

21世纪普通高等教育规划教材

材料成形工艺基础

何柏林 徐先锋 主编



化学工业出版社

21 世纪普通高等教育规划教材

材料成形工艺基础

何柏林 徐先锋 主编



化学工业出版社

·北京·

为了适应我国高等工科院校机械类专业人才培养模式,本书突出了材料成形工艺的理论基础知识,同时强化了综合分析与应用能力的培养。在内容上以铸造、锻压和焊接等常规成形工艺方法为主,还较大幅度地引入其他成形新技术、新工艺,以适应现代机械制造技术的发展。本书体现了工艺性课程的特色,各主要成形方法的介绍中,都有工艺设计的内容,并采用典型的工程实践中综合性工艺案例分析,以达到学以致用,融会贯通的目的。全书共六章,在每章之后都辅以一定量的复习思考题,以利于培养学生获取知识、分析与解决实际的技术问题的能力,提高学生的工程素质与创新思维能力。

本书可作为高等工科院校机械类及近机械类专业的教材,还可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺基础/何柏林,徐先锋主编. —北京:
化学工业出版社,2010.7

21世纪普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-08489-7

I. 材… II. ①何…②徐… III. 工程材料-成型-
工艺-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第115222号

责任编辑:叶晶磊 唐旭华

装帧设计:张辉

责任校对:吴静

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18 字数473千字 2010年8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: 34.00 元

版权所有 违者必究

《材料成形工艺基础》编写人员

主 编 何柏林 徐先锋

编写人员 (以姓氏笔画为序)

万迪庆	王红英	匡唐清	李树桢	何柏林
陈朝霞	周慧兰	胡 勇	赵龙志	赵明娟
徐先锋	熊光耀	黎秋萍		

前 言

本书是工程材料及机械制造基础课程的教材之一。读者在熟悉常用金属材料的性能和用途，初步具备合理选材、正确制定加工工艺及失效分析能力的基础上，学习本书。本书以各种毛坯的成形方法为主，注重材料成形工艺的理论基础知识，强化工艺设计，重在培养学生分析问题和解决问题的能力。为提高机械类学生的专业水平，培养更多的高素质应用型人才，书中较大篇幅增加了新材料、新技术、新工艺等内容，如粉末冶金、非金属材料成形等各种成形方法等。

本书由华东交通大学材料工程系组织编写，内容上力求由浅入深，易学易懂。本书的编写得到了华东交通大学教材出版基金的资助，编写过程中，还得到了机电工程学院其他教研室老师的帮助，在此表示感谢。

本书配有相关的电子课件，可免费提供给采用本书作为教材的院校使用，如有需要请联系 txh@cip.com.cn。

由于编者水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正，不胜感激。

编者

2010年5月

目 录

第1章 金属的液态成形	1
1.1 概述	1
1.2 液态成形理论基础	2
1.3 铸造工艺设计基础	15
1.4 砂型铸造	31
1.5 特种铸造	39
1.6 铸件缺陷和检验	49
1.7 常用合金铸件的生产	51
1.8 先进铸造技术简介	63
习题	69
第2章 金属塑性成形	73
2.1 概述	73
2.2 金属的塑性成形原理	75
2.3 自由锻造	84
2.4 模型锻造	93
2.5 板料冲压成形工艺	105
2.6 其他塑性成形方法	125
2.7 先进塑性成形工艺	129
2.8 常用塑性成形方法的选择	142
习题	144
第3章 连接成形	147
3.1 概述	147
3.2 熔焊过程与接头的组织与性能	151
3.3 常用焊接方法	160
3.4 现代焊接方法	183
3.5 常用金属材料的焊接	193
3.6 焊接结构工艺设计	203
3.7 胶接	213
习题	215
第4章 粉末冶金成形	218
4.1 粉末冶金工艺	219
4.2 粉末冶金制品的结构工艺性	229
4.3 常见粉末冶金成形件缺陷分析	232
4.4 粉末冶金新工艺、新技术简介	234
习题	237
第5章 非金属材料成形	238
5.1 塑料的成形	238
5.2 橡胶成形	249
5.3 陶瓷的成形	251
5.4 复合材料成形	257
习题	264
第6章 材料成形方法选择	265
6.1 材料成形方法选择的原则与依据	265
6.2 常用机械零件的毛坯成形方法选择	272
6.3 毛坯成形方法选择实例	275
习题	279
参考文献	282

第1章 金属的液态成形

1.1 概述

人类与其他动物的根本区别之一就是会使用并制造工具。人类要扩大自身的生存空间、提高生活质量，就必须不断增强征服和协调自然的能力。这种能力是通过生产工具的更新换代和不断升级来实现的，如从原始的木棒、石块，到简单机械（如杠杆、轮轴等），直到现代具有各种复杂功能的机械与装置。为了制造性能要求越来越高的工具，人们就必须不断地发现和开发性能更加优良的材料，采用更加先进的材料成形技术。

金属液态成形（铸造）工艺学是在总结劳动人民长期实践的基础上发展起来的。我国古代在材料生产及其成形加工工艺技术方面，有着辉煌的成就。从原始社会后期我国就开始有陶器，早在仰韶文化和龙山文化时期，制陶技术已经很成熟。我国的青铜冶炼始于夏代，到了距今在3000多年前的殷商、西周时期，技术水平已相当先进，用青铜制造的工具、食具、兵器、车饰、马饰等均得到普遍应用。在河南安阳地区发掘出来的商代青铜大方鼎（见图1-1），高133cm、长110cm、宽78cm，重达875kg。在大鼎的里面铸有“司母戊”三个字，在大鼎的四周，有蟠龙等组成的精致花纹。铸造这样大型的青铜器物，需要有很大的铸造场所，要求各个工种协同操作、密切配合，这充分反映出我国古代青铜冶炼和铸造成形的高超技艺。

