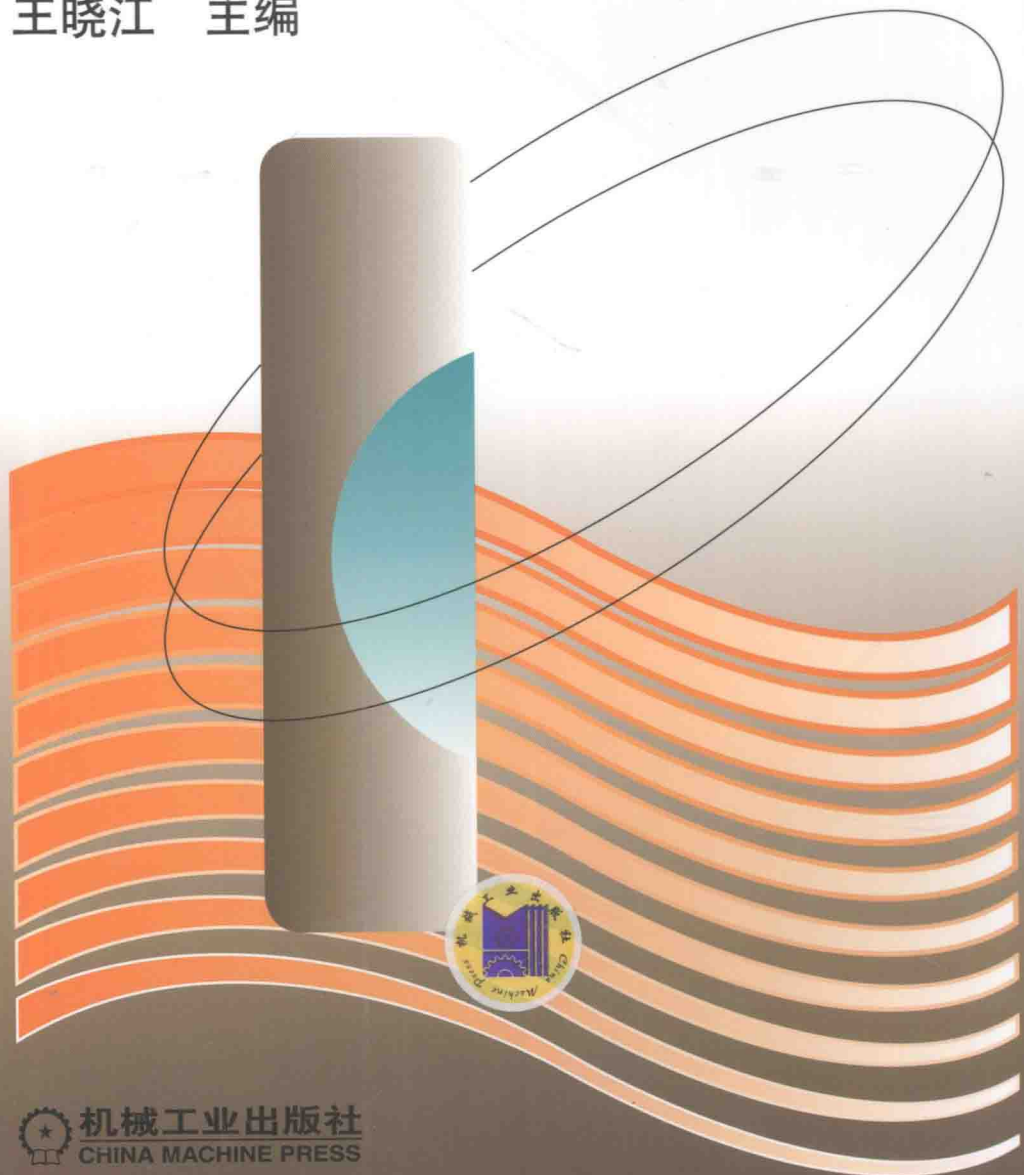


职业技术学院规划教材

# 铸造合金及其熔炼

王晓江 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

职业技术学院规划教材

# 铸造合金及其熔炼

主编 王晓江

参编 李长龙 黄之德 金挺 谢峰

主审 初福民



机械工业出版社

本书共分为铸造合金原理、铸铁及其熔炼、铸钢及其熔炼三篇十四章。书中系统论述了铸造合金原理、各种铸铁、铸钢的金相组织、性能特点、化学成分，熔炼用炉熔炼原理和熔炼工艺。全书以铸铁及其熔炼为主。书中注意吸取国内外有关先进的技术成果和生产经验，内容充实，先进实用。

本书可供高等职业技术学院铸造专业作教材，同时也可供中等专业学校、成人教育学校的师生及有关铸造专业的技术人员学习、参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

铸造合金及其熔炼/王晓江主编. - 北京: 机械工业出版社, 1999, 10 (2011.6 重印)  
职业技术学院规划教材

ISBN 978-7-111-07147-1

I. 铸… II. 王… III. ①铸造合金-专业学校-教材②铸造合金-熔炼-职业技术学院-教材 IV. TG27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14265 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王海峰 王霄飞 版式设计: 霍永明 责任校对: 韩 晶

封面设计: 姚 毅 责任印制: 乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011 年 6 月第 1 版第 5 次印刷

184mm × 260mm · 18.75 印张 · 457 千字

9001—11000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-07147-1

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

本教材是国家九五规划教材，根据原机械部教育司 1996 年 3 月颁发的“铸造合金及其熔炼”课程教学大纲编写而成。

全书共分三篇十四章，即第一篇铸造合金原理、第二篇铸铁及其熔炼、第三篇铸钢及其熔炼。教材在编写中力求体现职业技术教育的特色，重点放在为解决生产实际问题所必须的实用知识、理论和技能上。主要讲述了铸铁、铸钢的结晶原理，组织性能特点，化学成分的确 定，熔制工艺及熔炼用炉等方面的基本原理和技术知识，注意反映近年来国内外比较先进的生产经验和科研成果，推广和使用新的国家标准。

