



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

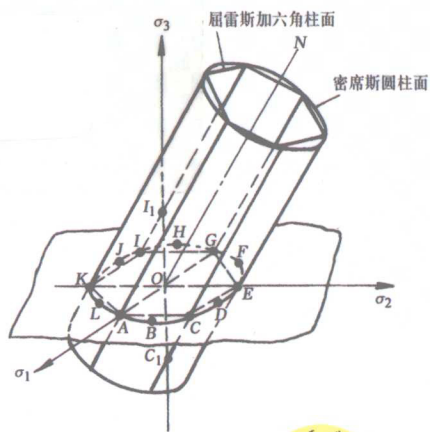
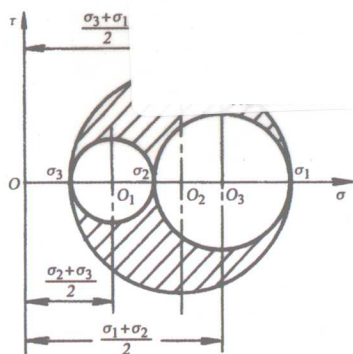
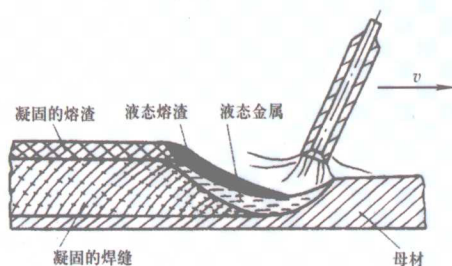
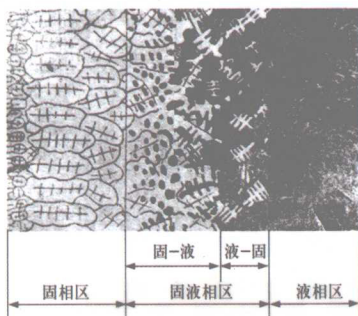


普通高等教育“十五”国家级规划教材

材料成形基本原理

第2版

合肥工业大学 刘全坤 主编 祖方道 李萌盛 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材

材料成形基本原理

第2版

主 编 刘全坤
副主编 祖方遒 李萌盛
参 编 王雷刚 曲仕尧 高锦张
 王国平 陈 刚 陈文琳
主 审 孙国雄 孙 胜



机械工业出版社

第2版前言

本教材是为适应教学改革需要，为材料成形及控制工程专业编写的，为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、普通高等教育“十五”国家级规划教材，作为本专业的技术基础课程教材，供各高校选用。

编写本教材是一种改革的尝试。从材料成形及控制工程专业角度和培养学生宽口径、厚基础的人才目标出发，编写一本适合专业特点的教材，把凝固成形、焊接成形、塑性成形、聚合物成形等近代材料成形技术中共同的物理现象、基本规律，以及各种成形技术的基本原理、理论基础、分析问题的方法加以阐述，使学生对材料成形过程及原理有较深入的理解，为后续的专业课程学习奠定理论基础。

全书分两篇共18章，着重介绍铸件形成原理、焊接冶金原理、塑性成形原理、聚合物成形原理。其中将材料成形中的凝固结晶、化学冶金等共性技术进行整合构成第一篇；将材料成形中的力学原理进行整合构成第二篇。本书包括以下主要内容：

- 1) 液态金属和合金的结构、性质，液态金属与合金凝固结晶的基本规律及结晶过程中的伴随现象，冶金处理对凝固组织与材料性能的影响。
- 2) 液态成形过程中的物理、化学冶金现象和内部规律，成形质量分析和控制方法。
- 3) 金属塑性成形的力学基础、塑性成形的基本原理和分析方法。
- 4) 聚合物流变模型和流变特性。

本书由合肥工业大学刘全坤教授任主编，编写第十二、十三、十四章；合肥工业大学祖方道教授任副主编，编写第一、三、四章和第五章的第一~四节；合肥工业大学李萌盛副教授任副主编，编写第二、八章；江苏大学陈刚教授编写第六章；山东大学曲仕尧教授编写第七、十一章；合肥工业大学王国平副教授编写第九、十章和第五章的第五节；江苏大学王雷刚教授编写绪论及第十五、十六、十七章；东南大学高锦张副教授编写第十八章。为配合多媒体教学，本教材配有多媒体课件，由合肥工业大学陈文琳教授和李萌盛副教授制作完成。

东南大学孙国雄教授和山东大学孙胜教授担任本书主审。孙国雄教授审阅了本书的第一篇，孙胜教授审阅了本书的第二篇。两位主审认真细致的态度和严谨的科学作风给全体编写人员留下了深刻的印象。他们在审阅中为本书的编写和修改提出了许多非常宝贵的意见。合肥工业大学陈其善教授、曹诗倬教授和章兆鹏副教授对本教材的编写和修改提出许多有益的建议。南京工程学院贾俐俐教授参加了本教材的讨论，给予很大的支持。在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中必有许多缺点和错误，敬请各高校师生在使用本教材和读者阅读本教材时能及时批评指正，以便再版时修改。

