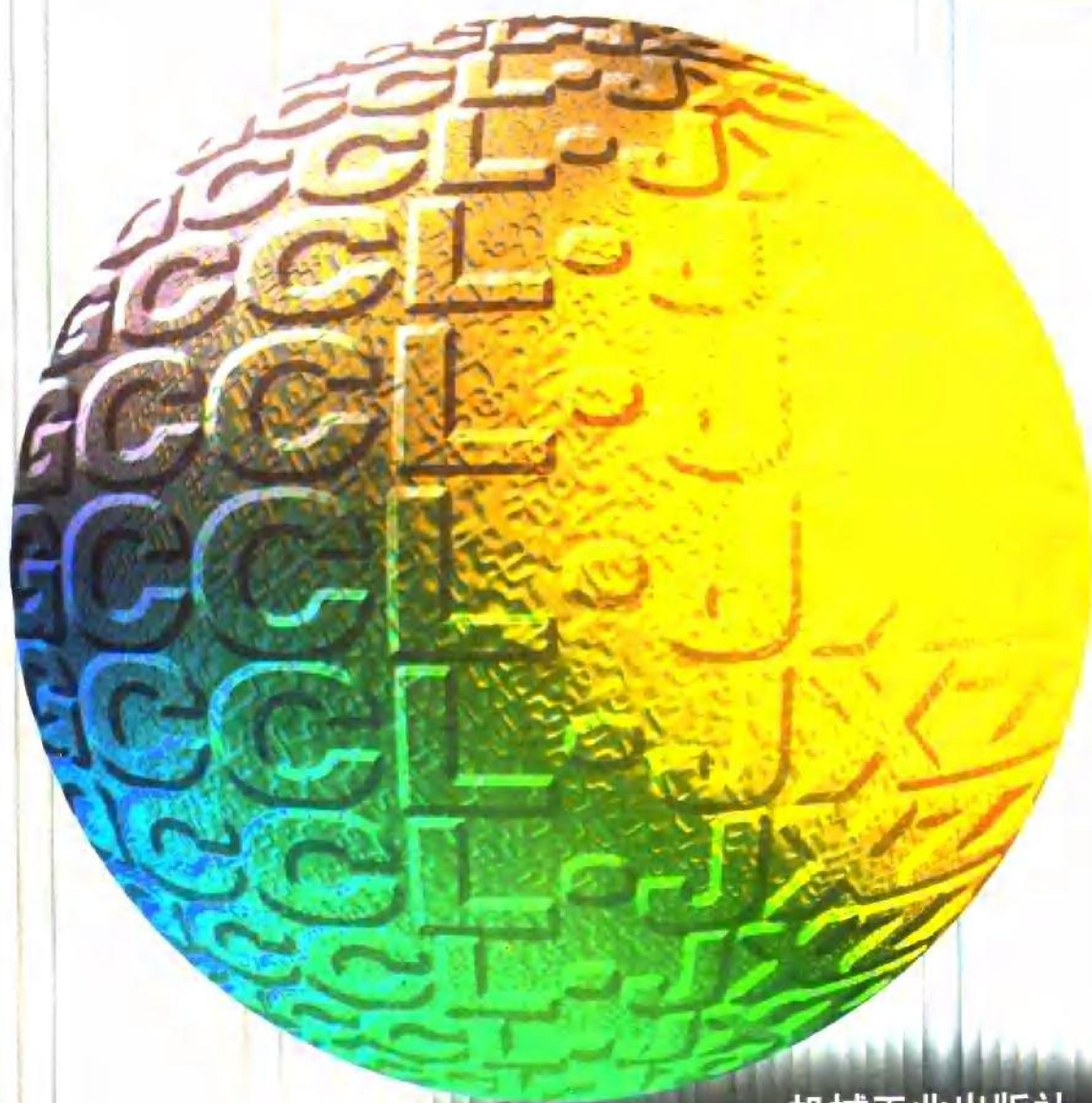


工程材料及 机械制造基础

II

(热加工工艺基础)

王俊昌 王荣声 主编



机械工业出版社

工程材料及机械制造基础 II

(热加工工艺基础)

王俊昌 王荣声 主 编
刘景武 谭建波 副主编

ND30/52



机械工业出版社

本书是根据国家教委高等教育司 1995 年 5 月 3 日印发的《教高司〔1995〕82 号》通知,关于《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》(机械类专业适用)中“工程材料及机械制造基础Ⅱ(热加工工艺基础)”部分的指导精神编写的。内容包括:铸造、锻压、焊接、毛坯选择与质量检验四章及实验指导。各章后附有复习思考题。

本教材可作为高等工科院校机械类本科教材,也可作为机械类专科教材,并可供成人高等教育及工程技术人员选用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及机械制造基础Ⅱ:热加工工艺基础/王俊昌,
王荣声主编. —北京:机械工业出版社, 1998. 2
ISBN 7-111-05878-X

I. 工… II. ①王…②王… III. ①工程材料②机械制造工艺
③热处理-工艺 N. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 17655 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑:吴天培 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟
封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1998 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·12.25 印张·295 千字
0 001—5 000 册
定价:18.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

