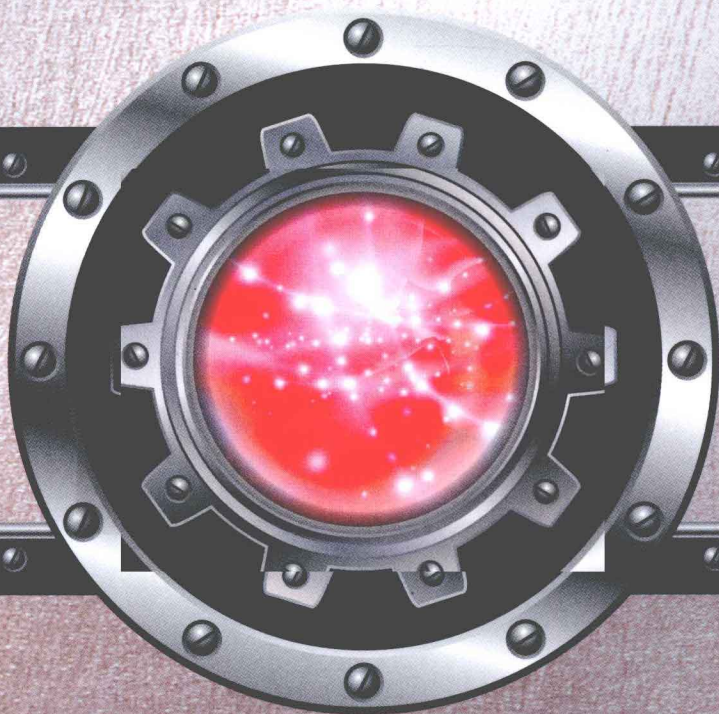


● 高等学校教材 ●

JINSHU GONGYI XUE

金属工艺学

朱振华 黄根哲 龚素芝 主编
王毅坚 主审



化学工业出版社

高等学校教材

金属工艺学

朱振华 黄根哲 龚素芝 主编
王毅坚 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分4章：铸造、金属的压力加工、焊接和切削加工。铸造部分主要介绍铸造工艺基础、常用合金铸件的生产、砂型铸造和特种铸造方法；压力加工部分主要介绍了板料冲压、锻造和常用的特种压力加工方法；焊接部分主要介绍了焊接工艺基础、焊接方法和焊接结构的设计；切削加工部分主要介绍了切削加工基础、金属切削机床、机械制造中的加工方法、典型表面的加工和切削加工的结构工艺性。全书较全面系统地介绍了机械零件加工的方法、原理、工艺特点和零件结构的设计原则，同时对有关的新技术、新工艺和现代加工方法也作了相应的介绍。

本书可作为高等院校机械类及相关专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属工艺学/朱振华, 黄根哲, 龚素芝主编. —北京: 化学工业出版社, 2011.8

高等学校教材

ISBN 978-7-122-11891-2

I. 金… II. ①朱…②黄…③龚… III. 金属加工-工艺学-高等学校-教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 143855 号

责任编辑: 金玉连 程树珍

装帧设计: 周 遥

责任校对: 陈 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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 402 千字 2011 年 9 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: 33.00 元

版权所有 违者必究

前 言

金属工艺学是高等工科院校机械类和近机类专业一门非常重要的技术基础课。该门课程主要介绍机械零件毛坯的制造方法和切削加工的方法及装备。通过该门课程的学习,要求学生掌握机械零件制造的基本知识和基本理论,为其他专业课的学习和进行毕业设计打下基础,也为学生毕业后从事机械制造等方面的工作打下坚实的基础。

金属工艺学是一门实践性很强的课程,几乎所有工科院校都安排有相应的“金工实习”教学环节。“金工实习”应与本课程的理论学习结合进行,做到理论与实践紧密结合。“金工实习”时应配有相应的实习教材。

本书内容包括铸造、压力加工、焊接及切削加工四部分。每章后面附有适量的习题。本书有如下特点:

(1) 以机械零件的制造技术为主线,全面系统地介绍了金属零件的制造工艺及相应装备;

(2) 针对本门课程实践性强的特点,将理论教学和现场实习教学结合起来,内容体系上不同于以往的同类教材;

(3) 吸取同类教材的优点,力求内容全面、系统,重点突出;

(4) 拓宽知识面,介绍相关方面的新工艺、新技术和新进展;

(5) 书中名词、术语、图表、符号、单位均采用最新国家标准和法定计量单位;

(6) 本书内容与先修课程和后续课程的内容紧密结合在一起,删减了课程中大量的不必要的重复内容和赘述,在机械(或过程装备)制造方面形成一个完整而严密的课程体系。

本书由朱振华、黄根哲、龚素芝主编。其中朱振华编写 1.1、1.2 节,杨立峰编写 1.3 节,李晶编写 1.4 节,黄根哲编写第 2 章,龚素芝编写第 3 章,陆永贵编写 4.1 节,高艺编写 4.2、4.3 节,张树仁编写 4.4、4.5 节。全书由吉林化工学院王毅坚教授主审。在本书编写过程中,刘昊、袁军等同学在本书制图、校对等方面付出了辛勤劳动,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中错误或不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2011.5

