



北京市高等教育精品教材立项项目

张彦华 编著

# 热制造学引论

(第2版)



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

# 热制造学引论

(第2版)

张彦华 编著

北京航空航天大学出版社

## 内容简介

本书以热制造学理论和工艺基础为主要内容,共分9章。其中第1章至第4章介绍材料热力学、传输理论、热制造冶金学与力学等热制造理论基础;第5章介绍热制造的工程原理;第6章至第8章分别介绍熔融-凝固成型、热塑性成型、焊接热力过程分析基础;第9章介绍热制造工艺数值模拟技术。

本书可作为材料加工工程学科研究生以及材料成型与控制专业高年级本科生的教材,也可供从事有关科学研究的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热制造学引论 / 张彦华编著. -- 2版. -- 北京 :

北京航空航天大学出版社, 2012. 7

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0842 - 5

I. ①热… II. ①张… III. ①热加工—高等学校—教材 IV. ①TG306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 126645 号

版权所有,侵权必究。

### 热制造学引论

(第2版)

张彦华 编著

责任编辑 杨昕 刘工 刘爱萍

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net) 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:25 字数:560千字

2012年7月第2版 2012年7月第1次印刷 印数:2 000册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0842 - 5 定价:59.00元

---

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

## 第2版前言

《热制造学引论》第一版出版后的几年来，作者在教学实践中反复思考的问题是，如何将铸、锻、焊等分立的热制造知识整合到统一的学科基础上来，这恐怕不是一个人能做到的事，还需要学界同仁长期的、广泛深入的思考和实践过程。可以观察到的基本事实是：热制造是借助热能和机械能并利用材料的状态和性能进行加工的过程。例如，铸造要利用材料在液态下的流动性质充满型腔后凝固成型，塑性成型要利用材料的塑性进行变形成型。以何种过程成型，取决于所施加的能量和材料本身的性质，其共同之处就是物质的运动或材料的流动。因此，传统的铸、锻、焊等热制造工艺在学科上并不是分立的。铸造可以有半固态铸造，塑性加工可以有超塑性成型，彼此并非背道而驰。而焊接中的熔焊又是小范围铸造问题，摩擦焊又成了局部锻造问题。这就要求我们在构造知识体系的过程中要深入认识内在的联系，才能为学生提供全面、完整的认知过程和宽广的知识视野。

随着现代工程教育的发展，学科集成已成为大趋势，将分离的专业教学整合到大学科的教学平台上来，对于培养创新型人才具有重要意义。基于这样的思考，作者对《热制造学引论》第一版进行了部分修订，修订的原则是突出热、力及耦合在热制造中的作用，试图搭建热制造工程基本的认识论和方法论框架，以培养学生开放性的思维和跨学科的综合能力。

第2版的前5章在第一版的基础上只做了少量修改，后4章进行了较大修订，重点突出了凝固成型、热塑性成型、焊接热力过程、热制造数值模拟的内容。对于工程学科而言，本书属于技术基础，作为技术基础，其理论和方法都具有相通性，这还需要读者在学习和实践过程中加以理解。最后，希望读者多赐意见，共同发展热制造学体系。

第2版得到北京市精品教材立项的资助。

作者  
2012年3月

# 前 言

热制造是利用材料在不同温度下的物理化学和力学性能而实现对其形状、成分、组织及性能进行控制的制造技术。热制造工艺包括从材料的熔融-凝固成型，到热塑性成型，以及聚合成型与焊接等广泛的内容，是现代制造业发展与竞争的技术基础。先进的热制造技术是当今高技术领域的重要组成部分，是新材料与新结构应用的关键。热制造科学涉及热学、力学、冶金学等多学科知识，是发展先进热制造技术的理论基础。

热制造学是在热加工技术基础上形成的工程科学。热加工技术是热制造技术的重要组成部分，而现代热制造已远超出传统热加工的范畴。在我国机械工程或制造技术领域，热加工技术通常泛指铸造、锻压、焊接等制造工艺，目前又称为材料成型加工技术。而在高等教育学科划分中，热加工类的专业命名为材料加工工程（研究生）和材料成型与控制工程（本科）。作者认为，无论是热加工，还是成型加工，在工程术语使用方面都难以准确表达。例如，定向凝固技术制造发动机叶片的工艺，用“成型”比用“热加工”来描述更为准确；船体结构的焊接装配，用“成型”和“热加工”来描述都欠妥，而这两种产品生产过程均可用热制造来概括。热加工（或成型加工）强调的是工艺方法本身，而热制造则突出了工艺过程和工程行为。因此，热制造更能体现学术和技术的意义。尽管目前尚不能对热制造学予以明确的定义，但从涉及的范围可以看到热制造学的多学科交叉性。