编者

第1版前言

本教材是为适应教学改革需要，为材料成形及控制工程专业编写的，列入普通高等教育“十五”国家级规划教材，作为本专业的技术基础课程，供各高校选用。

编写本教材是一种改革的尝试。从材料成形及控制工程专业角度和培养学生宽口径、厚基础的人才目标出发，编写一本适合专业特点的教材，把凝固成形、焊接成形、塑性成形、粉末成形和聚合物成形等近代材料成形技术中共同的物理现象、基本规律以及各种成形技术的基本原理、理论基础、分析问题的方法加以阐述，使学生对材料成形过程及原理有较深入的理解，为后续的专业课程学习奠定理论基础。

全书分两篇共19章，着重介绍铸件形成原理、焊接冶金原理、粉末冶金原理、塑性成形原理、聚合物成形原理。其中将材料成形中的凝固结晶、化学冶金等共性技术进行整合构成第一篇；将材料成形中的力学原理进行整合构成第二篇。本书包括以下主要内容：

- 1) 液态金属和合金的结构、性质，液态金属与合金凝固结晶的基本规律及结晶过程中的伴随现象，冶金处理对凝固组织与材料性能的影响。
- 2) 液态成形过程中的物理、化学冶金现象和内部规律，成形质量分析和控制方法。
- 3) 粉末冶金中的粉末制备、压制和烧结的物理、化学现象和基本规律。
- 4) 金属塑性成形的力学基础、塑性成形的基本原理和分析方法。
- 5) 聚合物流变模型和流变特性。

本书由合肥工业大学刘全坤教授任主编，编写第十三、十四、十五章；合肥工业大学祖方道教授任副主编，编写第一、三、四章和第五章的第一~四节；合肥工业大学李萌盛副教授编写第二、八章；江苏大学陈刚副教授编写第六章；山东大学曲仕尧副教授编写第七、十一章；合肥工业大学王国平副教授编写第九、十章和第五章的第五节；合肥工业大学程继贵教授编写第十二章；江苏大学王雷刚教授编写绪论及第十六、十七、十八章；东南大学高锦张副教授编写第十九章。全书由刘全坤教授、祖方道教授统稿。

东南大学孙国雄教授和山东大学孙胜教授担任本书主审。孙国雄教授审阅了本书的第一篇，孙胜教授审阅了本书的第二篇。两位主审认真细致的态度和严谨的科学作风给全体编写人员留下了深刻的印象。他们在审阅中和审稿会上为本书的编写和修改提出了许多非常宝贵的意见。合肥工业大学陈其善教授、曹诗倬教授和章兆鹏副教授参加了审稿会，并且对本教材的编写和修改提出许多有益的建议。南京工程学院贾俐俐教授参加了本教材的讨论，给予很大的支持。在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中必有許多缺点和错误，敬请各高校师生在使用本教材和读者阅读本教材时能及时批评指正，以便再版时修改。

编者

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

绪论 1

- 第一节 材料成形基本原理及其理论指导意义 1
 - 一、材料成形技术 1
 - 二、材料成形基本原理 1

- 三、材料成形原理的理论指导意义 1
- 第二节 材料成形原理的发展 2
 - 一、凝固理论的发展概况 2
 - 二、成形过程化学冶金理论的发展概况 3
 - 三、金属塑性成形理论的发展概况 3
- 第三节 材料成形原理课程的任务与内容 4

第一篇 材料成形过程中的凝固与冶金原理

第一章 液态金属的结构与性质 6

- 第一节 引言 6
- 第二节 液态金属的结构 7
 - 一、液体与固体、气体结构比较及衍射特征 7
 - 二、由物质熔化过程认识液态金属结构 8
 - 三、液态金属结构的理论模型 9
 - 四、实际金属的液态结构 12
 - 五、对液态金属结构的再认识及研究新进展 13
- 第三节 液态合金的性质 15
 - 一、液态合金的粘度 15
 - 二、液态合金的表面张力 18
- 第四节 液态金属的充型能力 25
 - 一、液态金属充型能力的基本概念 25
 - 二、液态金属停止流动机理与充型能力 26
 - 三、影响充型能力的因素 27
- 思考与练习 29

第二章 凝固温度场 31

- 第一节 传热基本原理 31
 - 一、温度场与传热学的基本理论 31
 - 二、凝固传热的基本方程 32
 - 三、凝固温度场的求解方法 33

- 第二节 铸造过程温度场 34
 - 一、半无限大平板铸件凝固过程的一维不稳定温度场 34
 - 二、铸件凝固时间计算 37
 - 三、界面热阻与实际凝固温度场 39
 - 四、铸件凝固方式及其影响因素 40
- 第三节 熔焊过程温度场 42
 - 一、焊接温度场的基本类型 42
 - 二、影响温度场的因素 43
 - 三、典型焊接温度场的解析解 46
- 思考与练习 48

第三章 金属凝固热力学与动力学 50

- 第一节 凝固热力学 50
 - 一、液-固相变驱动力 50
 - 二、曲率、压力对物质熔点的影响 51
 - 三、溶质平衡分配系数 (K_0) 52
- 第二节 均质形核 53
 - 一、形核功及临界半径 53
 - 二、形核率 55
- 第三节 非均质形核 55
 - 一、非均质形核形核功 55
 - 二、非均质形核的形核条件 57
- 第四节 晶体生长 58
 - 一、固-液界面结构及其影响因素 58
 - 二、晶体生长方式 60