目 录

1 铸造	1
1.1 铸造工艺基础	2
1.1.1 合金的流动性	2
1.1.2 合金的凝固与收缩	3
1.1.3 铸件中的缩孔和缩松	5
1.1.4 铸造内应力、变形和裂纹	7
1.1.5 合金的吸气性	10
1.1.6 铸造缺陷及质量控制	10
1.2 常用合金铸件的生产	12
1.2.1 铸铁件的生产	12
1.2.2 铸钢件的生产	20
1.2.3 铜、铝合金铸件的生产	22
1.3 砂型铸造	24
1.3.1 造型（制芯）方法的选择	25
1.3.2 砂型铸件结构的工艺性	35
1.3.3 砂型铸造工艺方案的确定	41
1.3.4 综合工艺分析举例	47
1.4 特种铸造	49
1.4.1 熔模铸造	49
1.4.2 金属型铸造	51
1.4.3 压力铸造	52
1.4.4 低压铸造	53
1.4.5 离心铸造	54
1.4.6 陶瓷型铸造	55
1.4.7 磁型铸造	56
1.4.8 连续铸造	57
1.4.9 常用铸造方法比较	57
习题	58
2 金属的压力加工	60
2.1 压力加工简介	60
2.2 锻造	61
2.2.1 金属的可锻性	61
2.2.2 锻造方法	62
2.2.3 锻造工艺规程的制定	68
2.2.4 锻件结构的工艺性	73

2.3 板料冲压	75
2.3.1 冲压设备	76
2.3.2 冲压的基本工序	77
2.3.3 冲模	82
2.3.4 冲压件的结构工艺性	84
2.4 特种压力加工方法简介	86
2.4.1 精密锻造	86
2.4.2 精密冲裁	87
2.4.3 挤压	87
2.4.4 拉拔	88
2.4.5 轧制	88
2.4.6 超塑性成形	90
习题	91
3 焊接	94
3.1 概述	94
3.1.1 焊接电弧	94
3.1.2 焊接接头	95
3.1.3 焊接应力与变形	99
3.1.4 焊接缺陷	101
3.2 焊接方法	103
3.2.1 焊条电弧焊	103
3.2.2 埋弧自动焊	109
3.2.3 气体保护焊	113
3.2.4 气焊	118
3.2.5 电渣焊	119
3.2.6 等离子弧焊	121
3.2.7 真空电子束焊焊接	122
3.2.8 激光焊接	123
3.2.9 压力焊	124
3.2.10 钎焊	128
3.2.11 堆焊和喷涂	130
3.3 焊接结构设计	130
3.3.1 焊接结构件材料的选择	130
3.3.2 焊接方法的选择及应用	131
3.3.3 焊接接头的工艺设计	132
习题	137
4 切削加工	139
4.1 切削加工基础	139
4.1.1 切削运动及切削用量	139
4.1.2 金属切削刀具	144

4.1.3	切屑及积屑瘤	152
4.1.4	切削力及切削功率	155
4.1.5	切削热及切削温度	157
4.1.6	切削液的选用	159
4.1.7	材料的切削加工性	159
4.2	金属切削机床	161
4.2.1	机床的类型	161
4.2.2	机床的基本构造	164
4.2.3	机床的传动	166
4.2.4	数控机床和加工中心简介	173
4.2.5	自动生产线和柔性制造系统	181
4.3	机械制造中的加工方法	184
4.3.1	车削	184
4.3.2	铣削	186
4.3.3	刨削、拉削	189
4.3.4	钻镗削	193
4.3.5	磨削	200
4.3.6	研磨及珩磨	208
4.3.7	超级光磨及抛光	211
4.3.8	超精密加工及超高速切削技术简介	212
4.3.9	特种加工	216
4.4	典型表面的加工	223
4.4.1	外圆面加工	224
4.4.2	孔加工	226
4.4.3	平面加工	227
4.4.4	成形面加工	230
4.4.5	螺纹加工	232
4.4.6	齿轮加工	235
4.5	切削加工的结构工艺性	241
4.5.1	零件结构工艺性的概念	241
4.5.2	零件结构工艺性的一般原则和实例分析	241
	习题	248
	参考文献	251

1 铸 造

铸造是将液态合金浇注到铸型型腔中，待其冷却凝固后，获得具有一定形状和尺寸的毛坯或零件的生产方法。用铸造方法得到的金属件称为铸件。用铸造方法所得到的铸件一般是零件的毛坯，毛坯经过机械加工以后才能得到尺寸精度较高、表面粗糙度较低的零件。但是采用一些特种铸造方法（比如熔模铸造、压力铸造等）生产出的铸件可以不经过机械加工或少量加工即可直接作为零件使用。

我国的铸造技术历史悠久。早在三千多年前商周时期青铜器的铸造已达到相当高的水平，二千五百多年前铸铁工具的应用已经相当普遍，直到今天铸造仍然是毛坯生产的主要方法。在各类机器产品中，铸件所占比例很大，如车床、内燃机中，铸件占总重量的 70%~90%，压缩机中占 60%~80%，拖拉机中占 50%~70%。铸造之所以应用如此广泛，是由于它具有如下的优越性。

- i. 可用来制造形状复杂，特别是具有复杂内腔的毛坯，如箱体、汽缸体等。
- ii. 原材料来源广，可直接利用成本低廉的废机件和金属切屑，铸件成本低。如一台金属切削机车，其中铸件的重量大约占 75%，但其成本仅占机床总成本的 15%~30%。
- iii. 适用范围广。如工业上常用的金属材料（碳素钢、合金钢、铸铁、铜合金、铝合金等）都可以铸造。铸件的大小几乎不限，铸件重量可以从几克到数百吨，壁厚从几毫米到几米。铸件的批量不限，它既可用于单件、小批生产，又可用于成批、大量的机械化、自动化生产。

但是由于铸造的生产过程比较复杂，有些工艺过程还难以进行精确控制，使铸件容易出现浇不足、缩孔、气孔、夹渣、裂纹等缺陷，因此铸件的废品率一般较高。

另外，由于铸件的力学性能比较低，所以铸件较笨重，从而，增加了机器的重量。因此，对于一些承受动载荷的重要零件，一般不宜采用铸件。

铸造的生产方法很多，主要分为砂型铸造和特种铸造两类。其中砂型铸造的应用最广泛。除砂型铸造外的其他铸造方法称为特种铸造。特种铸造方法主要有：熔模铸造，金属型铸造，压力铸造，低压铸造，离心铸造，陶瓷型铸造，磁型铸造等。

