

本教材是材料成形及控制工程专业的基础理论教材，列入普通高等教育“十五”国家级规划教材。本教材从培养学生宽口径、厚基础的人才目标出发，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的共同的物理现象、基本规律及基本原理加以阐述，使学生对材料成形过程及其基本原理与方法有较深入和系统的理解，为后续课程的学习奠定理论基础。本教材分为两篇，共 19 章。第一篇主要讲述材料成形中的凝固结晶学、化学冶金原理等共性技术；第二篇主要讲述材料成形中的力学原理。

本教材可作为普通高等学校材料成形及控制工程专业和机械类本科生教材，也可作为相关专业研究生和有关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目（CIP）数据

材料成形基本原理 / 刘全坤主编 .—北京：机械工业出版社，2004.10

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-111-15275-1

I. 材... II. 刘... III. 金属加工—高等学校—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 094679 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张祖凤

责任编辑：冯 钊 版式设计：霍永明 责任校对：陈延翔

封面设计：饶 薇 责任印制：

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·13.625 印张·529 千字

定价： 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 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；合肥工业大学祖方遒教授任副主编，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

2004年5月

# 目 录

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、粉末冶金理论的发展	4
四、金属塑性成形理论的发展概况	4
第三节 材料成形原理课程的任务与内容	5
第一篇 材料成形过程中的凝固与冶金原理	7
第一章 液态金属的结构与性质	8
第一节 引言	8
第二节 液态金属的结构	9
一、液体与固体、气体结构比较及衍射特征	9
二、由物质熔化过程认识液态金属结构	10
三、液态金属结构的理论模型	12
四、实际金属的液态结构	15
五、对液态金属结构的再认识及研究新进展	16
第三节 液态合金的性质	19
一、液态合金的粘度	19
二、液态合金的表面张力	22
第四节 液态金属的充型能力	31
一、液态金属充型能力的基本概念	31
二、液态金属停止流动机理与充型能力	32
三、影响充型能力的因素	34
思考与练习	36
第二章 凝固温度场	37
第一节 传热基本原理	37

一、温度场与传热学的基本理论 .....	37
二、凝固传热的基本方程 .....	38
三、凝固温度场的求解方法 .....	39
第二节 铸造过程温度场 .....	41
一、半无限大平板铸件凝固过程的一维不稳定温度场 .....	41
二、铸件凝固时间计算 .....	44
三、界面热阻与实际凝固温度场 .....	46
四、铸件凝固方式及其影响因素 .....	47
第三节 熔焊过程温度场 .....	49
一、焊接温度场的基本类型 .....	49
二、影响温度场的因素 .....	51
三、典型焊接温度场的解析解 .....	53
思考与练习 .....	56
第三章 金属凝固热力学与动力学 .....	58
第一节 凝固热力学 .....	58
一、液—固相变驱动力 .....	58
二、曲率、压力对物质熔点的影响 .....	59
三、溶质平衡分配系数 ( $K_0$ ) .....	60
第二节 均质形核 .....	62
一、形核功及临界半径 .....	62
二、形核率 .....	64
第三节 非均质形核 .....	64
一、非均质形核形核功 .....	64
二、非均质形核的形核条件 .....	67
第四节 晶体生长 .....	67
一、固—液界面结构及其影响因素 .....	67
二、晶体生长方式 .....	70
三、晶体生长速度 .....	71
四、晶体生长中位错的形成 .....	72
思考与练习 .....	73
第四章 单相及多相合金的结晶 .....	74
第一节 凝固过程中溶质再分配 .....	74
一、平衡凝固条件下的溶质再分配 .....	74
二、固相无扩散而液相充分混合均匀的溶质再分配 .....	75
三、固相中无扩散而液相中只有有限扩散的溶质再分配 .....	77
四、液相中部分混合 (有对流作用) 的溶质再分配 .....	81
第二节 合金凝固界面前沿的成分过冷 .....	83