本教材重点以热制造学理论和工艺基础为主要内容。全书共分12章。其中第1章至第4章介绍材料热力学、传输理论、热制造冶金学与力学等热制造理论基础；第5章介绍热制造的工程原理；第6章至第10章分别介绍熔融-凝固成型、热塑性成型、聚合与焊接、自由体成型与表面改性、微尺度热制造等工艺基础；第11章介绍热制造工艺数值模拟技术；第12章介绍热制造工业生态学与工程伦理。

编写热制造学教材是一种新的尝试，而形成完整的热制造学体系则是一项长期的工作，需要多方面的努力。由于作者对热制造学理论及工艺原理掌握得不够全面，相关知识领域和水平有限，书中的内容难免有错误和不当，敬请读者批评指正。

本书可作为材料加工工程学科研究生以及材料成型与控制专业高年级本科生的教材，也可供从事有关科学研究的工程技术人员参考。

本书的编写得到北京航空航天大学教材出版基金的资助。

作 者  
2005年6月

# 目 录

绪 论 .....	1
0.1 热制造技术的特征及作用 .....	1
0.2 热制造技术的发展趋势 .....	3
0.3 热制造技术的科学基础 .....	4
第 1 章 材料热力学基础 .....	8
1.1 热力学基本概念 .....	8
1.1.1 热力系统与状态 .....	8
1.1.2 热力过程及有关现象 .....	9
1.2 热力学第一定律 .....	10
1.2.1 热和功 .....	10
1.2.2 内 能 .....	11
1.2.3 热力学第一定律概述 .....	11
1.2.4 焓与热容 .....	12
1.3 热力学第二定律 .....	13
1.3.1 可逆过程与不可逆过程 .....	13
1.3.2 热力学第二定律的表述 .....	14
1.3.3 熵与自由能 .....	15
1.4 物质的聚集态 .....	18
1.4.1 固 体 .....	18
1.4.2 液 体 .....	20
1.4.3 气 体 .....	24
1.4.4 等 离子体 .....	25
1.5 相变热力学分析 .....	26
1.5.1 相变热力学 .....	26
1.5.2 固-液相变 .....	28
1.5.3 固态相变 .....	31
1.5.4 相平衡与相律 .....	31



1.6 非平衡现象	32
1.6.1 不可逆过程热力学	32
1.6.2 耗散结构	33
1.6.3 分岔与混沌	34
思考题	36
<b>第2章 传输理论</b>	<b>37</b>
2.1 动量传输	37
2.1.1 流体及其流动的基本概念	37
2.1.2 流体动力学方程	45
2.1.3 流体流动的能量守恒	50
2.2 热量传输	51
2.2.1 热量传输的基本概念	51
2.2.2 固体中的热传导	53
2.2.3 对流换热	59
2.2.4 辐射换热	63
2.2.5 强化传热	66
2.3 质量传输	67
2.3.1 质量传输基本概念	67
2.3.2 扩散传质	71
2.3.3 对流传质	73
思考题	75
<b>第3章 热制造冶金理论</b>	<b>76</b>
3.1 熔池冶金反应	76
3.1.1 液态金属与气体的反应	76
3.1.2 液态金属与熔渣的反应	78
3.1.3 非金属夹杂物及去除	80
3.1.4 真空冶金	81
3.2 液态金属的凝固	83
3.2.1 纯金属的凝固	83
3.2.2 单相合金的凝固	85
3.2.3 共晶合金的凝固	91
3.3 烧结过程	94