本教材是高、中等职业技术学院铸造专业教学用书，同时也适用于中等专业学校、成人中专及工厂培训使用，也可供工厂工程技术人员参考。

本教材由陕西工业职业技术学院王晓江任主编，并负责编写绪论、第一、二、三章；山东省机械工业学校李长龙编写第六、八章；常州铁路机械学校黄之德编写第九、十、十一、十二、十三、十四章；大连职业技术学院金挺和王晓江合编第四、五章；内蒙古工业学校谢峰和李长龙合编第七章。

本书由山东省机械工业学校初福民任主审。参加审稿的除参编人员外，还有沈阳市机电工业学校、广西职业技术学院、河北省机电学校、四川省机械工业学校、湖南职业技术学院的有关老师等。

在编写和审稿过程中，许多兄弟学校的老师对教材提出了宝贵建议，西安理工大学金相实验室的时惠英、陕西工业职业技术学院金相实验室的燕样样为本书提供了部分金相照片。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加上编写时间仓促，书中难免会有错误和不足之处，恳切希望读者批评和指正。

编 者

## 常用符号

符号	名称	单位	符号	名称	单位
L	金属液相		$a_{KV}$	冲击韧度 (V形缺口)	
A	奥氏体		$\delta$	伸长率	%
F	铁素体		$\epsilon$	应变率	%
P	珠光体		$\psi$	断面收缩率面积分数	%
B	贝氏体		$E$	弹性模量	MPa
M	马氏体		HBS	钢球作压头时测得的布氏硬度值	< 450
Fe <sub>3</sub> C	渗碳体		HBW	用硬质合金作非压头时测得的布氏硬度	> 450
G	石墨		HRC	用金刚石圆锥或钢球测得的洛氏硬度值	
Ld	莱氏体 (727℃以上)		HV	维氏硬度	
L'd	莱氏体 (727℃以下)		HK	努氏硬度	
Ac <sub>1</sub>	加热时下临界点温度		$\rho$	密度	g/cm <sup>3</sup>
Ac <sub>3</sub>	加热时亚共析钢上临界点温度		$\lambda$	热导率	W/m·℃
Ac <sub>cm</sub>	加热时过共析钢上临界点温度		$\alpha$	线膨胀系数	1/℃
Ar <sub>1</sub>	冷却时下临界点温度		$c$	比热容	J/kg·℃
Ar <sub>3</sub>	冷却时亚共析钢上临界点温度		$Q$	热量	J
Ar <sub>cm</sub>	冷却时过共析钢上临界点温度		$D, \phi$	直径	mm
M <sub>f</sub>	马氏体转变终了温度		$p$	压力	Pa
M <sub>s</sub>	马氏体转变开始温度		$\tau$	时间	S, min, h
$\sigma_b$	抗拉强度	MPa	$t$	摄氏温度	℃
$\sigma_{bb}$	抗弯强度	MPa	$T$	热力学温度	K
$\sigma_s$	屈服点	MPa	$w$	质量分数	
$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度	MPa	$V$	体积	m <sup>3</sup>
$\sigma_{-1}$	疲劳强度	MPa	A、S	面积	m <sup>2</sup>
$a_K$	冲击韧度 (无缺口)	J/cm <sup>2</sup>			
$a_{KU}$	冲击韧度 (U形缺口)	J/cm <sup>2</sup>			

# 目 录

前言	
常用符号	
绪论	1
<b>第一篇 铸造合金原理</b>	
第一章 铸造合金原理概述	3
第一节 液态金属的结构与性质	3
第二节 液态金属结晶的基本规律	5
第三节 铸造合金的流动性	7
第四节 铸造合金的收缩性及缩孔的形成	10
第五节 铸造应力、变形与裂纹	14
第六节 铸造合金中的偏析、气体和夹杂物	22
习题与思考题	26
<b>第二篇 铸铁及其熔炼</b>	
第二章 灰铸铁	29
第一节 概述	29
第二节 灰铸铁的金相组织、性能特点、牌号及技术要求	29
第三节 灰铸铁的结晶	40
第四节 影响铸铁组织和性能的主要因素	46
第五节 普通灰铸铁化学成分的确 定及熔制工艺	55
第六节 提高灰铸铁力学性能的主要途 径及孕育铸铁	60
第七节 灰铸铁的铸造性能、铸造工 艺及热处理特点	67
习题与思考题	69
第三章 球墨铸铁	70
第一节 概述	70
第二节 球墨铸铁的金相组织、性能特点、 牌号及技术要求	70
第三节 球墨铸铁的结晶特点	79
第四节 球墨铸铁的化学成分及熔制 工艺	81
第五节 球墨铸铁的凝固特点、铸造 性能及铸造工艺特点	91
第六节 球墨铸铁常见的铸造缺陷 及防止措施	94
第七节 球墨铸铁的热处理	97
习题与思考题	103
第四章 蠕墨铸铁	104
第一节 概述	104
第二节 蠕墨铸铁的金相组织、性能 特点、牌号及技术要求	104
第三节 蠕墨铸铁的化学成分及熔制 工艺	109
第四节 蠕墨铸铁的铸造性能、铸造工 艺及热处理特点	114
第五节 蠕墨铸铁常见缺陷及防止 措施	116
习题与思考题	117
第五章 可锻铸铁	118
第一节 概述	118
第二节 可锻铸铁的金相组织、性能 特点、牌号及技术要求	118
第三节 可锻铸铁的化学成分及白口 毛坯的熔制工艺	121
第四节 可锻铸铁的铸造性能、铸造 工艺特点	126
第五节 可锻铸铁的退火热处理	126
第六节 可锻铸铁常见缺陷及防止措施	130
习题与思考题	131
第六章 特种铸铁	132
第一节 概述	132
第二节 耐磨铸铁	132
第三节 耐热铸铁	140
第四节 耐蚀铸铁	144
习题与思考题	147
第七章 铸铁的熔炼用炉	148
第一节 概述	148

