研究	125
	参考文献	127

第7章 高温钛合金熔模精密铸造技术

7.1	概述	128
7.2	高温钛合金熔体与氧化物陶瓷型壳界面相互作用机理	129
7.2.1	熔体与型壳面层间的相互作用规律	129
7.2.2	熔体与型壳面层间的相互作用机制	132
7.3	高温钛合金熔体在离心力场条件下的充型与凝固规律	135
7.3.1	高温钛合金的铸造充型能力	138
7.3.2	型壳面层材料对合金充型能力的影响	139
7.3.3	型壳预热温度对合金充型能力的影响	142
7.3.4	界面反应对钛合金充型能力影响机制	144
7.3.5	离心转速对合金充型能力的影响	147
7.4	铸造高温钛合金成分控制与组织性能	148
7.4.1	铸造高温钛合金的成分控制	148
7.4.2	铸造高温钛合金的凝固组织及力学性能	150

7.5 典型高温钛合金铸件的研制	152
参考文献	156

第8章 高温合金点阵夹芯板熔模精密铸造技术

8.1 概述	157
8.2 3D-Kagome 点阵夹芯板熔模精密铸造充型与凝固特点	158
8.2.1 点阵夹芯板熔模精密铸造浇注系统设计	158
8.2.2 熔模精密铸造点阵夹芯板充型规律	159
8.2.3 熔模精密铸造点阵夹芯板凝固特点	161
8.2.4 熔模精密铸造点阵夹芯板缩松缺陷分析	164
8.3 浇注温度与型壳预热温度对点阵夹芯板铸造缺陷的影响	166
8.3.1 浇注温度对缩松缺陷位置的影响	166
8.3.2 型壳预热温度对缩松缺陷位置的影响	170
8.3.3 缩松缺陷体积分数分析	173
8.4 高温合金 3D-Kagome 点阵结构夹芯板熔模精密铸造成形实验	175
8.4.1 3D-Kagome 点阵夹芯板模样的制备	175
8.4.2 3D-Kagome 点阵夹芯板陶瓷型壳制备	175
8.4.3 高温合金 3D-Kagome 点阵夹芯板浇注工艺	177
8.4.4 熔模精密铸造 3D-Kagome 点阵夹芯板组织	178
8.5 高温合金 3D-Kagome 点阵夹芯板平压性能	180
8.5.1 高温合金 3D-Kagome 点阵夹芯板平压性能理论分析	180
8.5.2 刚性面板时 3D-Kagome 点阵夹芯板的平压性能	183
8.5.3 弹性面板时 3D-Kagome 点阵夹芯板的平压性能	185
8.5.4 3D-Kagome 点阵夹芯板平压性能实验	188
参考文献	189

第9章 TiAl 基合金电磁冷坩埚定向凝固技术

9.1 概述	190
9.2 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金铸锭制备	191
9.2.1 电磁冷坩埚定向凝固铸锭制备方法	191
9.2.2 熔体内电磁场分析	192
9.2.3 熔体洛伦兹力与电磁搅拌	194
9.2.4 熔体内流场分析	195
9.2.5 定向凝固铸锭表面质量	196
9.3 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金组织	198
9.3.1 定向凝固 TiAl 基合金的凝固组织	198
9.3.2 定向凝固柱状晶组织	201
9.4 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金片层	203
9.4.1 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金片层取向控制	203

9.4.2 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金片层间距	205
9.5 电磁冷坩埚定向凝固 TiAl 基合金性能及典型件研制	208
9.5.1 定向凝固 TiAl 基合金的力学性能	208
9.5.2 定向凝固 TiAl 基合金热处理技术	212
9.5.3 定向凝固 TiAl 基合金叶片精确加工成形技术	214
参考文献	215

