

金属凝固原理及技术

马幼平 许云华 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmip.com.cn>

金属凝固原理及技术

马幼平 许云华 主编

北 京

冶金工业出版社

2008

内 容 简 介

本书为“材料加工工程”专业方向主干教材之一，全书以基本原理及控制技术为主，包括材料加工机械、冶金等多领域有关凝固原理及凝固技术的最新成果及进展，体现新世纪材料加工学科中多领域交叉特色。

本书内容共分为十章，主要介绍了液态金属的结构和性质，液态金属凝固热力学及动力学，凝固过程中的溶质再分配，单相合金凝固，多相合金凝固，金属熔体控制，铸件凝固组织控制，凝固新技术，连续铸造技术等。

本书是普通高等学校材料加工工程、材料成型及控制工程、金属材料工程等专业的本科生教材，亦可作为研究生及有关领域科研及工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属凝固原理及技术/马幼平等主编. —北京：冶金工业出版社，2008.5

ISBN 978-7-5024-4496-9

I. 金… II. 马… III. 金属—凝固 IV. TG111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 046180 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号，邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 章秀珍 王楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 张青

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4496-9

北京百善印刷厂印刷；冶金工业出版社发行；各地新华书店经销

2008 年 5 月第 1 版，2008 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32；11.625 印张；310 千字；361 页；1-3000 册

32.00 元

冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893

冶金书店 地址：北京东四西大街 46 号(100711) 电话：(010)65289081

(本书如有印装质量问题，本社发行部负责退换)



马幼平 教授,1961年生,陕西省渭南市人。先后于西安交通大学获学士、硕士和博士学位。现为西安建筑科技大学教授,博士生导师,材料加工研究所所长,《热加工工艺》和《铸造技术》杂志编委。长期从事材料加工方面的教学和科研工作。主持和参加了国家、省部科技项目10余项。先后在 Surface & Coatings Technology、《金属学报》等刊物上发表学术论文50余篇,SCI、EI收录10余篇。



许云华 教授,1963年生,江苏省常州市人。西安建筑科技大学机电学院教授、博导。现任西安建筑科技大学耐磨材料研究所所长、陕西省耐磨材料工程技术研究中心主任、陕西省纳米材料与技术重点实验室主任、教育部耐磨材料与技术工程研究中心主任等职。主持承担了国家、省部、市级重大科技项目20余项,荣获省部市级科技奖励20余项;申报国家专利40余项,获准20项。先后在Wear、Materials Science Forum、《金属学报》等刊物上发表学术论文40余篇,SCI、EI收录10余篇。先后被评为陕西省有突出贡献专家、西部大开发行业十大功勋人物、陕西省十大优秀发明人和教育部新世纪优秀人才。

前 言

凝固是冶金、机械制造、先进金属材料及无机功能晶体材料制备的关键环节。材料的性能取决于其组织特征，而凝固组织主要受材料成分、冷却速率和冷却方式等控制。金属的制备加工过程几乎都要经过凝固过程，包括金属锭和铸件，在这一过程中涉及析出相组成、形态、分布以及偏析、裂纹、缩孔、疏松以及夹杂物的数量等，其对材料的性能具有重要的影响，控制凝固过程已成为提高传统材料性能和研制新材料的最关键的手段之一。熔化和凝固过程均是热力学原理和动力学条件决定的相变过程，涉及凝聚态物理学、界面与表面科学、传热传质学、流体力学、流变学、弹性力学、化学及数值计算方法等。众所周知，机械行业的铸、焊方向与凝固理论和相应的技术控制非常密切，尤其是铸造专业主要是以凝固理论和相应的技术控制为研究核心，因此，凝固课程体系在铸造、焊接的教学培养计划中显得非常重要。但是，随着近十多年来各高校学科的专业方向的不断调整，铸、焊专业培养方向愈来愈不明确，相应凝固方面的内容仅为材料加工教材体系中的一小部分。特别是近十多年来冶金工业及其相关技术的快速发展，冶