工程材料及机械制造基础系列教材

编 委 会

主 任 委 员 赵三元 李凤昌

副主任委员 (按姓氏笔划排列)

王春旭 邝朴生 李振兴 裴鸿昌

委 员 (按姓氏笔划排列)

王荣声 王俊昌 田振祥 史廷春

孙维连 孙新学 安 墀 刘景武

陈玉琨 林 兵 赵云筑 张晓茹

相瑜才 梁建明 彭泽田 谭建波

前 言

本教材是依据国家教委高教司(1995)82号通知精神编写的《工程材料及机械制造基础》系列教材(共四册)之一。与之配套的有机械工业出版社出版的《工程材料及机械制造基础Ⅰ(工程材料)》(相瑜才、孙维连主编),《工程材料及机械制造基础Ⅱ(机械加工工艺基础)》(陈玉琨、赵云筑主编),《工程材料及机械制造基础(实习教材)》(王荣声、陈玉琨主编)。

本书内容包括:铸造、锻压、焊接、毛坯选择与质量检验等四章及实验指导。使用本书时可根据各院校、各专业的特点进行必要的调整或增删。

为适应高等学校工科专业教学改革的要求,按照“基本要求”的“了解”、“熟悉”、“掌握”的指导精神,在传统的金属工艺学教材基础上,作了以下各方面的调整。

1. 注意了系列教材各分册内容的分工、衔接和配合,避免不必要的重复或脱节。有关工种的操作、设备、工具等的叙述,尽量安排在实习教材中,实习教材中未编入部分本书做了适当补充。讲课应安排在金工实习之后。

2. 侧重于应用理论和应用技术,强调理论联系实际,加强综合、归纳、运用和培养能力的结合,增加了插图、表格,力求便于自学。

3. 将实验编入教材,并尝试性地将部分实验移至实习教材中去。各章后附有适当深度的复习思考题。

4. 注意了各种加工的经济性分析,以培养学生的经济观点,适应市场经济。

5. 全书全部采用最新国家标准。

本书由王俊昌、王荣声任主编,刘景武、谭建波任副主编,孙新学、弋景刚参加了编写工作。

全书由田振祥教授担任主审。

本书在编写过程中,得到了全国金工研究会、河北省金工研究会,有关院校及厂矿企业各界前辈及同仁的大力支持和协助,在此一并表示感谢。

由于编者的水平有限,书中难免出现错误及不妥之处,恳请广大读者和有关同志批评指正。

目 录

前言

第一章 铸造 1

第一节 合金的铸造性能 1

第二节 常用合金铸件的生产 15

第三节 砂型铸造 34

第四节 特种铸造 54

第五节 零件结构的铸造工艺性 63

复习思考题 71

第二章 锻压 77

第一节 金属的锻造性能 79

第二节 自由锻 85

第三节 模锻 98

第四节 冲压 113

第五节 少无切削锻压工艺简介 124

第六节 各种锻压加工方法的比较 129

复习思考题 130

第三章 焊接 134

第一节 焊接的基本原理 135

第二节 焊条电弧焊 143

第三节 其它焊接方法 147

第四节 压焊与钎焊 154

第五节 堆焊与热喷涂 158

第六节 常用金属材料的焊接 159

第七节 焊接结构设计 165

复习思考题 173

第四章 毛坯的选择与质量检验 177

第一节 毛坯选择应考虑的问题 177

第二节 常用机械零件毛坯的成形方法 178

第三节 毛坯选择举例 180

第四节 毛坯质量检验 181

复习思考题 183

实验 184

实验一 铸造合金热应力的测定 184

实验二 冷变形强化及再结晶实验 185

实验三 冲压模具结构分析和拆装 186

实验四 焊接接头组织和性能实验 186

参考文献 187

第一章 铸 造

熔炼金属，制造铸型，并将熔融金属浇入铸型，凝固后获得一定形状和性能铸件的成形方法，称为铸造。铸造是一门应用科学，广泛用于生产机器零件或毛坯，其实质是液态金属逐步冷却凝固而成形，具有如下优点：

- 1) 可以生产出形状复杂，特别是具有复杂内腔的零件毛坯，如各种箱体、床身、机架等。
- 2) 铸造生产的适应性广，工艺灵活性大。工业上常用的金属材料均可用来进行铸造，铸件的重量可由几克到几百吨，壁厚可由 0.5mm 到 1m 左右。
- 3) 铸造用原材料大都来源广泛，价格低廉，并可直接利用废机件，故铸件成本较低。

但是，液态成形也给铸件带来某些缺点，如铸造组织疏松、晶粒粗大，内部易产生缩孔、缩松、气孔等缺陷。因此，铸件的力学性能，特别是冲击韧性低于同种材料的锻件。加之铸造工序多，且难于精确控制，使得铸件质量不够稳定。同时铸造的劳动条件差。

尽管铸造存在着上述缺点，然而其优点是显然的，故铸造在工业生产中得到广泛应用。现代各类机器设备中，铸件所占的比例很大，如在机床、内燃机中，铸件占机器总重的 70%~80%，在一些重型机械中，铸件可占总重的 90% 以上。

