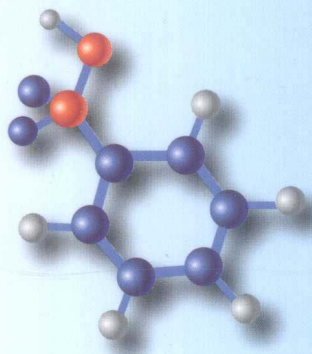




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

# 金属液态成型原理

贾志宏 编 著

- 精选内容：阐述液态成型的基本理论和规律
- 启迪思维：导入案例阅读材料有效辅助教学
- 突出应用：传统内容对接新材料合成及制备

Materials



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

# 金属液态成型原理

贾志宏 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书阐述金属液态成型工艺过程的相关基本原理及规律。除绪论外,全书分为6章:第1章液态金属的结构与性质,主要阐述液态金属的结构特点、液态金属的黏度、表面张力以及遗传性等性质,半固态金属的特性等;第2章液态金属的流动与传热,讨论了金属在液态成型过程中温度场、流场的基本原理,以及金属及合金的充型能力;第3章液态金属的结晶,阐述液态金属结晶的热力学条件、液态金属形核的特点,金属结晶过程固液界面的特征及其模型理论;第4章单相合金的结晶,则着重讨论了溶质再分配理论、成分过冷理论等经典凝固理论及其对单相合金结晶的影响;第5章多相合金的结晶,分别阐述了共晶合金、偏晶合金、包晶合金及金属基复合材料的结晶特点,重点是共晶合金的特点、分类及凝固特征;第6章宏观凝固组织的形成与控制,主要介绍了凝固宏观组织的特点、晶粒游离理论、获得细化等轴晶组织的工艺原理,偏析、气孔、夹杂、缩松等凝固缺陷的形成机理及控制途径。同时,还有附录高斯误差函数表。

本书可作为普通高等学校材料成型及控制专业或相关专业本科生教材,也可作为材料加工专业研究生的参考用书,同时也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属液态成型原理/贾志宏编著. —北京:北京大学出版社,2011.9  
(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)  
ISBN 978-7-301-15600-1

I. ①金… II. ①贾… III. ①液态金属充型—高等学校—教材 IV. ①TG21

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第178272号

书 名: 金属液态成型原理

著作责任者: 贾志宏 编著

策划编辑: 童君鑫

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15600-1/TG·0022

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印刷者: 涿州市星河印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 18.25印张 423千字

2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷

定 价: 35.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

# 21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

## 编审指导与建设委员会

### 成员名单（按拼音排序）

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 白培康（中北大学）    | 陈华辉（中国矿业大学）    |
| 崔占全（燕山大学）    | 杜彦良（石家庄铁道大学）   |
| 杜振民（北京科技大学）  | 耿桂宏（北方民族大学）    |
| 关绍康（郑州大学）    | 胡志强（大连工业大学）    |
| 李楠（武汉科技大学）   | 梁金生（河北工业大学）    |
| 林志东（武汉工程大学）  | 刘爱民（大连理工大学）    |
| 刘开平（长安大学）    | 芦笙（江苏科技大学）     |
| 裴坚（北京大学）     | 时海芳（辽宁工程技术大学）  |
| 孙凤莲（哈尔滨理工大学） | 孙玉福（郑州大学）      |
| 万发荣（北京科技大学）  | 王春青（哈尔滨工业大学）   |
| 王峰（北京化工大学）   | 王金淑（北京工业大学）    |
| 王昆林（清华大学）    | 卫英慧（太原理工大学）    |
| 伍玉娇（贵州大学）    | 夏华（重庆理工大学）     |
| 徐鸿（华北电力大学）   | 余心宏（西北工业大学）    |
| 张朝晖（北京理工大学）  | 张海涛（安徽工程大学）    |
| 张敏刚（太原科技大学）  | 张锐（郑州航空工业管理学院） |
| 张晓燕（贵州大学）    | 赵惠忠（武汉科技大学）    |
| 赵莉萍（内蒙古科技大学） | 赵玉涛（江苏大学）      |

# 前 言

液态成型技术具有广泛的适应性，在装备制造、新材料等产业领域承担重要的基础支撑作用。对任何大小、任意形状的零件都可以通过液态成型工艺制造出来；对任何可熔化的金属与合金材质都可进行液态成型，特别是对脆性材料(如铸铁)等材料，液态成型技术几乎是唯一的途径。同时，对于蓬勃发展的新材料而言，如单晶合金、非晶合金、纳米金属、金属基复合材料等，液态成型也是其中主要的、甚至是某些领域唯一的制备手段。

液态成型原理则是阐述液态成型工艺过程的相关基本原理及规律。通过对液态成型原理的研究，有助于人们深入认识金属熔体的结构特征及性质、金属及合金在凝固过程中的形核及其生长、宏观组织的形成等自然界中存在的基本规律。更为重要的是通过这些科学问题的探索，对金属材料的冶金质量控制、零件的液态成型及加工、新材料合成及制备等实践工作也具有重要的指导意义。