金企业的连铸、连铸连轧和铸轧领域进行的技术开发及改造相当快，凝固控制已成为冶金行业连铸、连铸连轧和铸轧新技术开发的关键。

为此，本教材旨在将凝固基本原理与传统凝固控制技术、先进凝固技术、连铸连轧技术及铸轧技术相结合，在原理部分突出凝固过程物理本质的论述，在凝固技术部分兼顾黑色、有色金属，覆盖冶金、机械领域，体现材料加工学科中多领域交叉特色。

本书由西安建筑科技大学马幼平、许云华二位教授共同规划、编排、修改和定稿。具体分工为马幼平编写概论、第6、7、8、9章，许云华编写第2、5章，刘晓平、刘晓燕编写第1、3、4章。杨蕾、李泽宇、王成辉、李兴彬、卢绍龙、刘可参加了本书的部分文字输入及校稿工作。

由于作者的水平所限，书中可能有不少缺点和不妥之处，诚恳希望广大读者批评指正。

作 者

2008年3月18日

目 录

0 概论	1
0.1 金属材料地位	1
0.2 金属凝固学的发展概论	3
0.3 金属凝固过程的研究对象	6
0.4 凝固过程基本问题	7
0.5 凝固过程研究方法	9
0.6 凝固学科的战略地位	11
0.7 凝固学科发展的现状与趋势	13
0.8 凝固学科发展战略目标	15

第一篇 凝固原理

1 液态金属的结构和性质	17
1.1 固体金属的加热、熔化	17
1.2 液态金属的结构	19
1.2.1 液态金属的热物理性质	19
1.2.2 X 射线结构分析	21
1.2.3 液态金属的结构	23
1.2.4 液态金属理论结构模型——刚球模型与 PY 理论	23
1.3 液态金属的性质	26
1.3.1 液态金属的黏滞性（黏度）	26
1.3.2 表面张力	29
2 液态金属凝固热力学及动力学	36
2.1 纯金属的凝固	36

2.2	二元合金的凝固平衡	38
2.3	压力及界面曲率对凝固点的影响	42
2.4	形核过程	46
2.5	形核率	49
2.6	固-液界面的结构	51
2.7	晶体生长	55
3	凝固过程中的溶质再分配	60
3.1	溶质再分配与平衡分配系数	60
3.2	非平衡凝固时的溶质再分配	61
3.2.1	液相均匀混合时的溶质再分配	62
3.2.2	液相中只考虑扩散时的溶质再分配	63
3.2.3	液相部分混合时的溶质再分配	66
4	单相合金凝固	69
4.1	单相合金平衡凝固	69
4.2	稳态凝固	70
4.3	液态合金凝固过程中的“成分过冷”	72
4.3.1	“成分过冷”产生的条件	72
4.3.2	“成分过冷”的过冷度	75
4.4	“成分过冷”对单相合金凝固过程的影响	77
4.4.1	无“成分过冷”的平面生长	77
4.4.2	窄成分过冷区的胞状生长	79
4.4.3	较宽成分过冷区的柱状树枝晶生长	80
4.4.4	宽成分过冷区的自由树枝晶生长	82
4.4.5	树枝晶的生长方向和枝晶间距	84
4.4.6	晶体形貌间的关系	86
5	多相合金凝固	88
5.1	共晶合金的凝固	88

5.1.1	概述	88
5.1.2	规则共晶凝固	91
5.1.3	非规则共晶凝固	96
5.2	偏晶合金和包晶合金的凝固	105
5.2.1	偏晶合金的凝固	105
5.2.2	包晶合金的凝固	106

第二篇 凝固控制技术

6	金属熔体控制	109
6.1	合金熔体的净化	109
6.1.1	非化学反应除气热力学	109
6.1.2	非化学反应除气动力学	111
6.1.3	有化学反应的除气热力学与动力学	114
6.1.4	合金熔体的净化方法	115
6.2	合金熔体的变质处理	132
6.2.1	基本概念	132
6.2.2	铝硅合金中共晶硅的变质处理	133
6.2.3	变质剂的种类与效果	138
6.2.4	变质处理工艺	139
6.2.5	铸铁中石墨的球化	140
6.2.6	其他变质方法	151
7	铸件凝固组织控制	158
7.1	铸件凝固组织的形成	158
7.1.1	凝固条件与凝固方式	158
7.1.2	铸件的典型凝固组织与形成过程	159
7.1.3	等轴晶的形核	162
7.1.4	铸件典型凝固组织形态的控制	165