我国铸造生产有着悠久的历史。早在三千多年前，青铜铸器已有应用，二千五百年前，铸铁工具已经相当普遍。例如，始建于公元 856 年的河北正定隆兴寺内的铜佛菩萨，高 22m 余，42 臂，重 120t，是我国古代最大的佛像，且造型生动逼真，是一尊难得的佛教艺术珍品；再如制造于公元 953 年的河北沧州铁狮子，身高 5.4m，长 6.5m，宽 3m，重 40t，颈下及体外铸有“狮子王”“大周广顺二年铸”等字样，腹内还铸有金刚经文，雄伟壮观，具有极高的艺术价值，充分体现了我国古代劳动人民精湛的铸造技艺。大量历史文物显示出我国古代劳动人民在世界铸造史上作出的卓越贡献，如泥型、金属型、失蜡型三大铸造技术就是我国的创造。

随着铸造技术的发展，除了机器制造业外，在公共设施、生活用品、工艺美术和建筑等国民经济各个领域，也广泛采用着各种铸件。因此，学习铸造技术，研究铸造理论，发展铸造事业是非常重要的。

第一节 合金的铸造性能

铸造生产的目的在于制造合格的铸件，而这一目的的顺利实现，合金的铸造性能起着决定性的影响。铸造性能是合金在铸造生产中所表现出来的工艺性能，它是合金的流动性、收缩性、偏析和吸气性等性能的综合体现。其中流动性和收缩性对铸件的质量影响最大。

一、流动性和充型能力

(一) 合金的流动性

1. 流动性 流动性是指熔融金属的流动能力。它是影响熔融金属充型能力的因素之一。

流动性好的合金，易于充满薄而复杂的铸型型腔，便于浇注出轮廓清晰的铸件，减少浇不到、冷隔等缺陷；有利于液体金属中气体和非金属夹杂物的上浮与排出，减少气孔、夹杂缺陷的产生；有利于对合金冷凝过程中所产生的收缩进行补偿，从而减少铸件中诸如缩孔、缩松及凝固后期所产生的热裂纹等铸造缺陷。因此，在铸件设计、选择合金和制定铸造工艺时，常常需要考虑合金的流动性。

合金流动性的好坏，通常以“螺旋形流动性试样”的长度来衡量，见图 1-1。将金属液体浇入螺旋形试样铸型中，在相同的浇注条件下，合金的流动性愈好，所浇出的试样愈长。

2. 流动性的影响因素 流动性是合金本身的属性，其影响因素很多，主要包括合金的种类、成分、结晶特征及其它物理性能。

(1) 合金的种类 表 1-1 是常用合金流动性的试验数值，可以看出，不同种类的合金，具有不同的螺旋线长度。其中灰铸铁的流动性最好，硅黄铜、铝硅合金次之，而铸钢的流动性最差。

(2) 化学成分和结晶特征 纯金属和共晶成分的合金，凝固是由铸件壁表面向中心逐层推进，凝固后的表面较平滑，对未凝固合金液体的流动阻力较小，所以流动性好，见图 1-2a。

在一定凝固温度范围内结晶的亚共晶合金，凝固时铸件壁内存在一个较宽的既有液体又有树枝状晶体的两相区。凝固温度范围越宽，则枝状晶越发达，对金属流动的阻力越大，金属的流动性就越差。这种凝固方式的示意图见图 1-2b。

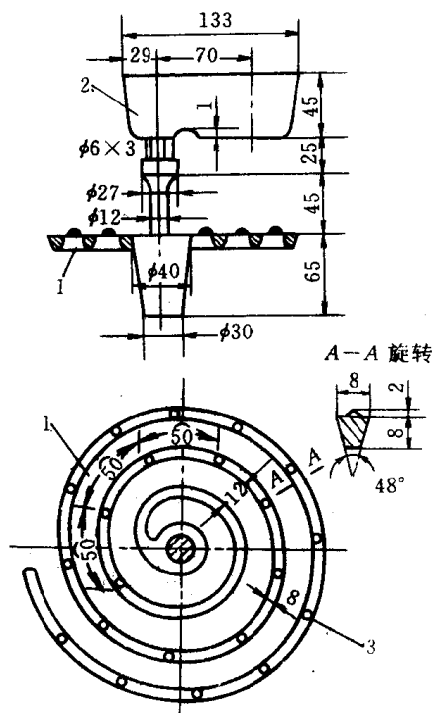


图 1-1 螺旋形试样

1—试样铸件 2—浇口
3—试样凸点

表 1-1 常用合金的流动性

合金种类及化学成分	铸型种类	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
铸铁 $w_C + Si = 6.2\%$ $w_C + Si = 5.9\%$ $w_C + Si = 5.2\%$ $w_C + Si = 4.2\%$	砂型	1300	1800
			1300
			1000
			600
铸钢 $w_C = 0.45\%$	砂型	1600	100
		1640	200
铝硅合金 (硅铝明)	金属型/300℃	680~720	700~800
镁合金 (含 Al 及 Zn)	砂型	700	400~600
锡青铜 ($w_{Sn} = 10\%$ $w_{Zn} = 2\%$)	砂型	1040	420
硅黄铜 ($w_{Si} = 1.5\% \sim 4.5\%$)	砂型	1100	1000