除绪论外，全书分为6章：第1章液态金属的结构与性质，主要阐述液态金属的结构特点、液态金属的黏度、表面张力以及遗传性等性质、半固态金属的特性等；第2章液态金属的流动与传热，讨论了金属液态成型过程中温度场、流场的基本原理，以及金属及合金的充型能力；第3章液态金属的结晶，阐述液态金属结晶的热力学条件、液态金属形核的特点，金属结晶过程固液界面的特征及其模型理论；第4章单相合金的结晶，则着重讨论了溶质再分配理论、成分过冷理论等经典凝固理论及其对单相合金结晶的影响；第5章多相合金的结晶，分别阐述了共晶合金、偏晶合金、包晶合金及金属基复合材料的结晶特点，重点是共晶合金的特点、分类及凝固特征；第6章宏观凝固组织的形成与控制，主要介绍了凝固宏观组织的特点、晶粒游离理论、获得细化等轴晶组织的工艺原理，偏析、气孔、夹杂、缩松等凝固缺陷的形成机理及控制途径。

本书是为了适应新时期材料成型及控制专业的教学改革需要，依据材料成型及控制专业的教学大纲，并结合编者近几年的教学实践而编写的。全书由江苏大学材料学院贾志宏编写，从内容选取上，一方面，考虑与其他课程的分工，如先进凝固技术、凝固过程的数值模拟等内容涉及不多；另一方面，考虑现在材料成型及控制专业、课程改革现状及学时安排的差异，有些内容可以根据实际需要安排自学或进行取舍。作为教材，考虑读者学习的方便及需要，书后仅列出参考书目，而对于编写过程中参阅的诸多论文等其他资料并未一一列出，特此说明。同时对参阅相关教材、论著的作者表示感谢。

本书可作为材料成型及控制专业本科生的教材，也可作为材料加工专业研究生的参考用书。

由于编者水平所限，书中可能存在诸多缺点和不妥之处，恳请广大读者批评指正，以便修订完善。

编 者

2011年7月

# 目 录

绪论 .....	1	2.1.1 导热的基本方程及求解 .....	50
0.1 液态成型的发展历史 .....	1	2.1.2 温度场的数值计算 .....	57
0.2 液态成型理论体系 .....	4	2.1.3 不同界面热阻条件下 温度场的特点 .....	60
0.2.1 液态成型理论的研究 对象及研究方法 .....	4	2.1.4 动态凝固曲线 .....	61
0.2.2 凝固理论 .....	4	2.1.5 金属的凝固特性 .....	63
0.2.3 液态成型理论的发展 趋势 .....	5	2.1.6 凝固时间 .....	66
0.3 本课程的任务和要求 .....	6	2.2 液态金属的充型能力 .....	73
0.3.1 课程目标 .....	6	2.2.1 充型能力的基本概念与 流动性的测定 .....	73
0.3.2 课程要求 .....	6	2.2.2 液态金属停止流动的机理 .....	74
0.3.3 本课程与其他专业课程的 联系 .....	7	2.2.3 液态充型能力的理论 计算 .....	75
第1章 液态金属的结构与性质 .....	8	2.2.4 影响充型能力的因素 .....	78
1.1 液态金属的结构 .....	9	2.3 液态成型中金属的流动 .....	86
1.1.1 液态金属结构的研究 方法 .....	10	2.3.1 浮力流 .....	86
1.1.2 液态金属结构模型 .....	12	2.3.2 枝晶间液体的流动 .....	88
1.2 液态金属的性质 .....	17	2.3.3 界面张力引起的流动 .....	89
1.2.1 黏度 .....	17	思考题 .....	90
1.2.2 表面张力 .....	24	第3章 液态金属的结晶 .....	92
1.3 遗传性 .....	30	3.1 液态金属结晶的热力学条件 和结晶过程 .....	94
1.3.1 金属遗传性 .....	30	3.1.1 液态金属结晶的热力学 条件 .....	94
1.3.2 金属遗传机制 .....	33	3.1.2 液态金属的结晶过程 .....	96
1.3.3 遗传性的影响因素 .....	34	3.2 液态金属的形核 .....	98
1.4 半固态金属的流变性 .....	37	3.2.1 均质形核 .....	98
1.4.1 半固态铸造 .....	37	3.2.2 非均质形核 .....	100
1.4.2 半固态金属的流变性 .....	39	3.3 晶体的生长 .....	110
思考题 .....	46	3.3.1 晶体生长中固-液界面处的 原子迁移 .....	110
第2章 液态金属的流动与传热 .....	48	3.3.2 固-液界面的微观结构 .....	111
2.1 液态成型过程的传热 .....	49	3.3.3 界面的生长方式和生长 速度 .....	117