3.3.1	烧结机理	94
3.3.2	烧结中的传质	96
3.3.3	晶粒生长与二次再结晶	97
3.3.4	烧结工艺	98
3.4	固态相变	101
3.4.1	珠光体转变	101
3.4.2	马氏体相变	102
3.4.3	脱溶分解	103
3.5	回复与再结晶	104
3.5.1	回复动力学	104
3.5.2	再结晶动力学	105
3.5.3	晶粒的长大	106
3.5.4	动态回复与再结晶	106
3.6	强化机制	109
3.6.1	固溶强化	109
3.6.2	细晶强化	110
3.6.3	析出强化	110
3.6.4	位错强化	111
	思考题	112
<b>第4章 材料变形力学理论</b>		<b>113</b>
4.1	连续统力学基本概念	113
4.1.1	变形与运动	113
4.1.2	应 力	118
4.1.3	守恒定律	124
4.1.4	连续统力学的边界条件和初始条件	125
4.1.5	连续统力学求解方法	125
4.2	材料本构方程	126
4.2.1	固体弹塑性本构方程	126
4.2.2	流体本构方程	135
4.2.3	粘弹性与粘塑性本构模型	136
4.3	热弹塑性分析	138
4.3.1	热弹性问题	138
4.3.2	热弹塑性问题	139





4.3.3 热变形与应力的简化分析 .....	141
4.4 强瞬态热力效应 .....	149
4.4.1 高能束加工中的强瞬态问题 .....	149
4.4.2 强瞬态热力效应的温度方程与应力方程 .....	150
4.4.3 强瞬态热冲击行为 .....	151
思考题 .....	153
<b>第5章 热制造工程原理 .....</b>	<b>154</b>
5.1 热制造工艺模型 .....	154
5.1.1 热制造工艺类型 .....	154
5.1.2 热制造工艺过程描述 .....	154
5.2 材料状态 .....	157
5.2.1 热制造工艺过程与材料状态 .....	157
5.2.2 工件形态 .....	157
5.2.3 热制造过程材料流 .....	159
5.3 能量与热源 .....	159
5.3.1 热制造过程中的能量存在形式 .....	160
5.3.2 热制造系统的能量流 .....	167
5.4 热制造信息 .....	169
5.4.1 热制造信息表示 .....	169
5.4.2 热制造系统中的信息传递 .....	170
5.4.3 信息管理与数据库 .....	170
5.5 热制造数字化与快速工艺实现 .....	171
5.5.1 数字化建模 .....	171
5.5.2 快速原型 .....	171
5.5.3 快速工艺实现 .....	174
5.6 热制造工业对环境的影响 .....	175
5.6.1 工业废气 .....	176
5.6.2 工业废水 .....	176
5.6.3 固体废弃物 .....	177
思考题 .....	178
<b>第6章 凝固成型原理 .....</b>	<b>179</b>
6.1 金属铸造工艺基础 .....	179



6.1.1	液态金属的充型能力与流动性 .....	179
6.1.2	铸件的凝固 .....	181
6.1.3	铸件的冷却收缩和收缩缺陷 .....	187
6.1.4	铸造应力及铸件的变形 .....	190
6.1.5	铸件的裂纹及防止 .....	194
6.1.6	铸造合金的偏析和吸气性 .....	196
6.2	定向凝固与单晶生长 .....	198
6.2.1	定向凝固技术 .....	198
6.2.2	单晶体的制备 .....	202
6.3	非晶合金与快速凝固 .....	203
6.3.1	非晶合金的形成 .....	203
6.3.2	快速凝固技术 .....	204
6.4	半固态成型技术 .....	207
6.4.1	半固态金属的特性 .....	207
6.4.2	半固态金属坯料制备 .....	209
6.4.3	半固态合金成型方法 .....	211
6.5	玻璃的熔制成型 .....	213
6.5.1	玻璃的熔制与凝固 .....	213
6.5.2	玻璃的成型 .....	214
6.5.3	玻璃的热处理 .....	214
6.6	聚合物材料的熔融与成型 .....	215
6.6.1	聚集态结构 .....	215
6.6.2	聚合物的熔融与流变特性 .....	216
6.6.3	聚合物的挤出成型 .....	220
6.7	金属基复合材料的液相法成型 .....	223
6.7.1	挤压铸造法(液态渗透) .....	224
6.7.2	液态金属浸渗法 .....	224
6.7.3	共喷射沉积 .....	225
6.7.4	自生复合材料 .....	225
	思考题 .....	227
<b>第7章</b>	<b>热塑性成型原理 .....</b>	<b>228</b>
7.1	金属的塑性变形 .....	228
7.1.1	晶体的塑性变形 .....	228