① w 表示质量分数。

铁碳合金的流动性与相图的关系，见图1-3。图中表明，纯铁和共晶铸铁的流动性最好，亚共晶铸铁和碳素钢随着凝固温度范围增加，流动性变差。

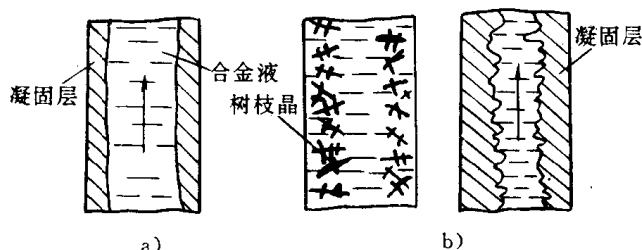


图 1-2 不同结晶特征的合金的流动性
a) 纯金属 b) 结晶温度范围宽的合金

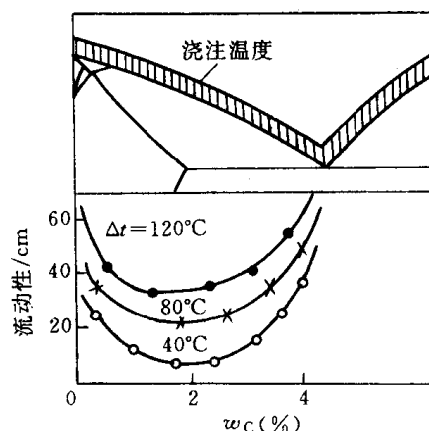


图 1-3 铁碳合金的流动性与相图的关系
 Δt —温度梯度

此外，合金液的粘度、结晶潜热、热导率等物理性能对流动性都有影响，如高铬耐热钢液因含较多的 Cr_2O_3 ，使粘度显著增大，流动性很差。

(二) 合金的充型能力

如前所述，合金的流动性是金属本身的属性，不依人们的意志而改变，材料一经选定，其本身的流动性即已确定。而在实际生产中，人们更加关注的是合金的另一性能——充型能力。

1. 充型能力 考虑铸型及工艺因素影响的熔融金属流动性叫合金的充型能力，即液态合金充满铸型型腔，获得形状完整、轮廓清晰铸件的能力。

在液态合金的充型过程中，有时伴有结晶发生。若充型能力不足，已形成的晶粒可能将金属流动的通道堵塞，产生浇不到、冷隔等类缺陷，造成废品。

2. 充型能力的影响因素 合金的流动性对充型能力的影响最大，此外，铸型和工艺条件也会改变合金的充型能力。

(1) 铸型填充条件 液态合金充型时，铸型的阻力将阻碍合金液的流动，而铸型与合金液之间的热交换又将影响合金保持流动的时间。故铸型对充型能力有显著影响：

1) 铸型的蓄热能力 即铸型从金属液中吸收和储存热量的能力。铸型的热导率和质量热容越大，对液态合金的激冷作用越强，合金的充型能力就越差。如金属型铸造较砂型铸造容易产生浇不到等缺陷。

2) 铸型温度 提高铸型温度，减少铸型和金属液之间的温差，减缓了冷却速度，可提高合金液的充型能力。

3) 铸型中的气体 在金属液的热作用下，型腔中的气体膨胀，型砂中的水分汽化，有机物燃烧，都将增加型腔内的压力，如果铸型的透气性差，将阻碍金属液的充填，导致充型能力下降。

(2) 浇注条件

1) 浇注温度 浇注温度对合金的充型能力有着决定性的影响。在一定范围内，随着浇注温度的提高，合金液的粘度下降，且在铸型中保持流动的时间增长，充型能力增加。因此，对薄壁铸件或流动性较差的合金，为防止浇不到和冷隔等缺陷的产生，可适当提高浇注温度。但

浇注温度过高,液态合金的收缩增大,吸气量增加,氧化严重,容易导致产生缩孔、缩松、气孔、粘砂、粗晶等缺陷,故在保证充型能力足够的前提下,尽量降低浇注温度。通常,灰铸铁的浇注温度为 $1230^{\circ}\text{C} \sim 1380^{\circ}\text{C}$,铸钢为 $1520^{\circ}\text{C} \sim 1620^{\circ}\text{C}$,铝合金为 $680^{\circ}\text{C} \sim 780^{\circ}\text{C}$ 。复杂薄壁件取上限,厚大件取下限。

2) 充型压力 液态合金在流动方向上所受的壓力越大,其充型能力越好。砂型铸造时,充型压力是由直浇道所产生的静压力取得的,故增加直浇道的高度可有效地提高充型能力。特种铸造中(压力铸造、低压铸造和离心铸造等),是用人为加压的方法使充型压力增大,充型能力提高。

此外,浇注系统结构越复杂,流动阻力越大,充型能力就越低。

(3) 铸件结构 铸件的结构对充型能力也有相当的影响。铸件壁厚过小,壁厚急剧变化,结构复杂,有大的水平面时,都将会影响合金的充型能力。

综上所述,在铸造生产中,为获得健全无缺陷铸件,应尽量选用流动性好的合金,同时采取措施提高合金的充型能力,如提高浇注温度和压头、合理设计浇注系统和改进铸件结构等。

二、合金的凝固与收缩

浇入铸型的金属液在其后的冷却凝固过程中,体积将会缩减,如果这种收缩得不到及时地补足,将在铸件中产生缩孔或缩松缺陷。同时,铸件中的热裂、析出性气孔、偏析、非金属夹杂等缺陷也都与合金的凝固过程有着密切的关系。为防止上述缺陷,提高铸件质量,认识合金的凝固规律具有十分重要的意义。