思考题 ..... 123

**第 4 章 单相合金的结晶** ..... 125

4.1 凝固过程的溶质再分配理论 ..... 127

4.1.1 扩散定律 ..... 127

4.1.2 溶质再分配现象的产生及平衡分配系数 ..... 127

4.1.3 平衡结晶时的溶质再分配 ..... 129

4.1.4 非平衡结晶时溶质再分配 ..... 129

4.2 成分过冷 ..... 137

4.2.1 成分过冷的产生 ..... 137

4.2.2 热过冷对纯金属结晶过程的影响 ..... 141

4.2.3 成分过冷对单相合金结晶过程的影响 ..... 142

4.3 其他界面稳定性理论介绍 ..... 149

4.3.1 M-S 理论的模型 ..... 149

4.3.2 M-S 理论界面稳定性判据 ..... 150

4.3.3 M-S 理论界面稳定性的分析 ..... 152

思考题 ..... 163

**第 5 章 多相合金的结晶** ..... 165

5.1 共晶合金的结晶 ..... 167

5.1.1 共晶合金结晶的特点及分类 ..... 167

5.1.2 共晶合金的结晶方式 ..... 168

5.1.3 规则共晶合金的结晶 ..... 172

5.1.4 非规则共晶合金的结晶 ..... 179

5.2 偏晶与包晶合金的结晶 ..... 187

5.2.1 包晶合金的结晶 ..... 187

5.2.2 偏晶合金的凝固 ..... 191

5.3 金属基复合材料的凝固 ..... 197

5.3.1 纤维增强复合材料的凝固 ..... 197

5.3.2 颗粒增强复合材料的凝固 ..... 198

思考题 ..... 201

**第 6 章 宏观凝固组织的形成与控制** ..... 203

6.1 宏观凝固组织的形成理论 ..... 206

6.1.1 宏观凝固组织的特点 ..... 206

6.1.2 晶粒游离理论 ..... 207

6.2 等轴晶组织的获得及细化 ..... 213

6.2.1 合理控制热学条件 ..... 213

6.2.2 孕育处理 ..... 217

6.2.3 动态晶粒细化 ..... 223

6.3 凝固缺陷的形成机理及控制 ..... 232

6.3.1 偏析的形成及控制 ..... 233

6.3.2 气孔的形成及控制 ..... 239

6.3.3 夹杂物的形成及控制 ..... 250

6.3.4 缩松与缩孔 ..... 255

6.3.5 应力 ..... 265

6.3.6 变形与裂纹 ..... 268

思考题 ..... 276

**附录 高斯误差函数表** ..... 279

**参考文献** ..... 280

# 绪 论

液态成型技术是将熔融金属或合金在重力场或其他外力场作用下注入铸型型腔中，待其冷却凝固后获得与型腔形状相似的铸件的一种成型方法，工业上这种成型方法通常称为铸造。更广义地讲，涉及金属或合金从熔炼到凝固这一过程的工艺方法都可称为液态成型技术。其范畴既包括传统的铸造成型(如重力铸造、压力铸造、连续铸造等)，也包括各种先进凝固技术(如快速凝固、定向凝固等)。液态成型工艺过程可以是利用特定形状的铸型(或结晶器)获得具有相应尺寸精度的零件或铸坯，也可以是利用电磁约束、雾化等工艺方法获得具有一定形状的构件或无定形金属粉末、碎片材料。液态成型工艺得到的金属或合金可以是常规的等轴晶材料，也可以是定向生长的柱状晶、单晶材料、甚至是纳米晶或非晶材料。

液态成型方法有几千年的发展历史，它之所以经久不衰，是因为有其突出的特点。对任何大小的零件，质量从几克到几百吨的零件；从仅 0.2mm 的薄壁零件，到数米厚度的零件；从小到几毫米，大到几十米零件；从形状简单到任意复杂的零件都可以通过液态成型工艺制造出来。对任何可熔化的金属与合金材质也都可进行液态成型，特别是对脆性材料(如铸铁)等，液态成型技术几乎是唯一的途径。所以说，液态成型技术的广泛适应性是其他任何金属成形方法所无法比拟的。此外，对于蓬勃发展的新材料而言，如单晶合金、非晶合金、纳米金属、金属基复合材料等，液态成型也是其中主要的、某些领域甚至是唯一的制备手段。

液态成型原理则是阐述液态成型工艺过程的相关原理，即围绕金属材料在液相向固相转变过程中熔体的结构及性质、成型过程中的温度场及流动场、液-固转变过程的凝固原理、凝固过程宏观组织的形成及控制等基本问题进行研究及讨论。

通过对液态成型原理的研究有助于人们深入认识金属熔体的结构特征及性质、金属及合金在凝固过程中形核及生长、宏观组织的形成等自然界中存在的基本规律；更为重要的是这些科学问题的探索对金属材料的冶金质量控制、构件的液态成型及加工、新材料合成及制备也具有重要的意义。

## 0.1 液态成型的发展历史

据出土文物的考证和文献的记载，传统的液态成型方法，即铸造工艺，在我国有着 6000 年悠久的历史。纵观整个世界的文明史，我国具有最灿烂的青铜文化，是最早应用铁器的国度。我国古代的铸造技术成就推动了农业生产、兵器制造、人民生活以及天文、医药、音乐、艺术等方面的进步。





我国早在夏代就已经可以成熟利用陶范铸造青铜器具，在商、周两代创造了灿烂的青铜文化。在青铜器鼎盛时代，所谓“钟鸣鼎食”是当时贵族权势和地位的象征。其中商代青铜文化巅峰时期的代表作—后母戊鼎(即原司母戊大方鼎)(图 0.1)，高 1.33m、长 1.16m、宽 0.79m，重达 875kg。春秋时期最具代表性的是该时期出土的编钟、剑等器物。湖北随县曾侯乙墓出土的大型编钟，共 65 枚，总重达 2.5t，其中形状及其复杂的甬钟，铸型分为两段四个层次，由百余块泥芯组成(图 0.2)。

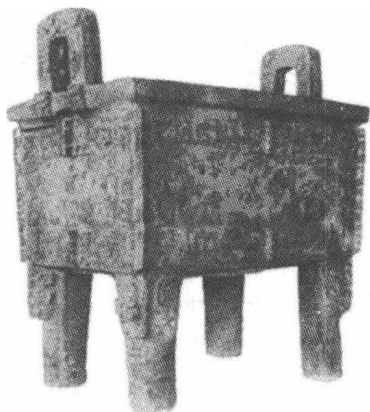


图 0.1 后母戊鼎(商，河南安阳出土)