一、“成分过冷”条件和判据 .....	84
二、“成分过冷”的过冷度 .....	86
第三节 “成分过冷”对合金单相固溶体结晶形态的影响 .....	87
一、热过冷及其对纯金属液固界面形态的影响 .....	87
二、“成分过冷”对合金固溶体晶体形貌的影响规律 .....	88
三、窄成分过冷作用下的胞状组织的形成及其形貌 .....	89
四、较宽成分过冷作用下的枝晶生长 .....	90
五、等轴晶的形成与内生生长 .....	91
六、枝晶间距 .....	92
第四节 共晶合金的凝固 .....	93
一、共晶组织的分类及特点 .....	93
二、非平衡状态下的共晶共生区 (Couple—Zone) .....	95
三、离异生长及离异共晶 .....	97
四、非小晶面—非小晶面共生共晶的形成 .....	98
五、非小晶面—小晶面共晶合金的结晶 .....	102
思考与练习 .....	104
第五章 铸件与焊缝宏观组织及其控制 .....	106
第一节 铸件的宏观组织 .....	106
第二节 表面激冷晶区及柱状晶区的形成 .....	107
一、表面激冷晶区的形成 .....	107
二、柱状晶区的形成 .....	107
第三节 内部等轴晶的形成机理 .....	108
一、“成分过冷”理论 .....	108
二、激冷等轴晶型壁脱落与游离理论 .....	109
三、枝晶熔断及结晶雨理论 .....	111
第四节 铸件宏观结晶组织的控制 .....	111
一、合理地控制浇注工艺和冷却条件 .....	112
二、孕育处理 .....	113
三、动力学细化 .....	115
第五节 焊接熔池凝固及控制 .....	116
一、熔池凝固条件 .....	116
二、熔池结晶特征 .....	117
三、熔池结晶组织的细化 .....	120
思考与练习 .....	121
第六章 特殊条件下的凝固与成形 .....	122
第一节 概述 .....	122
第二节 快速凝固 .....	122

一、快速凝固简介 .....	122
二、快速凝固方法 .....	123
三、快速凝固显微组织 .....	126
四、金属玻璃 .....	130
第三节 失重条件下的凝固 .....	134
第四节 定向凝固 .....	135
思考与练习 .....	137
<b>第七章 液态金属与气相的相互作用 .....</b>	<b>138</b>
第一节 气体的来源与产生 .....	138
一、焊接区内的气体 .....	138
二、铸造过程中的气体 .....	141
第二节 气体在金属中的溶解 .....	144
一、气体的溶解过程 .....	144
二、气体的溶解度 .....	145
第三节 气体对金属的氧化 .....	149
一、金属氧化还原方向的判据 .....	149
二、氧化性气体对金属的氧化 .....	150
第四节 气体的影响与控制 .....	151
一、气体对金属质量的影响 .....	151
二、气体的控制措施 .....	152
思考与练习 .....	155
<b>第八章 液态金属与熔渣的相互作用 .....</b>	<b>156</b>
第一节 渣相的作用与形成 .....	156
一、熔渣的作用与分类 .....	156
二、熔渣的来源与构成 .....	157
第二节 渣体结构及碱度 .....	159
一、熔渣结构的分子理论 .....	159
二、熔渣结构的离子理论 .....	160
三、熔渣的碱度 .....	161
第三节 渣相的物理性质 .....	162
一、熔渣的凝固温度与密度 .....	162
二、熔渣的粘度 .....	164
三、熔渣的表面张力及界面张力 .....	165
第四节 活性熔渣对金属的氧化 .....	165
一、熔渣的氧化性 .....	165
二、扩散氧化 .....	167
三、置换氧化 .....	168