7.1.2	多晶体金属塑性变形	231
7.1.3	金属的热塑性变形	236
7.1.4	热塑性变形对金属组织与性能的影响	244
7.2	金属塑性成型性能与规律	245
7.2.1	金属塑性成型性能	245
7.2.2	金属塑性成型的基本规律	251
7.2.3	金属塑性变形与应力分布的不均匀性	252
7.3	金属塑性成型的变形与裂纹	254
7.3.1	金属塑性成型的变形特点	254
7.3.2	塑性加工过程的裂纹	259
7.4	金属塑性变形力计算的工程法	262
7.4.1	工程法的基本原理	262
7.4.2	平面应变墩粗变形力分析	263
7.4.3	轧制压力与轧辊的变形	267
7.5	金属的超塑成型与蠕变时效成型	269
7.5.1	金属的超塑成型	269
7.5.2	蠕变时效成型	271
7.6	摩擦挤压成型	276
7.6.1	连续挤压技术	276
7.6.2	摩擦挤压技术	277
	思考题	279
<b>第8章 焊接热力过程分析</b>		<b>280</b>
8.1	焊接基本原理	280
8.1.1	焊接热源	280
8.1.2	焊接传热分析	284
8.2	焊接冶金	293
8.2.1	焊接熔池	293
8.2.2	金属熔化焊接时的结晶与相变	298
8.2.3	焊接接头及特点	300
8.2.4	焊接裂纹分析	303
8.3	焊接应力与变形分析	313
8.3.1	焊接应力	313
8.3.2	焊接变形	322



8.4 摩擦焊热力过程 .....	332
8.4.1 摩擦焊方法概述 .....	332
8.4.2 摩擦焊热力过程分析 .....	334
思考题 .....	340
<b>第9章 热制造工艺数值模拟 .....</b>	<b>341</b>
9.1 概 述 .....	341
9.1.1 热制造工艺数值模拟的作用 .....	341
9.1.2 热制造工艺数值模拟技术及其发展趋势 .....	342
9.1.3 焊接热力过程中的非线性现象 .....	344
9.2 热制造数值模拟方法 .....	347
9.2.1 热制造工艺数值模拟方法与过程 .....	347
9.2.2 传热过程数值模拟 .....	349
9.2.3 弹塑性有限元方程 .....	352
9.2.4 热力耦合分析 .....	353
9.3 铸造过程数值模拟 .....	354
9.3.1 铸件温度场的数值模拟 .....	354
9.3.2 铸件充型过程的数值模拟 .....	358
9.3.3 铸件的凝固与微观组织模拟 .....	358
9.3.4 应力场的数值模拟 .....	359
9.3.5 铸造过程数值模拟软件系统 .....	359
9.4 塑性成型数值模拟技术 .....	360
9.4.1 塑性成型数值模拟原理与作用 .....	360
9.4.2 塑性成型有限元模拟方法 .....	361
9.4.3 锻造工艺模拟 .....	365
9.5 焊接过程数值模拟技术 .....	368
9.5.1 焊接过程数值模拟的基本问题 .....	368
9.5.2 焊接过程数值模拟的方法 .....	369
9.5.3 焊接组织模拟 .....	376
9.5.4 焊接应力与变形的模拟 .....	377
思考题 .....	382
<b>参考文献 .....</b>	<b>383</b>

# 绪 论

## 0.1 热制造技术的特征及作用

### 1. 热制造技术的特征

热制造是利用材料在不同温度下的物理化学性能而实现对其形状、成分、组织及性能进行控制的制造技术。热制造过程就是科学利用材料的热学与力学行为成型零件或制造结构,其技术领域包括铸造、锻造、焊接等传统热加工技术,以及粉末冶金、高能束流加工、流变成型、快速热成型等制造技术。现代热制造技术是多学科交叉的高技术领域,是先进制造技术的重要组成部分,是新材料与新结构应用的关键。

任何产品或工程结构都是由多种形状的零部件或构件组成的,热制造工艺就是根据设计的要求将工程材料加工成具有一定形状和尺寸的零部件或装配成结构的过程。热制造不仅赋予零件或构件的形状,而且控制着零件或构件及结构的最终使用特性。零部件的材料结构与性能是热制造的结果,与加工前的材料结构与性能不同,最终成型后的材料必须能够以经济和社会可以接受的方式使产品或结构在规定的寿命期间完成特定的任务,即所谓的使用性能。热制造工艺、使用性能、材料性质、成分/组织四个因素中任一因素发生变化就会引起其他因素发生变化。对同一材料,不同热制造工艺制造的构件性能将有较大的差异。热制造技术的关键就是掌握这些因素之间的相互联系,制造出符合要求的产品。