三、晶体生长速度	61	第二节 表面激冷晶区及柱状晶区的形成	92
四、晶体生长中位错的形成	62	一、表面激冷晶区的形成	92
思考与练习	62	二、柱状晶区的形成	92
第四章 单相及多相合金的结晶	64	第三节 内部等轴晶的形成机理	93
第一节 凝固过程中溶质再分配	64	一、“成分过冷”理论	93
一、平衡凝固条件下的溶质再分配	64	二、激冷等轴晶型壁脱落与游离理论	93
二、固相无扩散而液相充分混合均匀的溶质再分配	65	三、枝晶熔断及结晶雨理论	95
三、固相中无扩散而液相中只有有限扩散的溶质再分配	66	第四节 铸件宏观结晶组织的控制	95
四、液相中部分混合(有对流作用)的溶质再分配	70	一、合理地控制浇注工艺和冷却条件	95
第二节 合金凝固界面前沿的成分过冷	72	二、孕育处理	97
一、“成分过冷”条件和判据	72	三、动力学细化	99
二、“成分过冷”的过冷度	74	第五节 焊接熔池凝固及控制	99
第三节 “成分过冷”对合金单相固溶体结晶形态的影响	75	一、熔池凝固条件	100
一、热过冷及其对纯金属液固界面形态的影响	75	二、熔池结晶特征	100
二、“成分过冷”对合金固溶体晶体形貌的影响规律	76	三、熔池结晶组织的细化	103
三、窄成分过冷作用下的胞状组织的形成及其形貌	77	思考与练习	104
四、较宽成分过冷作用下的枝晶生长	78	第六章 特殊条件下的凝固与成形	105
五、等轴晶的形成与内生生长	79	第一节 概述	105
六、枝晶间距	80	第二节 快速凝固	105
第四节 共晶合金的凝固	80	一、快速凝固简介	105
一、共晶组织的分类及特点	80	二、快速凝固方法	106
二、非平衡状态下的共晶共生区(Couple-Zone)	81	三、快速凝固显微组织	108
三、离异生长及离异共晶	83	四、金属玻璃	112
四、非小晶面-非小晶面共生共晶的形成	84	第三节 失重条件下的凝固	114
五、非小晶面-小晶面共晶合金的结晶	87	第四节 定向凝固	116
思考与练习	89	思考与练习	117
第五章 铸件与焊缝宏观组织及其控制	91	第七章 液态金属与气相的相互作用	118
第一节 铸件的宏观组织	91	第一节 气体的来源与产生	118
一、平衡凝固条件下的宏观组织	91	一、焊接区内的气体	118
二、非平衡凝固条件下的宏观组织	91	二、铸造过程中的气体	120
三、铸件的宏观组织	91	第二节 气体在金属中的溶解	123
一、铸件的宏观组织	91	一、气体的溶解过程	123
二、铸件的宏观组织	91	二、气体的溶解度	124
三、铸件的宏观组织	91	第三节 气体对金属的氧化	127
四、铸件的宏观组织	91	一、金属氧化还原方向的判据	127

二、氧化性气体对金属的氧化	128	一、研究焊接热循环的意义	155
第四节 气体的影响与控制	129	二、焊接热循环的参数及特征	155
一、气体对金属质量的影响	129	三、焊接热循环参数的计算及其影响	
二、气体的控制措施	130	因素	156
思考与练习	132	第二节 焊接热循环条件下的金属组织	
第八章 液态金属与熔渣的相互作		转变特点	157
用	133	一、焊接过程的特殊性	158
第一节 渣相的作用与形成	133	二、焊接加热过程的组织转变	158
一、熔渣的作用与分类	133	三、焊接冷却过程的组织转变	159
二、熔渣的来源与构成	134	第三节 焊接热影响区的组织与性能分	
第二节 渣体结构及碱度	135	析	160
一、熔渣结构的分子理论	135	一、焊接热影响区的组织分布	160
二、熔渣结构的离子理论	136	二、焊接热影响区的性能	162
三、熔渣的碱度	137	思考与练习	168
第三节 渣相的物理性质	138	第十一章 凝固缺陷及控制	169
一、熔渣的凝固温度与密度	138	第一节 合金中的成分偏析	169
二、熔渣的粘度	139	一、微观偏析	169
三、熔渣的表面张力及界面张力	140	二、宏观偏析	171
第四节 活性熔渣对金属的氧化	141	第二节 气孔与夹杂	174
一、熔渣的氧化性	141	一、气孔	174
二、扩散氧化	142	二、夹杂物	179
三、置换氧化	143	第三节 缩孔与缩松	183
思考与练习	144	一、金属的收缩	183
第九章 液态金属的净化与精炼	145	二、缩孔与缩松的分类及特征	186
第一节 液态金属的脱氧	145	三、缩孔与缩松的形成机理	187
一、先期脱氧	146	四、影响缩孔与缩松的因素及防止措	
二、沉淀脱氧	146	施	189
三、扩散脱氧	148	第四节 应力	192
四、真空脱氧	149	一、应力的形成	192
第二节 液态金属的脱碳精炼反应	149	二、控制应力的措施	195
第三节 液态金属的脱硫	151	第五节 热裂纹	196
一、沉淀脱硫	151	一、热裂纹的分类及特征	196
二、熔渣脱硫	152	二、热裂纹的形成机理	197
第四节 液态金属的脱磷	153	三、影响热裂纹形成的因素	199
思考与练习	154	四、防止热裂纹的措施	203
第十章 焊接热影响区的组织与性		第六节 冷裂纹	204
能	155	一、冷裂纹的分类及特征	204
第一节 焊接热循环	155	二、影响冷裂纹产生的因素	205
		三、延迟裂纹的形成机理	208
		四、冷裂纹的控制	209
		思考与练习	210