(一) 铸件的凝固方式及影响因素

1. 铸件的凝固方式 铸造合金大都在一定温度范围内(状态图中的液相线到固相线之间)结晶凝固。在其凝固过程中,一般存有三个区域,即液相区、固相区和液固两相区(又称凝固区),其中液固两相区对铸件质量的影响最显著。通常根据液固两相区的宽窄将铸件的凝固方式分为逐层凝固方式、糊状凝固方式和中间凝固方式。

(1) 逐层凝固方式 恒温下结晶的金属或合金,在凝固过程中,其铸件断面上的凝固区域宽度趋于零,断面上的固相和液相由一条界线(凝固前沿)清楚地分开,见图 1-4a。随着

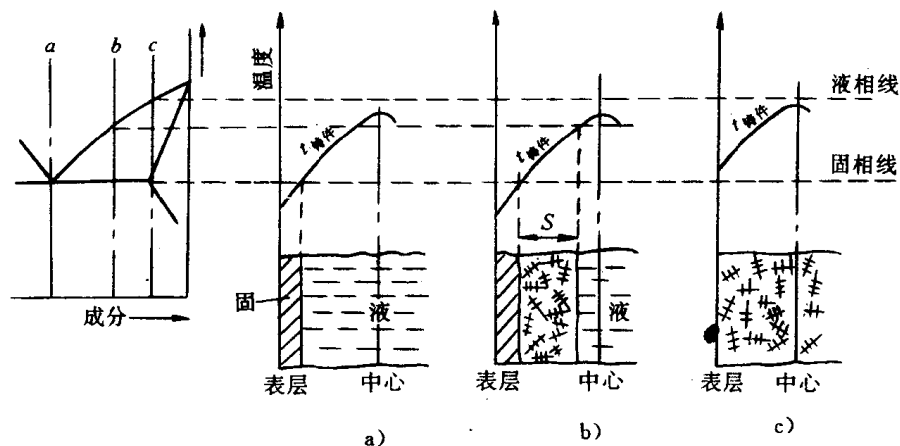


图 1-4 铸件的凝固方式

a) 逐层凝固 b) 中间凝固 c) 糊状凝固

温度的下降，固相层不断加厚，直达铸件中心，这种凝固方式称为逐层凝固方式。当铸件断面上的凝固区域很窄时，也属于逐层凝固方式。

常见合金如灰铸铁、低碳钢、工业纯铜、工业纯铝、共晶铝硅合金及某些黄铜都属于逐层凝固的合金。

呈逐层凝固方式的合金，其凝固前沿与液态金属接触（或凝固区域很窄），凝固阶段发生的收缩能及时得到液体的补足，故易获得组织致密的铸件；同时，如果凝固层因收缩受阻而产生了晶间裂纹，也很容易得到未凝固金属液的填补而弥合起来，从而大大减少了铸件的热裂缺陷；另外，呈逐层凝固方式的合金，具有良好的流动性，便于浇注出轮廓清晰的铸件。

(2) 糊状凝固方式 如果合金的凝固温度范围很宽，或铸件断面温度曲线较平坦，则其凝固区很宽，甚至在铸件凝固的某段时间内，液固并存的凝固区贯穿整个铸件断面，见图 1-4c。由于这种凝固方式与水泥相类似，即先呈糊状而后固化，故称糊状凝固方式。球墨铸铁、高碳钢、锡青铜和某些黄铜等都是糊状凝固的合金。

呈糊状凝固的铸件，当液固两相共存的糊状物变得粘稠后，树枝状等轴晶把尚未凝固的液体分割成若干互不相通的小熔池。这些液体结晶凝固时，其体积的缩减难于得到补充，于是在铸件中留下了许多分散的小孔洞（缩松）。因此通常认为呈糊状凝固方式的合金难以获得组织致密的铸件。另一方面，糊状凝固的合金树枝晶较发达，且过早地连成骨架，并开始线收缩，铸件易产生热裂。同时液体中较发达的枝晶增大了流动阻力，使合金的流动性降低。

(3) 中间凝固方式 大多数合金的凝固介于逐层凝固和糊状凝固之间（图 1-4b），称为中间凝固方式。中碳钢、高锰钢、白口铸铁等具有中间凝固方式。

2. 凝固方式的影响因素 影响铸件凝固方式的主要因素是合金的凝固温度范围和铸件结晶时的温度梯度^①。

(1) 合金凝固温度范围的影响 在铸件断面温度梯度相近的情况下，凝固区域的宽度取决于合金的凝固温度范围。凝固区域的宽度可根据合金状态图上液相线和固相线之间的垂直距离直接判断，如两条相线交叉在一起（纯金属或共晶成分合金），或间距很小，则金属趋于逐层凝固；如两条相线之间的距离很大，则趋于糊状凝固；如两条相线间距离较小，则趋于中间凝固方式。