此外，古文献《周礼·考工记》中还出现了世界上最早的合金配方，对于青铜就有“四分其金(铜)，而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金，而锡居一，谓之大刃之齐”的记载。

到西周东周之交，为了更复杂的器形和纹饰的铸造需要，我国还发明了熔模(失蜡)铸造工艺。先秦时期，制作的典型器物如青铜尊和盘。西汉的“鎏金长信宫灯”、明代的浑仪以及清乾隆时期的朝钟等国宝级文物都是前人利用熔模铸造工艺制得的。在古代典籍《天工开物》中还详细记载了失蜡法的工艺过程。

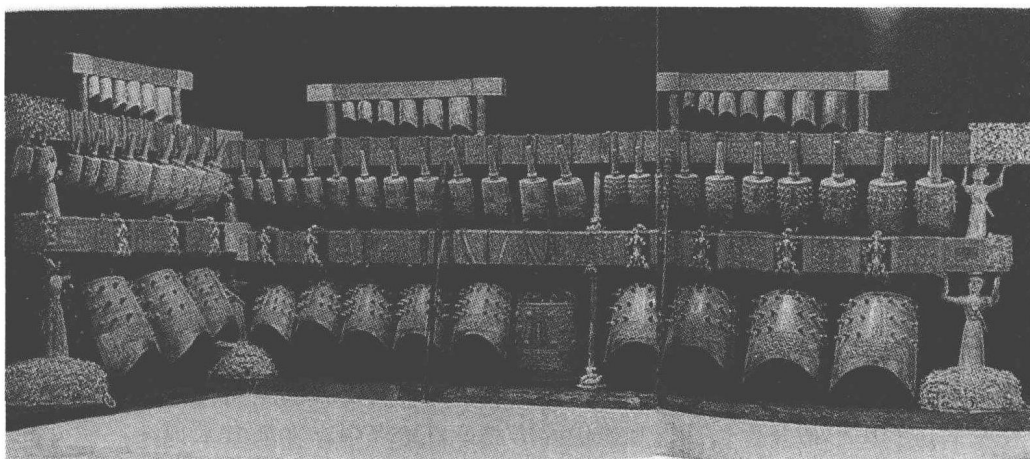


图 0.2 曾侯乙编钟(1978 年 9 月出土于湖北随县)

随着熔炼技术的发展，我国在公元前 6 世纪左右就发明了生铁和铸铁技术，战国时期开始有了铁制工具的使用，大大提高了农业的生产效率，并出现铁范(金属型)工艺如曾侯乙尊盘之尊(图 0.3)。我国的铸铁技术与西方社会的铸铁技术形成了古代钢铁技术的两大流派。隋唐以后，随着社会经济的进一步发展，铸造技术向大型和特大型铸件发展。铸造于公元 10 世纪五代十国时期的河北沧州大铁狮、北宋时期(1061 年)铸造的玉泉寺铁塔(图 0.4)等都是这一时期的代表。

总之，我国古代铸造技术，在从商代中、晚期直到产业革命前，可以说一直是位于世界领先的水平，大大促进了当时生产力的发展，为人类文明做出了巨大的贡献。

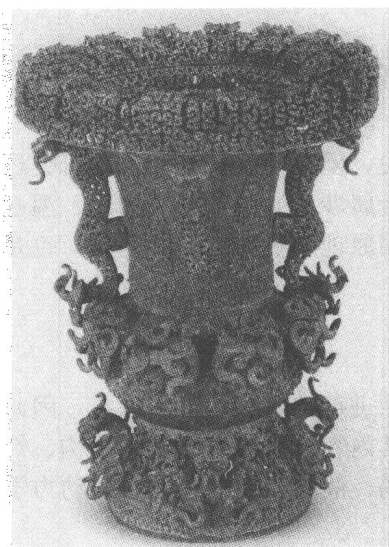


图 0.3 曾侯乙尊盘之尊(战国早期)

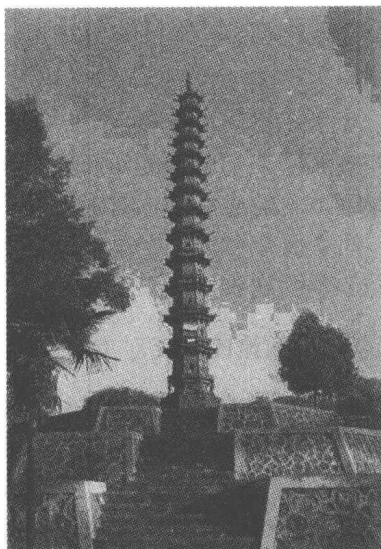


图 0.4 当阳玉泉寺铁塔(宋, 湖北当阳)

随着近代工业的发展,凝固学科开始形成并逐渐发展,业已形成完整的理论体系,铸造及凝固技术也随之不断发展。一方面是新工艺、新技术的不断涌现,如在传统的砂型铸造、金属型铸造等基础上,消失模铸造、半固态铸造、电磁铸造等新工艺已经逐渐投入生产应用;已经能够制备出单晶叶片,用于航空涡轮发动机等。另一方面,生产装备的不断改进,生产线的自动化程度越来越高,如砂型铸造生产线,已经从机械化造型生产线发展到气冲造型、高压造型到静压造型生产线。汽车发动机用铝合金缸体和单晶叶片分别如图 0.5、图 0.6 所示。