思考与练习 .....	169
<b>第九章 液态金属的净化与精炼</b> .....	<b>171</b>
<b>第一节 液态金属的脱氧</b> .....	<b>171</b>
一、先期脱氧 .....	172
二、沉淀脱氧 .....	173
三、扩散脱氧 .....	175
四、真空脱氧 .....	176
<b>第二节 液态金属的脱碳精炼反应</b> .....	<b>177</b>
<b>第三节 液态金属的脱硫</b> .....	<b>178</b>
一、沉淀脱硫 .....	179
二、熔渣脱硫 .....	179
<b>第四节 液态金属的脱磷</b> .....	<b>181</b>
思考与练习 .....	182
<b>第十章 焊接热影响区的组织与性能</b> .....	<b>183</b>
<b>第一节 焊接热循环</b> .....	<b>183</b>
一、研究焊接热循环的意义 .....	183
二、焊接热循环的参数及特征 .....	184
三、焊接热循环参数的计算及其影响因素 .....	184
<b>第二节 焊接热循环条件下的金属组织转变特点</b> .....	<b>186</b>
一、焊接过程的特殊性 .....	186
二、焊接加热过程的组织转变 .....	187
三、焊接冷却过程的组织转变 .....	188
<b>第三节 焊接热影响区的组织与性能分析</b> .....	<b>189</b>
一、焊接热影响区的组织分布 .....	189
二、焊接热影响区的性能 .....	192
思考与练习 .....	199
<b>第十一章 凝固缺陷及控制</b> .....	<b>200</b>
<b>第一节 合金中的成分偏析</b> .....	<b>200</b>
一、微观偏析 .....	200
二、宏观偏析 .....	202
<b>第二节 气孔与夹杂</b> .....	<b>206</b>
一、气孔 .....	206
二、夹杂物 .....	213
<b>第三节 缩孔与缩松</b> .....	<b>217</b>
一、金属的收缩 .....	217
二、缩孔与缩松的分类及特征 .....	221
三、缩孔与缩松的形成机理 .....	222

四、影响缩孔与缩松的因素及防止措施 .....	225
第四节 应力 .....	228
一、应力的形成 .....	228
二、控制应力的措施 .....	232
第五节 热裂纹 .....	233
一、热裂纹的分类及特征 .....	233
二、热裂纹的形成机理 .....	234
三、影响热裂纹形成的因素 .....	237
四、防止热裂纹的措施 .....	241
第六节 冷裂纹 .....	242
一、冷裂纹的分类及特征 .....	242
二、影响冷裂纹产生的因素 .....	244
三、延迟裂纹的形成机理 .....	248
四、冷裂纹的控制 .....	249
思考与练习 .....	250
第十二章 粉末冶金原理 .....	251
第一节 金属粉末的生产 .....	251
一、机械法生产金属粉末 .....	251
二、物理化学法生产金属粉末 .....	253
三、金属粉末的性能 .....	254
第二节 粉末的成形 .....	256
一、成形前粉末原料的预处理 .....	256
二、模压成形 .....	257
三、特殊成形 .....	263
第三节 烧结 .....	269
一、烧结概述 .....	269
二、固相烧结 .....	271
三、液相烧结 .....	272
四、粉末烧结体的组织与性能 .....	274
思考与练习 .....	275
第二篇 材料成形力学原理 .....	277
第十三章 金属塑性成形的物理基础 .....	278
第一节 概述 .....	278
一、金属塑性成形的特点 .....	278
二、塑性成形工艺的分类 .....	279
第二节 金属在冷态下的塑性变形 .....	280

一、金属的晶体结构和组织 .....	280
二、金属冷态下的塑性变形机理 .....	280
三、合金的塑性变形 .....	283
四、冷塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	284
第三节 金属的热塑性变形 .....	287
一、热塑性变形时金属的软化过程 .....	287
二、热塑性变形机理 .....	291
三、双相合金热塑性变形的特点 .....	293
四、热塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	293
第四节 对塑性和变形抗力的影响因素 .....	296
一、塑性指标和变形抗力 .....	296
二、对塑性的影响因素 .....	298
三、对变形抗力的影响因素 .....	303
第五节 金属的超塑性 .....	305
一、超塑性变形的特点 .....	305
二、超塑性变形的类型 .....	306
三、超塑性变形时组织的变化和对力学性能的影响 .....	307
四、超塑性变形机理 .....	308
思考与练习 .....	309
第十四章 应力分析 .....	310
第一节 张量的基本知识 .....	310
一、角标符号和求和约定 .....	310
二、张量的基本概念 .....	311
三、张量的基本性质 .....	312
四、应力张量 .....	312
第二节 外力、应力和点的应力状态 .....	313
一、外力和应力 .....	313
二、直角坐标系中一点的应力状态 .....	314
第三节 主应力和主切应力 .....	316
一、主应力 .....	316
二、应力张量不变量 .....	317
三、主切应力和最大切应力 .....	318
四、应力偏张量和应力球张量 .....	319
五、等效应力 .....	321
第四节 应力平衡微分方程 .....	321
第五节 应力莫尔圆 .....	322
一、平面应力状态下的应力莫尔圆 .....	323