第 10 章 Nb-Si 基超高温合金等离子弧—感应悬浮复合熔炼技术

10.1 概述	217
10.2 等离子弧—感应悬浮复合熔炼系统设计	219
10.2.1 等离子枪整体结构设计	220
10.2.2 水冷铜坩埚结构设计	223
10.3 等离子弧—感应悬浮复合熔炼数值模拟	226
10.3.1 复合熔炼数值模拟	226
10.3.2 电流载荷下坩埚内的电磁场计算	229
10.3.3 频率对坩埚内不同位置电磁场影响	230
10.3.4 感应器相对坩埚底部距离对其内部磁感应强度影响	231
10.3.5 感应加热稳态熔体内电磁场分布	231
10.3.6 水冷铜坩埚感应悬浮熔炼温度场分布及特性分析	234
10.4 Nb-Si 合金等离子弧—感应悬浮复合熔炼实验	239
10.4.1 等离子枪单独加热熔炼 Nb-Si 合金	239
10.4.2 等离子弧—感应悬浮复合熔炼电磁场对等离子弧的影响	240
10.4.3 气体流量对等离子弧稳定性的影响	241
10.4.4 等离子弧—感应悬浮复合熔炼过程驼峰的变化	241
10.4.5 等离子弧—感应悬浮复合熔炼组织成分研究	242
10.5 典型件应用	245
参考文献	247

第 11 章 硼化钛晶须增强钛基复合材料成形与热处理技术

11.1 概述	249
11.2 网状结构 TiBw/Ti 复合材料制备与表征	249
11.2.1 网状结构 TiBw/Ti 复合材料设计与制备	249
11.2.2 网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织与拉伸性能	251
11.3 塑性变形对 TiBw/Ti 复合材料组织与性能的影响	254
11.3.1 烧结态 TiBw/TC4 复合材料高温压缩变形	254
11.3.2 网状结构 TiBw/TC4 复合材料热挤压变形	258
11.3.3 网状结构 TiBw/TC4 复合材料热轧制变形	264
11.4 热处理对 TiBw/Ti 复合材料组织与性能的影响	267
11.4.1 淬火时效对 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	267

11.4.2 退火对挤压态 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	269
11.4.3 淬火时效对挤压态 TiBw/TC4 复合材料组织与性能的影响	272
11.5 钛基复合材料典型件制备	274
参考文献	275

第12章 Al-Zn-Mg-Cu 合金非等温时效处理技术

12.1 概述	277
12.1.1 非等温时效的定义	277
12.1.2 非等温时效技术应用需求及背景	278
12.1.3 非等温时效工艺的特点	279
12.2 非等温时效工艺简介	279
12.2.1 非等温时效工艺对铝合金材料的要求	279
12.2.2 非等温时效工艺分类	280
12.3 7×××铝合金非等温时效过程中铝合金的析出行为	281
12.3.1 升温时效过程中的沉淀析出行为	281
12.3.2 降温时效过程中 7×××合金的沉淀析出行为	283
12.3.3 复合时效过程中的 7×××铝合金组织变化	286
12.3.4 时效过程中析出行为小结	288
12.3.5 非等温时效过程中的组织演化机理	289
12.4 非等温时效态铝合金的力学性能	290
12.4.1 升温时效 7A85 合金的力学性能	290
12.4.2 降温时效 7A85 合金的力学性能	291
12.4.3 复合时效过程中合金的力学性能	293
12.4.4 非等温时效与其它工艺的对比	294
12.5 组织与性能关系	296
12.6 非等温时效工艺存在的问题及发展方向	298
参考文献	299

第13章 应力—磁场复合真空热处理技术

13.1 概述	301
13.2 复合场热处理对马氏体择优取向热力学理论	302
13.2.1 应力真空热处理对马氏体择优取向热力学理论	302
13.2.2 磁场真空热处理马氏体择优取向热力学理论	304
13.2.3 应力—磁场复合真空热处理马氏体择优取向热力学理论	307
13.3 应力—磁场复合真空热处理晶化行为与晶粒尺寸控制	308
13.3.1 Ni-Mn-Ga 系薄膜的晶化行为	308
13.3.2 应力—磁场复合真空热处理晶粒尺寸控制	311
13.4 应力—磁场复合真空热处理畴结构取向规律及机制	313
13.4.1 应力—磁场复合真空热处理工艺对薄膜微观组织结构的影响	313