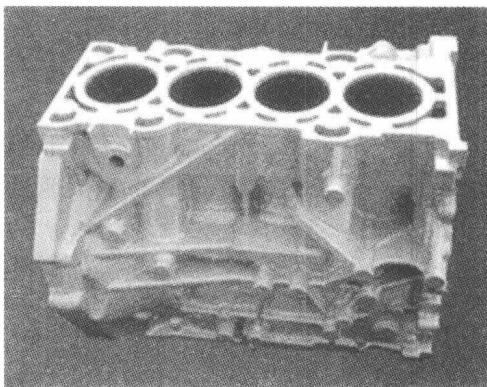


图 0.5 汽车发动机用铝合金缸体

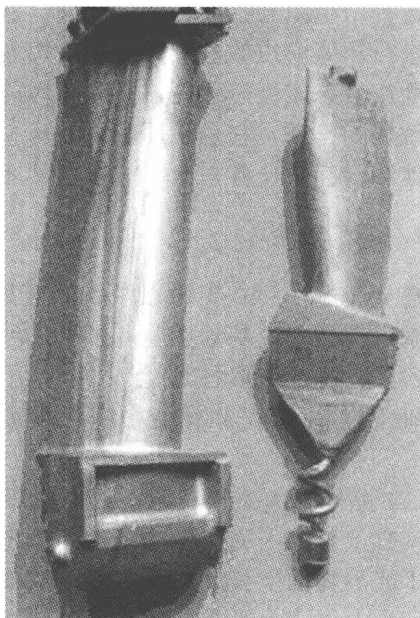


图 0.6 单晶叶片



## 0.2 液态成型理论体系

虽然液态成型工艺已经经历了几千年的发展历史，但相关的基础性理论研究还仅限于近代。本课程涉及的成型理论有成型研究对象液态金属涉及的液态金属物理、温度场及流场涉及的传热学及流体力学、凝固原理等。其中凝固原理是最为核心的问题，也是液态成型理论研究的主要内容。

### 0.2.1 液态成型理论的研究对象及研究方法

液态成型理论所描述的是金属材料由液相向固相进行转变这一基本现象，因此其研究的对象是液态金属及处于液固相变过程中的金属。其内容包括液态金属的结构、性质及其成型性能；液态成型过程的流动、温度及其他外力场；液固相变的热力学、动力学等基本原理解；宏观凝固组织的形成机制及其预测、控制等。

液态成型理论的研究可采用多种手段，简而言之，有数学解析方法、数值计算及数值模拟、实验研究方法、物理模拟方法等。这些研究方法是互为补充，相互完善的。数学解析方法是运用数学方法研究铸件和铸型的传热，主要目的是利用传热学的理论，建立表明铸件凝固过程传热特征的各物理量之间的方程式，即铸件和铸型的温度场数学模型并加以求解。但由于处理温度场、流场等物理场的微分、偏微分方程在绝大多数条件下无法得到精确的解析。此时，只能依靠数值计算及模拟的手段，获得足够精度的近似解。目前数值模拟方法日臻完善，应用范围也在进一步拓宽。在实现温度场模拟的同时，还能对工艺参数进行优化、宏观及微观组织的模拟等。物理模拟则通常是利用小试件，借助于某实验装置再现材料在凝固过程中受热、受力的物理过程，充分而精确地暴露与揭示材料或构件在凝固过程中组织与性能变化的规律。从上述研究方法的关系看，数学解析法得到的基本公式是进行数值模拟的基础，但通过物理模拟可以实现对某些暂时还无法获得完整理论公式的凝固或液态成型过程而建立的合理的数学模型；实验研究在液态成型理论研究中仍具有不可替代的作用，它是验证理论计算、模拟结果的必要途径。因此，只有将各种研究方法有机地结合起来，各司其职、各尽其能，才能更有效地解决液态成型过程中的复杂问题。

### 0.2.2 凝固理论

自从 20 世纪 40 年代以来，对凝固科学逐步建立起相关的理论体系，其中具有开创性、基础性的理论基础主要有以下几种。

(1) 液固相变形核理论。20 世纪 40~50 年代，Turnbull 和 Fisher 在经典形核理论的基础上建立了液-固相变中的形核理论，提出了形核率及熔体中晶核的生长速度的表达式。

(2) 晶体界面生长动力学理论。1951 年 Burton 和 Cabrera 在 Frank 非完整晶体生长理论的基础上建立了完整和非完整晶体光滑界面的结构模型与生长动力学理论 (BCF 理论)，奠定了光滑界面生长动力学的理论基础。

(3) 成分过冷理论。1953 年哈佛大学教授 Chalmers 和他的合作者通过对金属凝固中液固界面形态的研究，提出了界面稳定性概念和成分过冷理论，并导出了著名的成分过冷

判据。首次从界面稳定性角度揭示了单相凝固结构出现复杂形态的内在原因。

(4) 界面稳定性线性动力学理论。1964年 Mullins 和 Sekerka 将流体动力学分析方法及干扰技术应用于凝固中界面稳定性问题,提出了界面稳定性的线性动力学理论。该理论表明,界面稳定性是由温度梯度、界面能和溶质边界层三方面因素决定的。