第二篇 材料成形力学原理

第十二章 金属塑性成形的物理基础	214	一、主应力	246
第一节 概述	214	二、应力张量不变量	247
一、金属塑性成形的特点	214	三、主切应力和最大切应力	247
二、塑性成形工艺的分类	214	四、应力偏张量和应力球张量	249
第二节 金属在冷态下的塑性变形	216	五、等效应力	250
一、金属的晶体结构和组织	216	第四节 应力平衡微分方程	250
二、金属冷态下的塑性变形机理	216	第五节 应力莫尔圆	251
三、合金的塑性变形	218	一、平面应力状态下的应力莫尔圆	252
四、冷塑性变形对金属组织和性能的影响	220	二、三向应力莫尔圆	253
第三节 金属的热塑性变形	222	思考与练习	254
一、热塑性变形时金属的软化过程	222	第十四章 应变分析	256
二、热塑性变形机理	225	第一节 位移与应变	256
三、双相合金热塑性变形的特点	226	第二节 质点的应变状态和应变张量	257
四、热塑性变形对金属组织和性能的影响	227	第三节 小应变几何方程、应变连续方程	259
第四节 对塑性和变形抗力的影响因素	229	一、小应变几何方程	259
一、塑性指标和变形抗力	229	二、应变连续方程	261
二、对塑性的影响因素	231	第四节 有限变形	262
三、对变形抗力的影响因素	235	第五节 塑性变形体积不变条件	264
第五节 金属的超塑性	236	第六节 速度分量和速度场、位移增量和应变增量、应变速率张量	265
一、超塑性变形的特点	237	一、速度分量和速度场	265
二、超塑性变形的类型	237	二、位移增量和应变增量	265
三、超塑性变形时组织的变化和对力学性能的影响	238	三、应变速率张量	266
四、超塑性变形机理	239	第七节 对数应变	267
思考与练习	240	第八节 平面问题和轴对称问题	268
第十三章 应力分析	241	一、平面应力问题	268
第一节 张量的基本知识	241	二、平面应变问题	269
一、角标符号和求和约定	241	三、轴对称问题	270
二、张量的基本概念	242	思考与练习	272
三、张量的基本性质	243	第十五章 屈服准则	273
四、应力张量	243	第一节 材料真实应力-应变曲线及材料模型	273
第二节 外力、应力和点的应力状态	243	一、拉伸图和条件应力-应变曲线	273
一、外力和应力	243	二、拉伸真实应力-应变曲线	274
二、直角坐标系中一点的应力状态	244	三、拉伸真实应力-应变曲线的塑性失稳点特性	275
第三节 主应力和主切应力	246		

四、材料模型	275	一、摩擦对金属塑性变形和流动的影响	302
第二节 理想塑性材料的屈服准则	280	二、工具形状对金属塑性变形和流动的影响	302
一、屈服准则的概念	280	三、金属各部分之间的关系对塑性变形和流动的影响	303
二、屈雷斯加 (H. Tresca) 屈服准则	280	四、金属本身性质不均匀对塑性变形和流动的影响	303
三、密塞斯 (von Mises) 屈服准则	281	第三节 不均匀变形、附加应力和残余应力	303
第三节 屈服准则的几何表达	281	一、不均匀变形	303
一、主应力空间中的屈服表面	281	二、附加应力	304
二、平面应力状态的屈服轨迹	282	三、残余应力	304
三、 π 平面上的屈服轨迹	283	第四节 金属塑性成形中的摩擦和润滑	305
第四节 两个屈服准则的统一表达式	284	一、金属塑性成形中摩擦的特点及其影响	305
第五节 应变硬化材料的屈服与加载表面	285	二、塑性成形中的摩擦分类及机理	306
思考与练习	286	三、塑性成形时摩擦力的计算	307
第十六章 材料本构关系	288	四、影响摩擦因数的主要因素	308
第一节 弹性应力应变关系	288	五、塑性成形的摩擦因数的测定方法	308
第二节 塑性应力应变关系	289	六、塑性成形中的润滑	309
第三节 增量理论	290	思考与练习	311
一、列维-密塞斯 (Levy-Mises) 理论	290	第十八章 塑性成形力学的工程应用	312
二、应力-应变速率方程	291	第一节 金属塑性成形问题的求解方法概述	312
三、普朗特-劳斯 (Prandtl-Reuss) 理论	291	第二节 主应力法及其求解要点	313
第四节 全量理论	292	第三节 主应力法的应用	313
第五节 粉末体塑性成形理论	293	一、平面应变镦粗的变形力	314
一、基本假设	293	二、轴对称镦粗的变形力	315
二、粉末体变形的屈服准则	294	三、通过圆锥孔形挤压的变形力	315
三、粉末体塑性变形时的应力应变关系	295	四、在板料成形中的应用	316
第六节 金属粘塑性本构关系	296	第四节 滑移线的基本理论	317
一、金属的粘塑性行为	296	一、平面变形应力状态的特点	318
二、粘塑性本构方程	298	二、最大切应力迹线——滑移线的形成	318
第七节 聚合物熔体的流变特性	298	三、关于 α 、 β 滑移线和 ω 角的规定	319
一、聚合物熔体的非牛顿剪切粘性	298	四、滑移线的微分方程	320
二、聚合物熔体的弹性行为	299	五、滑移线的主要特性	320
思考与练习	299	六、滑移线场的建立	321
第十七章 金属塑性变形与流动问题	301	第五节 滑移线法的应用	324
第一节 金属流动方向——最小阻力定律	301		
第二节 影响金属塑性变形和流动的因素	302		