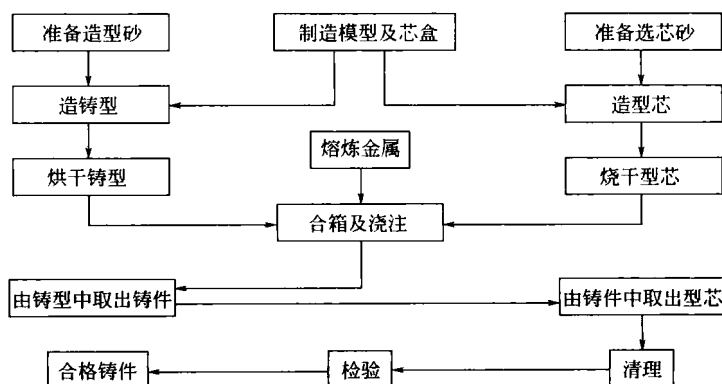


图 1-1 砂型铸造的生产过程

以砂型铸造为例说明铸造的生产过程。首先根据零件图的形状和尺寸，设计出铸件的模型及型芯盒。用模型制造出砂型（也就是铸型），用芯盒制造出型芯（型芯的作用是形成铸件的內孔），把烘干的型芯装入砂型并合箱。将熔化的金属浇入铸型，金属凝固后经落砂、清理、检验合格便得到铸件。这个过程可用图 1-1 表示。

1.1 铸造工艺基础

合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能，称为金属的铸造性能。金属的铸造性能主要是指合金的流动性、收缩性、偏析、吸气性、氧化性等。铸造性能对铸件质量影响很大，其中流动性和收缩性对铸件的质量影响最大。铸造性能是铸造工艺及铸件结构设计的重要依据。

1.1.1 合金的流动性

1.1.1.1 流动性的概念

合金的流动性是指金属液本身的流动能力。流动性是合金的主要铸造性能之一，它对铸件质量影响很大。

流动性直接影响到金属液的充型能力。所谓充型能力是指液体合金充满铸型的型腔，获得形状完整，轮廓清晰铸件的能力。流动性好的金属，充型能力强能获得轮廓清晰、尺寸精确、薄壁和形状复杂的铸件，还有利于金属液中夹杂物和气体的上浮与排除。相反，金属的流动性差，充型能力不足，则铸件容易出现冷隔、浇不足等缺陷。浇不足是指铸件的型腔未浇满液体金属，使铸件不能获得完整的形状。冷隔是指在铸件表面存在未完全融合的缝隙和洼坑。冷隔虽然可使铸件获得完整的外形，但因存在未完全融合的垂直接缝，使铸件的力学性能下降。

1.1.1.2 影响流动性的因素

影响流动性的因素主要有合金成分、浇注条件、浇注系统的结构、铸型和铸件结构等因素。

（1）合金成分

影响合金流动性的因素很多，但以化学成分对合金流动性的影响最显著。不同的铸造合金具有不同的流动性。灰铸铁流动性最好，硅黄铜次之，而铸钢的流动性最差。同种合金，由于成分不同，使其具有不同的结晶特点，流动性也不同。在各种成分的合金当中，共晶成分的合金流动性最好。以铸铁来说，含碳量为 4.3% 的铁碳合金流动性最好，合金的成分愈远离共晶，合金的结晶温度范围愈宽，流动性也就愈差。这主要是由于共晶成分的合金是在恒温下进行结晶，结晶过程是从表面开始向中心逐层推进。由于凝固层的内表面比较平滑，对尚未凝固的合金流动阻力小，有利于合金充填型腔，所以流动性好。而其他成分合金的结晶是在一定温度范围内进行，即结晶区域为一个液相和固相并存的两相区。在此区域初生的树枝状枝晶使凝固层内表面参差不齐，阻碍液态合金的流动。合金结晶温度范围愈宽，液相线和固相线距离愈大，凝固层内表面愈参差不齐，流动阻力愈大，流动性愈差。

（2）浇注条件

合金的浇注条件主要包括两个方面，一是浇注温度，二是浇注时的充型压力。

① 浇注温度 浇注温度（即浇注时液态金属的温度）对合金的流动性起着决定性的影响。浇注温度高，合金的过热度就高，合金的黏度就会下降，液态合金的流动性越好。但是浇注温度不能过高，否则，由于合金吸气多，氧化严重，流动性反而降低。因此每种合金均

有一定的浇注温度范围。通常灰口铸铁的浇注温度为 $1200\sim 1380^{\circ}\text{C}$ ，铸钢为 $1520\sim 1620^{\circ}\text{C}$ ，铸造铝合金为 $680\sim 780^{\circ}\text{C}$ 。

② 充型压力 充型压力是指液态合金在流动方向上所受的壓力。充型压力越大，合金的流动性越好。砂型铸造时，充型压力是由直浇道所产生的合金静压力产生的，所以直通道的高度应适当，若高度较低，合金的流动性就差，液态合金的充型能力就小。

(3) 浇注系统的结构

浇注系统的结构越复杂，流动的阻力就越大，流动性就越低。故在设计浇注系统时，要合理布置内浇道在铸件上的位置，选择恰当的浇注系统结构。

(4) 铸型

铸型的蓄热能力、温度以及铸型中的气体等均影响合金的流动性。

铸型的蓄热能力是指铸型从金属中吸收和储存热量的能力。铸型材料的热导率和比热容越大，对液态合金的激冷作用越强，液态合金的流动性就越差，如液态合金在金属型比在砂型中的流动性差。

浇注前将铸型预热，提高铸型的温度，可减少铸型和金属液之间的温度差，使合金的冷却速度减缓，从而使合金的流动性得到提高。

金属液浇注进铸型以后，由于金属液的温度比较高，在金属液的热作用下，型腔中会产生大量气体。如果铸型的排气能力比较差的话，型腔中的气体压力就会增大，从而阻碍液态合金的流动，液态合金的流动性变差，如铸造时若型砂中水分过多，则合金的流动性较差。

