



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 材料工程导论

毕大森 主编

43



化学工业出版社

普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材

# 材料工程导论

毕大森 主 编

张金山 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为高等学校教学用书，是材料成型及控制工程系列规划教材之一。内容包括：金属的液态成形、塑性成形和焊接成形；非金属材料成型；表面工程技术以及其他成形工艺方法。通过本书的学习可以使读者全面地了解和掌握材料工程的全貌，为以后的专业课程学习和工程实践打下基础。

本书可以作为材料成型及控制工程专业与机械类相关专业的教材和主要参考书，也可供相关行业的工程技术人员自学与参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

材料工程导论/毕大森主编. —北京：化学工业出版社，2010.6

(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)

ISBN 978-7-122-08122-3

I. 材… II. 毕… III. 工程材料-高等学校-教材  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 055237 号

---

责任编辑：彭喜英

责任校对：蒋宇

文字编辑：冯国庆

装帧设计：荆遥

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数334千字 2010年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：25.00 元

版权所有 违者必究

## 序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

## 前 言

本书为高等学校教学用书，是材料成型及控制工程系列规划教材之一。全书共分为7章，第1~3章讲述了金属的液态成形、塑性成形和焊接成形。第4~6章阐述了非金属材料成型、表面工程技术以及其他成形工艺方法。第7章介绍了材料成形工艺的选择。通过本书的学习可以使读者全面地了解 and 掌握材料工程的全貌，为以后的专业课程学习和工程实践打下基础。本书可以作为材料成型及控制工程专业及机械类相关专业的教材和主要参考书，也可供有关专业的工程技术人员自学与参考。

本书第1章由太原理工大学张金山编写，第2章、第4章、第7章由天津理工大学毕大森编写，第3章由河北工业大学薛海涛编写，第5章、第6章由太原理工大学许春香编写。本书由毕大森担任主编，张金山担任副主编。天津理工大学张建担任主审。

由于条件所限，本书未能将所有参考文献一一列出，在此对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

在本教材的编写过程中全体编者认真探讨专业教学改革，努力将各自学校的特色通过教材体现出来，但由于编者的水平有限，书中难免有欠妥与不尽人意之处，敬请各兄弟院校的同仁及读者批评指正。

编 者

2010年1月

# 目 录

<b>第 1 章 金属液态成形</b> .....	1	2.4.2 精密模锻成形	68
1.1 液态金属成形工艺理论 .....	1	2.4.3 多向模锻	69
1.1.1 液态金属成形工艺的概念 .....	1	2.4.4 液态模锻成形	70
1.1.2 液态金属成形工艺特点 .....	1	2.4.5 摆碾成形	71
1.1.3 合金的铸造性能 .....	2	2.4.6 轧制成形	72
1.2 铸造合金及熔炼 .....	13	2.4.7 粉末锻造	73
1.2.1 常用铸造合金 .....	13	2.4.8 超塑性成形	74
1.2.2 铸造合金熔炼 .....	15	2.4.9 内高压成形	75
1.3 铸造成型工艺 .....	17	2.4.10 高速高能成形	76
1.3.1 砂型铸造 .....	17	习题与思考题	77
1.3.2 砂型铸造工艺方案的确定 .....	22	<b>第 3 章 金属焊接成形</b> .....	79
1.4 特种铸造 .....	27	3.1 焊接原理 .....	79
1.4.1 熔模铸造 .....	27	3.1.1 焊接的本质与特点 .....	79
1.4.2 金属型铸造 .....	28	3.1.2 焊接方法的分类 .....	80
1.4.3 压力铸造 .....	29	3.1.3 焊接接头的组织及性能 .....	81
1.4.4 低压铸造 .....	31	3.2 常用的焊接方法 .....	98
1.4.5 离心铸造 .....	31	3.2.1 电弧焊 .....	98
1.4.6 挤压铸造 .....	33	3.2.2 电阻焊 .....	106
1.4.7 消失模铸造 .....	33	3.2.3 钎焊 .....	110
1.5 金属液态成形技术的发展 .....	34	3.3 金属材料的焊接性 .....	113
1.5.1 固态金属铸造成形技术 .....	34	3.3.1 金属焊接性的概念 .....	113
1.5.2 近净成形铸造技术 .....	35	3.3.2 影响焊接性的因素 .....	113
习题与思考题 .....	36	3.3.3 焊接性评定方法分类 .....	114
<b>第 2 章 金属塑性成形</b> .....	38	习题与思考题 .....	116
2.1 金属塑性成形理论基础 .....	38	<b>第 4 章 非金属材料成型</b> .....	117
2.1.1 金属塑性变形 .....	38	4.1 塑料的成型工艺 .....	117
2.1.2 金属塑性变形后的组织与性能 .....	39	4.1.1 塑料成型基础 .....	117
2.1.3 金属可锻性及影响因素 .....	40	4.1.2 塑料成型方法 .....	121
2.2 锻造成形工艺 .....	42	4.1.3 塑料成型模具 .....	130
2.2.1 自由锻 .....	42	4.1.4 塑件结构设计 .....	136
2.2.2 模锻 .....	47	4.2 橡胶的成型工艺 .....	145
2.3 板料冲压成形工艺 .....	56	4.2.1 常用橡胶材料 .....	145
2.3.1 板料冲压成形的基本工序 .....	56	4.2.2 橡胶制品成型 .....	146
2.3.2 板料冲压模具 .....	64	4.3 陶瓷材料的成形工艺 .....	149
2.3.3 冲压件结构设计 .....	66	4.3.1 陶瓷粉的性能与制备 .....	150
2.4 其他塑性成形工艺简介 .....	67	4.3.2 陶瓷材料的成形方法 .....	152
2.4.1 挤压成形 .....	67	4.3.3 陶瓷的烧结 .....	157