13.4.2 应力—磁场复合作用下马氏体孪晶择优取向物理模型	320
13.5 应力—磁场复合真空热处理对磁感生应变特性的影响	323
参考文献	328

第14章 大面积强流脉冲电子束处理技术

14.1 概述	330
14.2 大面积均匀强流脉冲电子束的产生	330
14.3 强流脉冲电子束辐照温度场模拟	332
14.3.1 温度场模拟物理模型	332
14.3.2 差分法求解 HCPEB 加热温度场	333
14.3.3 有限元 HCPEB 温度场计算	334
14.4 强流脉冲电子束(HCPEB)处理技术的应用	336
14.4.1 HCPEB 表面抛光与净化	336
14.4.2 HCPEB 表面强化处理	340
14.4.3 HCPEB 合金化与增材沉积	340
14.5 HCPEB 辐照层组织演化	344
14.5.1 HCPEB 合金化处理合金元素的分配	344
14.5.2 HCPEB 辐照处理后重熔层晶粒形态	348
参考文献	349

Chapter 1 Introduction

1.1 Precision Hot Forming Technology and its Role	1
1.2 Developing Trend of Hot Forming Technology in Aviation and Aerospace Industry	3
1.2.1 Precision Hot Forming Technology for Light – Weight Components	3
1.2.2 Precision Hot Forming Technology for Integrated Components	4
1.2.3 Precision Hot Forming Technology for Combined Structural – Functional Performance	5
1.2.4 Precision Hot Forming Technology for Components of Ultra High Temperature Material	6
References	7

Chapter 2 Internal High Pressure Forming Offlight – Weight Alloy Tubes

2.1 Introduction	8
2.2 IHPF of Aluminum Alloy Tube with Thermal Oil	9
2.2.1 Equipment for IHPF with Thermal Oil	9
2.2.2 Isothermal IHPF with Thermal Oil	11
2.2.3 Non – Isothermal IHPF with Thermal Oil	15
2.3 IHPF of Aluminum Alloy Tube with Pressured Gas at Elevated Temperature	18
2.3.1 Equipment for IHPF with Pressured Gas	18
2.3.2 Formability of Aluminum Alloy Tube at Elevated Temperature	20
2.3.3 Forming of Aluminum Alloy Parts with Changeable Cross – Sections	22
2.4 IHPF of Magnesium Alloy Tube at Elevated Temperature	25
2.4.1 Mechanical Property along Hoop Direction and Hydro – Formability	25
2.4.2 Forming of Magnesium Alloy Parts with Various Cross – Sections	28
2.5 IHPF of Titanium Alloy Tube at Elevated Temperature	31
2.5.1 Mechanical Property of TA18 Tube at High Temperature	31
2.5.2 Forming of Titanium Alloy Parts with Changeable Diameters	33
2.5.3 Effect of Axial Feeding on Thickness Distribution	35
2.5.4 Microstructure Evolution	36
References	38

Chapter 3 Hot Forming of Aluminum Alloy Sheet with Cold – Hot Dies

3.1	Introduction	40
3.2	Principle and Characters of Hot Forming with Cold – Hot Dies	41
3.2.1	Principle of Hot Forming with Cold – Hot Dies	41
3.2.2	Characters of Hot Forming with Cold – Hot Dies	43
3.3	Deformation Behavior of Aluminum Alloy Sheet in Solution Condition	43
3.3.1	Deformation Mechanism at Elevated Temperature	43
3.3.2	Mechanical Properties at Elevated Temperature	44
3.3.3	Bulging Ability at Elevated Temperature	45
3.3.4	Fracture Behavior at Elevated Temperature	46
3.4	Strengthening Evolution of Aluminum Alloy Sheet in Hot Forming with Cold – Hot Dies	47
3.4.1	Heat Treatable Aluminum Alloy	47
3.4.2	Strength Evolution	48
3.4.3	Precipitate Evolution	50
3.5	Key Technology of Forming Device	52
3.6	Typical Application	53
	References	54