7.2 等轴晶的晶粒细化	165
7.2.1 添加晶粒细化剂法	167
7.2.2 动力学细化法	173
7.2.3 熔炼及浇注过程的温度控制	175
7.3 铸铁多相合金凝固过程控制	176
7.3.1 影响铸铁组织的因素及控制	176
7.3.2 化学成分的影响	182
7.3.3 冷却速度的影响	189
7.3.4 孕育处理的影响	194
7.3.5 振动的影响	216
7.4 铝合金多相合金凝固过程控制	216
7.4.1 Al-Cu 合金	217
7.4.2 Al-Si 合金	219
7.4.3 Al-Cu-Si 合金	222
7.4.4 振动能对铝及其合金凝固和组织的影响	224
7.4.5 压力对铝合金凝固过程、组织及性能的影响	226
7.5 凝固收缩及凝固组织致密度的控制	233
7.5.1 凝固收缩率	233
7.5.2 缩松的形成与控制	236
7.5.3 强化补缩的方法——保温冒口与保温补贴	239
8 凝固新技术	245
8.1 定向凝固	245
8.1.1 定向凝固工艺	246
8.1.2 定向凝固技术的应用	248
8.2 优质铸件凝固	253
8.3 深过冷凝固	253
8.4 超常凝固	256
8.4.1 微重力下的凝固	256
8.4.2 声悬浮技术	261

8.4.3 高压凝固	261
8.5 快速凝固	262
8.5.1 快速凝固方法	263
8.5.2 快速凝固的特征	265
8.6 半固态金属的特性及半固态铸造	266
8.6.1 半固态金属的特性	266
8.6.2 连续搅拌对半固态金属凝固的影响	268
8.6.3 半固态铸造	272
9 连续铸造技术	276
9.1 连铸技术的发展现状	277
9.1.1 连铸技术的发展史	278
9.1.2 我国连铸技术的发展现状	281
9.2 连铸的基本方法	282
9.2.1 立式连铸机	283
9.2.2 弧形连铸机	284
9.2.3 水平连铸机	284
9.3 连铸过程凝固组织特点及质量控制	285
9.3.1 连铸过程凝固特点	285
9.3.2 连铸凝固组织、缺陷	287
9.4 钢锭连铸工艺过程的控制环节	304
9.4.1 结晶器的结构设计	304
9.4.2 结晶器振动	305
9.4.3 连铸速率的控制	306
9.4.4 钢锭的弯曲与矫直	306
9.5 连铸连轧新技术	306
9.5.1 钢锭的液芯轧制	306
9.5.2 薄板连铸连轧技术	310
9.5.3 其他薄板连铸连轧技术	314
9.5.4 我国连铸连轧技术的发展现状	317

9.6 其他合金的连铸技术	330
9.6.1 铝合金的连续铸造	330
9.6.2 其他合金的连铸	340
9.7 O. C. C. 连铸技术	343
9.7.1 O. C. C. 连铸技术的原理与特点	344
9.7.2 O. C. C. 连铸方法	346
9.7.3 O. C. C. 连铸的凝固过程与质量控制	354
参考文献	359

0 概 论

0.1 金属材料地位

金属材料是目前用量最大、使用最广的材料。金属材料包括两大类：钢铁材料和有色金属。有色金属主要包括铝合金、钛合金、铜合金、镍合金等。

在机械制造业（如农业机械、电工设备、化工和纺织机械等）中，钢铁材料占90%左右，有色金属约占5%。在汽车制造业中，有色金属与塑料的比例稍大些，例如，1985年美国福特汽车公司的数据为：钢铁占72%，铝合金占5.3%，塑料占8.5%，这几种材料近年来在汽车中的比例大致如图0-1所示。