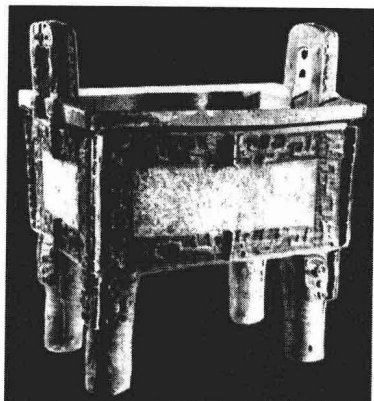


图 1-1 司母戊大方鼎

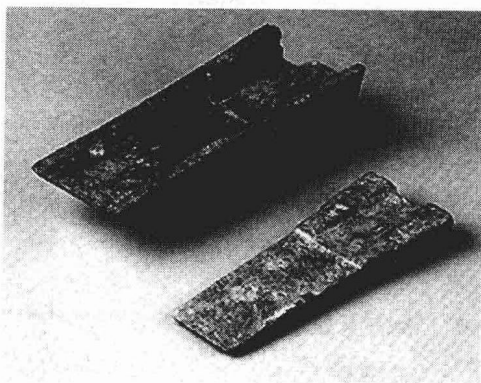


图 1-2 战国铁器与铁模

春秋战国时期，我国开始大量使用铁器，白口铸铁、麻口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953年从河北兴隆地区发掘出来的战国铁器中，就有浇铸农具用的铁模子（见图1-2），说

明当时已掌握了铁模铸造技术。随后出现了炼钢、锻造、钎焊和退火、淬火、正火、渗碳等热处理技术。一直到明朝，在这之前的2 000多年间，我国钢铁的产量及金属材料成形工艺技术一直在世界上遥遥领先。这些事实生动地说明了中华民族在材料及其加工方面为世界文明和人类进步做出了卓越贡献。

但是到了18世纪以后的长时间内，由于封建统治者长期采取闭关自守的政策，严重地束缚了我国生产力的发展，使我国科学技术处于停滞落后状态。就在我国闭关锁国期间，欧洲的工业得到飞速发展。18世纪20年代初先后在欧美发生的产业革命极大地促进了钢铁工业、煤化学工业和石油化学工业的快速发展，各类新材料不断涌现。材料对科学技术的发展起着关键性作用，航空工业的发展充分说明了这一点。1903年世界上第一架飞机所用的主要结构材料是木材和帆布，飞行速度仅16km/h；1911年硬铝合金研制成功，金属结构取代木布结构，使飞机性能和速度获得一个飞跃；喷气式飞机的超音速飞行，高温合金材料制造的涡轮发动机起到了重要作用，因为当飞机速度为2~3倍音速时，飞机表面温度会升到300℃，飞机材料只能采用不锈钢或钛合金；至于航天飞机，机体表面温度会高达1 000℃以上，只能采用高温合金材料及防氧化涂层；目前，玻璃纤维增强塑料、碳纤维增强高温陶瓷复合材料、陶瓷纤维增强塑料等先进复合材料在飞机、航天飞行器上已获得广泛应用。

新中国成立以后，我国机械制造业得到了飞速发展，经历了由仿制到自行设计、制造，从生产普通机械到制造精密和大型机械，从生产单机到制造成套设备的发展过程。例如，20世纪50年代，自行制造汽车、拖拉机及飞机；60年代，制造万吨水压机、齿轮磨床和坐标镗床等精密机床；70年代，制造大型成套设备和万吨级远洋巨轮；直至90年代，为我国航天、原子能等工业领域提供先进的技术装备等。至今已经形成了包括汽车、拖拉机、造船、航空航天、重型机械、精密机床和精密仪表等产品门类基本齐全，分布比较合理的机械工业体系。机械产品装备了工业、农业、国防等各个部门，支持着各部门的发展。与此同时，材料及其成形技术也得到了长足的进步。例如，我国成功地进行耗用钢水达490t的轧钢机机架巨型铸件的铸造，生产出了用于锻造大型锻件的 12×10^4 t水压机，解决了5万吨级远洋油轮船体的焊接技术上的难题。

1.2 液态成形理论基础

金属液态成形（铸造）是将液态金属在重力或外力作用下充填到型腔中，待其凝固冷却后，获得所需形状和尺寸的毛坯或零件的方法。液态成形具有适应性广，工艺灵活性大（材料、大小、形状几乎不受限制），适合形状复杂的箱体、机架、阀体、泵体、缸体等的制造；制造成本较低，铸件与最终零件的形状相似、尺寸相近。液态成型的主要缺点是组织疏松、晶粒粗大，铸件内部常有缩孔、缩松、气孔等缺陷产生，导致铸件力学性能，特别是冲击性能较差。

1.2.1 液态金属的凝固

合金从液态转化为固态的过程称为凝固。铸造的实质是液态金属逐步冷却凝固而成形。固态金属为晶体，因而金属的凝固过程又称为结晶。结晶包括形核和长大两个基本过程。凝固组织就宏观状态而言，指的是铸态晶粒的形态、大小、取向和分布等情况；铸件的微观组织指晶粒内部结构的形态、大小和分布，以及各种缺陷等。铸件的凝固组织对金属材料的力学性能、物理性能影响甚大。一般情况下，晶粒愈细小均匀，金属材料的强度和硬度愈高，

塑性和韧性愈好。影响铸件凝固组织的因素主要有成分、冷却速率和形核条件等，后续内容将详细讨论。

1.2.2 铸件的凝固方式

在铸件凝固过程中，其断面上一般存在三个区域，即固相区、凝固区和液相区（见图1-3）。其中，对铸件质量影响较大的主要是液相和固相并存的凝固区的宽窄。铸件的凝固方式决定了铸件的组织结构形式，是影响铸件质量的内在因素。铸件的凝固方式就是依据凝固区的宽窄来划分的。根据合金的凝固温度范围，可将凝固方式分为如下三种。