第二节	冲天炉的基本结构及其辅助装置 .....	149	第二节	合金元素在钢中的作用 .....	231
第三节	冲天炉炉型分析及常用炉型 .....	156	第三节	铸造低合金钢 .....	232
第四节	冲天炉的主要工艺参数 .....	160	第四节	铸造高合金钢 .....	236
	习题与思考题 .....	165	第五节	铸造合金钢的铸造性能、铸造工艺及热处理特点 .....	245
第八章	铸铁的冲天炉熔炼原理及工艺 .....	166		习题与思考题 .....	247
第一节	概述 .....	166	第十一章	三相电弧炉 .....	249
第二节	冲天炉熔炼原理 .....	168	第一节	概述 .....	249
第三节	冲天炉熔炼工艺 .....	185	第二节	三相电弧炉的构造 .....	251
第四节	冲天炉炉料及配料计算 .....	207		习题与思考题 .....	259
第五节	冲天炉熔炼过程的系统控制 .....	212	第十二章	电弧炉炼钢工艺 .....	260
	习题与思考题 .....	213	第一节	炼钢用原材料 .....	260
			第二节	碱性电弧炉氧化法熔炼工艺 .....	262
			第三节	铸钢的氧化法熔炼工艺举例 .....	277
			第四节	碱性电弧炉不氧化法熔炼工艺特点 .....	279
			第五节	酸性电弧炉炼钢工艺特点 .....	280
				习题与思考题 .....	280
			第十三章	感应电炉 .....	282
			第一节	概述 .....	282
			第二节	感应电炉的熔炼原理 .....	283
			第三节	感应电炉的基本结构 .....	285
				习题与思考题 .....	289
			第十四章	感应电炉熔炼工艺 .....	290
			第一节	概述 .....	290
			第二节	感应电炉熔炼工艺 .....	290
				习题与思考题 .....	292
			参考文献	.....	293
第三篇	铸钢及其熔炼				
第九章	铸造碳钢 .....	215			
第一节	概述 .....	215			
第二节	铸造碳钢的性能特点、牌号及技术要求 .....	216			
第三节	铸造碳钢的结晶过程及铸态组织 .....	218			
第四节	化学成分对铸造碳钢组织和性能的影响 .....	222			
第五节	碳钢的热处理特点、铸造性能及铸造工艺特点 .....	224			
	习题与思考题 .....	229			
第十章	铸造合金钢 .....	230			
第一节	概述 .....	230			

## 绪 论

铸造合金（包括铸铁、铸钢和铸造非铁合金）是重要的工程材料，在工农业生产、国防建设及人民日常生活中都占有相当重要的地位，特别是在机器制造业中占的比例就更大。

人类为了生存和生产，总是不断地探索、寻找制造生产工具的材料，每一种新材料的发现和运用，都会促使生产力的发展，并给人类生活带来巨大的变革，把人类社会和物质文明推向一个新的阶段。人类社会发展的历史，以其所使用的材料不同可划分为石器时代、陶器时代、青铜器时代和铁器时代。当今，人类正跨入人工合成材料和复合材料的新时代。

早在 4000 多年前，我们的祖先就已开始使用天然存在的红铜。大约到公元前 1000 多年的殷商时代，我国的青铜冶铸技术已达到很高的水平。出土的大量青铜礼器、生活用具、武器、工具等都说明当时已具有高超的冶铸技术和艺术造诣。到春秋时期，我国已能对青铜的冶铸技术作出规律性的总结，湖北随县出土的青铜乐器编钟（总重量达 2.5t 左右，共 64 件，铸造精巧，音律准确，音色优美）就是青铜文化时期青铜铸件的杰出代表。作于公元前 5 世纪的《周礼·考工记》中就有完整的关于青铜合金化的记载。

由于我国古代青铜铸造技术的高度发达，在商代就能使炉温达到 1200℃ 以上。因此，在公元前 6 世纪就发明了生铁和铸铁技术，这比欧洲要早约 1900 多年，如河北武安出土的战国时期的铁锹，经检验证明就相当于今天的可锻铸铁。1978 年，我国对河南巩县铁生沟遗址出土的西汉铁镢进行检验，发现基体中石墨球化良好。隋唐以后，社会经济有了进一步的发展，铸造技术向大型和特大型铸铁发展，如著名的当阳铁塔（重 40t）、北京明永乐大钟（重约 46t）、北京颐和园的铜亭、武当山金顶的金殿等。在世界冶铸技术史上，我国古代劳动人民表现出了无穷的智慧和才能，写下了光辉的篇章。

现代铸造合金种类及熔炼技术的飞速发展主要是在 20 世纪 50 年代以后，如孕育铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁退火周期的大幅度缩短、电炉熔炼铸铁技术的发展等。随着人们对各种铸造合金、铸造工艺方法及铸造合金熔炼用炉的广泛深入研究，许多新技术、新成果被不断地应用到生产中，特别是计算机在铸造生产中的应用，取得了令人满意的成果。目前我国各省、市都有铸造学会，大多数工科院校都设有铸造专业，铸造技术水平发展很快，有些方面已达到或超过了世界先进水平。但我们还应清楚地看到，我国的铸造生产方面还存在一些问题，如设备陈旧、废品率高、劳动强度大、环境污染严重、后继乏人等，这些都有待于我们认真学好铸造专业知识，来进一步提高铸造生产的技术水平和铸件的质量，改变铸造行业的落后状况。