二、三向应力莫尔圆 .....	324
思考与练习 .....	326
第十五章 应变分析 .....	327
第一节 位移与应变 .....	327
第二节 质点的应变状态和应变张量 .....	328
第三节 小应变几何方程、应变连续方程 .....	331
一、小应变几何方程 .....	331
二、应变连续方程 .....	332
第四节 塑性变形体积不变条件 .....	334
第五节 速度分量和速度场、位移增量和应变增量、应变速率张量 .....	335
一、速度分量和速度场 .....	335
二、位移增量和应变增量 .....	335
三、应变速率张量 .....	336
第六节 对数应变 .....	337
第七节 平面问题和轴对称问题 .....	338
一、平面应力问题 .....	339
二、平面应变问题 .....	340
三、轴对称问题 .....	341
思考与练习 .....	343
第十六章 屈服准则 .....	344
第一节 材料真实应力-应变曲线及材料模型 .....	344
一、拉伸图和条件应力-应变曲线 .....	344
二、拉伸真实应力-应变曲线 .....	345
三、拉伸真实应力-应变曲线的塑性失稳点特性 .....	346
四、材料模型 .....	347
第二节 理想塑性材料的屈服准则 .....	348
一、屈服准则的概念 .....	348
二、屈雷斯加 (H. Tresca) 屈服准则 .....	349
三、密塞斯 (Von Mises) 屈服准则 .....	349
第三节 屈服准则的几何表达 .....	350
一、主应力空间中的屈服表面 .....	350
二、平面应力状态的屈服轨迹 .....	351
三、 $\pi$ 平面上的屈服轨迹 .....	352
第四节 两个屈服准则的统一表达式 .....	353
第五节 应变硬化材料的屈服与加载表面 .....	354
思考与练习 .....	356
第十七章 材料本构关系 .....	358

第一节 弹性应力应变关系 .....	358
第二节 塑性应力应变关系 .....	359
第三节 增量理论 .....	360
一、列维-密塞斯 (Levy-Mises) 理论 .....	361
二、应力-应变速率方程 .....	362
三、普朗特-劳斯 (Prandtl-Reuss) 理论 .....	362
第四节 全量理论 .....	363
第五节 粉末体塑性成形理论 .....	364
一、基本假设 .....	364
二、粉末体变形的屈服准则 .....	365
三、粉末体塑性变形时的应力应变关系 .....	367
第六节 金属粘塑性本构关系 .....	368
一、金属的粘塑性行为 .....	368
二、粘塑性本构方程 .....	369
第七节 聚合物熔体的流变特性 .....	370
一、聚合物熔体的非牛顿剪切粘性 .....	370
二、聚合物熔体的弹性行为 .....	371
思考与练习 .....	371
第十八章 金属塑性变形与流动问题 .....	373
第一节 金属流动方向——最小阻力定律 .....	373
第二节 影响金属塑性变形和流动的因素 .....	374
一、摩擦对金属塑性变形和流动的影响 .....	374
二、工具形状对金属塑性变形和流动的影响 .....	375
三、金属各部分之间的关系对塑性变形和流动的影响 .....	375
四、金属本身性质不均匀对塑性变形和流动的影响 .....	375
第三节 不均匀变形、附加应力和残余应力 .....	376
一、不均匀变形 .....	376
二、附加应力 .....	376
三、残余应力 .....	377
第四节 金属塑性成形中的摩擦和润滑 .....	378
一、金属塑性成形中摩擦的特点及其影响 .....	378
二、塑性成形中的摩擦分类及机理 .....	379
三、塑性成形时摩擦力的计算 .....	380
四、影响摩擦因数的主要因素 .....	381
五、塑性成形的摩擦因数的测定方法 .....	382
六、塑性成形中的润滑 .....	383
思考与练习 .....	385