(1) 逐层凝固

纯金属或共晶成分合金在凝固过程中因不存在液、固并存的凝固区 [见图1-3(a)]，故断面上外层的固体和内层的液体由一条界线（凝固前沿）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，直达铸件的中心，这种凝固方式称为逐层凝固。

(2) 糊状凝固

如果合金的结晶温度范围很宽，且铸件的温度分布较为平坦，则在凝固的某段时间内，铸件表面并不存在固体层，而液、固并存的凝固区贯穿整个断面 [见图1-3(c)]。由于这种凝固方式与水泥类似，即先呈糊状而后固化，故称为糊状凝固。

(3) 中间凝固

大多数合金的凝固介于逐层凝固和糊状凝固之间 [见图1-3(b)]，称为中间凝固。铸件质量与其凝固方式密切相关。一般说来，逐层凝固时，合金的充型能力强，便于防止缩孔和缩松；糊状凝固时，难以获得结晶密实的铸件。

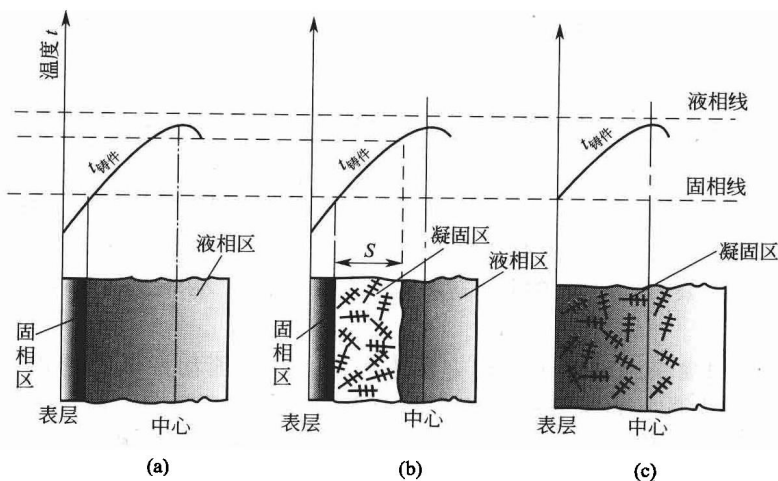


图1-3 铸件的凝固方式

1.2.3 影响铸件凝固方式的因素

影响铸件凝固方式的主要因素有合金的结晶温度范围和铸件的温度梯度。

(1) 合金的结晶温度范围

如前所述，合金的结晶温度范围越小，凝固区域越窄，越倾向于逐层凝固。如砂型铸造时，低碳钢结晶温度范围小，为逐层凝固；高碳钢结晶温度范围甚宽，为糊状凝固。

(2) 铸件的温度梯度

在合金结晶温度范围已定的前提下，凝固区域的宽窄取决于铸件内外层间的温度梯度。若铸件的温度梯度由小变大，则其对应的凝固区由宽变窄。铸件的温度梯度主要取决于如下几点。

① 合金的性质 合金的凝固温度越低，热导率越高，结晶潜热越大，铸件内部温度均匀化能力越大，因而使铸型的激冷作用变小，故温度梯度越小（如多数铝合金）。

② 铸型的蓄热能力 铸型蓄热能力越强，激冷能力越强，铸件温度梯度越大。

③ 浇注温度 浇注温度越高，因带入铸型中热量增多，铸件的温度梯度减小。

通过以上讨论可以得出：具有逐层凝固倾向的合金（如灰铸铁、铝硅合金等）易于铸造，应尽量选用。当必须采用有糊状凝固倾向的合金（如锡青铜、铝铜合金、球墨铸铁等）时，需考虑采用适当的工艺措施，例如，选用金属型铸造等，以减小其凝固区域。

1.2.4 液态合金的铸造性能

金属与合金的铸造性能是指金属与合金在铸造成形的工艺过程中，是否容易获得外形正确、内部健全的铸件的性质。铸造性能是重要的工艺性能指标，铸造合金除应具备符合要求的力学性能、物理性能和化学性能外，还必须有良好的铸造性能。铸造性能通常用充型能力、收缩性等来衡量，除合金的化学成分外，工艺因素对铸造性能的影响也很大。掌握金属与合金的铸造性能，对采取合理的工艺措施，防止铸造缺陷，提高铸件质量有重要意义。

1.2.4.1 液态合金的充型能力

熔融合金填充铸型的过程，简称充型。熔融合金充满铸型型腔，获得形状完整，轮廓清晰的铸件的能力，称为合金的充型能力。充型能力首先取决于熔融合金本身的流动能力（即流动性），同时又受外界条件，如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素影响。因此，充型能力是上述各种因素的综合反映。这些因素通过以下两个途径发生作用：①影响金属与铸型之间的热交换条件，从而改变金属液的流动时间；②影响金属液在铸型中的动力学条件，从而改变金属液的流动速度。延长金属液的流动时间、加快流动速度，都可以改善充型能力。

影响合金充型能力的主要因素如下。

(1) 合金的流动性

液态合金充满型腔，形成轮廓清晰、形状和尺寸符合要求的优质铸件的能力，称为液态合金的流动性。流动性是熔融合金自身的流动能力，它是影响充型能力的主要因素之一，是液态金属固有的属性。流动性仅与金属本身的化学成分、温度、杂质含量以及物理性质有关。合金的流动性好，充填铸型的能力就强，易于获得尺寸准确、外形完整和轮廓清晰的铸件，可避免产生铸造缺陷。合金的流动性差，铸件易产生浇不到、冷隔、气孔和夹杂等缺陷。