一、平冲头压入半无限体	324	五、上限法原理	331
二、平砧横镦圆断面轴	326	第七节 上限法的应用	333
第六节 塑性极值原理和上限法	328	一、上限法的解题步骤	333
一、概述	328	二、应用实例	334
二、虚功原理与基本能量方程式	329	思考与练习	337
三、速度间断	329	参考文献	339
四、最大散逸功原理	330		

绪 论

第一节 材料成形基本原理及其理论指导意义

一、材料成形技术

材料是现代文明各个领域不可缺少的物质基础。而材料的应用价值，体现在形成一定形状、轮廓、尺寸并具备应有使用性能的零件、部件、构件，以特定方式组合、装配而构成各种装置、设备、仪器、设施、器件或用具，从而服务于各行各业。使材料成为零件、部件、构件等制品的工艺过程称为“材料成形”。材料成形一般包括传统的铸造、锻压、焊接、粉末冶金成形。随着科学技术的发展，新材料新工艺的不断涌现，材料成形的内涵和外延有了很大的拓宽，材料成形向精密、柔性、复合、高效、清洁、优质方向发展。

材料成形与各行各业密不可分。可以毫不夸张地说，没有材料成形就没有现代工业、现代农业、交通运输、城市建设、能源与矿产等国民经济的基础设施和精良装备；没有材料成形就没有现代通信、自动控制、航海、航空、航天等高新技术领域存在；没有材料成形，人民生活需求及国防建设就没有保障。

二、材料成形基本原理

材料成形是一个材料、能量、信息不断变化的过程。不管何种材料，不管采用什么方式成形，在成形过程中均遵循金属学、冶金学、物理化学、热力学、塑性力学等的基本定律。材料成形原理是上述基础理论在材料成形中的应用而形成的技术理论。不同的材料种类（金属、非金属、复合材料）和材料形态（液态、固态、粉末、半固态）的成形，形成了相应的材料成形原理。如金属学、冶金学、热力学、物理化学等在指导铸造工艺、焊接工艺设计时形成了铸件形成原理、焊接冶金原理；塑性力学在塑性成形中的应用形成了塑性成形原理；冶金学、热力学等在粉末成形、烧结中的应用形成了粉末冶金原理；物理化学、热力学、粘性流体力学等在聚合物成形中的应用形成聚合物成形原理。

三、材料成形原理的理论指导意义

材料成形原理是指导材料成形工艺设计，进行质量分析与控制，正确选择成形方法与设备的理论依据，也是新材料、新工艺开发的理论指导。

(1) 对液态成形的指导作用 通过对液态金属结晶机理、凝固规律的认识以及凝固温度场的分析，为铸造工艺及模具设计、焊接方法与设备选择、铸件结构设计与性能分析、焊接接头设计与性能分析奠定了理论基础，也为快速凝固、定向凝固、激光表面重熔与焊接等新工艺开发提供了理论指导。

(2) 对塑性成形的指导作用 通过对塑性成形过程应力应变场的分析，为塑性成形工艺及模具设计、成形设备选择、冲压件和锻件性能分析奠定了理论基础，同时也为无模成形、激光成形、电磁成形、液压成形等新工艺开发提供了理论指导。

第二节 材料成形原理的发展

一、凝固理论的发展概况

凝固——从液态向固态转变的相变过程，广泛存在于自然界和工程技术领域。从钢铁、非铁金属（或合金）冶金生产中单铸锭及连铸锭的结晶到材料成形领域铸件及焊缝的凝固，以及非晶、微晶材料的快速凝固，半导体及各种功能晶体的液相生长，高分子塑料、橡胶在模具中的固化，均属凝固过程。由于大多数物质的凝固属结晶过程，所以凝固多以晶体生长规律和晶体的内部结构、形貌、成分和缺陷为研究对象。

实现对凝固过程的控制是人们长期追求的目标，其历史可以追溯到公元前 2000 多年前的青铜器时代。从精美的铸造文物及 2500 年前的《考工记》记载可以看出，我国古代对合金的成分控制、冶炼技术及凝固收缩的控制等方面已积累了丰富的经验。当然，现代凝固理论和技术的迅速发展与材料科学的进步密切相关，其发展大体经历了以下几个阶段：