热制造是一个极其复杂的过程,在这个过程中,材料经液态流动充型、凝固结晶,或发生固态流动变形、相变、再结晶和重结晶等一系列复杂的物理、化学、冶金变化而最后成为零部件或构件。通过对热制造过程的有效控制,使材料的成分、组织、性能处于最佳状态,缺陷减到最小,以满足产品或结构的使用要求。

热制造不但赋予材料形状和性能,同时也是使材料增值的经济活动。我国在高端产品制造方面竞争力不足的原因之一就是热制造等先进制造工艺技术薄弱。尽管不同的产品和结构所采用的成型加工技术有很大的不同,但在提高技术能力和效率上是一致的。为了高效、低成本地研制高性能产品,就必须不断发展并采用先进热制造技术。

### 2. 热制造技术的作用

制造业是一个国家综合经济实力的重要基础。制造技术是制造业发展的关键之一,在高科技时代,制造业的发展越来越依赖于先进的制造技术。热制造是制造技术的重要组成部分,



许多先进的制造工艺都与热制造有关。没有先进的热制造工艺就不会有今天的信息化,也不可能使高科技产品层出不穷。因此,创新的热制造工艺永远是高科技。随着新材料与新结构的不断应用,对热制造技术提出了更高的要求。发展先进的洁净、精确、快速热制造技术至关重要。

热制造技术是航空航天、电子信息、交通运输、石油化工、机械装备等产业的基础技术。据统计,全世界75%的钢材要经过塑性加工,45%的钢材采用焊接制造结构。我国铸件年产量已超过1400万吨,超过美国成为世界铸件生产第一大国。

热制造工艺是飞机结构设计的有力保证。现代飞机广泛采用模锻件,且尽量采用精锻件,近无余量锻造在飞机承力构件正在得到应用。机身加强框、机翼主梁、起落架等部件均采用锻造成型工艺。多向锻造、等温锻造、粉末锻造、热等静压等特种锻造工艺在飞机结构件的制造中有应用前景。现代飞机结构正在不断扩大焊接结构的应用范围。钛合金构件的氩弧焊、电子束与激光焊、等离子电弧焊、感应钎焊等先进工艺具有减轻质量、提高结构的整体性等优势。新型战斗机的承力框、带筋壁板采用焊接结构可降低加工制造成本。复合材料构件的热成型制造是下一代飞机结构的革新方案。高性能发动机制造大力发展精确铸造、粉末冶金、定向凝固、快速凝固、等温锻造、摩擦焊、电子束焊接等热制造技术。

航天器的发展要求不断采用新材料、新结构和先进的热制造技术。热制造是运载火箭、导弹、卫星、航天飞机、空间站等航天结构的主要制造工艺。焊接技术在航天器制造中得到广泛的应用,如长征三号运载火箭推进剂储箱的焊缝总长近600m,螺旋管式喷管焊缝总长820余米。马丁公司和马歇尔飞行中心研究用VPPA(变极性等离子弧焊)焊接厚度3~26mm、焊缝长900m的2195铝锂合金外贮箱,比起用GTA(气体钨极电弧焊)质量提高,成本降低。搅拌摩擦焊受到航天工业的关注,英国焊接研究所(TWI)应用搅拌摩擦焊为波音公司生产了三个2000系列的铝合金航天飞机油箱。麦道公司已将搅拌摩擦焊用于制造德尔塔火箭推进剂的贮箱。

热制造技术在汽车生产中具有重要地位。据统计,占汽车质量的65%以上的钢、铝及镁合金等零部件与构件要经过热制造成型。汽车的发动机缸体、缸盖、曲轴、凸轮轴、进排气管、活塞及活塞环等八大件全部是铸造而成。汽车车身及底盘采用塑性成型加工与焊接制造。

我国西气东输管道为长距离、大口径、高钢级、高压、大壁厚输气管道,在管道焊接施工中部分线路采用多焊头内焊机进行根焊,填充、盖面焊采用自动外焊机分层流水施焊。此项技术的采用,不仅在质量和进度上满足了西气东输工程的需要,也提高了国内管道的焊接技术水平。