合金的流动性用浇注流动性试样的方法来衡量。测试流动性试样的种类很多，如螺旋形、球形、真空试样等。通常采用螺旋形试样测试合金流动性，如图 1-4 所示。

决定合金流动性的因素主要如下。

① 合金的种类 合金的流动性与合金的熔点、热导率、合金液的黏度等物理性能有关。如铸钢熔点高，在铸型中散热快、凝固快，则流动性差。

② 合金的化学成分 合金的化学成分是影响其流动性的主要因素。同种合金中，成分不同的铸造合金具有不同的结晶特点，对流动性的影响也不相同。纯金属和共晶合金是在恒温下进行结晶的，结晶时从表面向中心逐层凝固，凝固层的表面比较光滑，对尚未凝固的金属的流动阻力小，故流动性好。特别是共晶合金，熔点最低，因而

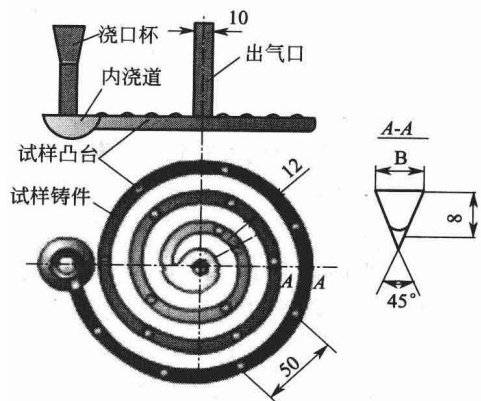


图 1-4 螺旋形试样

流动性最好。图 1-5(a) 是纯金属和共晶合金在铸造时的流动性示意图，当液流前端温度达到固相点 T_s 时，在铸件壁断面上凝固从表面向中心推动，固/液相界面平滑，阻力小，故中心未凝固体仍能够流动，流动的时间长，因而流动距离也远，所以流动性好。

在一定温度范围内结晶的亚共晶合金，其结晶过程是在铸件截面上一定的宽度区域内同时进行的。在结晶区域中，既有形状复杂的枝晶，又有未结晶的液体。复杂的枝晶不仅阻碍熔融金属的流动，而且使熔融金属的冷却速率加快，所以流动性差。结晶区间越大，流动性越差。图 1-5(b) 是宽结晶温度范围的合金在铸造时的流动性示意图，在液流前端较早就出现了液、固相共存区，使得金属液流速下降，随着小晶粒的不断增多，到一定程度时，液体则停止流动，因而流动的时间短，流动距离也近，所以流动性差。表 1-1 列出了常用铸造合金的流动性参数，其中，铸铁和硅黄铜的流动性最好，铸钢的流动性最差。

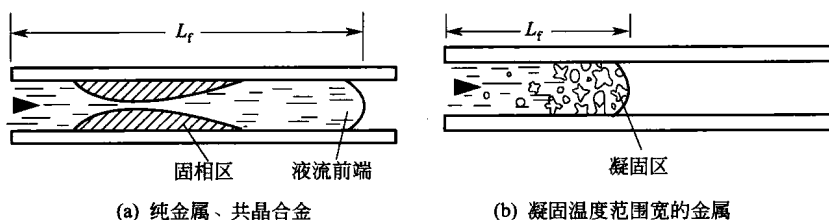


图 1-5 不同成分合金的流动性示意

表 1-1 常用铸造合金的流动性 (砂型, 试样截面 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$)

合金种类	铸型种类	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	螺旋线长度/mm
铸铁 $\omega_{\text{C}+\text{Si}}=6.2\%$ $\omega_{\text{C}+\text{Si}}=5.9\%$ $\omega_{\text{C}+\text{Si}}=5.2\%$ $\omega_{\text{C}+\text{Si}}=4.2\%$	砂型	1 300	1 800
	砂型	1 300	1 300
	砂型	1 300	1 000
	砂型	1 300	600
铸钢 $\omega_{\text{C}}=0.4\%$	砂型	1 600	100
	砂型	1 640	200
铝硅合金(硅铝明)	金属型(300°C)	680~720	700~800
镁合金(含 Al 和 Zn)	砂型	700	400~600
锡青铜($\omega_{\text{Sn}} \approx 10\%$, $\omega_{\text{Zn}} \approx 2\%$)	砂型	1 040	420
硅黄铜($\omega_{\text{Si}}=1.5\% \sim 4.5\%$)	砂型	1 100	1 000

Fe-C 合金 (如铸钢、铸铁) 的流动性与含碳量之间的关系如图 1-6 所示。由图可见，亚共晶铸铁随含碳量增加，结晶温度区间减小，流动性逐渐提高，愈接近共晶成分，合金的流动性愈好。

③ 杂质与含气量 熔融合金中出现的固态夹杂物，将使合金液的黏度增加，合金的流动性下降。如灰铸铁中的锰和硫，多以 MnS (熔点 $1\ 650^{\circ}\text{C}$) 的形式悬浮在铁液中，阻碍铁液的流动，使流动性下降。熔融金属中的含气量愈少，合金的流动性愈好。

(2) 浇注条件

① 浇注温度 浇注温度对合金的充型能力有决定性影响。浇注温度越高，合金的黏度越低，液态合金所含的热量多，传给铸型的热量多，在同样冷却条件下，保持液态的时间延长，流动性好，充型能力强。因此，提高浇注温度是改善合金充型能力的重要措施。但浇注温度过高，会使合金的吸气量和总收缩量增大，从而增加铸件产生其他缺陷 (如缩孔、缩松、黏砂、晶粒粗大等) 的可能性。因此，在保证流动性足够的条件下，浇注温度应尽可能低。