20 世纪 20 年代 Kossel 和 Stranski 提出完整晶体生长的微观理论；40 年代 Frank 发展了缺陷晶体生长的微观理论。这些工作为后来的晶体生长界面理论奠定了基础。20 世纪 50 ~ 60 年代是经典凝固理论的诞生时期。50 年代半导体的问世及 60 年代激光晶体的发展，要求人们生长单晶并有效地控制晶体的结构与成分，于是展开了围绕传热、传质的液、固成分分布和界面稳定性研究。在 Chalmers 的指导下，Tiller、Jackson 和 Rutter 在对凝固界面附近溶质分布求解的基础上提出了著名的“成分过冷”理论，首次将传质和传热因素结合起来分析凝固过程的组织形态问题。此后，Jackson 和 Hunt 提出了枝晶和共晶合金凝固过程扩散场的理论解，并在此基础上获得枝晶及共晶间距与凝固条件（温度梯度和凝固速率）的关系式，得到许多实验结果的支持。Flemings 等从工程的角度出发，进一步考虑了凝固过程两相区内的液相流动效应，提出局部溶质再分配方程等理论模型，推动了凝固理论的发展。俄裔捷克工程师 Chvorinov 巧妙地引入铸件模数的概念，导出了著名的平方根定律，至今仍是铸造工艺设计的理论依据之一。

20 世纪 60 年代以来，人们把研究工作的重点放在经典凝固理论的应用上。通过大量的实验研究，Chalmers 及大野笃美等人提出“激冷等轴晶游离”理论，Jackson、Southi 等人提出“枝晶熔断”及“结晶雨”理论，以此为指导可有效控制结晶过程和凝固组织。在这些理论的基础上，机械及超声波振动、机械及电磁液相搅拌、孕育处理、变质处理等技术得以发展与推广并仍在不断改进及完善，使人们在控制铸锭、铸件凝固组织形貌和细化晶粒方面更加得心应手，并在控制焊缝结晶组织上也得到了很好的运用。半固态铸造、定向凝固、激光小体积高能量重熔条件下的凝固（表面处理或焊接），零维（粉体）、低维（线材、薄带及表面膜）和体材的快速凝固等先进工艺和技术均在这一时期诞生。

在最近的 20 余年中，凝固理论和技术研究进入了新的历史发展时期。计算机技术的应用，使人们能够直观定量地描述液态金属的凝固过程和预测凝固缺陷，从而逐步实现科学地进行工艺设计。由于对高性能先进材料的需求和技术的进步，在极端条件下的凝固过程（快速凝固、极低速凝固）、特殊条件下的凝固过程（微重力凝固、超重力凝固、超高压凝固），以及纤维增强及颗粒增强金属基复合材料的凝固等方面进行了大量的研究。在这些凝固条件下，某些普通凝固过程中影响较小并在经典凝固理论中忽略了的因素变成主要影响因

素。为了解释各种极端和特殊条件下的实验现象，人们在尝试建立新的理论模型。

二、成形过程化学冶金理论的发展概况

铸件浇注前的金属熔炼过程至液态金属充型后的凝固阶段，熔焊中熔滴、熔池的形成至凝固成焊缝，熔融的金属与周围的气相介质、液相熔渣及固相型壁所构成的多相体系中，发生了复杂的物理冶金、化学冶金反应。这些反应既服从于冶金学的一般原理，又具有成形工艺条件所局限的特殊性。例如熔滴、熔池金属与周围介质间的化学冶金反应，由于熔体的高过热度、大比表面积和短暂的存在时间等特点，焊接化学冶金不仅要依据化学热力学中反应过程自由能的变化准则来判断冶金反应的方向，还要考虑参与反应的各相在熔体中的质量传输、界面反应速度、电弧机械力作用等动力学因素。

近几十年来，随着计算机技术的发展应用和相关学科的进步，为成形冶金过程研究打开了方便之门。建立在各种物理模型上的复杂的数理方程，借助计算机可进行数值求解，使研究由定性阶段进入定量阶段。随着成形工艺过程数据库、专家系统的建立与完善，成形过程的数值模拟在越来越多的研究领域中得以实现。人们可以对冶金反应的微观、宏观过程进行定量认识与动态模拟，可以逼真地展现各种工艺条件下凝固缺陷的形成过程、成形工件内应力与应变的形成过程，从而可以对各种工艺条件下的铸件与焊缝质量、焊接热影响区组织与性能进行预测。通过多种因素的综合数值模拟和少量的验证性试验，人们在成形过程研究领域已经步入“更真实、更准确、更便捷的高速公路”，使不可见的过程实现可视化。

三、金属塑性成形理论的发展概况

金属的塑性加工已有悠久的历史。早在公元前 2000 多年前的青铜器时代，我国劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能，并掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。

随着近代科学技术的发展，人们赋予了塑性加工技术以崭新的内涵。但是，作为这门技术的理论基础——金属塑性成形原理则发展得较晚，直到 20 世纪 40 年代才逐步形成独立的学科。它是在塑性变形的物理、物理-化学和力学的基础上发展起来的一门新兴的工程应用技术理论科学。