第十九章 塑性成形力学的工程应用 .....	386
第一节 金属塑性成形问题的求解方法概述 .....	386
第二节 主应力法及其求解要点 .....	387
第三节 主应力法的应用 .....	388
一、平面应变墩粗的变形力 .....	388
二、轴对称墩粗的变形力 .....	389
三、通过圆锥孔形挤压的变形力 .....	390
四、在板料成形中的应用 .....	391
第四节 滑移线的基本理论 .....	392
一、平面变形应力状态的特点 .....	393
二、最大切应力迹线——滑移线的形成 .....	394
三、关于 $\alpha$ 、 $\beta$ 滑移线和 $\omega$ 角的规定 .....	395
四、滑移线的微分方程 .....	395
五、滑移线的主要特性 .....	395
六、滑移线场的建立 .....	396
第五节 滑移线法的应用 .....	400
一、平冲头压入半无限体 .....	400
二、平砧横墩圆断面轴 .....	402
第六节 塑性极值原理和上限法 .....	405
一、概述 .....	405
二、虚功原理与基本能量方程式 .....	405
三、速度间断 .....	406
四、最大散逸功原理 .....	407
五、上限法原理 .....	408
第七节 上限法的应用 .....	410
一、上限法的解题步骤 .....	410
二、应用实例 .....	411
思考与练习 .....	415
参考文献 .....	418

# 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、信息不断变化的热力过程。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) 对粉末冶金的指导作用 通过对粉末制备，以及由粉末原料制取烧结体过程中的物理化学和机械学等的研究，可以为粉末材料的成分设计、工艺制订、成形模具的设计、关键设备的选择、材料的微观结构和性能分析等奠定理论基础，也可为开发具有特殊性能的粉末冶金材料及制品提供理论指导。

(3) 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、有色金属（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之得以实现。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、粉末冶金理论的发展

粉末冶金技术起源于远古。考古学资料表明,早在纪元前,人们即在原始的炉子中还原氧化铁得到海绵铁,再经锻造和锤打,制成各种铁器件。19 世纪初叶,用粉末冶金法制得海绵铂粉,经冷压,再在铂熔点的三分之二左右进行热处理,然后进一步锻打成各种铂制品。现代粉末冶金发展至今已有 100 多年的历史,特别是在 20 世纪得到了十分迅速的发展,其间经历了三个重要的标志阶段。第一个重要标志是克服了难熔金属熔铸过程中的困难,于 1909 年通过粉末冶金方法制成了电灯钨丝,为现代粉末冶金迈出了第一步,并于 1923 年成功地制造了硬质合金;第二个重要标志是 20 世纪 30 年代用粉末冶金方法成功地制得了多孔含油轴承,并随之成功生产铁基机械零件,从而充分发挥了粉末冶金少切削、无切削的工艺特点;第三个重要标志是粉末冶金向更高级的新材料、新工艺发展,如 20 世纪 40 年代金属陶瓷、弥散强化材料等新型粉末冶金材料的出现,60~70 年代粉末高速钢、粉末超合金等的相继出现,以及粉末冶金锻造工艺被成功地用于制造高强度零件等。

伴随着现代粉末冶金技术的发展,对其工艺过程中理论问题的研究也不断深入。如在制粉方面提出了液态金属快速凝固雾化制备准晶或非晶态粉末的水雾化机制;通过对影响粉末模压成形过程中各种因素的综合考虑获得了更具有普适性的粉末成形理论;通过将高聚物成形原理和粉末成形相结合形成了新型的温压致密化理论;提出了成形和烧结结合的热压模型和热压致密化理论。此外,在研究粉末压坯烧结过程中,由传统的两球烧结模型发展到粉末压坯烧结模型,提出了综合作用烧结理论,以及烧结的电子理论等。

### 四、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