本教材是为了配合中、高等职业技术学校铸造专业（或热加工专业等）学生学习“铸造合金及其熔炼”这门课程的需要而编写的。教材内容包括铸造合金原理、铸铁及其熔炼、铸钢及其熔炼三大部分，共计十四章。主要涉及铸造合金材料和铸造合金的熔炼两个方面的内容。本课程的主要任务是：论述各种铸造合金的化学成分，金相组织与性能之间的关系，铸



造合金的铸造性能、铸造工艺和热处理特点；各种铸造合金的熔炼用炉、熔炼工艺及熔炼方法等。本课程具有理论性、实用性、系统性比较强，突出重点等特点。在学习系统的理论知识的同时，要注意密切联系生产实际，加强实践性教学环节（如实习、实验、现场参观教学等）。

# 第一篇 铸造合金原理

铸件都是由液态合金在铸型中冷却凝固而成（即使金属焊接时，焊缝中也要发生结晶凝固过程）。因此，铸造合金的液态结构、物理性质、结晶凝固特点以及铸造合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能（也称为铸造性能，包括流动性、收缩性、偏析、气体及夹杂物等）对铸件的质量有着极为重要的影响，是我们制定合理的铸造工艺，获得健全铸件的重要依据。本篇主要介绍铸造合金的原理。

## 第一章 铸造合金原理概述

### 第一节 液态金属的结构与性质

在铸造生产过程中，铸件是由液态金属转变为固体金属的结晶过程而得到的。而液态金属冷却时会产生体积的变化，固相的析出、凝固过程中溶质的再分配，气体和夹杂物的析出等。这些变化都与铸件的母体即液态金属的结构与物理性质密切相关。了解液态金属的结构与性质，可以控制其结晶过程，改善铸件的性能。

#### 一、液态金属的结构

由金属学原理可知，固态金属都是晶体，其中的原子都是在较大范围内按照特定的晶格类型呈现有规则的排列，我们把固态金属的这种结构特征称为“远程有序”结构。而当固态金属加热时，随着加热温度的提高，原子的热振动加剧，振幅增大，活化原子数增多，原子在点阵中频繁跳跃，点阵内的空位数增加；对于多晶体还可使晶界产生移动，从而使金属的体积膨胀。

由于原子在三维方向都有相临的原子，彼此的振动方向又是随机的。因此，常常相互碰撞并传递能量，从而使有的原子能量增大或减小，使有的原子能量大于或超过原子的平均能量，有的小于或远远小于平均能量。这种能量的不均匀性称为能量起伏。

当温度达到熔点时，多晶体晶粒之间的结合受到极大的破坏，晶粒之间更容易产生相对运动，使原有晶粒逐渐失去固有的形状和尺寸。为了使金属由固态转变为液体，还需要不断提供能量使原子间的结合进一步破坏，使晶粒进一步瓦解为小的原子集团，称为“近程有序”。这时外部提供的能量并不使金属的温度进一步升高，而使原子间的结合进一步破坏，我们把金属由固态转变为液态时所吸收的能量称为熔化潜热。几种金属的熔化潜热比较，如表 1-1 所示。

能量起伏理论是我们了解物质微观运动的一个重要概念。用此理论可以解释金属的熔化、蒸发、扩散、凝聚和固态相变等一系列物理、化学过程。

表 1-1 几种金属的熔化潜热

金属名称	铝	铜	铁	锌	铬
熔化潜热/ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	10.5	13.0	16.2	8.2	16.5

从微观上看,液态金属是由许多强烈游动的原子集团和空穴所组成,温度越高,原子集团越小,空穴越多,能量起伏越大,游动越快。所有的原子集团都处在瞬息万变状态,时而长大,时而变小,时而产生,时而消失,即时聚时散,时有时无。我们把金属的这种现像称为结构起伏。用此可以解释液态金属的流动性。只要在重力场的作用下,其外形就能随着铸型型腔而变化。

合金都是由两种或两种以上元素组成,不同元素间的原子结合力是不相同的,结合较强的原子容易聚集到一起而排斥别的原子。这就造成在游动的原子集团中有的 A 种原子多,有的 B 种原子多。我们把这种原子集团间成分不均匀现象称为浓度起伏,如图 1-1 所示。

## 二、液态金属的物理性质

液态金属的物理性质对金属的浇注、凝固过程及铸件质量都有很大的影响。

(1) 熔点和熔化热 各种纯金属的熔点差别很大,如 K 为  $63.7^{\circ}\text{C}$ , Fe 为  $1538^{\circ}\text{C}$ , Al 为  $660.37^{\circ}\text{C}$ , Cu 为  $1083^{\circ}\text{C}$  等。纯金属在一定的温度下熔化和结晶,而大部分合金(除共晶成分合金外)则有一个熔化或结晶温度区间,其大小取决于合金的种类和成分。

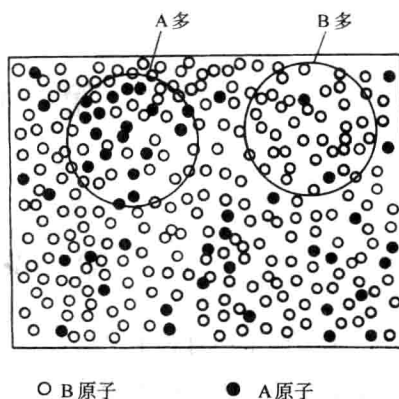


图 1-1 液态金属中浓度起伏示意图

各种金属的熔化热差别也很大,如 Cu 为  $54.5\text{kJ/mol}$ , Fe 为  $16.2\text{kJ/mol}$ , Al 为  $10.7\text{kJ/mol}$ , Zn 为  $6.7\text{kJ/mol}$ , Sn 为  $7.2\text{kJ/mol}$  等。具有熔化温度区间的合金,熔化时所吸收的热量包括真正的熔化热和从固相线加热到液相线所吸收的热量。