② 充型压力 熔融合金在流动方向上所受的的压力愈大，充型能力愈好。砂型铸造时，

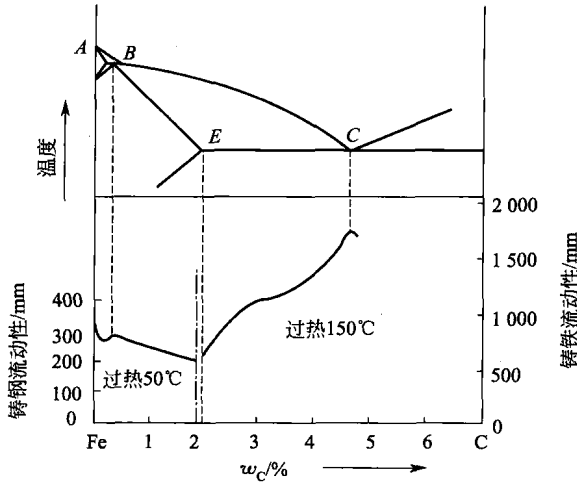


图 1-6 Fe-C 合金的流动性与含碳量的关系

充型压力是由直浇道的静压力产生的，适当提高直浇道的高度，可提高充型能力。但过高的砂型浇注压力，使铸件易产生砂眼、气孔等缺陷。在低压铸造、压力铸造和离心铸造时，因人为加大了充型压力，故充型能力较强。

(3) 铸型条件

熔融合金充型时，铸型的阻力及铸型对合金的冷却作用，都将影响液态合金的充型能力。

① 铸型的蓄热能力 表示铸型从熔融合金中吸收并传出热量的能力。铸型材料的比热容和热导率愈大，对熔融合金的冷却作用愈强，合金在型腔中保持流动的时间缩短，合金的充型能力愈差。

② 铸型温度 浇注前将铸型预热到一定温度，减小了铸型与熔融金属的温度差，减缓了合金的冷却速率，延长了合金在铸型中的流动时间，则合金充型能力提高。

③ 铸型中的气体 浇注时因熔融合金在型腔中的热作用而产生大量气体。如果铸型的排气能力差，则型腔中气体的压力增大，阻碍熔融合金的充型。铸造时，除应尽量减小气体的来源外，应增加铸型的透气性，并开设出气口，使型腔及型砂中的气体顺利排出。

④ 铸件结构 当铸件壁厚过小，壁厚急剧变化、结构复杂，或有大的水平面时，均会使充型困难。因此在进行铸件结构设计时，铸件的形状应尽量简单，壁厚应大于规定的最小壁厚。对于形状复杂、壁厚薄、散热面大的铸件，应尽量选择流动性好的合金或采取其他相应措施。在设计铸件结构时，铸件的壁厚必须大于规定的最小允许壁厚值，表 1-2 是依据经验得到的砂型铸造时，铸件的最小允许壁厚值。

表 1-2 砂型铸造的最小允许壁厚值

铸件尺寸/mm	最小允许壁厚/mm				说 明
	灰铸铁	铸钢	铝合金	铜合金	
<200×200	5~6	6~8	3	3~5	1. 结构复杂以及高强度灰铁铸件,应取最大值; 2. 对于特大型的铸件,还可以增大壁厚的尺寸
(200×200)~(500×500)	6~10	10~12	4	6~8	
>500×500	15~20	18~25	5~7		

可见，为了提高铸造合金的充型能力（流动性），应尽量选用共晶成分的合金，或结晶温度范围小的合金；应尽量提高金属液的质量，金属液中的气体、杂质含量愈少，充型能力

(流动性)愈好。但在通常情况下,合金是给定的,要提高铸件的质量,必须采取其他方面的措施,如改善铸型条件和浇注条件等。

1.2.4.2 合金的收缩

合金从浇注、凝固直至冷却到室温的过程中,其体积或尺寸缩减的现象,称为收缩。收缩是合金的物理本性,是影响铸件几何形状、尺寸、致密性,甚至造成某些缺陷的重要因素之一。

合金的收缩量常用体收缩率或线收缩率来表示。合金从液态到常温的体积改变量称为体收缩。金属在固态由高温到常温的线尺寸改变量称为线收缩。分别以单位体积和单位长度的变化量来表示:

$$\text{体收缩率} \quad \epsilon_v = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \alpha_v (t_0 - t_1) \times 100\%$$

$$\text{线收缩率} \quad \epsilon_l = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% = \alpha_l (t_0 - t_1) \times 100\%$$

式中 t_0, t_1 ——合金在液态和常温时的温度, $^{\circ}\text{C}$;

V_0, V_1 ——合金在 t_0, t_1 时的体积, m^3 ;

l_0, l_1 ——合金在 t_0, t_1 时的长度, m ;

α_v, α_l ——合金在 t_0 至 t_1 温度范围内的体收缩系数和线收缩系数, $1/^{\circ}\text{C}$ 。

合金的收缩经历如下三个阶段,如图 1-7 所示。

① 液态收缩 合金从浇注温度 ($T_{\text{浇}}$) 冷却到凝固开始温度 (液相线温度 T_1) 的收缩,即合金在液态时由于温度降低而发生的体积收缩。

② 凝固收缩 合金从凝固开始温度 (T_1) 冷却到凝固终止温度 (固相线温度 T_s) 的收缩,即熔融合金在凝固阶段的体积收缩。

③ 固态收缩 从凝固终止温度 (T_s) 冷却到室温的收缩,即合金在固态由于温度降低而发生的体积收缩。

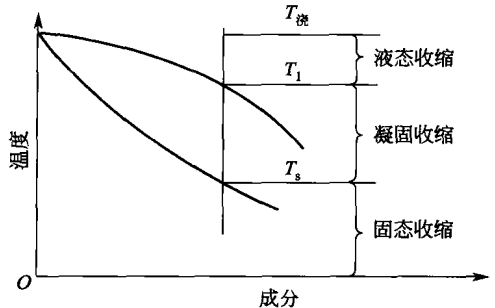


图 1-7 合金收缩的三个阶段

合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金的体积缩小,通常以体收缩率来表示。它们是铸件产生缩孔、缩松缺陷的基本原因。合金的固态收缩,尽管也是体积变化,但它只引起铸件各部分尺寸的变化。因此,通常用线收缩率来表示。固态收缩是铸件产生内应力、裂纹和变形等缺陷的主要原因。