(2) 铸件温度梯度的影响 当合金的化学成分确定之后，其凝固温度范围即已确定，铸件断面的凝固区域宽度则决定于铸件的温度梯度。较大的温度梯度可以使凝固区域变窄

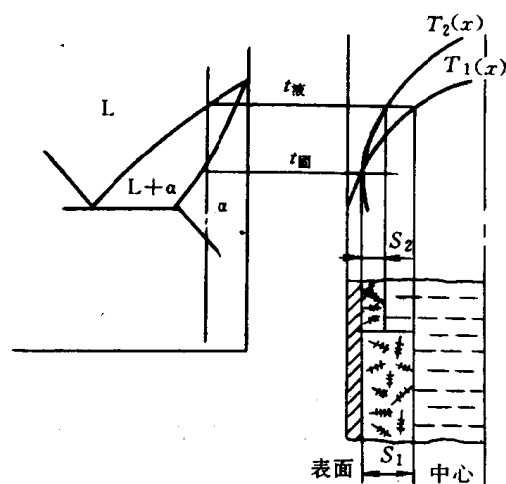


图 1-5 温度梯度对凝固区域的影响

① 温度场内任一点温度与沿等温面（线）法线方向的任一点单位距离之间的温度差称温度梯度，常以单位距离若干℃表示。

(图 1-5), 如加大铸型的蓄热能力和激冷能力以及降低金属液的浇注温度, 都可以增大铸件断面的温度梯度, 使合金的凝固方式向逐层凝固转化; 反之, 铸件的凝固方式则向糊状凝固转化。故温度梯度是凝固方式的重要调节因素。

通过以上分析可以看出, 倾向于逐层凝固的合金便于铸造, 容易生产出优质铸件, 故应尽量选用; 当必须选用倾向于糊状凝固的合金时, 则可考虑采用适当的工艺措施, 提高铸件断面的温度梯度, 以减小其凝固区域。

(二) 铸造合金的收缩

铸造合金从液态冷却到室温的过程中, 其体积和尺寸缩减的现象称为收缩。收缩是铸造合金的物理性能, 是多种铸造缺陷(缩孔、缩松、残余内应力、变形、裂纹)产生的基本原因。

合金的收缩量通常用体收缩率或线收缩率来表示。当合金由温度 t_0 下降到 t_1 时, 其体收缩率和线收缩率分别为:

$$\epsilon_V = \frac{V_{\text{模}} - V_{\text{铸件}}}{V_{\text{模}}} \times 100\% = \alpha_V(t_0 - t_1) \times 100\%$$

$$\epsilon_L = \frac{L_{\text{模}} - L_{\text{铸件}}}{L_{\text{模}}} \times 100\% = \alpha_L(t_0 - t_1) \times 100\%$$

式中

ϵ_V ——体收缩率;

ϵ_L ——线收缩率;

$V_{\text{模}}、V_{\text{铸件}}$ ——合金在 $t_0、t_1$ 时的体积/ cm^3 ;

$L_{\text{模}}、L_{\text{铸件}}$ ——合金在 $t_0、t_1$ 时的长度/ cm ;

$\alpha_V、\alpha_L$ ——合金在 t_0 至 t_1 温度范围内的体胀系数和线胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)。

铸造合金从浇注、凝固、冷却到室温的过程中, 其收缩经历如下三个阶段:

1. 液态收缩 金属在液态时由于温度降低而发生的体积收缩。此时的收缩表现为型腔内液面的降低, 合金液体的过热度越大, 则液态收缩也越大。为减小合金的液态收缩及吸气, 兼顾充型能力, 铸造合金的浇注温度一般控制在高于液相线 $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。

2. 凝固收缩 熔融金属在凝固阶段的体积收缩。纯金属及恒温结晶的金属, 其凝固收缩单纯由于液—固相变引起; 具有一定结晶温度范围的合金, 则除液—固相变引起的收缩之外, 还有因凝固阶段温度下降产生的收缩。液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔缩松的基本原因。

3. 固态收缩 金属在固态由于温度降低而发生的体积收缩。固态体积收缩表现为三个方向线尺寸的缩小, 即三个方向的线收缩。所以固态收缩一般用线收缩率来表示。但线收缩并非从金属的固相线温度开始, 而是从析出的枝晶搭成骨架时开始, 这一温度称为线收缩起始温度。线收缩对铸件的形状和尺寸精度影响很大, 是铸造应力、变形和裂纹等缺陷产生的基本原因。

(三) 影响收缩的因素

合金的总体积收缩为液态收缩、凝固收缩和固态收缩之和, 其主要影响因素有合金的化学成分、浇注温度、铸型结构和铸型条件等。

1. 化学成分 不同成分的合金其收缩率一般也不相同。常见铁碳合金的体积收缩率, 见表 1-2。

表 1-2 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	凝固收缩	固态收缩	总体积收缩
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.5	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

在常用铸造合金中铸钢的收缩最大，灰铸铁最小。这是因为灰铸铁结晶时所含碳大多以石墨形态析出，石墨质量体积大，使铸铁体积膨胀（每析出质量分数为1%的石墨，铸铁的体积约增加2%），因而抵消了一部分收缩。凡有利于石墨形成的元素都将减小铸铁的收缩。