(5) 铸件结构

当铸件壁厚过小、结构复杂、有大的水平面等结构时，都会使金属液的流动困难。

1.1.1.3 合金流动性的测定

合金的流动性一般用浇注流动性试样的方法来测定。将金属液浇注到螺旋形试样的铸型中（一般采用砂型铸造），冷凝后测出其充满型腔的试样长度，这个长度就代表合金的流动性。所得到的螺旋形试样的长度越长，液态合金的流动性越好。

图 1-3 表示一个浇注出来的螺旋形试样（铸件）。在螺旋形试样上每隔 50mm 设一个标点，来直接读出螺旋线的长度。

1.1.2 合金的凝固与收缩

1.1.2.1 铸件的凝固方式

合金浇注到铸型的型腔后，合金从液态转变为固态过程称为凝固。在铸件凝固的过程中，其断面上一般存在三个区域，即固相区、凝固区和液相区。其中液相和固相并存的凝固区的大小对于铸件的质量影响最大。因此，按照凝固区的宽窄（图 1-3 中的 S），可以把铸件的凝固方式划分为三种，即逐层凝固、糊状凝固和中间凝固。

(1) 逐层凝固

图 1-3 中合金 α 是共晶成分的合金，其凝固是在恒定温度下进行的，不存在液相和固相并存的凝固区。其最显著的特征是有一个清晰的凝固前沿把断面上外层的固体和内层的液体

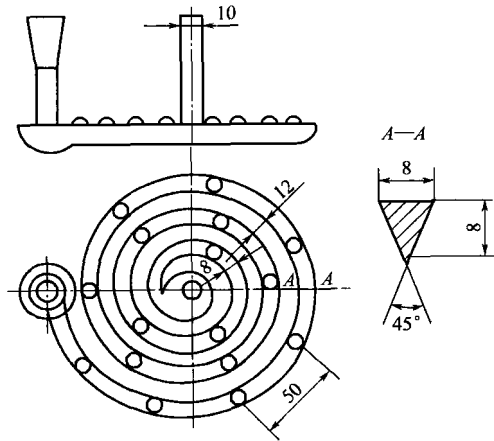


图 1-2 螺旋形标准试样

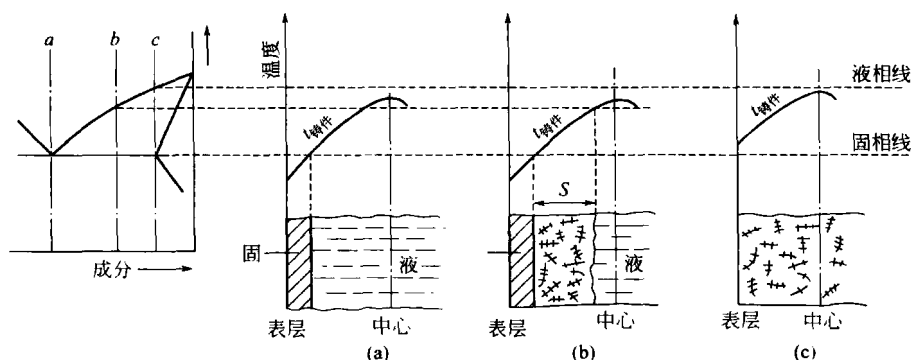


图 1-3 铸件的凝固方式

清楚地分开。随着温度下降，固体层不断加厚，液体层不断减少，直到铸件中心，这种凝固方式称为逐层凝固。如果合金的结晶温度范围很小，铸件断面的凝固区域很窄，则也属于逐层凝固方式。

(2) 糊状凝固

图 1-3 中合金 *c* 的结晶温度范围较宽（即相图中液相线和固相线之间的距离较宽），且铸件断面上不同位置处的温度分布比较均匀，则在凝固的某段时间内，液相和固相并存的凝固区贯穿整个截面，这种凝固方式称为糊状凝固。

(3) 中间凝固

中间凝固是指介于逐层凝固和糊状凝固之间的凝固方式。大多数合金都属于中间凝固。如图 1-3(b) 所示，对于合金 *b* 来说，在某一时刻，由于铸件表面的温度低于固相线的温度，所以表层是固体。由于铸件中心部位的温度高于液相线的温度，所以铸件的中心部位是液体。温度介于液相线和固相线之间部分属于凝固区。

一般来说，逐层凝固时，合金的流动性好，充型能力强，铸件质量较好。糊状凝固时铸件质量较差。在常用合金中，灰铸铁、铝硅合金等倾向于逐层凝固；球墨铸铁、锡青铜、铝铜合金等倾向于糊状凝固。

1.1.2.2 铸造合金的收缩

收缩是指合金从液态冷却到室温的过程中，体积和尺寸缩小的现象。收缩是合金重要的铸造性能之一，收缩给铸造工艺带来许多困难，是多种铸造缺陷（如缩孔、缩松、残余内应力、裂纹、变形等）产生的根源，严重影响铸件的质量。因此必须研究收缩的规律性。

(1) 收缩的过程

合金从液态冷却到室温的整个过程要经历三个收缩阶段。

① 液态收缩 是指合金从浇注温度冷却到凝固开始温度之间的体积收缩，此时的收缩表现为型腔内液面的降低。合金的过热度越大，则液态收缩也越大。

② 凝固收缩 是指合金从凝固开始温度冷却到凝固终止温度之间的体积收缩，在一般情况下，这个阶段仍表现为型腔内液面的降低。

③ 固态收缩 是指合金从凝固终止温度冷却到室温之间的体积收缩，它表现为铸件三个方向线尺寸的缩小，即三个方向的线收缩。合金的固态收缩常用单位长度的收缩量（线收缩率）来表示。