金属塑性变形的物理及物理-化学基础属于金属学及金属物理范畴。20 世纪 30 年代提出的位错理论可以解释塑性变形过程中很多现象，特别是对塑性变形的微观机理有了科学的解释。对于金属的塑性，人们也有了更深刻的认识。塑性，作为金属状态属性，不仅取决于金属材料本身（如晶格类型、化学成分和组织结构等），还取决于变形的外部条件（如变形温度、变形速度及力学状态等），从而使人们对塑性变形的物理本质有了充分的认识。

塑性成形力学是塑性成形原理的另一个重要内容，它是在塑性理论的发展和应用中逐渐形成的。塑性理论的发展历史可追溯到 1864 年，法国工程师屈雷斯加（H. Tresca）首次提出了最大切应力屈服准则——屈雷斯加屈服准则。1870 年，圣维南（B. Saint-Venant）提出了应力-应变速率方程（塑性流动方程）。列维（M. Levy）于 1871 年提出了应力-应变增量关系。后来一段时间，塑性理论发展缓慢，直到 20 世纪初才有所进展。1913 年，密塞斯（von Mises）从纯数学角度提出了另一新的屈服准则——密塞斯屈服准则。1923 年，汉基（H. Hencky）和普朗特（L. Prandtl）论述了平面塑性变形中滑移线的几何性质。1930 年，劳斯（A. Reuss）根据普朗特的观点提出了考虑弹性应变增量的应力-应变关系。至此，塑性理论的基础已经奠定。

德国学者卡尔曼（von Karman）最早将塑性理论用于金属塑性加工，他在 1925 年用初

等方法求出了轧制时的应力分布规律。萨克斯 (C. Sachs) 和齐别尔 (E. Siebel) 在研究拉丝过程中提出了相似的求解方法——切块法 (又称主应力法)。此后, 人们对塑性成形过程的应力、应变和变形力的求解逐步建立了许多理论求解方法, 如滑移线法、工程计算法、变形功法、上限法、上限元法、逐次单元分析法、视塑性法等。随着计算机技术的发展, 有限元方法在塑性成形力学分析中起到了重要的作用, 它可以模拟材料的变形和在流动过程中发生的一系列现象, 帮助人们分析缺陷产生的原因和采取相应的预防措施; 还可以对模具的受力状况进行分析, 通过改进结构来提高模具的强度。塑性成形力学理论将随着对大量工程问题的进一步认识、研究和解决而得到不断的完善与发展。

第三节 材料成形原理课程的任务与内容

“材料成形基本原理”是材料成形及控制工程专业的技术基础课。本课程的任务是对材料的凝固成形、焊接成形、塑性成形、粉末成形和聚合物成形等近代材料成形技术中共同的物理现象、基本规律以及各种成形技术的基本原理、理论基础、分析问题的方法加以阐述, 使学生对材料成形过程及原理有深入的理解, 为后续的成形加工方法、设备控制等课程的学习, 为开发新材料和新的成形技术奠定理论基础。

本书内容分二篇共十八章, 着重介绍铸件形成、焊接冶金、塑性成形、聚合物等各种材料成形的基本原理。其中将材料成形中的凝固结晶、化学冶金等共性技术进行整合构成第一篇; 将材料成形中的力学原理进行整合构成第二篇。这是本书的一个尝试, 也是本书的特色之一。本书主要内容:

- 1) 液态金属和合金的结构、性质, 液态金属与合金凝固结晶的基本规律及结晶过程中的伴随现象, 冶金处理对凝固组织与材料性能的影响。
- 2) 液态成形过程中的物理、化学冶金现象和内部规律, 成形质量分析和控制方法。
- 3) 塑性成形的物理基础, 从微观上研究塑性变形机理及变形条件对塑性和变形抗力的影响; 阐明塑性变形的力学基础, 分析塑性变形力学问题的各种解法。
- 4) 聚合物流变模型和流变特性。

第一篇

材料成形过程中的凝固 与冶金原理

1

第一章 液态金属的结构与性质

第一节 引言

自然界有千万种不同的液体，按液体结构和内部作用力可将其分为：原子液体（如液态金属、液化惰性气体）、分子液体（如极性与非极性分子液体）、离子液体（如各种简单的及复杂的熔盐）等。从表观上看，液体与气体一样可完全占据容器的空间并取得容器内腔的形状。但液体与固体一样具有自由表面，而气体不具有自由表面；与固体相像，液体可压缩性很低，而这一点与气体又恰恰相反；液体最显著的性质之一是具有流动性，不能够像固体那样承受切应力，表明液体的原子或分子之间的结合力没有固体中强，这一点类似于气体。液体的结构特征是“远程无序”而“近程有序”。液体的性质包括：密度、粘度、电导率、热导率和扩散系数等物理性质；等压热容、等容热容、熔化和气化潜热、表面张力等物理化学性质；蒸气压、膨胀和压缩系数及其他热力学性质，等等。