2. 浇注温度 合金浇注温度越高，过热度越大，液体收缩越大。

3. 铸件结构与铸型条件 铸件冷却收缩时，因其形状、尺寸的不同，各部分的冷却速度不同，导致收缩不一致，且互相阻碍，又加之铸型和型芯对铸件收缩的阻力，故铸件的实际收缩率总是小于其自由收缩率。这种阻力越大，铸件的实际收缩率就越小。

(四) 收缩对铸件质量的影响

1. 缩孔和缩松 铸件凝固过程中，其液态收缩和凝固收缩所减少的体积如果得不到及时的补充，则在铸件最后凝固的部位形成一些孔洞。大而集中的孔洞叫缩孔，细小而分散的孔洞叫缩松。缩孔和缩松的形成，降低了铸件的力学性能和气密性，严重时可能使铸件成为废品。

(1) 缩孔的形成 缩孔总是出现在铸件上部或最后凝固的部位，其外形特征是：内表面粗糙，形状不规则，多近于倒圆锥形。通常缩孔隐藏于铸件的内部，有时经切削加工才能暴露出来。

纯金属和接近共晶成分的金属易形成缩孔，现以圆柱形铸件为例说明缩孔的形成过程，见图1-6。

液态金属充满铸型型腔，降温时发生液态收缩，其减小的体积可以从浇注系统中得到补偿，见图1-6a。

由于铸型的吸热，靠近型腔表面的金属率先凝固结壳，此时内浇道被冻结，见图1-6b。

体系向外界散失热量，凝固层加厚，但封闭于硬壳内的液体金属因液态收缩和补充凝固层的凝固收缩，体积减小，液面下降，硬壳内出现空隙，见图1-6c。

铸件凝固依次进行，硬壳层逐渐加厚，液面不断下降。此时若下降的液面得不到液体金属的补足，当铸件全部凝固后，在其上部形成了一个倒圆锥形的孔洞——缩孔，见图1-6d。

已形成缩孔的铸件继续冷却到室温时，由于固态收缩，铸件的外形轮廓有所减小，缩孔的体积亦有所减小，但缩孔体积与铸件体积的比值保持不变，缩孔被保留下来，见图1-6e。

由以上分析可看出，缩孔形成的主要原因是液态收缩和凝固收缩。

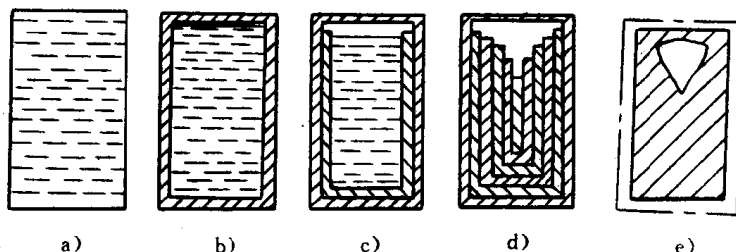


图 1-6 缩孔形成过程示意图

(2) 缩松的形成 如前所

述，缩松是分散在铸件某区域内的细小孔洞，可分为宏观缩松和显微缩松两种，见图 1-7。

宏观缩松多分布在铸件最后凝固的部位，如铸件的中心轴线处或缩孔的下方，用肉眼或借助于放大镜可以看出；显微缩松则是存在于晶粒之间的微小孔洞，这种缩松的分布面积更为广泛，有时遍及整个截面，只有借助显微镜才能观察出来。

缩松的形成过程是在铸件结晶后期，其厚大截面的内部、尤其是凝固范围较宽的合金有一个较宽的液固两相区，继续凝固时，晶体不断长大，直至互相接触，此时互相接触的固体将液相分割成许多封闭的小区，封闭区内的金属液凝固收缩时无法得到补充，故最后形成一个个微小的分散孔洞，即缩松。如同缩孔一样，形成缩松的主要原因也是液态收缩和凝固收缩所致。

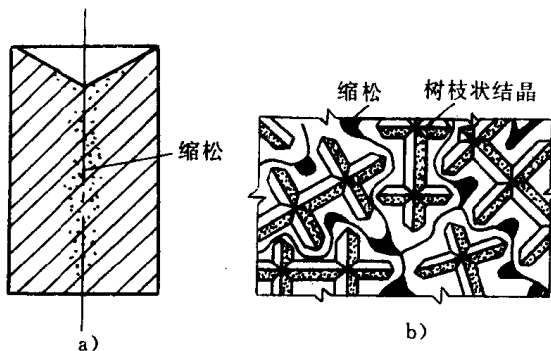


图 1-7 缩松示意图

a) 宏观缩松 b) 微观缩松

不同铸造合金形成缩孔和缩松的倾向不同。纯金属和接近共晶成分的合金倾向于逐层凝固方式，容易产生集中的缩孔；而凝固温度范围较宽的合金，如白口铸铁，则倾向于糊状凝固方式，容易产生分散的缩松。在生产中可以采取一定的工艺措施，控制铸件的凝固方式，使铸件中的缩孔和缩松在一定的范围内互相转化。