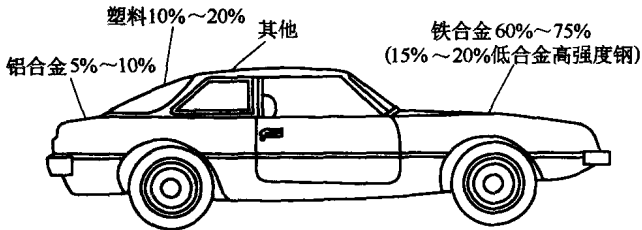


图 0-1 汽车中各种材料的大致比例

就世界范围来说，钢铁材料在20世纪30~50年代，处于鼎盛时期。那时，钢铁是材料科学技术的中心，现在有些衰退。例如，美国在1978年钢的年产量为1.37亿t，10年后却降至7000万t，2005年仅为9390万t。究其原因：一方面可能是随着钢的强度和钢材质量的提高，导致一些经济发达国家钢材的需求量减少；另一方面也由于利润的驱使和对未来社会发展的预测，美国材料的研究重点转向了电子通信材料。而日本的钢铁生产则处于世界领先地位，这与日本钢铁生产的工艺装备先进和在工艺研究上的大量投资，最后导致了能以低的成本生产出高质量的钢材有

关。

我国的钢铁工业仍在高速发展。据统计, 1994 年我国钢产量 9261 万 t, 其中合金钢 566 万 t, 占钢生产的 6.1%, 即使这样, 我国特殊钢的消耗量仍不能满足要求, 近几年每年要耗费 8 亿~9 亿美元进口合金钢材, 而其中不锈钢板的费用就约占 50%。特别是我国明确提出要加速发展汽车工业, 到 2010 年, 将与钢铁、石油、化工和建筑业一样形成国民经济的支柱产业。1994 年我国汽车产量为 138 万辆, 计划到 2007 年产量超过 800 万辆。仅就汽车工业的发展而言, 钢材的需求量(约占我国钢材生产量的 20% 左右)也在不断上升。

实际上, 2005 年, 全球粗钢产量达到 11.294 亿 t, 中国钢产量占世界总产量的 30.90% (2004 年为 26.3%), 达到 3.494 亿 t, 较 2004 年增长 24.6%, 连续 5 年保持 20% 以上的增长(2000 年钢产量仅为 1.27 亿 t), 2006 年是我国“十一五”的开局之年, 中国钢产量达到 4.1878 亿 t, 同比增长仍达 18.48%, 钢产量占世界总产量的 30.98%, 至 2007 年年底, 我国钢产量达到 4.8924 亿 t, 同比增长 18.92%。这与我国近几年的总体经济增长和行业发展有关。钢铁材料虽不属高科技的先进材料, 但因其具有优良的力学性能、工业性能和低的成本, 在 21 世纪中仍将占有重要地位, 其他种材料如高分子材料、陶瓷或复合材料可能会少量地代替金属材料, 但钢铁材料的应用不可能大幅度衰减。正如材料科学家柯垂耳(Cottrell)在题为《我们还将继续使用金属及合金吗?》发言中说:“我们将继续使用金属及合金, 特别是钢。我们的孩子和孙子也将会这样。”虽然由于其他材料的兴起, 钢铁材料已经走过了它最辉煌的年代, 但绝不是“夕阳工业”, 尤其在我国。

除钢铁外, 其他的金属材料均称为有色金属。在有色金属中, 铝及其合金用得最多, 这主要是因为:

(1) 质量轻, 只有钢的 1/3。虽然铝合金的力学性能远不如钢, 但如果设计者把减轻质量放在性能要求的首位, 最合适的就

是铝合金。例如，现今的波音 767 亚音速飞机，所用材料的 81% 是由铝合金制成的；

(2) 有好的导热性和导电性，在远距离输送的电缆中多用铝；

(3) 耐大气腐蚀。因此，在美国，25% 的铝用来制作容器和包装品，20% 的铝用作建筑结构，如门窗、框架、滑轨挡板等，还有 10% 的铝用作导电材料。钛合金的高温强度比铝合金好，也是金属材料中迄今发现的最好的耐蚀材料。尽管钛的价格比铝昂贵，但钛合金在航空、航天领域，以及特定的化工设备和海洋开发方面愈加得到更为广阔的应用。