习题与思考题 .....	158	6.3 快速成形工艺 .....	189
<b>第5章 表面工程技术</b> .....	160	6.3.1 快速成形的原理与特点 .....	189
5.1 表面工程技术概述 .....	160	6.3.2 快速成形工艺方法 .....	190
5.2 表面涂层技术 .....	160	习题与思考题 .....	193
5.2.1 热喷涂技术 .....	160	<b>第7章 材料成形工艺的选择</b> .....	194
5.2.2 镀层技术 .....	167	7.1 材料成形工艺选择的原则 .....	194
5.2.3 表面沉积技术 .....	169	7.1.1 常用材料成形工艺分析 .....	194
5.3 表面强化改性技术 .....	174	7.1.2 材料成形工艺的选择原则 .....	196
5.3.1 固态表面强化 .....	174	7.1.3 材料成形工艺的选择依据 .....	198
5.3.2 液态表面强化 .....	175	7.2 材料的失效与防护 .....	199
习题与思考题 .....	176	7.2.1 机械失效与失效分析 .....	199
<b>第6章 其他成形工艺方法</b> .....	177	7.2.2 材料失效的防护 .....	202
6.1 粉末冶金成形工艺方法 .....	177	7.2.3 产品的质量控制与检验 .....	204
6.1.1 粉末冶金成形工艺过程 .....	177	7.3 典型零件毛坯材料成形工艺的选择 .....	207
6.1.2 粉末冶金制品的结构工艺性 .....	180	7.3.1 常用机械零件毛坯成形方法	
6.2 复合材料成形工艺 .....	183	选择 .....	207
6.2.1 复合材料的概念和分类 .....	183	7.3.2 毛坯成形方法选择实例 .....	209
6.2.2 复合材料成形方法 .....	184	习题与思考题 .....	213
6.2.3 复合材料的应用 .....	188	<b>参考文献</b> .....	214

# 第 1 章 金属液态成形

**本章导读：**金属液态成形是机械制造业的主要组成部分，是先进制造技术的重要内容。机械、汽车、电力、冶金、石化、航空航天、国防、造船及家电等行业都离不开液态成形，其对国民经济的发展起着重要作用。本章主要介绍了金属液态成形工艺的基本理论、成形合金及熔炼和金属液态成形的各种方法。学完本章内容后，学生应熟悉液态成形的基本工艺原理和各种特种液态成形方法，了解成形合金的液态成形性能特点，掌握产生偏析、气孔、非金属夹杂、缩孔、缩松、热裂、应力、变形的原因以及消除和避免这些缺陷的基本方法。

## 1.1 液态金属成形工艺理论

### 1.1.1 液态金属成形工艺的概念

液态金属成形或金属浇注成形，又称为铸造，它是指把熔炼好的、符合一定化学成分要求的金属液体浇注到预制的铸型中，使之在重力场或外力场的作用下冷却、凝固而形成铸件（零件）的一种工艺方法。该工艺过程一般包括金属的熔炼、造型、浇注和冷却凝固等过程，所铸出的毛坯或零件称为铸件。对于毛坯铸件，一般需要经过机械加工后才能成为各种机器零件；少数铸件的尺寸精度和表面粗糙度等能达到使用要求，而作为零件直接应用。

对于液态金属凝固成形的工艺方法有如下几个方面。

① 根据金属液填充进铸型方法的不同可分为：重力铸造（液态金属靠自身重力填充型腔）、低压铸造、挤压铸造、压力铸造（液态金属在一定的压力下填充型腔）等。

② 根据形成铸型材料的不同，可分为一次型（如砂型铸造、陶瓷型铸造、壳型铸造）和永久型（如金属型铸造）。对于砂型铸造，根据型砂黏结剂的不同，有黏土砂、树脂砂、水玻璃砂等。根据造型方法不同有手工造型和机器造型。

③ 此外，对于一些特殊的凝固成形件，还可采用连续铸造（等截面长铸件）、离心铸造（筒形铸件）、实型铸造、熔模铸造等方法。

液态金属成形在国民经济中占有极其重要的地位，铸件在机床、内燃机、重型机器中占 70%~90%；在风机、压缩机中占 60%~80%；在汽车、拖拉机、农业机械中占 30%~60%；总体来说一般占各类机器质量的 45%~80%。它广泛应用于机械制造、矿山冶金、能源与运输设备、航天航海、轻工纺织等各个领域。

### 1.1.2 液态金属成形工艺特点

在材料的热加工成形方法中，液态金属成形具有以下特点。



(1) 适用范围广 能生产形状复杂的毛坯或零件,如内燃机的汽缸体与汽缸盖、机床的箱体与机架、螺旋桨、各种阀体等,铸造壁厚最小可达 0.3mm,工业中常用金属材料的加工一般都可用液态金属成型的方法加工成型。

(2) 尺寸精度高 铸件一般比锻件、焊接件尺寸精确,且能节省材料,提高加工效率。

(3) 成本低廉 液态金属成型易实现机械化、半自动化生产,可利用废旧零件和再生材料,尺寸精度高,加工余量少,加工工时较小,故生产成本低。

(4) 液态金属成型存在的不足 如成形件组织的内部晶粒粗大,常有缩孔、缩松、气孔、砂眼和成分偏析等铸造缺陷,故力学性能不如锻件高;液态金属成型中的一些工艺过程难以精确控制,且工序繁多,有时导致废品率高;铸造生产的工作条件差。