产品或结构设计、材料及热制造技术三者相辅相成、互相促进、互相制约。新产品的研制总伴随着新材料、新结构和新工艺的重大突破。热制造技术的发展,必将促进产品质量或结构性能的提高。



## 0.2 热制造技术的发展趋势

制造业在过去的几十年中发生了巨大变化,热制造技术取得了长足进步,新方法(工艺)、新技术层出不穷。随着新材料与新结构的应用,先进的热制造技术成为重要的研究领域。根据可持续发展对制造技术的要求,热制造技术正沿着优质、高效、精密、无污染的方向发展。

现代热制造技术的发展主要体现在以下几方面:

### (1) 新的热制造工艺方法发展迅速

近代科学技术的发展,特别是材料科学和制造科学的发展,出现了许多新一代热制造技术。例如,定向凝固单晶体叶片熔模铸造新技术、粉末高温合金涡轮盘超塑性锻造、搅拌摩擦焊接技术、喷射沉积成型和隔热涂层技术等。在过去的30年中,航空发动机涡轮进口温度提高了450℃,其中70%是由于采用了精铸空心叶片获得的,是决定高推重比发动机所能达到最高性能水平的关键技术之一。

### (2) 轻量化及近终成型加工技术成为重要的发展趋势

发展精密锻造、铸造,焊接工艺制造的整体结构件,可大幅度减轻装备质量,降低制造成本,同时,还为设计人员提供了设计的灵活性。

### (3) 常规热成型加工技术逐步被现代技术改造

传统的锻、铸、焊、热、表面处理等工艺引进了计算机、真空和激光等技术,被改造为高新技术。采用多向模锻、真空热处理、表面镀镱钛和喷丸及孔挤压强化处理等先进热工艺制造飞机起落架零件,可使起落架与飞机同寿命。

### (4) 组合或复合热制造工艺得到应用

各种学科的交叉出现了如超塑性成型/扩散连接、形变热处理技术、电弧与激光复合热源焊接。电磁成型、喷射成型及各种材料和工艺复合的新的加工方法等。

### (5) 热制造工艺过程的模拟技术发展迅速

在信息科学的发展和带动下,热制造技术的研究与开发方法正由传统的经验方法向基于知识的建模仿真与试验相结合的方向发展,建模与仿真正在成为热制造工艺研究与开发必不可少的手段。如铸件凝固铸造过程的数值模拟,锻件和铸件缺陷形成及预测的数值模拟,焊接热效应的数值模拟等。

### (6) 热制造技术与新结构、新材料并行发展

如摩擦焊接、热等静压和液相扩散焊等成型加工技术分别与整体涡轮转子、整体叶盘结构和大型夹芯结构风扇叶片及对开叶片等新结构并行发展。热等静压和超塑性锻造与粉末高温合金、液态金属快速冷却轧制与非晶态材料同步发展等。

为确保人类社会文明与经济的可持续发展,重视环境保护与资源节约,发展无废弃物及无污染的热制造技术应成为重要的发展方向。





## 0.3 热制造技术的科学基础

热制造学是在热加工技术基础上形成的工程科学。热制造学涉及热学、力学、冶金学等多学科理论。从理论上认识热制造过程,对于热制造工艺建模,发展先进热制造技术具有极大的挑战性。

### 1. 材料热力学与热能

热制造过程中材料可能存在多种状态,焊接高温足以使材料汽化,铸造要在熔融状态下完成,锻造则要在热塑性状态实现,聚合物材料的流变成型,还有半固态、超塑性成型、固态相变等,材料状态的变化是复杂的物理化学过程,这一过程都要服从热力学和动力学规律。

热力学研究的是物质的热性质与外部的系统变量(如压力、温度、组成等)之间的关系,确定物理化学过程是否发生。动力学是确定某一过程进行的速度,基本的变量是时间和温度。反应及其速率决定了生成物质的结构,而结构又决定了性质。因此,研究热制造过程中的材料行为,应具备热力学与动力学的基本知识。

热制造理论的研究本质上是分析材料状态条件及相互转化问题。材料的导热性、热膨胀性、熔点、热容、焓、熵、自由能等热力学状态函数,在热制造过程中材料状态与行为研究中都是非常重要的。相平衡与相变动力学对于热制造工件的性能设计与控制具有重要意义。