(5) 共晶生长理论。从液相同时结晶出两个或多个不同固相的共晶凝固明显区别于单相合金的凝固。1966年由 Jackson 和 Hunt 对正常共晶的耦合生长做了定量描述,所提出的模型常称为 J-H 模型,以后的许多模型都是在 J-H 模型基础上细化和发展的。该模型通过求解稳定扩散场方程,得到生长情况下耦合生长液固界面前沿液相中的溶质分布,从而得到界面过冷度和共晶间距的关系。

(6) 枝晶生长边缘稳定性理论。对结构材料,特别是合金在凝固过程中以枝/胞晶形态出现占有绝对的比例,枝晶生长的稳定性问题成为关注的焦点。1977年 Langer 和 Muller-Krumbhaar 在 Ivantsov 解的基础上,通过对枝晶尖端严格的稳定性分析,提出了边缘稳定性原理(LMK 原理)。

(7) 快速凝固晶体生长理论。瑞士和美国科学家 Kurz 和 Trivedi 综合 M-S 平界面和 Langer 的枝晶尖端稳定性理论及 Aziz 的快速凝固条件下溶质的非平衡分配理论,建立了一个描述从枝晶到平界面绝对稳定区内的界面形态演化规律,及快速定向凝固下尖端半径与生长速度关系的 KGT 模型。

从时间跨度上,20世纪50年代,溶质再分配理论及成分过冷理论等较完整地形成了凝固科学领域的理论体系,一般称之为经典凝固理论阶段。在此基础上,快速凝固、定向凝固等凝固新技术、新工艺不断涌现。但随着对凝固过程研究的深入,人们也认识到经典凝固理论的局限性,在凝固理论方面提出了快速凝固理论、凝固过程组织形态选择的时间相关性和历史相关性理论等。

在对上述凝固基础理论开展研究的同时,还有大量的研究工作是考虑其实际应用的,比如20世纪40年代俄裔捷克工程师 Chvorinov 创造性地引入了铸件模数的概念,得到了平方根定律,至今仍是铸造工艺设计的理论依据之一。再比如20世纪60年代后,Chalmers、大野笃美、Jackson、Southi 等人提出“激冷等轴晶游离”、“枝晶熔断”、“结晶雨”等假说并在实验上加以证实,从而使人们以前用静止的观点发展到用动态的观点来研究和分析凝固过程,以此为指导有效地控制了结晶过程和凝固组织。在此基础上,机械及超声波振动、机械及电磁搅拌、孕育处理、变质处理等技术得以发展与推广并仍在不断地改进和完善。

在最近二三十年中,凝固理论还由于计算机技术的应用得到了更快的发展。随着计算机的应用和发展,利用数值计算及数值模拟的手段,使定量描述液态金属和合金的凝固过程得以实现。在对温度场、外力场、热物理性能研究的基础上,实现凝固过程模拟,对凝固组织和缺陷进行预测,工艺进行优化,以便能更合理地凝固过程进行控制,降低生产成本,节约资源消耗。如大型电站水轮机主轴、转子、叶片等在性能要求高、质重件大的铸件上已经有了成熟的应用。

### 0.2.3 液态成型理论的发展趋势

随着工业化进程的加快和科学技术的发展,也对液态成型领域提出了更高的要求及期望,如从节能环保及技术经济性要求上直接获得近终形铸件的凝固技术;对液态金属结构



的深入了解,获得熔体处理的新工艺、新技术,以实现更有效地控制凝固组织;利用凝固技术制备、开发各类新材料;实现多尺度、多学科的凝固过程建模及仿真模拟等。

因此,要适应社会及科技的发展要求,液态成型理论还需深入地开展研究,具体体现在如下几个方面。

(1) 计算机技术的深入应用和发展。虽然计算机技术在液态成型研究及工艺中已得到了较广泛应用,在凝固过程数值模拟及仿真、CAD/CAM 技术、成型过程和成型设备的运行和监控等领域都得到了快速发展,但是仍还有很大的上升空间。

(2) 高性能铸件的精确成型原理和技术。精密化、薄壁化、轻量化、复合化和高性能化等指标代表了铸件的发展方向,在汽车、航空航天器、导弹潜艇等的零部件产品制造等诸多领域具有广阔的前景。这就要求对其液态精确成型过程的温度/外力等物理场规律、此特殊条件下传热/传质/动量传输机制、组织控制等基础理论进行深入研究。

(3) 多元多相合金的凝固理论。现代凝固理论在简单二元合金的研究中已经取得很大进展的同时,对工业上最具有发展前景的多元多相合金体系的凝固过程的认识还相当有限。这在很大程度上影响了实际中如何更精确、更有效地对凝固过程进行控制。因此,对多元多相合金凝固过程相的选择和形态选择成为凝固理论研究的重点方向之一。

(4) 复杂体系合金液态结构与凝固行为的关系。通过对多组元合金液中的物理化学过程进行研究,包括不同元素的相互作用、原子团簇的形成及其演变、熔体中固相微粒及其稳定性等,揭示出合金结构对凝固过程热力学及动力学方面的影响规律。这已成为部分新材料制备和组织控制的主要理论依据。