### 1.1.3 合金的铸造性能

合金的铸造性能一般包括铸造合金的流动性,凝固与收缩特性,以及偏析与裂纹倾向性。合金的铸造性能是衡量铸造合金优劣的标志之一,是保证铸件质量的重要因素。在此主要讨论铸造合金的流动性及铸件内部产生缩孔、疏松和冷热裂纹等缺陷的倾向性。这些性能对于获得高质量铸件是非常重要的。

#### 1.1.3.1 合金的流动性

(1) 定义 合金的流动性是指熔融液态铸造合金本身的流动能力。合金的流动性与合金的化学成分、温度、杂质含量及其物理性质有关,流动性好,易于充满薄而复杂的型腔,可避免出现冷隔、浇不足等缺陷,易于获得形状完整、轮廓清晰的铸件;流动性好,有利于液态合金中气体、夹杂物及时浮出,从而减少气孔和夹渣缺陷的产生;流动性好,有利于填充和弥合铸件在凝固期间产生的缩孔或因收缩受阻产生的裂纹缺陷。

(2) 铸造合金流动性的测试方法与影响因素 在工程上和科学试验中,合金的流动性一般用浇注“流动性试样”的方法来测试,流动性试样一般有螺旋线形、球形、U形等,其中螺旋线形试样在工程上应用最普遍,如图 1-1 所示,可根据浇注后金属所形成的螺旋线长度确定某种合金流动性的好坏,螺旋线长度越长,流动性就越好,表 1-1 为用螺旋线形方法测得的几种常用合金的流动性。

表 1-1 用螺旋线形方法测得的几种常用合金的流动性

合金种类及化学成分	铸型种类	铸型温度/℃	螺旋线长度/mm
灰铸铁 $\omega_C^{\text{①}} + \omega_{Si} = 6.2\%$ $\omega_C + \omega_{Si} = 5.2\%$	砂型	1300	1800
			1000
铸钢 $\omega_C = 0.45\%$	砂型	1600	100
		1640	200
锡青铜 ( $\omega_{Si} = 10\%, \omega_{Zn} = 2\%$ )	砂型	1040	420
铝硅合金	金属型	680~720	700~800

①  $\omega$  表示质量分数。

影响铸造合金流动性的主要因素有:合金的物理性质、化学成分、结晶特点等。

① 合金的物理性质 [比热容 ( $c$ )、密度 ( $\rho$ ) 和热导率 ( $\lambda$ ) ]。若合金的比热容 ( $c$ ) 和密度 ( $\rho$ ) 较大,热导率 ( $\lambda$ ) 较小,因本身含有较多的热量,而散热较慢,因此,流动性就好;反之,流动性就差。在相同条件下,合金的表面张力越大,流动性越差;反之,则流动性就越好。液态合金的黏度越大,流动性就越差;而黏度越小,流动性就越好。

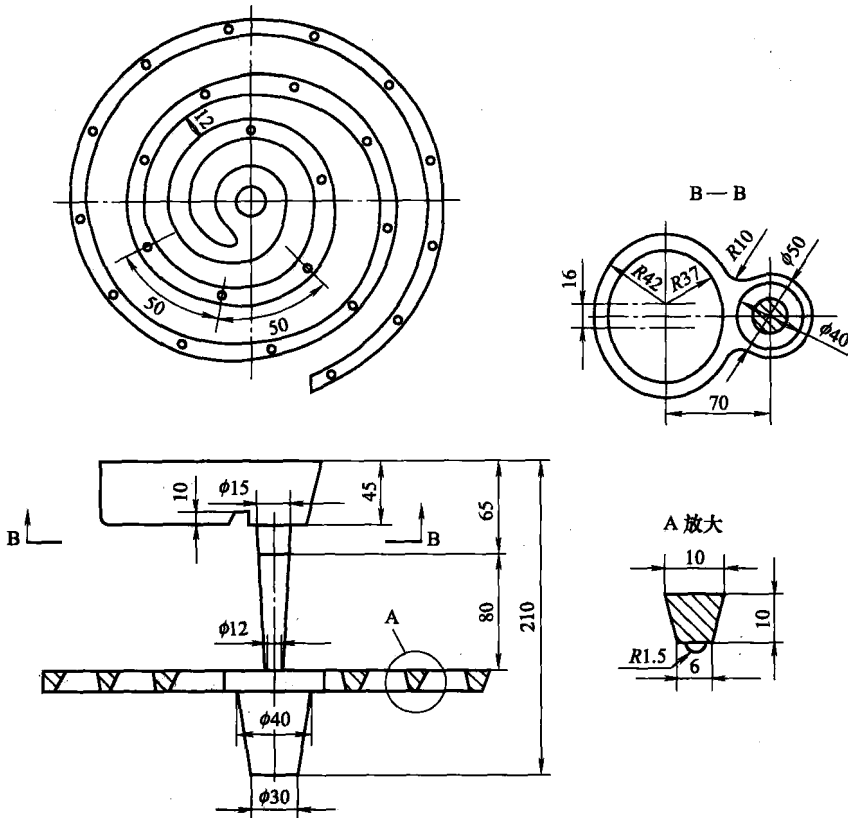


图 1-1 螺旋线形流动性试样

② 合金的化学成分。合金的化学成分不同，它们的熔点及结晶温度范围不同，其流动性也不同，Fe-C 合金的流动性与含碳量的关系如图 1-2 所示，共晶成分的合金流动性最好，凝固时从表面逐层向中心凝固，已凝固的硬壳内表面较光滑，阻碍尚未凝固的合金液体流动的阻力小，流动性好。例如灰口铸铁、硅黄铜等，因而成形能力强。