Chapter 4 Light Alloy Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure

4.1	Introduction	56
4.1.1	Principle of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	56
4.1.2	Characteristic of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	57
4.1.3	Applicability of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	57
4.1.4	Civil and Foreign Development of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	57
4.2	Device for Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	58
4.2.1	Tools of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	58
4.2.2	Pressure Control System of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	60
4.2.3	Heating System of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	61
4.3	Defects of Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	62
4.3.1	Rupture	62
4.3.2	Wrinkle	64
4.3.3	Surface Defect	65
4.4	5A06 Aluminum Alloy Sheet Warm Deep Drawing with Counter Pressure	65
4.4.1	Materials and Geometry of Workpiece	65

4.4.2	Temperature's Effects on Thickness and Defects	66
4.4.3	Granular Size Dimension and Pressure's Effects on Surface	68
4.4.4	Optimization of Temperature and Pressure	70
References		71

Chapter 5 Pulse Current Assisted Hot Plastic Forming Technology of NiAl Alloy

5.1	Introduction	73
5.2	Pulse Current Sintering Technology of NiAl Alloy	75
5.2.1	Mechanical Alloying of NiAl Powder	75
5.2.2	Pluse Current Sintering Process of NiAl Alloy	78
5.3	Pulse Current Assisted High Temperature Deformation and Microstructure Evolution of NiAl Alloy	83
5.3.1	High Temperature Deformation Behavior of NiAl Alloy Assisted by Pluse Current ...	83
5.3.2	Microstructure Evolution of NiAl Alloy during High Temperature Deformation Assisted by Pluse Current	87
5.4	Plastic Forming Process Assisted by Pulse Current and Performance of NiAl Alloy Part	89
5.4.1	Plastic Forming Process Assisted by Pluse of NiAl Alloy Leading Edge	89
5.4.2	Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Leading Edge Manufactured by Pluse Current Assist Plastic Forming Technology	90
5.4.3	High Temperature Oxidation Resistance Characterization and Control Methods of Leading Edge Manufactured by Pluse Current Assist Plastic Forming Technology ...	94
References		98

Chapter 6 Aluminum Alloy Casting Under Traveling Magnetic Field

6.1	Introduction	100
6.2	Electromagnetic Force on the Alloy Melt by Traveling Magnetic Field	102
6.2.1	The Influence of Traveling Magnetic Field Position on Electromagnetic Force	102
6.2.2	The Influence of Current Times Coil Turns on Electromagnetic Force	106
6.2.3	The Influence of Current Frequency on Electromagnetic Force	108
6.2.4	Experimental Verification	111
6.3	Solidification Structure Refinement of Aluminum Alloy under Traveling Magnetic Field	112
6.4	Densification Solidification of Aluminum Alloy under Traveling Magnetic Field	116
6.4.1	The Influence of Traveling Magnetic Field on Gas Porosity of Aluminum Alloy	

during Solidification	117
6. 4. 2 The Influence of Traveling Magnetic Field on Solidification Micro – Voids of Aluminum Alloy	119
6. 5 Casting Experiments under Traveling Magnetic Field	125
References	127