金属的总体收缩为上述三个阶段收缩之和，表 1-1 列出了几种铁碳合金的体积收缩率。液态收缩和凝固收缩（这两个过程称为体积收缩）是铸件产生缩孔和缩松的主要原因，固态收缩是铸件产生内应力、变形和裂纹等缺陷的主要原因。

表 1-1 几种铁碳合金的体积收缩率

合金种类	碳的质量 分数/%	浇注温度 /℃	液态收 缩率/%	凝固收缩率 /%	固态收 缩率/%	总体积收 缩率/%
铸钢	0.35	1610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12.9
灰铸铁	3.5	1400	3.0	0.1	3.3~4.0	6.4~7.1

(2) 影响收缩的因素

合金的收缩主要与合金的化学成分、浇注温度、铸件结构与铸型材料等有关。

① 化学成分 不同种类和不同成分的合金，其收缩率不同。显然，合金的收缩率越小，铸造性能越好。在常用的合金中，铸钢的收缩率最大，灰口铸铁的收缩率最小。

② 浇注温度 浇注温度越高，液态收缩越大，因此浇注温度不宜过高。

③ 铸件结构与铸型材料 铸造时型腔形状越复杂，型芯的数量越多，铸型材料的退让性越差，对收缩的阻碍越大，产生的收缩应力越大，越容易产生裂纹等缺陷。

1.1.3 铸件中的缩孔和缩松

铸件凝固结束后常常在某些部位出现孔洞，在铸件上部或最后凝固部位出现的容积较大的孔洞，称为缩孔。在铸件内部出现的细小而分散的孔洞称为缩松。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，甚至使铸件成为废品，是极其有害的铸造缺陷之一。

1.1.3.1 缩孔和缩松的形成

(1) 缩孔的形成

缩孔的形成过程（假设为逐层凝固）如图 1-4 所示。图（a）表示金属液刚填满铸型的型腔。图（b）表示由于铸型的吸热，靠近铸型表面的金属首先凝固成一层外壳，内部仍为液态。图（c）表示随着温度的下降，外壳加厚，而内部液体由于补足液态收缩和凝固收缩引起容积缩减，使液面下降。图（d）表示当逐层凝固结束时，在铸件的上部形成了缩孔。图（e）表示凝固以后的铸件在固态收缩时，使铸件的外形尺寸略有缩小。

合金的液态收缩和固态收缩愈大，浇注温度愈高，铸件愈厚，缩孔的容积愈大。

(2) 缩松的形成

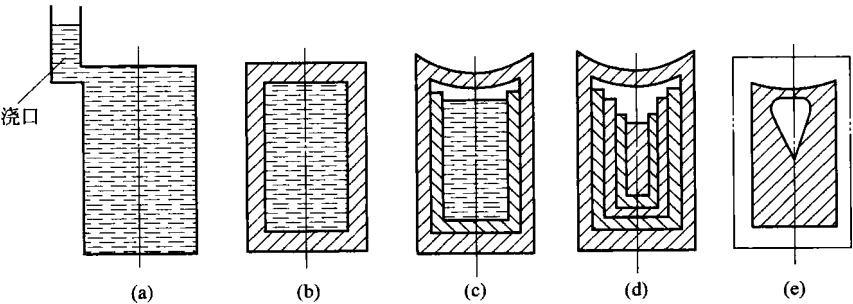


图 1-4 缩孔的形成过程示意图

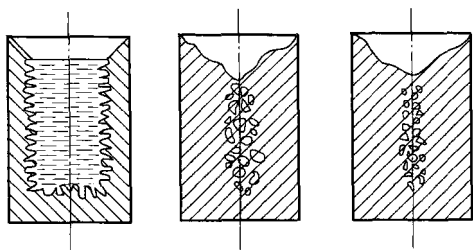


图 1-5 缩松形成过程示意图

缩松的形成过程如图 1-5 所示。当合金结晶温度范围较宽时，在铸件表面结壳后，内部有一个较宽的液、固两相共存的凝固区域。继续凝固，固相不断增多，液相不断减小。凝固后期，先生成的树枝晶相互接触，将合金液分割成许多小的封闭区域，当封闭区域内合金的凝固收缩得不到液体补充时，就形成了缩松。缩松可以看成许多分散的小缩孔，合金的结晶温度范围愈宽，愈易形成缩松。

合金凝固时，对于逐层凝固的合金形成缩孔的倾向比较大，形成缩松的倾向比较小，糊状凝固的合金形成缩孔的倾向小，但极易形成缩松。

1.1.3.2 缩孔和缩松的防止

缩孔和缩松都会使铸件的力学性能下降，缩松还可能造成铸件的渗漏。因此，缩孔和缩松都属于铸件的重要缺陷，应想办法来防止。

实践证明，通过使铸件实现定向凝固（即顺序凝固）可以防止缩孔和缩松的形成。

所谓定向凝固（顺序凝固）就是在容易产生缩孔的厚大部位（这个部位最后凝固）设置冒口，使远离冒口的部位先凝固，然后是靠近冒口的部位凝固，最后才是冒口部位的凝固。图 1-6 为定向凝固的示意图。铸件凝固时，远离冒口的第Ⅰ部分由于温度最低，最先凝固，其收缩由后凝固的第Ⅱ部分来补足，第Ⅲ部分的收缩由冒口的液体来补足。冒口部位温度最高，最后凝固。这样，就使形成的缩孔位于冒口中。冒口是铸件的多余部分，在铸件清理时将其去掉。