合金的总体收缩为上述三个阶段收缩之和。它与合金的成分、温度和相变有关。不同合金收缩率是不同的。表 1-3 和表 1-4 分别是不同成分的铁碳合金的体收缩率和线收缩率。

表 1-3 不同成分的铁碳合金的体收缩率

合金种类	含碳量 /%	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态体收缩率 /%	凝固体收缩率 /%	固态体收缩率 /%	总体收缩率 /%
碳素铸钢	0.35	1 610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1 400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.5	1 400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

表 1-4 不同成分的铁碳合金的线收缩率

合金种类	灰铸铁	可锻铸铁	球墨铸铁	碳素铸钢	铝合金	铜合金
线收缩率/%	0.8~1.0	1.2~2.0	0.8~1.3	1.38~2.0	0.8~1.6	1.2~1.4

从表 1-3 和表 1-4 中可以看出，合金的成分对收缩率影响很大，实际上，影响合金收缩率的还有浇注温度和铸件结构和铸型条件等因素。它们对收缩率的影响表现如下。

① 化学成分 例如，碳钢中随含碳量增加，其结晶温度范围变宽，凝固收缩增加，而固态收缩略减。几种铸造碳钢的凝固收缩率与含碳量的关系见表 1-5。灰铸铁中，碳是形成石墨化元素，硅是促进石墨化元素，所以碳硅含量增加，收缩率减小，如图 1-8 所示。硫阻碍石墨的析出，使铸铁的收缩率增大。适量的锰，可与硫合成 MnS，抵消硫对石墨的阻碍作用，使收缩率减小。但含锰量过高，铸铁的收缩率又有增加。

表 1-5 铸造碳钢的凝固收缩率与含碳量的关系

含碳量/%	0.10	0.25	0.35	0.45	0.70
凝固收缩率/%	2.0	2.5	3.0	4.3	5.3

② 浇注温度 浇注温度愈高，过热度愈大，合金的液态收缩增加。值得注意的是，合金的收缩和铸件的收缩是不同的，铸件的收缩要比合金的收缩复杂得多。当合金的成分和温度一定时，铸件的收缩还和铸件结构和铸型条件有关。铸型中的铸件冷却时，因形状和尺寸不同，各部分的冷却速率不同，结果对铸件收缩产生阻碍。此外，铸型和型芯对铸件的收缩也将产生机械阻力，铸件的实际线收缩率比自由线收缩率小。因此，设计模样时，应根据合金的种类，铸件的形状、尺寸等因素，选取适合的收缩率。

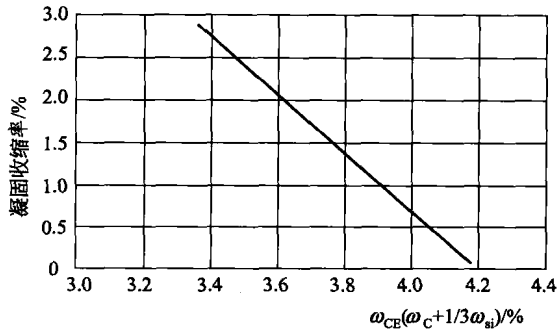


图 1-8 灰铸铁的凝固收缩率与碳当量的关系

1.2.5 铸造性能对铸件质量的影响

铸造性能对铸件质量有显著的影响。收缩是铸件中许多缺陷，如缩孔、缩松、应力、变形和裂纹等产生的根本原因。充型能力不好，铸件易产生浇不到、冷隔、气孔、夹杂、缩孔、热裂等缺陷。

1.2.5.1 缩孔和缩松

铸型内的熔融合金在凝固过程中，由于液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充，在铸件最后凝固部位将形成空洞。按空洞的大小和分布可分为缩孔和缩松。大而集中的空洞称为缩孔，细小而分散的空洞称为缩松。缩孔和缩松可使铸件的力学性能、气密性和物理化学性能大大降低，以至成为废品。缩孔和缩松是极其有害的铸造缺陷，必须设法防止。

(1) 缩孔和缩松的形成

① 缩孔的形成 缩孔通常隐藏在铸件上部或最后凝固部位，有时在机械加工中可暴露出来。缩孔形状不规则，孔壁粗糙。缩孔产生的条件是合金在恒温或很小的温度范围内结晶，铸件壁以逐层凝固的方式进行凝固。缩孔的形成过程如图 1-9 所示。液态合金填满铸型后 [见图 1-9(a)]，因铸型吸热，靠近型腔表面的金属很快就降到凝固温度，凝固成一层外壳 [见图 1-9(b)]，温度继续下降，合金逐层凝固，凝固层加厚，内部的剩余的液体，由于液态收缩和补充凝固层的凝固收缩，体积缩减，液面下降，铸件内部出现空隙 [见图 1-9

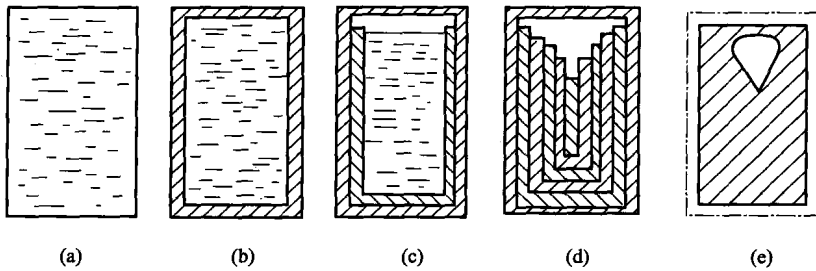


图 1-9 缩孔的形成示意

(c)], 直到内部完全凝固, 在铸件上部形成缩孔 [见图 1-9(d)]. 已经形成缩孔的铸件继续冷却到室温时, 因固态收缩使铸件的外形轮廓尺寸略有缩小 [见图 1-9(e)].