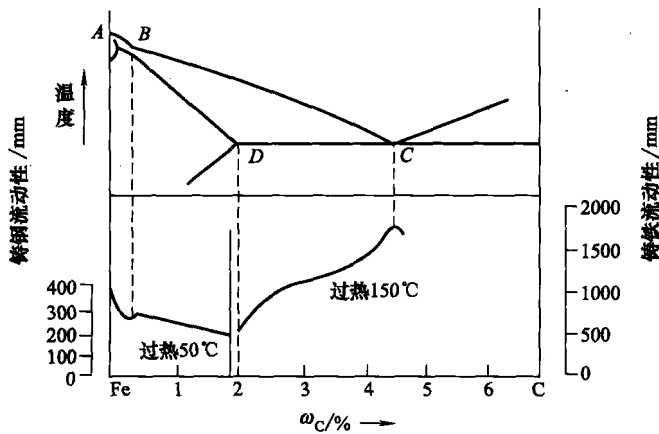


图 1-2 Fe-C 合金流动性与含碳量的关系

随着结晶温度范围的扩大，初生树枝晶已使凝固的硬壳内表面参差不齐而阻碍金属的流动，因此，从流动性考虑，选用共晶成分或结晶温度范围较窄的合金作为铸造合金为宜。人

们从研究 Pb-Sn 合金的流动性中也证实了这点，随着含锡量的不同，其流动性发生规律性变化。如图 1-3 所示，对于纯金属、共晶成分类型的合金，流动性出现最大值；而具有一定结晶温度范围的合金，一般情况下，结晶温度范围宽的合金流动性最差，如图 1-4 (a) 所示；纯金属流动性好，如图 1-4 (b) 所示。

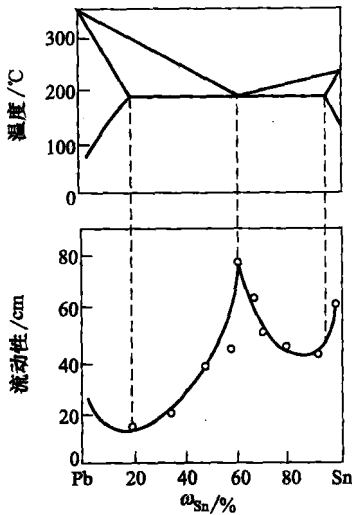
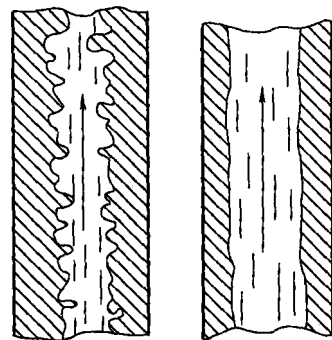


图 1-3 Pb-Sn 合金的流动性与化学成分的关系



(a) 结晶温度范围宽的合金 (b) 纯金属

图 1-4 金属在结晶状态下流动

虽然铸铁的结晶温度范围一般比铸钢宽，但铸铁的流动性却比铸钢要好，这主要是因为铸钢的熔点高，不易过热。另外，铸钢的温度高，与铸型之间的温差大，激冷大，在铸型中散热快，使钢液的流动能力减弱。表 1-2 和表 1-3 列举了常用铸造合金的流动性数据。

表 1-2 一些合金的流动性 (砂型螺旋形试样)

合 金		浇注温度/°C	螺旋形试样长度/mm
铸铁	$\omega_C + \omega_{Si} = 6.2\%$	1300	1800
	$\omega_C + \omega_{Si} = 5.9\%$	1300	1300
	$\omega_C + \omega_{Si} = 5.2\%$	1300	1000
	$\omega_C + \omega_{Si} = 4.2\%$	1300	600
铸钢	$\omega_C 0.4\%$	1600	100
	$\omega_C 0.4\%$	1640	200
镁合金(Mg-Al-Zn)		700	400~600
锡青铜(Sn10%、Mn2%)		1040	420
硅黄铜(Si3%)		1100	1000

表 1-3 几种铸铁的流动性比较

流动性	稀土球铁	普通球铁	球铁原铁液	$\omega_C = 3\%$ 灰铸铁
浇注温度/°C	1270	1250	1280	1295
螺旋线长度/mm	1107	750	1082	380

铸铁中的其他合金元素也影响流动性。如图 1-5 所示，磷含量增加，铸铁的流动性增大，这主要是由于液相线温度下降，黏度下降，同时由于磷共晶增加，固相线温度也下降。但通常不用增加含磷量的方法提高铸铁的流动性，以防止铸铁变脆，对于艺术品铸件要求轮

廓清楚，花纹清晰，而又几乎不承受载荷，故可适当增加含磷量，以提高铁液的充型能力。在铸铁中硅的作用和碳相似，含硅量增加，液相线温度下降，故在同样过热温度下，铸铁的流动性随含硅量的增加而提高，如图 1-6 所示。

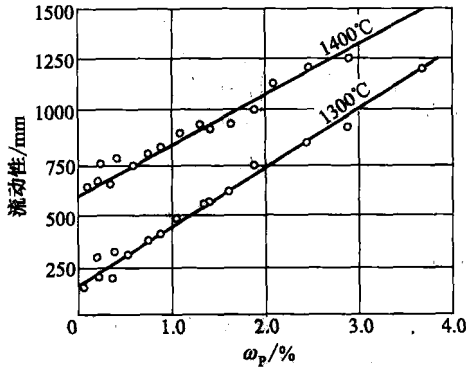


图 1-5 铸铁 ( $\omega_c = 3\%$ ，即  $\omega_{Si} = 2\%$ ) 的流动性与含磷量的关系 (浇注温度分别为 1400°C、1300°C)