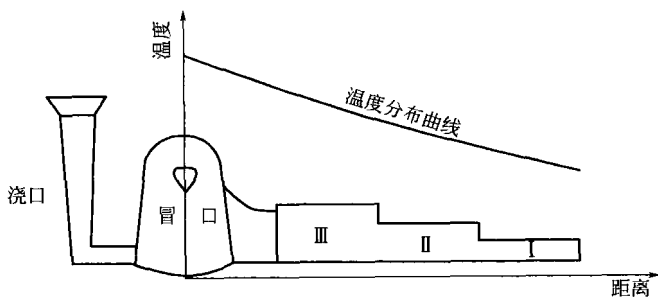


图 1-6 定向凝固

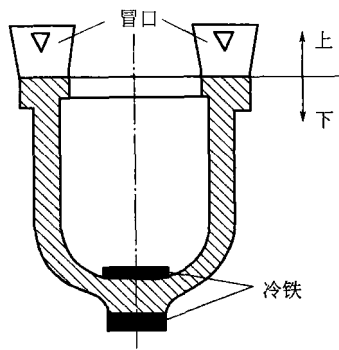


图 1-7 冷铁的应用

对于铸件上不便设置冒口的厚大部位，为了实现顺序凝固，可以在这些部位设置冷铁。冷铁分为外冷铁和内冷铁两类。外冷铁是造型时放置在模样表面而埋入砂型中的冷铁，内冷铁是放置在型腔内，能与铸件熔合为一体的冷铁。图 1-7 表示冷铁的应用。图中铸件的热节（容易产生缩孔的部位）共有三个。顶部的两个热节可通过安放冒口来防止缩孔。底部的凸台由于比较厚，也容易出现缩孔，但在此处不便安放冒口。于是，可在这个凸台的型壁上安放两块冷铁。由于冷铁加快了 this 部位的冷却速度，使厚度较大的凸台最先凝固，从而实现了由下而上的顺序凝固。这样，就使形成的缩孔位于最后凝固的冒口内。

由此可见，冷铁的作用主要是加快某些厚大部位的冷却速度，以便控制凝固的顺序，实

现顺序凝固，但冷铁本身并不起补缩作用。冷铁通常用钢或铸铁制成。

必须指出，对于结晶温度范围甚宽的合金，结晶开始之后，发达的树枝状骨架布满了整个截面，使冒口的补缩道路严重受阻，因而难以避免显微缩松的产生。显然，选用近共晶成分或结晶温度范围较窄的合金生产铸件是适宜的。

1.1.4 铸造内应力、变形和裂纹

铸件的固态收缩受到阻碍而引起的内应力，称铸造内应力。它是铸件产生变形、裂纹等缺陷的主要原因。按照内应力产生的原因不同，铸造内应力可分为热应力和机械应力两种。

1.1.4.1 铸造内应力的形成

(1) 热应力

热应力是指铸件各部分由于壁厚不均匀、冷却速度不同，造成在同一时期内，铸件各部分收缩不一致而产生的应力。

下面以图 1-8 所示的框形铸件来分析热应力的形成过程（图中+表示拉应力；—表示压应力）。该铸件由杆Ⅰ和杆Ⅱ两部分组成，中间的杆Ⅰ较粗，两侧的杆Ⅱ较细。图 1-8 中的曲线Ⅰ表示粗杆Ⅰ在固态收缩过程中温度随时间变化的关系曲线，曲线Ⅱ表示细杆Ⅱ在固态收缩过程中温度随时间变化的关系曲线。由于杆Ⅱ较细，冷却较快，所以曲线Ⅱ在曲线Ⅰ的下面，即同一时刻杆Ⅱ的温度低于杆Ⅰ。图中 $T_{\text{临}}$ 表示杆发生弹性变形和塑性变形的临界温度。当杆的温度大于 $T_{\text{临}}$ 时，发生塑性变形，变形之后内应力消除。杆的温度小于 $T_{\text{临}}$ 时，发生弹性变形，变形之后内应力继续存在。

在 $T_0 - T_1$ 的冷却过程中，两杆的温度都大于 $T_{\text{临}}$ ，所以两杆都处于塑性状态。尽管在这个过程中，杆Ⅱ的冷却速度大于杆Ⅰ（因为杆Ⅱ比杆Ⅰ细），两杆的收缩不一致，但所产生的瞬时内应力可通过两杆的塑性变形自行消失，如图 1-8(a) 所示。