(2) 沸点和蒸发热 各种金属的沸点不同,而且差别较大,如 Zn 为  $906^{\circ}\text{C}$ , Sn 为  $2270^{\circ}\text{C}$ , Al 为  $2450^{\circ}\text{C}$ , Fe 则高为  $3070^{\circ}\text{C}$ 。金属沸点的高低,可用来估算在熔化过程中该金属的蒸发烧损较严重时的温度范围,以便确定合理的合金熔炼工艺。

各种金属的蒸发热各不相同,而且远远高于金属的熔化热。如 Zn 的蒸发热为  $116.7\text{kJ/mol}$ , Sn 为  $293\text{kJ/mol}$ , Al 为  $284.5\text{kJ/mol}$ , Fe 为  $354\text{kJ/mol}$ 。这也说明,液态金属的结构和特性与固态金属较为接近,而与气态相差甚远。

(3) 液态金属的热膨胀和凝固收缩 绝大多数金属的液态密度都比固态时小,如 Cu 为  $7.93\text{g/cm}^3$ , Al 为  $2.35\text{g/cm}^3$ , Zn 为  $6.92\text{g/cm}^3$ 。原因是在液态时金属原子的热运动加剧,空位和空穴增多,体积也明显膨胀。同理,几乎所有金属(除 Bi、Sb、Si 外),凝固时体积都要缩小,如 Al 凝固时的体收缩为  $6.6\%$ , Cu 为  $2.6\%$ , Bi 为  $-3.32\%$ (膨胀为负)。金属的这一特性对铸件的形成过程十分重要,并且受到合金的种类、成分及合金中含气量的影响。

(4) 液态金属的热导率和比热容 液态金属的热导率(即导热系数  $\lambda$ )的大小直接影响着液态金属的充型过程,但各种金属之间差别也较大,如 Zn 在  $600^{\circ}\text{C}$  时为  $56.9\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ , Al 在  $790^{\circ}\text{C}$  时为  $121.4\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ , Pb 在  $400^{\circ}\text{C}$  时为  $15.9\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

液态金属比热容的大小对流动性影响也较大。常见金属的比热容分别为：Al 在 800℃ 左右时为 1084J/kg·℃，Cu 在 1100℃ 左右时为 468J/kg·℃，Pb 在 400℃ 时为 155J/kg·℃，Zn 在 600℃ 时为 489J/kg·℃。

(5) 液态金属的粘度 液体在层流运动时，各液层之间有摩擦力，称为液体的内摩擦，其妨碍着液体的流动。此种内摩擦阻力称为粘度，是液态金属的物理特性之一。

通常用动力粘度系数来表示液态金属粘度的大小。据实验测定：Al 在 800℃ 为 0.0014Pa·s，Cu 在 1145℃ 为 0.0034Pa·s，Pb 在 441℃ 为 0.0021Pa·s，Fe 在 1540℃ 为 0.004Pa·s。

液态金属的粘度对金属在铸型中的流动性，金属中气体、夹杂物、熔渣等上浮，以至铸件的补缩均有明显的影响。液态金属的粘度大小与许多因素有关，如温度、压力、化学成分及杂质含量等。几乎所有金属的粘度都随温度的升高而降低，液态金属中固态杂质的数量愈多，粘度也愈大。同一合金的成分不同，粘度也有差别。如共晶成分的铁碳合金，在相同条件下，其粘度要比其它成分的低。

(6) 液态金属的表面张力 由于液相表面的质点受到周围质点对它的作用力，并且不平衡。因此，产生一个欲把表面质点拉向液体内部的力，促使其表面积减小，此力称为表面张力。

液态金属表面张力的大小，对液态金属的充型及是否能获得轮廓清晰的健全铸件影响较大。相同条件下表面张力小的液态金属较表面张力大的有利于充型，在制定铸造工艺时要给以考虑。一般情况下，为了保证液态金属充满薄壁铸型，克服因表面张力而产生的附加压力，就需要适当加高压头。

## 第二节 液态金属结晶的基本规律

我们所使用的各种铸件都是通过由液态转变为固态的结晶过程得到的，为了获得所需要的铸件组织和性能，就必须搞清楚金属结晶过程的基本规律，以便指导生产，控制铸件的铸态组织和性能。

研究证明，金属或合金的结晶过程，在温度起伏、结构起伏和浓度起伏的作用下，同样是由晶核的形成和晶体的长大这两个基本过程组成。

### 一、液态金属中晶核的形成

图 1-2 是金属的实际冷却曲线，液态金属并不是冷却到理论结晶温度  $T_0$  后就立刻开始结晶的，而只有当液态金属的过冷度  $\Delta T$  达到一定数值  $\Delta T_1$  后才开始形成固体晶核。

由于结晶条件不同，可能会出现两种不同的形核方式：即自发形核和非自发形核。

(1) 自发形核 也称均质形核，它是液态金属中存在的此起彼伏的原子集团，当过冷到  $\Delta T_1$  时，其中一部分就成为结晶的核心。过冷度愈大，形成的晶核也就愈多，晶粒也就愈细。实验指出，自发形核所需的过冷度较大，约为金属熔点的 20% 左右。因此，在铸造合金的实际结晶过程中，自发形核的可能性很小。

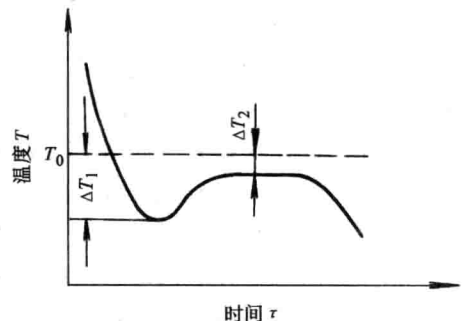


图 1-2 金属的实际冷却曲线

(2) 非自发形核 也称非均质形核,它是以液态金属中的杂质、固体质点、及其它外来表面为基础,当液态金属过冷到平衡结晶温度以下时,依附在这些表面上的某些原子集团就成为结晶核心。在实际液态金属中固体质点愈多,结晶过冷度就愈大,形成的晶粒也就愈细。