合金的液态收缩和凝固收缩越大, 浇注温度越高, 铸件的壁越厚, 缩孔的容积就越大。

② 缩松的形成 形成缩松和形成缩孔的基本原因相同, 但形成的条件却不同。缩松主要出现在结晶温度范围宽、以糊状凝固方式凝固的合金或厚壁铸件中。一般合金在凝固过程中都存在液-固两相区, 树枝状晶在其中不断扩大 [见图 1-10(a)]. 枝晶长到一定程度, 枝晶分叉间的熔融合金被分离成彼此孤立的状态 [见图 1-10(b)], 它们继续凝固时也将产生收缩, 这种凝固方式称糊状凝固。这时铸件中心虽有液体存在, 但由于树枝晶的阻碍使之无法补缩, 在凝固后的枝晶分叉间就形成许多微小的孔洞 [见图 1-10(c)]. 这些孔洞有时只有在显微镜下才能辨认出来, 我们称这种很细小的孔洞为疏松或显微缩松。

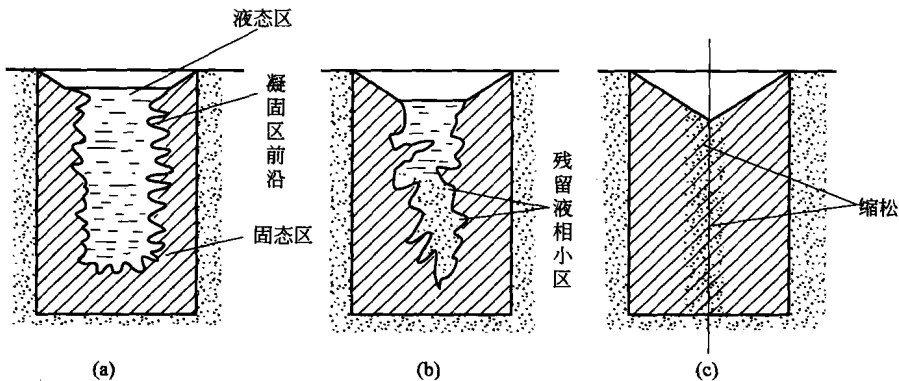


图 1-10 缩松的形成示意

由以上缩孔和缩松的形成过程, 可得到以下规律:

- ① 合金的液态收缩和凝固收缩愈大 (如铸钢、白口铸铁、铝青铜), 铸件愈易形成缩孔;
- ② 合金的浇注温度愈高, 液态收缩愈大, 愈易形成缩孔;
- ③ 结晶温度范围宽的合金, 倾向于糊状凝固, 易形成缩松;
- ④ 纯金属和共晶成分合金倾向于逐层凝固, 易形成集中缩孔。

(2) 缩孔和缩松的防止

缩孔和缩松降低了铸件的力学性能。因此, 应合理设计铸件的结构, 尽量避免铸件上的局部金属积聚; 让缩孔转移到冒口中去。冒口是指铸型内储存供补缩铸件备用的熔融金属的空腔, 防止铸件内产生缩孔的根本措施是顺序凝固, 即使铸件按规定的方向, 从一部分到另一部分逐渐凝固的过程, 通常向着冒口的方向凝固, 图 1-11 为通过设置冷铁、冒口而实现

顺序凝固的示意图。冷铁本身不起补缩作用，只能增加铸件局部冷却速率。

对一定成分的合金，缩孔和缩松的数量可以相互转化，但其总容积基本一定。防止铸件中产生缩孔和缩松的基本原则就是针对合金的收缩和凝固特点制定正确的铸造工艺，使铸件在凝固过程中建立良好的补缩条件，尽可能使缩松转化为缩孔，并通过控制铸件的凝固过程使之符合顺序凝固的原则，并在铸件最后凝固的部位合理地设置冒口，使缩孔移至冒口中，即可获得合格的铸件。主要工艺措施如下。

① 按照定向凝固原则进行凝固 定向凝固原则是指采用各种工艺措施，使铸件上从远离冒口的部分到冒口之间建立一个逐渐递增的温度梯度，从而实现由远离冒口的部分向冒口的方向顺序地凝固，如图 1-11 所示。这样铸件上每一部分的收缩都得到稍后凝固部分的合金液的补充，缩孔转移到冒口部位，切除后便可得到无缩孔的致密铸件。

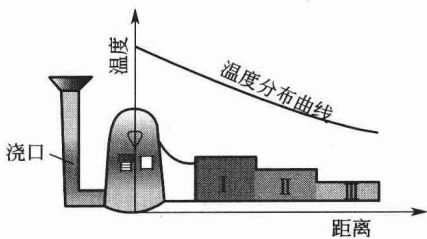


图 1-11 顺序凝固示意

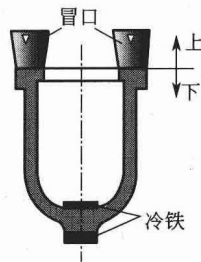


图 1-12 冷铁和冒口的应用

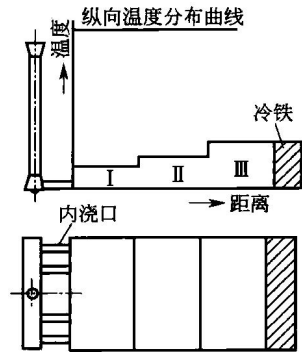


图 1-13 同时凝固示意

② 合理地确定内浇道位置及浇注工艺 内浇道的引入位置对铸件的温度分布有明显影响，应按照定向凝固的原则确定。例如，内浇道应从铸件厚实处引入，尽可能靠近冒口或由冒口引入。

③ 合理地应用冒口、冷铁和补贴等工艺措施 冒口、冷铁和补贴的综合运用是消除缩孔、缩松的有效措施。图 1-12 是冷铁和冒口的应用。

④ 按照同时凝固原则进行凝固 同时凝固原则即采用相应工艺措施使铸件各部分温度均匀，在同一时间内凝固。如图 1-13 所示的阶梯形铸件在壁厚较大的 III 处放置冷铁，以加快该处的冷却速率；在壁薄的 I 处开设多个内浇道，使此处始终保持高温，则该铸件在纵断面上得到均匀的温度场，从而达到 I、II、III 三部分同时凝固的目的。