(5) 液态成型与其他学科的交叉与融合。比如通过激光、电子束等手段,实现对合金熔体及凝固过程的精确控制以大幅度提高材料的某些性能或获得新材料;通过高压装置,能在较大冷却速度下获得非晶材料,这给快速凝固技术提供了很大的潜在发展空间;液态成型与快速成型(RP)技术相结合,可高质量快速获得铸型;与电磁技术相结合,实现电磁铸造等。在与其它学科、技术相融合的过程中,必然要求对相应的成型原理进行深入的研究。

## 0.3 本课程的任务和要求

### 0.3.1 课程目标

金属液态成型原理课程是材料成型及控制工程专业的基础课程,其目的是通过本课程的学习,掌握与液态成型相关的理论基础,为后续专业课程学习及其专业生涯奠定重要基础。

### 0.3.2 课程要求

本课程要求学生了解熔体的结构和性质、充型能力及温度场、液态金属结晶基本原理、凝固组织控制等几个主要内容有较全面的了解和掌握。具体要求概括为以下几点。

(1) 了解液态金属研究的基本手段并掌握理想液态金属的结构特点;掌握液态金属黏度、表面张力、遗传性的定义及物理内涵,了解其测试或评价方法,掌握液态金属性质的

影响因素及对成型过程的影响。

(2) 了解和掌握液态成型过程中传热问题研究的基本途径、方法,熟悉动态凝固曲线及其作用、金属的凝固区域结构模型、金属的凝固方式及其影响方式、平方根定律、影响充型能力的因素及改善充型能力的途径等。

(3) 掌握液态金属结晶的热力学条件、液态金属形核的特点;了解金属结晶过程固液界面的特征及其模型理论。

(4) 理解单相合金的含义;掌握溶质再分配规律及成分过冷理论;了解成分过冷对单相合金结晶的影响规律。

(5) 了解多晶合金的概念及多晶合金结晶的基本类型;掌握共晶合金结晶的特点、分类及其生长特点;了解包晶合金、偏晶合金、金属基复合材料的结晶特点。

(6) 了解金属凝固宏观组织的类型及特点,掌握晶粒游离形成途径以及游离晶粒对宏观晶区形成的影响;理解获得完全细化等轴晶组织的工艺途径;理解和掌握凝固缺陷的主要类型、对铸件性能的影响及消除(或控制)缺陷的方法。

### 0.3.3 本课程与其他专业课程的联系

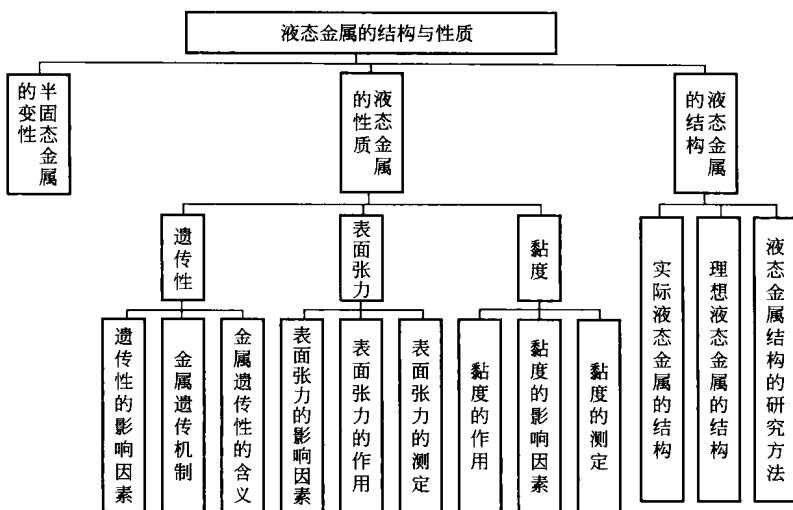
本课程从专业课程设置体系上应在系统学习物理化学、金属学及热处理(或材料科学基础)、冶金传输原理等先导课程之后进行讲授。而成型工艺、成型装备(设备)、成型过程数值模拟、铸造合金及熔炼、造型材料、先进凝固技术等专业课程(或选修课)则应安排在本课程之后。

# 第 1 章

## 液态金属的结构与性质



本章知识结构图



本章学习提示

- (1) 了解液态金属研究的基本手段，掌握液态金属研究中的偶分布函数、径向分布函数、配位数等函数的物理含义。
- (2) 掌握理想液态金属的结构特点，了解实际液态金属的特点。
- (3) 掌握液态金属黏度的定义、物理意义，了解其测试方法及原理，掌握液态金属黏度的影响因素及对成型过程的影响。
- (4) 理解表面张力的物理意义，了解熔体表面张力的测试方法及原理，了解表面张力的理论计算方法。掌握表面张力的影响因素及对成型过程的影响。
- (5) 理解金属遗传性的定义及内涵，了解金属的遗传机制，掌握遗传性的影响途径。
- (6) 理解金属半固态的物理意义，了解半固态铸造工艺，掌握半固态金属的流变特性及表观黏度。

导入案例

众所周知，世界上所有的元素或化合物均以固体、液体或气体的形式存在，其存在方式取决于温度和压力条件，图 1.1 给出了  $P-T$  相图。图中分别标出了玻璃化转变温度  $T_{gt}$ 、三相点  $T_t$ 、熔点  $T_m$ 、沸点  $T_b$ 、临界点  $T_c$ ，以及三相点的压力值  $P_1$ 、常压  $P_{at}$  和临界点压力值  $P_c$ 。用回绕临界点的带箭头的虚线路径表示液体与气体之间的无相转化。在三相点，固体、液体和气体处于平衡态。图中临界点  $T_c$  代表液体可能存在的上限温度，三相点是液体存在的最低温度，但由于过冷现象，在  $T < T_t$  时，液体也可以以过冷的亚稳定状态存在。