材料成形过程大多经历液-固转变。工程技术及研究人员为了更好地掌握凝固、冶金等方面的规律和原理，往往需要对液体的结构和性质有较为深入的了解和认识。比如：

- 1) 凝固过程的形核及晶体生长的热力学与液体的界面张力、潜热等性质有关。
 - 2) 探索凝固的微观机制需要人们深入地理解熔体的结构信息。
 - 3) 成分偏析、固-液界面类型及晶体生长方式受液体的原子扩散系数、界面张力、传热系数、结晶潜热、粘度等性质共同控制。
 - 4) 性能优异的非晶、微晶、纳米晶材料的凝固，以及诸种低维功能晶体的液相生长，也受到与传热及（或）传质相关的液相性质和微观结构的制约。
 - 5) 特种条件下（如电磁场、高压、微重力、超重力等物理场下）的现代凝固技术均需考虑液体的相关物理性质。
 - 6) 铸造合金及焊接熔池的精炼，其去除有害杂质和气体的效果，除受热力学因素影响外，还受到反应物和生成物在金属熔体及渣相中的扩散速度的影响。
 - 7) 熔炼炉的“大熔池”及焊接的“小熔池”熔渣的工艺性，如覆盖性（影响对合金液的保护能力）、成形性、分离性（脱渣难易程度）等，与熔渣-金属液之间的界面张力、渣液自身的表面张力、熔渣的粘度、熔渣-金属的熔点之差等因素相关。
 - 8) 重力浇注及压力充型铸件外部轮廓和尺寸精度、内部缩孔及缩松的控制，与合金熔体的粘度、表面张力、界面张力、熔点、比热容、结晶潜热、热导率等性质密切相关。
- 液态物理学研究指出，液态物质的各项物理性质及热力学性质主要取决于其液体结构。虽然人类对液态的认识比固态和气态要肤浅得多，目前仍没有成熟的理论模型给予液体结构满意的描述，但人类对液体的研究从未间断过，取得了许多瞩目的阶段性成就，特别是近30多年来对液体结构的研究有了许多新的突破。本章将以液态金属为例，概要介绍有关液体结构的知识，并适当体现近年来新的突破和成果。对液体的性质，主要讨论与液态成形相

关的粘度和表面张力。

第二节 液态金属的结构

一、液体与固体、气体结构比较及衍射特征

现代晶体学表明，晶体的原子以一定方式周期排列在三维空间的晶格结点上，表现出平移、对称性特征，同时原子以某种模式在平衡位置上作热振动。相对于晶体这种原子有序排列，气体的分子、原子不停地作无规律运动，其分子平均间距比分子的尺寸要大得多，气体分子的统计分布相对于任何一个分子而言是均匀的，在空间分布以完全无序为特征。液体的原子分布相对于周期有序的晶态固体是不规则的，液体结构宏观上不具备平移、对称性，表现出长程无序特征；而相对于完全无序的气体，液体中存在着许多不停“游荡”着的局域有序的原子集团，液体结构表现出局域范围的近程有序（Short Range Ordering）。

图 1-1 所示为描述不同类型物质结构的示意图以及对应的偶分布函数特征。对于粒子数为 N 、体积为 V 的任一体系，偶分布函数 $g(r)$ 的物理意义是距某一参考粒子 r 处找到另一个粒子的几率。换言之，表示离开参考原子（处于坐标原点 $r=0$ ）距离为 r 位置的数密度 $\rho(r)$ 对于平均数密度 ρ_0 ($=N/V$) 的相对偏差。若 $g(r)=1$ ，则表示该位置的原子数密度等于整体液体系统的平均数密度 ρ_0 。对于气体，由于其粒子（分子或原子）统计分布的均匀性，其

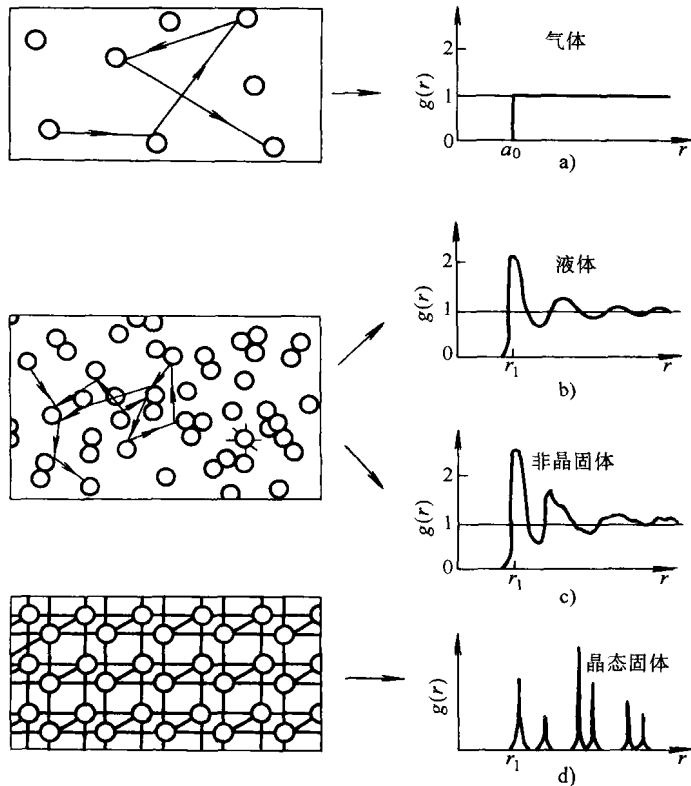


图 1-1 气体、液体、非晶及晶态固体的结构特点及衍射特征