0.2 金属凝固学的发展概论

据对出土文物考证，我国冶铸技术已有 5000 多年的历史：前 3000 年为青铜器时代，后 2000 年为铁器时代。铜器和铁器的制造是一个典型的熔化、凝固过程。商朝“钟鸣鼎食”是权贵的象征。1978 年湖北随县出土的曾侯乙青铜器编钟，64 件共分 8 组，可演奏中外名曲，音律准确和谐，音色优美动听。它们是距今 2400 多年前战国初期铸造的。北京大钟寺的永乐大钟，是明永乐十八年（公元 1418 ~ 1422）铸造的，重 46t，高 5.84m，外径 3.3m，内径 2.9m。钟体内外铸满笔画清晰的经文约 22700 个文字。其钟声优雅悦耳，可传数十里，堪称世界之最。由此可见，当时对青铜的化学成分和凝固过程的控制已达到很高的水平。

尽管如此，在古代对液态金属的凝固控制只是停留在经验的基础上。近代凝固理论大约经历了以下几个阶段：20 世纪 60 年代前诞生了经典的凝固理论。该理论认为凝固首先是成核，接着是核心长大直至成为固态。在多伦多大学 B. Chalmers 的指导下，许多著名的凝固学家脱颖而出。他们在对凝固界面附近溶质分析求解的基础上，总结出“成分过冷”理论，并提出了可操作性的成分过冷判据：首次将传热和传质耦合起来，研究其对晶体生

长方式和形态的影响。Flemings 等从工程的角度出发, 研究了两相区内液相流动效应, 提出了局部溶质再分配方程等理论模型, 推动了凝固科学的发展。捷克的 Chvorinov 通过对大量逐渐凝固冷却曲线的分析, 引入了铸件模数的概念, 建立了求解铸件凝固层厚度和铸件凝固时间的数学方程, 导出了著名的平方根定律。该定律仍是今日铸造工艺设计的重要理论依据之一。20 世纪 60 年代后的较长一段时间内, 研究的重点放在经典理论的应用上, 以提高材料的质量, 降低产品的成本, 以使用低的消耗获得优质产品。同时, 出现了快速凝固、定向凝固、等离子熔化技术、激光表面重熔技术、半固态铸造、扩散铸造、调压铸造等先进的凝固技术和材料成形方法, 积累了大量的凝固过程参数, 为凝固学的进一步发展奠定了基础。近代, 凝固学的发展进入了新的历史时期。其显著的特点是, 对凝固过程的认识逐渐从经验主义中摆脱出来, 对经典理论的局限性有进一步的认识。日本的大野笃美在总结前人经验的基础上, 做了大量的试验研究, 提出了晶粒游离和晶粒增殖的理论, 从而使人们从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。特别令人感兴趣的是, 由于计算机和计算技术的发展, 能定量地描述液态金属(合金)的凝固过程, 可以对凝固过程和凝固缺陷进行预测, 以便能合理地控制凝固过程, 大幅度节约材料和能源, 以低的价格获得优质产品。如大型电站水轮机主轴、转子、叶片等类铸件, 性能要求高、质重件大, 若报废, 将带来重大损失。采用对凝固过程的数学模型和计算机辅助设计的方法能有效地控制凝固过程, 以最小的投入, 获得大的产出。在此基础上, 出现了许多新的凝固理论和模型。它们将温度场、应力场、流动场耦合起来进行研究, 其结果更接近于实际。国际上已出现了许多商品化的凝固模拟软件, 它们在科研和生产中发挥着重要作用。国内紧随其后, 研究开发的凝固模拟软件, 在科研和实际生产中得到了较广泛的应用。

国内学者近年来在凝固学方面取得了很大的进展, 中国已成