同时凝固适用于各种合金的薄壁铸件。由于铸型的冷却作用强，薄壁处横向断面上温度梯度大，倾向于逐层凝固。而多个分散的内浇道有利于液流的补充，对于收缩较小的灰铸铁可以消除缩孔，获得致密铸件。收缩较大的薄壁铸件、有色金属合金铸件往往出现轴线缩松，但因其表层致密，可以保证气密性而不发生泄漏。对于凝固温度范围宽，用冒口亦难以消除缩松的合金（如锡青铜），采用冷铁或金属型及同时凝固原则，对防止渗漏可以起到满意效果。同时凝固原则无需冒口，节约金属且工艺简单；铸型冷却均匀，不易形成应力、变形和裂纹等缺陷。

1.2.5.2 铸造应力

铸件在凝固、冷却过程中，由于各部分体积变化不一致、彼此制约而使其固态收缩受到阻碍引起的内应力，称为铸造应力。按阻碍收缩原因的不同，铸造内应力分为热应力和收缩应力。铸造内应力是液态成形件产生变形和裂纹的基本原因。铸件各部分由于冷却速率不同、收缩量不同而引起的阻碍称热阻碍，铸型、型芯对铸件收缩的阻碍，称机械阻碍。由热

阻碍引起的应力称热应力，由机械阻碍引起的应力称收缩应力（机械应力）。铸造应力可能是暂时的，当引起应力的原因消除以后，应力随之消失，称为临时应力；也可能是长期存在的，称为残余应力。

(1) 热应力

热应力是由于铸件壁厚不均，各部分收缩受到热阻碍而引起的。落砂后热应力仍存在于铸件内，是一种残余铸造应力。现以图 1-14 所示的框形铸件来说明热应力的形成过程，它由一根粗杆 I 和两根细杆 II 组成。图 1-15 表示杆 I 和杆 II 的冷却曲线， $T_{\text{临}}$ 表示金属弹塑性临界温度。当铸件处于高温阶段时， t_0-t_1 间两杆均处于塑性状态。尽管杆 I 和杆 II 的冷却速率不同，收缩不一致，但两杆都是塑性变形，不产生内应力 [见图 1-14(a)]。继续冷却到 t_1-t_2 间，此时杆 II 温度较低，已进入弹性状态，但杆 I 仍处于塑性状态。杆 II 由于冷却快，收缩大于杆 I，在横杆的作用下将对杆 I 产生压应力，而杆 I 反过来给杆 II 以拉应力 [见图 1-14(b)]。处于塑性状态的杆 I 受压应力作用产生压缩塑性变形，使杆 I、II 的收缩趋于一致，也不产生应力 [见图 1-14(c)]。当进一步冷却至 t_2-t_3 间，杆 I 和杆 II 均进入弹性状态，此时杆 I 温度较高，冷却时还将产生较大收缩，杆 II 温度较低，收缩已趋停止，在最后阶段冷却时，杆 I 的收缩将受到杆 II 强烈阻碍，因此杆 I 受拉，杆 II 受压。到室温时形成残余应力 [见图 1-14(d)]。

热应力使冷却较慢的厚壁处受拉伸，冷却较快的薄壁处或表面受压缩，铸件的壁厚差别愈大，合金的线收缩率或弹性模量愈大，热应力愈大。顺序凝固时，由于铸件各部分冷却速率不一致，产生的热应力较大，铸件易出现变形和裂纹，采用该凝固方式时应予以考虑。

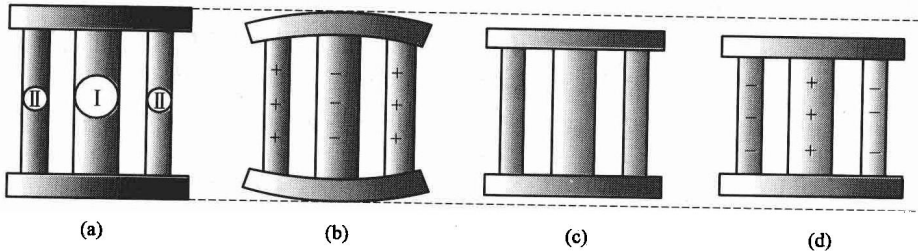


图 1-14 框架铸件的热应力形成过程
+ 表示拉应力；- 表示压应力

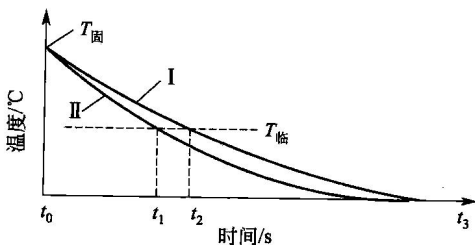


图 1-15 杆 I 和杆 II 的固态冷却曲线

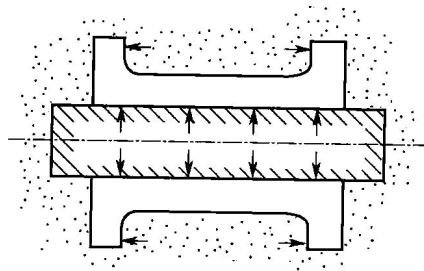


图 1-16 收缩应力的形成

(2) 收缩应力

铸件在固态收缩时，因受铸型、型芯、浇冒口等外力的阻碍而产生的应力称收缩应力，如图 1-16 所示。一般铸件冷却到弹性状态后，收缩受阻都会产生收缩应力。收缩应力常表现为拉应力，与铸件部位无关。形成原因一经消除（如铸件落砂或去除浇口后），收缩应力也随之消失，因此收缩应力是一种临时应力。但在落砂前，如果铸件的收缩应力和热应力共