实验还证明,非自发形核所需的过冷度远比自发形核小,仅为理论结晶温度的2%左右。因此,铸造合金结晶的形核方式多以非自发形核为主。

## 二、液态金属中晶体的长大

在液态金属中晶核形成以后,结晶条件及结晶速度不同对结晶后晶体的形状、大小以及性能都有很大的影响。

### 1. 晶核长大的机理

晶核的长大机理与固—液相界面处的结构有关。晶核与液相界面有两种类型:即平整界面和粗糙界面。

(1) 平整界面及侧面长大机理 固相界面上原子层的排列基本上是满的,如图 1-3a 中,虚线以上只有少量的孤立原子 A,这些原子是不稳定的,时而脱离,时而长大,但界面总的来说是平整的。这种界面上的单原子和晶面的结合较弱,长大速度很慢,所需的过冷度也较大,我们称这种长大为侧面长大。而且这种界面多出现在非金属物质的结晶中。

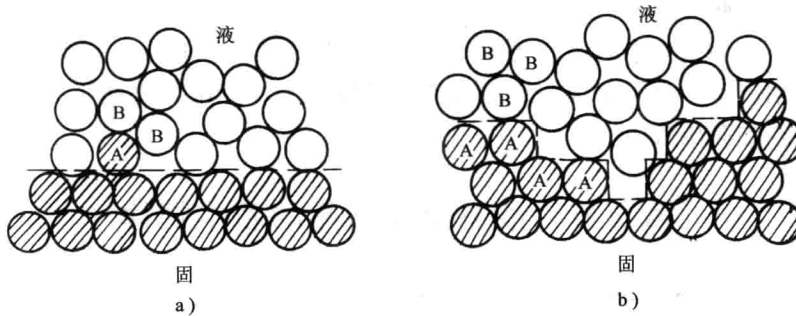


图 1-3 液—固界面的两种结构

a) 平整界面 b) 粗糙界面

(2) 粗糙界面及垂直长大机理 如图 1-3b 所示,固相表面最外几个原子层 A 约有 50% 的位置是空的。这种界面结构很容易把从液相迁移来的原子 B 联结起来。因此,长大的速度就很快,生长所需要的过冷度也很小,我们称这种长大为垂直长大。大多数金属晶体的长大属于这种方式,也称这种界面为金属型界面。

### 2. 晶体长大的形态

晶体长大的形态因结晶条件不同而不同。当过冷度很小时,液体内呈正的温度梯度,如图 1-4a 所示。从液—固界面起,沿晶体的长大方向,液体温度递增时,结晶潜热只能通过已经结晶的固体来散发,长大速度决定于固体的温度梯度和导热能力。这时固—液交界面(相界面)上的任何局部的凸出伸向温度高于熔点的液体内的凸出点必然会重新熔化。所以在相界面上,固相只能以平面向前推进,使晶体在长大的过程中保持比较规则的外形。

当结晶过程中释放出大量结晶潜热使界面上的温度高于周围液态金属的温度时,会在相界面前沿的液体内造成所谓的负温度梯度,如图 1-4b 所示,这时相界面上如果出现局部的凸出点,它将伸向过冷度较大的液体内,并以高于周围晶体的长大速度长大,这就破坏了

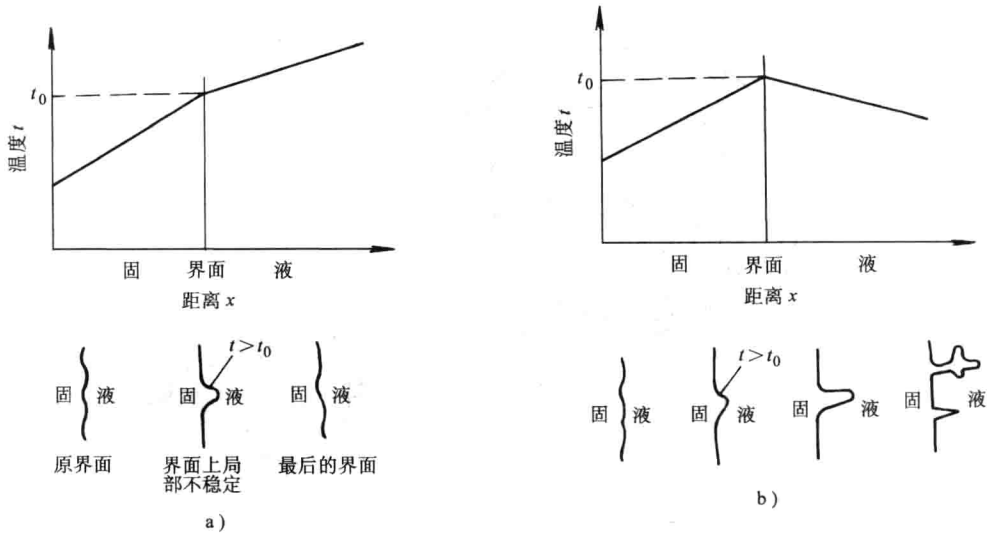


图 1-4 存在温度梯度时界面的推出方式

a) 正温度梯度时界面的变化 b) 负温度梯度时界面的变化

平面长大的相界面。

通常，这种局部凸出而又迅速生长所形成的晶体，又可以从侧面破坏，长出旁边的分枝，这就是所谓的树枝状成长。另外，由于合金凝固时，在界面前沿的液相中出现溶质元素富集和结晶温度的变化，改变了固—液界面前沿的过冷情况，使界面前沿的液相产生成分过冷现象。成分过冷也和负温度梯度一样有利于树枝状结晶的生长。