Chapter 7 Investment Casting Technology of High Temperature Titanium Alloys

7. 1 Introduction	128
7. 2 Interfacial Interaction Mechanisms between Molten High Temperature Titanium Alloy and Oxide Ceramic Mold	129
7. 2. 1 Interaction Laws between Melt and Primary Coating of Ceramic Mold	129
7. 2. 2 Interaction Mechanisms between Melt and Primary Coating of Ceramic Mold	132
7. 3 Mold Filling Capacity and Solidification of High Temperature Titanium Alloys in a Centrifugal Force Field	135
7. 3. 1 Mold Filling Capacity of High Temperature Titanium Alloys	138
7. 3. 2 Effects of Primary Coating Materials on Mold Filling Capacity	139
7. 3. 3 Effects of Mold Preheating Temperature on Mold Filling Capacity	142
7. 3. 4 Effects of Interfacial Reaction on Mold Filling Capacity	144
7. 3. 5 Effects of Rotational Speed on Mold Filling Capacity	147
7. 4 Composition Controlling, Microstructure and Mechanical Properties of Cast High Temperature Titanium Alloys	148
7. 4. 1 Composition Controlling of Cast High Temperature Titanium Alloys	148
7. 4. 2 Solidification Microstructure and Mechanical Properties of Cast High Temperature Titanium Alloys	150
7. 5 Preparation of Typical High Temperature Titanium Alloy Castings	152
References	156

Chapter 8 Lattice Truss Core Sandwich Plate of Superalloy by Investment Casting Technology

8. 1 Introduction	157
8. 2 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate Filling and Solidification Characteristics	158
8. 2. 1 Gating System Designing of Investment Casting Lattice Truss Core Sandwich Plate	158
8. 2. 2 Filling Process of Investment Casting Lattice Truss Core Sandwich Plate	159
8. 2. 3 Solidification Characteristics of Investment Casting Lattice Truss Core Sandwich Plate	161
8. 2. 4 Porosity Defect of Investment Casting Lattice Truss Core Sandwich Plate	164

8.3	Effects of Pouring Temperature and Mold Pre – Heating Temperature on Casting Defects of Lattice Truss Core Sandwich Plate	166
8.3.1	Effects of Pouring Temperature on Porosity Positions	166
8.3.2	Effects of Mold Pre – Heating Temperature on Porosity Positions	170
8.3.3	Analysis of Porosity Defect Volume Fraction	173
8.4	Investment Casting Experiments of Superalloy 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate	175
8.4.1	Fabrication of 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate Patterns	175
8.4.2	Fabrication of 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate Ceramics Mold	175
8.4.3	Pouring Process of Superalloy 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate	177
8.4.4	Microstructure of Investment Casting 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate	178
8.5	Compress Property of Superalloy 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate	180
8.5.1	Compress Property Analysis of Superalloy 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate	180
8.5.2	Compress Property of 3D – Kagome Lattice Truss Core Sandwich Plate with Rigidity Face Plate	183
8.5.3	The Flat Crush Property of 3D – Kagome Lattice Core Plate Considering Face Plate as Elastic	185
8.5.4	The Flat Crush Property Test of 3D – Kagome Lattice Core Plate	188
References		189

Chapter 9 TiAl – Based Alloys Electromagnetic Cold Crucible Directional Solidification Technique

9.1	Introduction	190
9.2	Preparation of Electromagnetic Cold Crucible Directional Solidification TiAl – Based Ingots	191
9.2.1	Methodology of Electromagnetic Cold Crucible Directional Solidification	191
9.2.2	Electromagnetic Field in the Confinement Melt	192
9.2.3	Lorentz Force and Electromagnetic Stirring Acted on the Confinement Melt	194
9.2.4	Flow Field in the Confinement Melt	195
9.2.5	Surface Finishing of the Directional Solidified Ingots	196
9.3	Structures of Electromagnetic Cold Crucible Directional Solidification TiAl – Based Alloys	198
9.3.1	Solidified Structure of Directional Solidification TiAl – Based Alloys	198
9.3.2	Columnar Structure of Directional Solidification TiAl – Based Alloys	201
9.4	Lamellae of Electromagnetic Cold Crucible Directional Solidification TiAl – Based Alloys	203