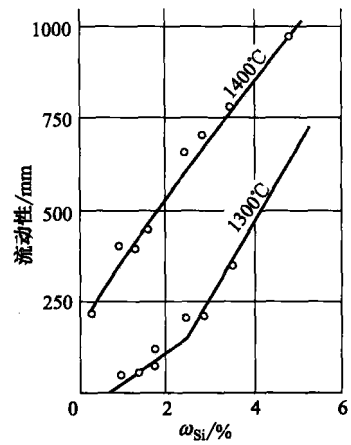


图 1-6 铸铁 ( $\omega_c = 3\%$ ， $\omega_p = 0.05\%$ ) 的流动性与含硅量的关系 (浇注温度分别为 1400°C、1300°C)

③ 合金的结晶特点。一般来说，在合金的结晶过程中放出潜热越多，则液态合金保持时间就越久，流动性就越好。对于纯金属和共晶成分的合金，因其结晶放出的潜热多，提高流动性的作用比结晶温度范围较宽的合金大。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 AlCu ( $\omega_{Cu} = 54\%$ )、Al+AlCu 共晶 ( $\omega_{Cu} = 33\%$ ) 和纯 Al ( $\omega_{Al} = 100\%$ )，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。

### 1.1.3.2 铸造合金的凝固与收缩特性

(1) 合金的凝固特性 铸造合金在一定温度范围内结晶凝固时，其截面一般存在三个区域，即固相区、液-固共存区和液相区，其中液-固共存区对铸件质量影响最大，通常根据液-固共存区的宽窄将铸件的凝固方式分为逐层凝固方式、中间凝固方式和体积凝固方式。

① 逐层凝固方式。对于纯金属或共晶成分合金在凝固过程中不存在液-固相共存的凝固区，如图 1-7 (a) 所示，故截面上外层的固体和内层的液体由一条界限清楚地分开。随着温度的下降，固体层不断加厚，液体层不断减少，固体和液体始终保持接触，直到中心层全部凝固，这种凝固方式称为逐层凝固。纯铜、纯铝、灰铸铁、低碳钢等均属于逐层凝固。

② 中间凝固方式。介于逐层凝固和体积凝固之间的凝固方式称为中间凝固，如图 1-7 (b) 所示。大多数合金均属于中间凝固方式，例如，中碳钢、白口铸铁等。

③ 体积凝固方式。当合金的凝固温度范围很宽，或铸件截面温度分布曲线较为平坦时，其凝固区在某段时间内，液-固共存的凝固区贯穿整个铸件截面，如图 1-7 (c) 所示。高碳钢、球墨铸铁、锡青铜等合金均为体积凝固。

不同合金的结晶过程不同，导致液态合金具有不同的凝固特性。逐层凝固又可分为内生壳状凝固和外生壳状凝固，如碳素钢金属液凝固时，结晶从铸型壁开始，外生晶粒形成的凝固前沿比较光滑，凝固前沿向铸件中心的液相逐层推进，当相互面向的凝固前沿在铸件中心

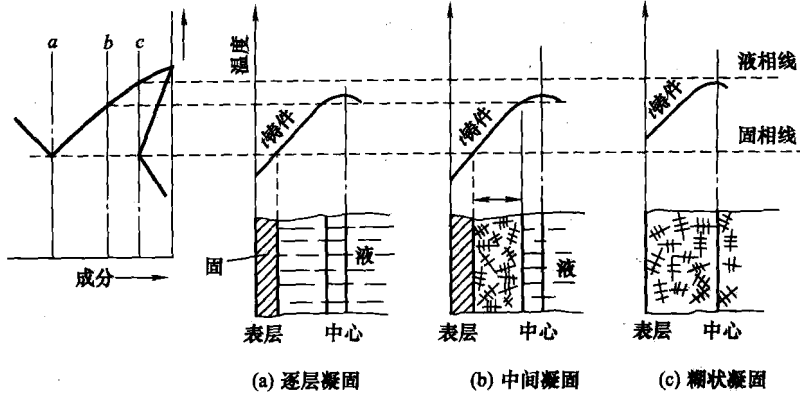


图 1-7 铸件的凝固方式

会合时，凝固结束，这种凝固有光滑的凝固前沿，属于外生壳状凝固方式，见表 1-4。凝固开始形成的外生壳承载能力高，凝固时液相补缩通道畅通，铸件接受补缩（受补）能力高；灰口铸铁液态金属及有色金属液凝固时，按内生生长方式结晶，即晶粒在金属液内部形核、长大。但在铸型壁处的晶粒由于热量能迅速传出，故形核、长大、结晶速度快，形成固体外壳，有粗糙的凝固前沿，属于内生壳状凝固，一般窄凝固温度范围合金中的共晶成分灰铸铁、共晶成分铝基合金均属于内生壳状凝固方式。

表 1-4 三种铸造合金的不同凝固特性

合金种类	碳素钢	灰口铸铁	球墨铸铁
示意图			
凝固方式	逐层凝固		体积凝固
	外生壳状凝固	内生壳状凝固	

(2) 铸造合金的收缩特性 铸造合金的收缩特性是指将具有一定过热度的铸造合金液体浇入铸型，合金从高温液态冷却到固态的某一温度时所发生的体积和尺寸减小的现象。收缩是铸造合金的物理本性，是铸件产生缩孔、缩松、热应力、变形及裂纹等铸造缺陷的基本原因。所以收缩特性也是铸造合金的重要铸造性能之一。