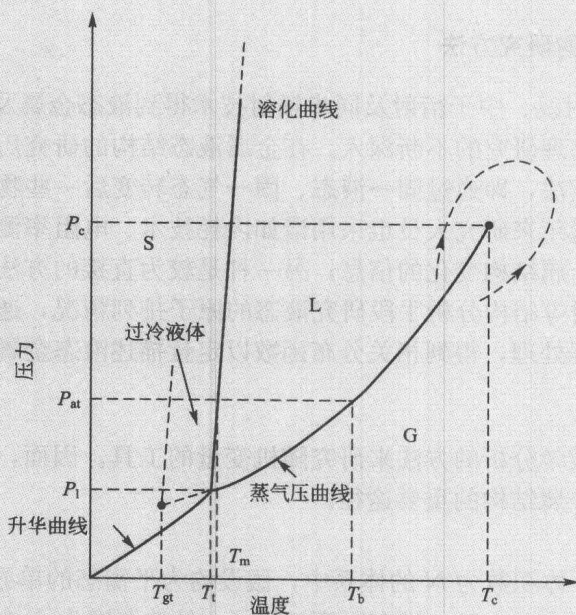


图 1.1 简单物质的  $P-T$  相图

金属可以以固、液、气等形式中的任何一种状态存在，而液态金属的存在自然也满足图 1.1 的相图规律。

液态成型是将金属熔体浇入铸型得到所需构件的成型方法。金属由液态→固态的凝固过程中的一些现象，如结晶、溶质的传输、晶体长大、气体溶解和析出、非金属夹杂物的形成、金属体积变化等都与液态金属结构及物理性质密切相关。

## 1.1 液态金属的结构

绝大多数的金属固体是以晶体的形式存在，在加热过程中，其体积及热物理性能(如比热容、密度、导热性等)会随着温度的变化而逐渐变化。但当温度达到熔点时，其热力





学参数会发生突变(如体积、熔化潜热、熔化熵等);同时在外来作用下,会产生宏观的流动,即产生了固相→液相的变化,也即熔化过程。

对于熔化过程,目前人们的认识还不统一。笼统地讲,主要以两种观点概括,一是认为金属固→液转变是通过单个原子间的分离途径来实现的,即有规则排列的固相晶体直接分裂成单独的原子;另一种观点认为,熔化机制是以原子集团为单位,通过逐步分解的方式进行,即固相首先裂解成若干小的原子集团。

而相对于固体金属成熟的结构理论来说,液态金属(或称之为金属熔体)由于受到观测及实验条件的制约,人们对其结构的认识远未达到固体的水平。与金属固体具有晶体结构这样规则排列的特点相比,其熔体则可认为是一个无序体系,但又区别于气体这样一个完全由孤立粒子组成的无序体系。

### 1.1.1 液态金属结构的研究方法

近年来,利用 X 射线、中子衍射及同步辐射技术得到液态金属及合金的直接的结构信息,促进了液体金属物理研究的不断深入。在金属液态结构的研究历史上,可通过两种方法进行,一种是间接方法,即通过固→液态、固→气态转变后一些物理性质的变化判断液态的原子结合状况,近年来研究人员也采用诸如内耗技术、电阻率测定、黏度等物理性参数的变化来得到液态金属结构变化的信息;另一种是较为直接的方法,即通过液态金属的 X 射线衍射、中子衍射等结构分析手段研究液态的原子排列情况,通常采用实验测得衍射强度再经过一定的数据处理,得到相关分布函数以定量描述液态金属的结构。

#### 1. 分布函数

分数函数是利用数学分析的方法来研究随机变量的工具。因而,对特定分布函数的获取及分析是研究液态金属结构的重要途径。

##### 1) 偶分布函数

对于粒子数为  $V$ , 体积数为  $N$  的体系中,假设均为平衡态的单原子金属熔体。选取其中任一原子作为坐标原点( $r=0$ ),则在距离该原子  $r$  处的厚度为  $dr$  的球壳中能找到的原子数  $dN$  如式(1-1)所示。

$$dN = 4\pi r^2 dr \left( \frac{N}{V} \right) g(r) \quad (1-1)$$

式中:  $g(r)$ ——偶分布函数,也称之为双体分布函数。

对于理想气体,假定原子间无相互作用,  $g(r)$  在任意位置的值都等于单位值(即为 1)。则在  $r \rightarrow r+dr$  的球壳内的原子数如式(1-2)所示。

$$dN = 4\pi r^2 dr n_0 \quad (1-2)$$

式中:  $n_0$ ——平均单位体积中的原子数,  $n_0 = \frac{N}{V}$ 。

对于熔体,由于原子间存在引力和电磁斥力这两种基本作用力,典型的简单液体偶分布函数与  $r$  的关系就变得复杂,如图 1.2 所示。当  $r$  较大时,随距离的增大,中心原子与外层原子的作用力会迅速减小,在  $r \rightarrow r+dr$  的球壳内找到另一原子的几率与参考原子的存在无关,相当于完全无序,  $g(r) \rightarrow 1$ 。当  $r$  小于原子间距时,则在  $r \rightarrow r+dr$  的球壳内找