继续冷却，在 $T_1 - T_2$ 的冷却过程中，杆Ⅱ的温度已小于 $T_{\text{临}}$ ，进入弹性状态，而粗杆

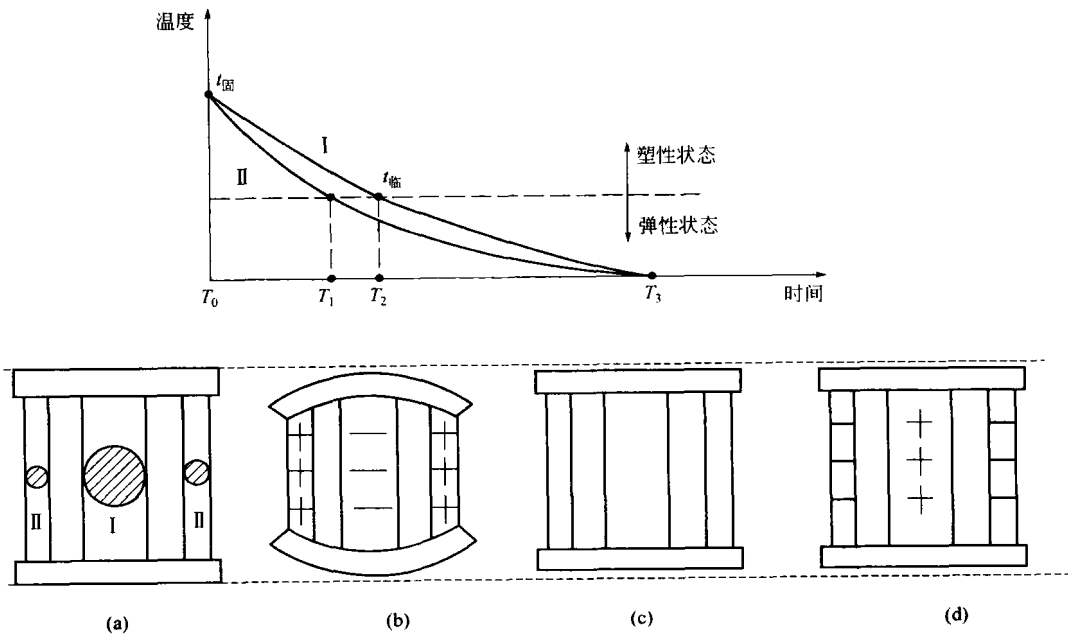


图 1-8 热应力的形成

+ 表示拉应力；— 表示压应力

I 由于冷却比较慢，其温度仍高于 $t_{\text{临}}$ ，这个过程粗杆 I 仍处于塑性状态。由于细杆 II 冷却快，其收缩量大于粗杆 I，两杆的收缩不一致。细杆 II 的收缩必然要受到粗杆 I 的阻碍，通过顶板，使细杆 II 受到拉伸，在细杆 II 中产生拉伸应力。同时，粗杆 I 受到压缩，在粗杆 I 中产生压缩应力。这样，在铸件中就形成了暂时的内应力，如图 1-8(b) 所示。

但此时，粗杆 I 仍处于塑性状态，铸件中的这个暂时内应力可通过粗杆 I 的微量塑性变形（即粗杆 I 被压短）而消失。变形以后，两杆的长度相同，都变短了，两杆中的暂时内应力都消失，如图 1-8(c) 所示。

继续冷却，在 T_2-T_3 的冷却过程中，杆 I 和杆 II 的温度都低于 $t_{\text{临}}$ ，两杆都处于弹性状态。但此时粗杆 I 的温度仍然较高，还会继续收缩，细杆 II 的温度较低，收缩已基本停止。因此，粗杆 I 的收缩必然受到细杆 II 的强烈阻碍，细杆 II 通过顶板阻碍粗杆 I 的收缩，结果在粗杆 I 中产生拉应力，在细杆 II 中产生压应力，如图 1-8(d) 所示。

由上面的分析可以看出，热应力最终使铸件的厚壁部位或心部受拉伸。使薄壁部位或表面受压缩。铸件的壁厚差别越大，合金的线收缩率越高，弹性模量越大，所产生的热应力就越大。

预防热应力可采用同时凝固原则。对于图 1-9 所示的铸件，正常凝固时薄壁部分冷却快，温度低；厚壁部分冷却慢，温度高。为了减少各个部位之间的温度差，可将浇口开在薄壁处，使薄壁处的铸型在浇注时较厚壁处升温快，使薄壁处的冷却减缓。有时，为加快厚壁处的冷却速度，常在厚壁处安放冷铁，使厚壁处的冷却速度加快。通过这样的方法，使整个铸件均匀冷却，从而减少内应力。这种将浇口开在薄壁处或在厚壁处安放冷铁，以实现铸件均匀冷却，减少内应力的措施，称为同时凝固原则。

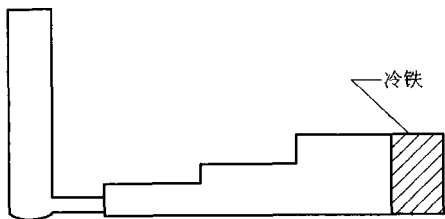


图 1-9 铸件的同时凝固原则

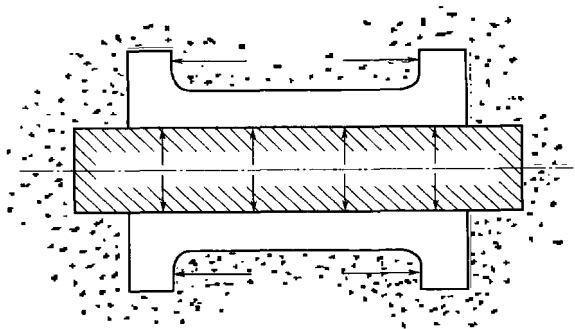


图 1-10 机械应力

(2) 机械应力

机械应力指铸件在固态收缩时，因受到铸型、型芯、浇冒口等外力的阻碍而产生的应力。例如图 1-10 所示的铸件，由于整个铸件沿着轴线方向的收缩受到中间部位型砂的阻碍，在铸件中产生拉伸应力。同时，由于铸件沿着径向的收缩受到型芯的阻碍，在铸件中产生剪切应力。机械应力的存在是暂时的，在铸件落砂之后，这种内应力便可自行消除。

1.1.4.2 铸件的变形和防止

(1) 铸件的变形

具有残余内应力的铸件是不稳定的，将自发地通过变形来减缓内应力，以趋于稳定状态。厚壁部分之所以受到拉伸产生拉伸应力，是由于其收缩受到阻碍造成的，因此，只有使原来受拉伸的部位产生压缩变形，原来受压缩的部位产生拉伸变形，铸件中的内应力才能减

少或消除。

(2) 减小变形的措施

为防止和减小铸件产生的变形，可采取以下几方面的措施。

i. 在设计铸件时，应尽可能地使铸件壁厚均匀，形状对称。

ii. 采用同时凝固的方法，以便使铸件均匀冷却，减小内应力。

iii. 采用“反变形工艺”。比如对于凝固后产生向上凸的变形铸件，在制作模型时，预先作出一个相当于铸件变形量的向下凹的反变形量，以抵消铸件的变形。

iv. 进行时效处理。铸件变形以后，内应力有所减缓，但并没有完全消除。铸件经机械加工后，由于内应力的重新分布，还可能产生微量的变形，影响零件的精度。因此，对于不允许发生变形的重要铸件，必须进行时效处理，以便消除内应力。