铸造合金由液态到常温的收缩若用体积改变量来表示，称为体收缩。合金在固态时的收缩，若用线尺寸改变量来表示，称为线收缩。铸造合金由液态冷却到常温，一般可分为三个阶段：液态收缩阶段（Ⅰ），凝固收缩阶段（Ⅱ），固态收缩阶段（Ⅲ），如图 1-8 所示。液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔、缩松缺陷的基本原因，固态收缩因收缩受阻而引起较大的铸造应力，这是产生变形和裂纹缺陷的基本原因，而且还会影响铸件的尺寸精度。

① 液态收缩。合金从浇注温度冷却到开始凝固的液相线温度时所产生的收缩称为液态

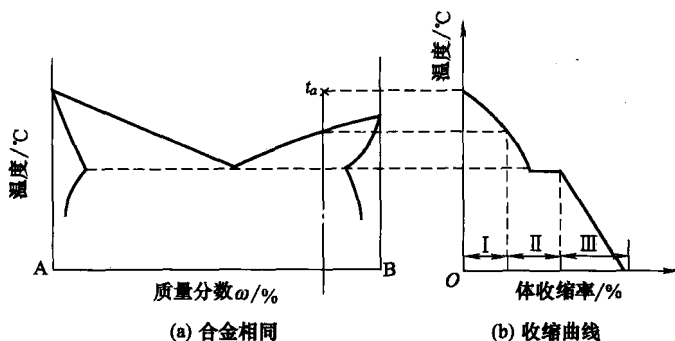


图 1-8 铸造合金收缩的三个阶段

I—液态收缩；II—凝固收缩；III—固态收缩

收缩。其间，合金处于液态，因而，液态收缩会引起型腔内液面下降。

② 凝固收缩。合金从液相线温度（开始凝固的温度）冷却到固相线温度（凝固终止的温度）时的体积收缩称为凝固收缩。各种常见纯金属的凝固体收缩率见表 1-5，其收缩量的大小与合金的结晶温度范围和状态的改变有关。

表 1-5 各种纯金属的凝固体收缩率

金属种类	Al	Mg	Cu	Co	Fe	Zn	Ag	Sn	Pb	Sb	Bi
体收缩率/%	6.24	4.83	4.8	4.8	4.09	4.44	4.35	2.79	2.69	-0.93	-3.1

③ 固态收缩。合金从凝固终止温度冷却到室温之间的体积收缩为固态收缩，通常表现为铸件外形尺寸的减小，对铸件的尺寸精度影响较大，常用线收缩率表示。若合金的线收缩不受铸型等外部条件的阻碍，称为自由线收缩；否则，称为受阻线收缩，常见几种铁碳合金的自由线收缩率见表 1-6，常用铸造合金的铸件线收缩率见表 1-7。

表 1-6 常见几种铁碳合金的自由线收缩率

材料名称	合金化学成分 ω/%						总收缩率 /%	浇注温度 /℃
	C	Si	Mn	P	S	Mg		
碳钢	0.14	0.15	0.02	0.05	0.02	—	2.165	1530
灰口铸铁	3.30	3.14	0.66	0.10	0.02	—	1.08	1270
球墨铸铁	3.40	2.96	0.69	0.11	—	0.05	0.807	1250
白口铸铁	2.65	1.00	0.48	0.06	0.26	—	2.180	1300

表 1-7 常用铸造合金的铸件线收缩率

合金类别	收缩率/%		合金类别	收缩率/%	
	自由收缩	受阻收缩		自由收缩	受阻收缩
灰铸铁中、小型铸件	1.0	0.9	白口铸铁	1.75	1.5
灰铸铁中、大型铸件	0.9	0.8	铸造碳钢和低合金钢	1.6~2.0	1.3~1.7
灰铸铁筒形件(长度方向)	0.9	0.8	含铬高合金钢	1.3~1.7	1.0~1.4
灰铸铁筒形件(直径方向)	0.7	0.5	铸造铝硅合金	1.0~1.2	0.8~1.0
孕育铸铁	1.0~1.5	0.8~1.0	铸造铝镁合金	1.3	1.0
可锻铸铁	0.75~1.0	0.5~0.75	铝铜合金(ω <sub>Cu</sub> =7%~18%)	1.6	1.4
球墨铸铁	1.0	0.8	锡青铜	1.4	1.2
			铸黄铜	1.8~2.0	1.5~1.7

影响合金收缩的因素主要有合金的化学成分、浇注温度等。在常用的铸造合金中，铸钢的收缩率最大，灰铸铁的最小，见表 1-6 和表 1-7。铸铁结晶时，内部的碳大部分以石墨形态析出，石墨的密度较小，析出时所产生的体积膨胀弥补了部分凝固收缩；灰铸铁中，碳是石墨的形成元素，硅是促进石墨化的元素，所以铸铁碳硅含量越高，收缩率越小；硫能阻碍石墨的析出，使铸铁收缩率增大；适当地增加锰的含量，由于锰与铸铁中的硫形成  $MnS$ ，可抵消硫对石墨化的阻碍作用，使铸铁收缩率减小。一般浇注温度越高，过热度越大，合金液态收缩也越大，形成缩孔的倾向就越大。