热制造的显著特征是在材料成型与结构制造过程中施加热作用,采用的热能主要来源有燃烧、电磁感应、电弧、电阻、电子束、激光、离子束、微波、太阳能、强力摩擦等,每一种新的能源的出现都给热制造方法带来新的变革。如何利用新的热源发展新的热制造工艺是热制造技术发展的重要方面。研究热源与材料作用过程中的能量转换,热量的有效利用、传播与控制是热制造工艺研究的关键。尽可能提高热源效率,降低能源消耗,减少对环境的污染有着重要的技术、经济意义。

不同的热制造工艺其热作用模式有很大的不同。铸造需要将材料加热到熔化状态,然后浇注成型。锻造需要在热塑性状态下进行成型。而焊接、高能束加工等通常是在材料局部塑性或熔化状态下进行的,为使材料达到形成加工的条件,需要高度集中的热输入,高度集中的能量在材料表面的沉积所引起的非均匀温度场导致材料产生复杂的应力与变形。针对不同的热输入建立符合工程应用的热源模型,对热制造过程中工件内部的温度场进行分析,从而预测材料的行为,是工艺性能分析的基础。

### 2. 热制造传输理论

热制造过程中必然伴随着物质的传输和热量的传输。动量传输、热量传输和质量传输是热制造过程中三个重要的传输现象。热制造传输理论是将流体力学、传热学和传质学的原理应用于热制造传输过程分析。





动量传输的主要研究内容是流体的运动规律。流体流动的规律在热制造过程中是很重要的。如铸造过程涉及到液态材料的流动问题,气体保护焊、等离子加工涉及到气体流动问题,在锻造加工中还会发生塑性流动。热制造的实质就是利用材料的各种流动性能并加以控制而获得所需形状的过程。动量传输理论也是热量传输和质量传输的基础。掌握动量传输理论,对于认识热制造工艺物理本质、优化工艺过程具有重要作用。

Fourier 定律描述了热流量与温度分布之间的本构关系。铸造、锻造、焊接等热制造工艺中广泛采用 Fourier 定律进行传热分析。随着激光、电子束等高能束焊接及加工技术的发展与应用,人们发现了热传导现象中的非 Fourier 效应。非 Fourier 分析的关键是在热传导模型中考虑热量传播速度的影响。应用这一理论,可对强瞬态热过程的非定常物理行为进行分析。

质量传输在热制造过程中也具有重要意义。无论是铸造、锻造,还是焊接等热制造工艺,都存在溶质或原子、分子的传递现象。质量传输与动量传输、热量传输类似。

### 3. 热制造冶金学

凝固及固态相变是热制造冶金学研究的主要问题。铸造成型过程中的材料要经历由液态转变为固态的结晶过程。金属在焊接时,焊缝中的金属也要发生结晶。金属结晶后所形成的组织直接影响金属的加工性能和使用性能。了解金属材料的凝固过程,掌握其规律,对控制金属成型质量,提高成型件性能有重要意义。凝固理论的研究包括:液态金属的结构与性质,液/固界面动力学与形态选择传热,金属重熔、精炼及变质处理对液态金属结构和性质的影响,平衡与非平衡凝固过程,均质形核与非均质形核理论及晶体生长,受控凝固作用机制,晶体的相变及强化原理等。

固态相变包括同素异构转变、非晶态的晶化、回复与再结晶等过程。钢在热处理、锻造过程中都离不开加热和冷却,钢在加热过程中的固态组织转变及对冷却过程的控制决定了冷却后钢的组织类型和性能。金属冷变形后的加热所产生的回复与再结晶称为静态回复和静态再结晶。在热塑性变形过程中,金属内部同时进行着加工硬化和回复、再结晶软化两个相反的过程,这种与金属变形同时发生的回复与再结晶称为动态回复和动态再结晶。掌握固态相变原理的目的是控制热制造工艺过程及工件性能。

### 4. 热制造力学

在铸造、锻压、焊接等热制造过程中,材料发生复杂的运动与变形,特别是随着新材料及热制造工艺的应用,需要更为精确地控制变形。因此,需要将现代力学理论与材料成型技术紧密结合,研究和揭示热制造过程的本质,进而发展适合工程应用的分析方法。

热制造过程中的材料和运动往往同时具有机械的、热学的、光学的、电磁学的和化学的等多种属性,应用连续统力学理论研究热制造过程中的材料流动与变形问题具有重要意义。连