时效处理可分为自然时效和人工时效。自然时效是指将铸件放在露天场地半年以上，使其缓慢地发生塑性变形，从而使内应力消除。人工时效是将铸件加热到 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，对铸件进行去应力退火。

人工时效较自然时效速度快，内应力去除也比较彻底，所以应用广泛。时效处理应该在粗加工之后进行。这样，一方面可以消除其原有应力，又可将粗加工时产生的内应力一并消除。

1.1.4.3 铸件的裂纹与防止

当铸造应力超过合金的强度极限时，铸件便产生裂纹。裂纹是铸件的严重缺陷，常会导致整个铸件的报废。按裂纹产生的温度不同，可分为热裂纹和冷裂纹两种。

(1) 热裂纹

热裂纹是在凝固后期的高温下形成的，此时合金的强度很低，当铸件固态收缩受到铸型或型芯的阻碍，所产生的机械应力超过了该温度下合金的强度极限时，便产生热裂纹。热裂纹的特征是裂纹短、缝隙宽、形状曲折、缝内呈氧化色，裂口沿晶界产生和发展。热裂纹是铸钢件、可锻铸铁件和某些铝合金铸件常见的缺陷。

影响热裂纹形成的主要因素有以下两个方面。

① 合金的性质 合金的结晶温度范围越宽，液固两相区的绝对收缩量越大，合金产生热裂纹的倾向也越大。在常用合金中，铸钢、铸铝和可锻铸铁的热裂倾向较大。另外，钢铁中存在的 S、P 由于可形成低熔点的共晶体，会使结晶温度范围扩大。所以 P、S 含量越多，热裂倾向越大。

② 铸型阻力 由于热裂纹是由于铸件的线收缩受到铸型或型芯的阻碍而产生的，所以铸型和型砂的退让性越好，所形成的机械应力越小，铸件形成热裂纹的可能性也就越小。

为防止铸件的热裂，应合理设计铸件结构，改善型砂、芯砂的退让性，严格控制钢和铸铁中的硫含量、选用收缩性小的合金等。

(2) 冷裂纹

冷裂纹是在较低温度下产生的，常出现在受拉应力和有应力集中的部位。其特征是裂纹细小，呈连续直线或圆滑曲线状，缝内表面光滑，具有金属光泽或呈轻微氧化色，裂口常穿过晶粒延伸到整个断面。

铸件的冷裂倾向与铸造内应力的的大小密切相关。不同合金的冷裂倾向不同。灰口铸铁，白口铸铁，高锰钢等塑性差的合金容易产生冷裂纹。塑性较好的合金冷裂纹倾向较小。

为防止铸件的冷裂，一方面应设法减小铸造内应力，另一方面还要控制钢、铁中的含磷

量。因为随着含 P 量的增加，冲击韧性将急剧下降，冷裂纹倾向将明显增加。

1.1.5 合金的吸气性

合金在熔炼和浇注时吸收气体的性能称为合金的吸气性。合金液所吸收的气体如不能及时逸出而停留在合金液内，则使铸件产生气孔缺陷。气孔的存在使铸件的力学性能下降，特别是使铸件的冲击韧性和强度显著下降。由于气孔所造成的废品常常占到铸造废品总数的三分之一左右。

按照气体的来源，气孔可分为侵入气孔、析出气孔和反应气孔三类。

(1) 侵入气孔

侵入气孔是由于砂型或砂芯受热而产生的气体侵入金属液内部而形成的。其特征是：在铸件上表面或砂型和砂芯表面附近有呈梨形或椭圆形的较大孔洞，且表面光滑。侵入铸件中的气体主要来自造型材料中的水分、黏结剂和各种附加物。

预防侵入气孔的基本途径是降低型砂和芯砂的发气量，增加铸型的排气能力，并正确设计浇冒口系统。

(2) 析出气孔

合金在熔炼和浇注过程中因接触气体而使氢、氧、氮等气体溶解在其中，且其溶解度随温度的升高而增加，当达到合金熔点时急剧上升。当合金液冷凝时，气体在合金中的溶解度逐渐下降而以气泡形式析出。气泡如不能及时上浮逸出，便会在铸件中形成析出气孔。析出气孔在铝合金中最为常见。

析出气孔的特征是体积较小，大面积分布于铸件截面上。

防止析出气孔的主要途径是：必须严格控制炉料质量、熔炼过程和浇注工艺。如炉料不应含水、氧化物和油污；熔炼时要加覆盖剂，尽量缩短熔炼时间；避免剧烈搅拌；合理设计浇注系统等。

(3) 反应气孔

合金液与型砂中的水分、冷铁、芯撑之间或合金内部某些元素、化合物之间发生化学反应产生气体而形成的气孔称为反应气孔。

反应气孔的特征是数量多而尺寸小（孔径一般为 1~3mm），大多数产生于铸件表皮下 1~2mm 处，形状多呈针状（有的呈球状），故又称皮下针孔或皮下气孔。

反应气孔的形成过程如下。冷铁或型芯撑的表面如果有锈蚀，就会与灼热的金属液接触发生化学反应，生成 CO 气体，生成的 CO 气体在冷铁、型芯撑附近形成气孔。这个化学反应为：



防止反应气孔的主要途径保证冷铁、型芯撑的表面不得有锈蚀、油污等，并保持干燥。

1.1.6 铸造缺陷及质量控制

1.1.6.1 铸造缺陷

铸件清理后要进行质量检验。根据产品要求不同，检验的项目主要有外观、尺寸、金相组织、力学性能、化学成分和内部缺陷等。其中最基本的是外观检验和内部缺陷检验。由于铸造工序繁多，影响铸件质量的因素比较复杂，因此铸件的缺陷几乎难以完全避免，废品率较其他金属加工方法要高。

铸造缺陷种类很多，常见铸造缺陷的特征及产生的主要原因见表 1-2。