(3) 液态金属收缩的表示方法 合金从液态到凝固完毕，体积的缩小分为两个阶段，即液态收缩和凝固收缩。两者的收缩是直接引起铸件产生缩孔、缩松、气孔、偏析和热裂的根本原因。其中液态收缩的体收缩率  $\epsilon_{V_L}$  为

$$\epsilon_{V_L} = \frac{V_0 - V_L}{V_0} \times 100\% = \alpha_{V_L} (t_0 - t_L) \times 100\% \quad (1-1)$$

- 式中  $\epsilon_{V_L}$  —— 液态收缩的体收缩率，%；  
 $V_0$  —— 金属液在浇注结束时的体积；  
 $V_L$  —— 金属液在液相线时的体积；  
 $\alpha_{V_L}$  —— 金属的液态体收缩系数， $^{\circ}C^{-1}$ ；  
 $t_0$  —— 浇注温度， $^{\circ}C$ ；  
 $t_L$  —— 液相线温度， $^{\circ}C$ 。

#### (4) 铸造合金的缩孔与缩松

① 缩孔与缩松的含义及产生原因。铸件在冷却和凝固过程中，由于合金的液态收缩和凝固收缩大于合金的固态收缩，所以在铸件最后凝固的地方常常会产生孔洞，容积大而比较集中的孔洞称为缩孔；细小且分散的孔洞称为缩松。缩孔的形成过程如图 1-9 所示 [图 (a) 为铸型充满——初级阶段，图 (d) 和图 (e) 为凝固终了阶段]。缩孔产生的原因是合金的液态收缩和凝固收缩值大于固态收缩值。缩孔产生的基本条件是铸件由表及里逐层凝固，缩孔通常分布在铸件上部或最后凝固的热节部位，其外形特征为倒锥形，内表面不光滑；缩松形成的基本原因主要是液态收缩和凝固收缩大于固态收缩，产生的基本条件是合金的结晶温度范围较宽，树枝晶发达，合金以体积方式凝固，液态收缩和凝固收缩所形成的细小、分散孔洞得不到外部液态金属的补充而造成的，一般多分布于铸件的轴线区域、厚大部位或浇口附近。

② 缩孔形成机理。现以如图 1-9 所示的圆柱形铸件为例，来分析缩孔的形成过程。假定所浇铸的合金的结晶温度范围很窄，铸件是由表及里逐层凝固的。图 1-9 (a) 表示液态金属充满了铸型。因铸型吸热，金属液温度下降，发生液态收缩，但它将从浇注系统中得到补充。因此，此期间型腔总是充满着金属液。

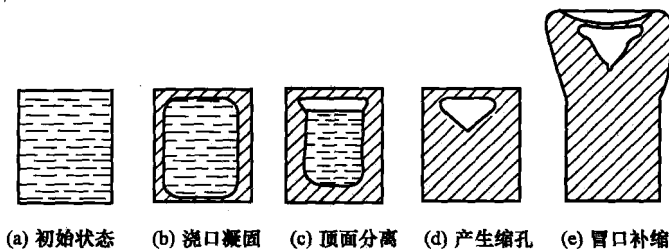


图 1-9 铸件中缩孔形成过程示意图

当铸件外表温度下降到凝固温度时，铸件表面凝固了一层硬壳，并紧紧地包住内部的金属液。内浇道此时已凝固，如图 1-9 (b) 所示。

进一步冷却时，硬壳内的金属液因温度降低产生液态收缩，以及对形成硬壳的凝固收缩的补缩，使液面下降。与此同时，固态硬壳也因为温度降低而使铸件外表尺寸缩小。如果因液态收缩和凝固收缩引起的体积缩减等于外表尺寸缩小所造成的体积缩减，则凝固的外壳仍和内部的液态金属紧密接触，而不产生缩孔。但是，液态收缩和凝固收缩总是超过硬壳的固态收缩，因此，液面下降脱离顶部的硬壳，如图 1-9 (c) 所示。如此进行下去，硬壳不断增厚，液面不断下降，待金属全部凝固后，在铸件上部就形成一个倒锥形的缩孔，如图 1-9 (d) 所示。整个铸件体积因温度下降至常温而不断缩小，使缩孔绝对体积有所减小，如图 1-9 (e) 所示。

③ 缩松形成机理。铸钢件的轴线缩松通常都产生在壁厚均匀的铸壁内。从纵截面上看，产生在轴线处；从横截面上看，产生在中心部位，所以称其为轴线缩松或中心缩松。

形成轴线缩松的基本原因和形成缩孔一样，都是铸钢的凝固体收缩得不到钢液的补缩而形成的。轴线缩松的形成条件是：在缩松区域内的金属几乎是同时凝固的。

如图 1-10 所示是一个具有均匀厚度的平浇铸件。在它的左端放一个足够大的冒口。用热电偶测量浇注后各时刻铸件中心线的温度，用 X 射线检查铸件内部质量。可将铸件分为以下三个区域。

a. 冒口区。由于冒口中钢液的热作用，使其在纵向存在温度差。等液相线和等固相线越靠近冒口，向铸件中心推进越慢。因此，在冒口区中形成楔形补缩通道，扩张角为  $\varphi_2$ ，向冒口扩张，如图 1-10 (a) 所示，有利于冒口补缩，为顺序凝固，铸件在这个区域是致密的。加大冒口的压力、提高冒口中金属液的温度和延长冒口的凝固时间，都可以增加冒口区的长度。