### 第三节 铸造合金的流动性

#### 一、铸造合金流动性概念及其测试

##### 1. 铸造合金流动性概念

流动性是指液态铸造合金本身的流动能力。铸造合金的流动性是合金的重要铸造性能之一，并且与合金的化学成分、温度、杂质含量及其物理性质有关。

流动性与液态金属的充型能力是两个不同的概念。充型能力是液态合金充满铸型型腔，获得形状完整、轮廓清晰健全铸件的能力。充型能力的好与差，首先取决于铸造合金的流动性，同时又受到外界条件，如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素的影响，是各种因素的综合反映，要注意区别两者。

流动性好的铸造合金，充型能力强，浇注时能迅速充满铸型型腔，易于获得形状完整、轮廓清晰的铸件；可使液态合金中的气体、夹杂物易于浮出，减少气孔和夹杂物的产生；也可使铸件在凝固期间产生的缩孔和因收缩受阻产生的裂纹，得到充填和弥合。

##### 2. 铸造合金流动性的测试

液态合金的流动性一般用浇注“流动性试样”的方法来衡量。流动性试样的类型很多，有螺旋线形、球形、U形、楔形及真空试样等。但在生产和科研中应用最多的还是螺旋线形试样，如图 1-5 所示。

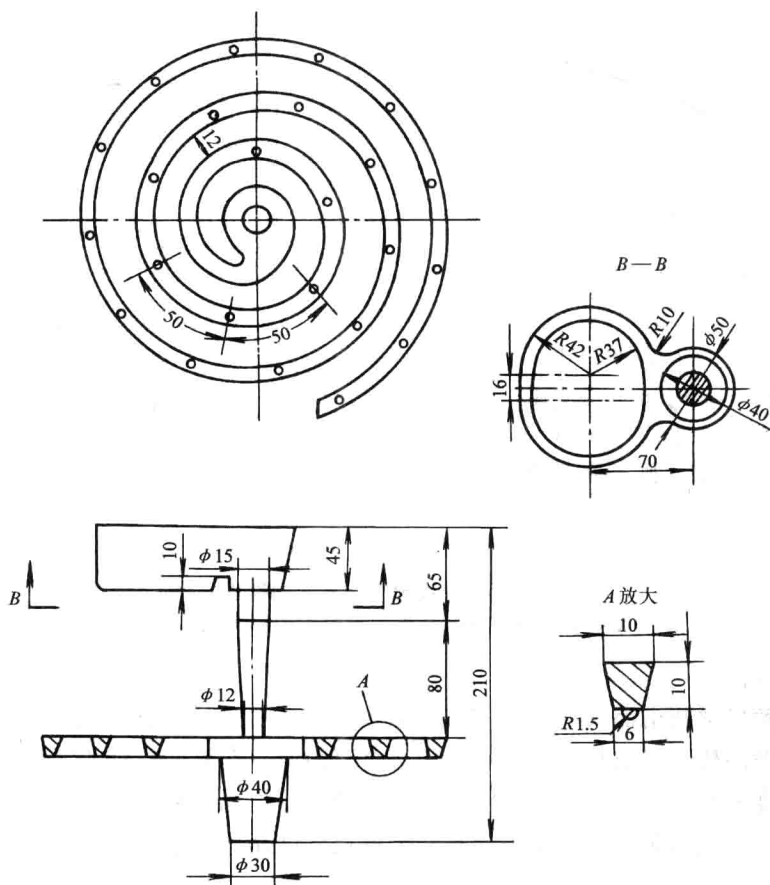


图 1-5 螺旋线形流动性试样

其特点是：灵敏度高，对比形象直观，金属可流动相当长的距离，而铸型的轮廓尺寸并不大；但金属流线弯曲多，沿途阻力损失大，且流程愈长，散热愈多，其受铸型的紧实度、型砂水分、透气性等因素影响而不易控制。铸型一般为湿型，铸出螺旋线试样后，测量其长度，将其作为判断铸造合金流动性好与差的依据。常用铸造合金的流动性见表 1-2。

表 1-2 常用铸造合金的流动性（砂型螺旋试样，沟槽断面 8mm×8mm）

常用铸造合金的（质量分数，%）	造型材料	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
铸铁（C+Si=6.2）	砂 型	1300	1800
（C+Si=5.9）	砂 型	1300	1300
（C+Si=5.2）	砂 型	1300	1000
（C+Si=4.2）	砂 型	1300	600
铸钢（C=0.4）	砂 型	1600	100
	砂 型	1640	200
铝硅合金	金属型 (300℃)	680~720	700~800

(续)

常用铸造合金的 (质量分数, %)	造型材料	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
锡青铜 (Sn=9~11) (Zn=2~4)	砂 型	1040	420
硅黄铜 (Si=1.5~4.5)	砂 型	1100	1000

## 二、影响铸造合金流动性的因素

各种铸造合金的流动性, 取决于合金的种类、结晶特点及其它物理性能等, 它是合金性质方面各因素对流动性影响的综合表现。

### 1. 合金的化学成分及结晶特点的影响

合金的化学成分及结晶特点与合金的流动性之间存在着一定的规律。研究 Pb-Sn 合金的流动性发现, 随着含 Sn 量的不同, 其流动性按一定的规律变化, 如图 1-6 所示。从图中可见, 对应着纯金属、共晶成分类型的合金, 流动性出现最大值; 对于具有一定结晶温度范围的合金, 特别是结晶温度范围大的合金, 流动性最差, 结晶温度范围小的合金流动性就好。

纯金属和共晶成分的合金是在固定温度下凝固结晶的, 已结晶的固体层内壁表面比较平滑 (见图 1-7a), 未凝固的液体在其中流动时阻力小, 流动性好; 而结晶温度范围比较宽的合金, 初生树枝晶比较发达, 结晶凝固时固体层参差不齐 (见图 1-7b), 未凝固的液体在其中流动时阻力很大, 补缩困难, 因此流动性差。

铁碳合金流动性与状态图的关系见图 1-8。

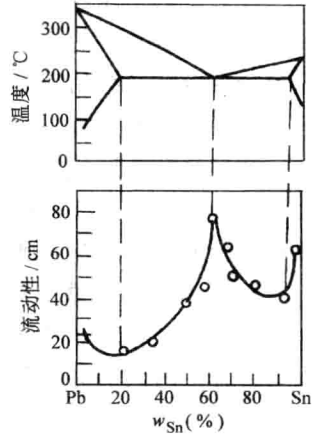


图 1-6 Pb-Sn 合金流动性与化学成分的关系

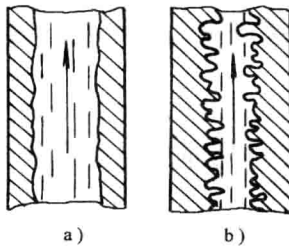


图 1-7 金属在结晶状态下流动  
a) 纯金属 b) 结晶温度范围宽的合金

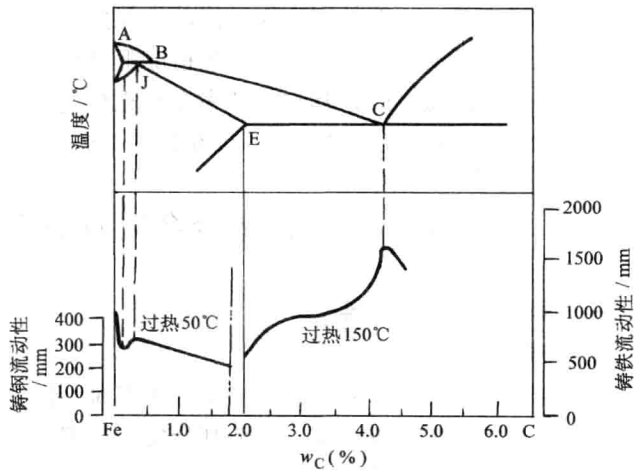


图 1-8 Fe-C 合金流动性与状态图的关系

从图中可见, 纯铁的流动性比较好; 而亚共晶成分的铸铁, 成分愈接近共晶, 流动性就愈好, 在共晶成分处流动性最好。

铸铁的结晶温度范围一般都比铸钢宽, 但实际上铸铁的流动性都比钢要好, 这主要是因为铸钢的熔点高, 不易过热。另外, 由于铸钢的温度高, 在铸型中散热快, 也使钢液很快地



失去流动能力。几种铸铁的流动性见表 1-3 所示。

表 1-3 几种铸铁的流动性比较

铸铁种类	稀土镁球铁	镁球铁	球铁原铁液	$w_{\text{C}_r} = 0.3\%$ 灰铸铁
浇注温度/℃	1270	1250	1280	1295
螺旋线长度/mm	1107	750	1082	380

## 2. 合金结晶潜热和晶粒形状的影响

在合金的结晶过程中放出潜热愈多，则液态合金保持时间就愈久，流动性就好。但是，结晶潜热对流动性的良好作用是否能充分发挥，则取决于合金的结晶特点。对于纯金属和共晶成分的合金其结晶潜热提高流动性的作用能够比较充分地发挥；而对于结晶温度范围较宽的合金则影响不显著。

结晶晶粒的形状对流动性也有影响，如同在固定温度下结晶的三种 Al-Cu 合金：中间化合物  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $w_{\text{Cu}} = 54\%$ )、Al +  $\text{Al}_2\text{Cu}$  共晶 ( $w_{\text{Cu}} = 33\%$ ) 和纯 Al ( $w_{\text{Al}} = 100\%$ )。由于前两种合金形成球状及规则形状的晶粒，其流动性就比形成树枝状晶粒的纯铝好。

## 3. 合金的物理性质对流动性的影响

(1) 合金的热导率 ( $\lambda$ )，比热容 ( $c$ ) 和密度 ( $\rho$ ) 对流动性的影响  $c$ 、 $\rho$  较大， $\lambda$  较小的合金，因其本身含有较多的热量，而热量的散失又较慢，因此，流动性就好；反之，流动性就差。

(2) 合金的表面张力对流动性的影响 在相同条件下，一般合金表面张力大的，流动性差；相反，则流动性就好。

(3) 液态合金的粘度对流动性的影响 液态合金的粘度与其化学成分、温度及夹杂物的含量和状态等有关。一般粘度愈大，流动性就愈差，而粘度愈小流动性就愈好。

总的来说，流动性好的合金在多数情况下其充型能力都较强；流动性差的合金其充型能力较差，但也可以通过改善其它条件来提高充型能力（如提高熔炼质量、浇注温度和浇注速度，改善铸型条件及铸件结构等），以获得健全铸件。

# 第四节 铸造合金的收缩性及缩孔的形成

## 一、铸造合金的收缩性

### 1. 收缩的基本概念

液态合金当温度下降而由液态转变为固态时，因为金属原子由近程有序逐渐转变为远程有序，以及空穴的减少或消失，一般都会发生体积减小。液态合金凝固后，随温度的继续下降，原子间的距离还要缩短，体积也进一步减小。铸造合金在液态、凝固态和固态冷却的过程中，由于温度的降低而发生的体积减小现象，称为铸造合金的收缩性。它是铸造合金本身的物理性质。

收缩又是铸件中许多缺陷，如缩孔、缩松、热裂、应力、变形和裂纹等产生的基本原因，是合金的重要铸造性能之一。它对铸件质量（如获得符合要求的几何形状和尺寸，致密的优质铸件）有着很大的影响。