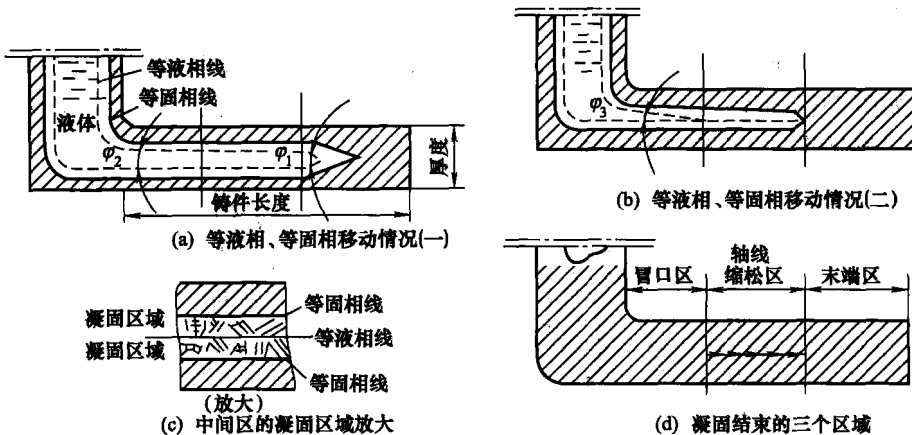


图 1-10 均壁厚铸件轴线缩松形成过程示意图

b. 末端区。因末端区比中间区多一个散热端面，所以冷却速度较快，在纵向上存在较大的温度差，越靠近端面，温度越低，因此等液相线和等固相线越靠近端面，向铸件中心推进越快，这就构成了补缩通道，其扩张角  $\varphi_1$  向冒口方向扩张。因在中间段的中心尚未构成补缩边界之前，末端区已凝固完毕，所以末端区里的钢液所产生的凝固收缩完全能获得冒口中钢液的补缩。这一段为顺序凝固，铸件是致密的。若末端区加放冷铁，可增加末端区的



长度。

c. 轴线缩松区。在冒口区 and 末端区作用都达不到的中间段称为轴线缩松区。在这个区域，铸件的冷却速度相同，在纵向上没有温度差。等液相线和等固相线平行于铸件上、下表面向中心推进，侧面的凝固情况也相同，所以其扩张角为零，其凝固前沿是平行的，凝固方式为同时凝固，如图 1-10 (b) 所示。在末端区凝固完毕以后，中间区的等液相线在铸件中心汇合，构成很宽的凝固区，凝固前沿平行，当等固相线推进到铸件中心附近，在靠近等固相线的初生晶体之间的钢液发生凝固收缩，首先形成具有一定真空度的晶体间的小孔隙。这种真空的小孔隙又把中心线上的初生晶体之间的钢液吸入而得到补缩，如图 1-10 (c) 所示，然而却在铸件的中心线上产生断断续续的晶间小孔，称为轴线缩松。此时，冒口虽然存在补缩通道扩张角  $\varphi_3$  [图 1-10 (b)]，但冒口中的钢液已不能克服中间段已经搭接的晶体间的阻力来对中心处进行补缩。这就是轴线缩松形成的机理。

综上所述，形成铸件缩松的原因是：在凝固期，铸件纵截面上各点没有温差或没有足够的温度差，以致在凝固末期补缩通道消失而导致产生轴线缩松。因此，凡是能创造等于或大于临界温度差的措施，都能增加致密区的长度，能使一些宽结晶温度范围的合金获得致密的组织。

缩孔和缩松的防止措施：铸造合金的液态收缩越大，则缩孔形成的倾向越大；合金的结晶温度范围越宽，凝固收缩越大，则形成缩松的倾向也越大。凡能促使合金减少液态和凝固期间收缩的工艺措施（如降低浇注温度和减慢浇注速度，增加铸型的激冷能力，通过调整化学成分，增加在凝固过程中的补缩能力，对于灰口铸铁可促进凝固期间的石墨化等），都有利于减少缩孔和缩松的形成。为使铸件在凝固过程中建立良好的补缩条件，通过控制铸件的凝固顺序（如采用冒口和冷铁配合），使之符合“顺序凝固原则”或“同时凝固原则”，尽量使缩松转化为缩孔，并使缩孔出现在铸件最后凝固的位置。

顺序凝固是采取一定措施，如合理选择内浇道在铸件上的引入位置和高度、开设冒口、放置冷铁等，使铸件从远离冒口的部分先凝固，然后向着冒口顺次凝固，冒口本身最后凝固的过程，如图 1-11 所示。主要用于凝固收缩大、凝固温度范围较小的合金，如铸钢、高牌号灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和青铜等。

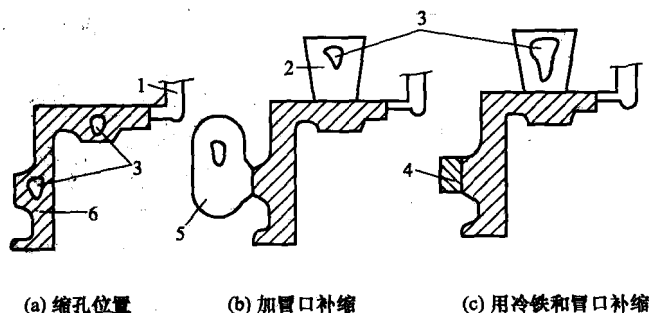


图 1-11 用冒口和冷铁消除缩孔的示意图

1—浇注系统；2—顶冒口；3—缩孔；4—冷铁；5—侧冒口；6—铸件

同时凝固是从工艺上采取措施，保证铸件结构上各部分之间没有温差或使温差尽量小，使铸件各部分基本同时凝固，一般用于凝固温度范围大、以体积方式凝固、容易产生缩松的合金，壁厚均匀的薄壁铸件或气密性要求不高的铸件。当热裂和变形成为主要矛盾时也可