(3) 缩孔、缩松的防止措施 缩孔是铸件中的重要缺陷，它导致铸件的力学性能下降，甚至报废；而缩松虽对于一般铸件不做为缺陷对待，但对于气密性要求较高的铸件，例如承受液压和气压的铸件，则应设法将其减少，以防止铸件因发生渗漏等现象而报废。

产生缩孔、缩松的主要原因是液、凝固态收缩，而收缩是铸造合金的物理本性，在一定条件下其收缩容积是不能改变的。但生产中可以通过采取下列工艺措施，避免在铸件中产生缩孔、缩松缺陷。

1) 采用定向凝固的原则 所谓定向凝固，是使铸件按规定方向从一部分到另一部分逐渐凝固的过程。因为铸件中的缩孔总是出现在最后凝固的部位，采取工艺措施，在铸件最后凝固的部位加设冒口（冒口是指铸型中储存供补缩用熔融金属的空腔，也指该空腔中充填的金属）。使铸件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位向冒口的方向定向地凝固，见图 1-8。这样，铸件的每一部分的收缩都能得到稍后凝固部分的金属液的补充，而将由收缩造成的缩孔最后转移到冒口中去。冒口是铸件中的多余部分，切除后便得到无缩孔的致密铸件。

为了实现定向凝固，在设置冒口的同时还可在铸件的某些厚大部位设置冷铁，加大局部冷却速度，从而控制整个铸件的凝固顺序，使可能产生的缩孔向冒口方向转移，见图 1-9。

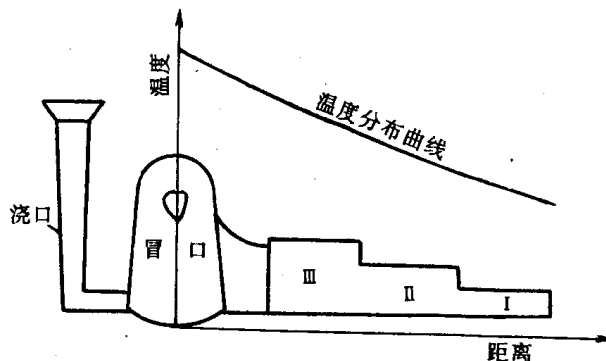


图 1-8 定向凝固原则示意图

冒口和冷铁的合理使用,可造成铸件的定向凝固,有效地消除缩孔、缩松(主要是宏观缩松)缺陷,故广泛应用于收缩大或壁厚差较大的易产生缩孔的铸件,如铸钢、高强度铸铁和可锻铸铁等。但定向凝固使铸件各部分的温差加大,容易导致变形、裂纹等缺陷的产生。

2) 合理确定铸件的浇注位置、内浇口位置及浇注工艺
铸件的浇注位置要符合铸件的凝固原则,例如,当铸件的壁厚不均匀需要补缩时,应从定向凝固原则出发,将铸件的厚大部位放到上面或侧面,以便安放冒口进行补缩。

内浇道的位置对铸件各部分的温度分布影响极大,应尽量使内浇道开设在铸件的厚壁处或靠近冒口,以加强铸件的定向凝固和冒口的补缩作用。

合理选择浇注温度和浇注速度,在不增加其它缺陷的前提下,尽量降低浇注温度和浇注速度,以减少金属的液态收缩量。

2. 铸造应力、变形和裂纹 在铸件的凝固以及以后的冷却过程中,随温度的不断降低,收缩不断发生,如果这种收缩受到阻碍,就会在铸件内产生应力,引起变形或开裂,这种缺陷的产生,将严重影响铸件的质量。

(1) 铸造应力的产生 铸造应力按其产生的原因可分为三种:

1) 热应力 铸件在凝固和冷却过程中,不同部位由于不均衡的收缩而引起的应力。若铸件的各部分壁厚不均匀,则各部分的冷却速度不同,在同一时期内铸件各部分的收缩不一致。但铸件各部分彼此相连,相互制约,不能自由收缩,因而产生热应力。

框形铸件热应力的形成过程,见图 1-10。

图示框形铸件由中间的粗杆 I、两侧完全相同的细杆 II 以及联系它们的上、下横梁所组成(图 1-10b)。铸件凝固时,粗细两杆均从同一温度 T_1 开始冷却。由于两杆厚度不一致,故其冷却速度不同,但最后两杆必定达到同一温度 T_0 (室温)。这必然是细杆 II 前期的冷却速度大于厚杆 I,而后期则是厚杆 I 的冷却速度大于细杆 II,两杆的固态冷却曲线见图 1-10a。

图 1-10a 中, T_k 是金属弹、塑性转变的临界温度(例如钢和铸铁为 $620^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$),合金在此温度之上处于塑性状态,其下则处于弹性状态。

① 塑性阶段 ($t_0 \sim t_1$): 此阶段粗杆 I 和细杆 II 均处于塑性状态。细杆降温较快,若能自由收缩,其收缩量必定会大于粗杆而变得比粗杆短;由于粗细杆之间有横梁联系,互相制约,两者只能收缩到同一长度。此时粗杆受压产生压应力,而细杆受拉产生拉应力(图 1-10c)。但由于此时粗细杆均处于塑性状态,所产生的瞬时应力通过其本身的塑性变形而自行消失,故此阶段铸件内不残留应力。

② 弹、塑性阶段 ($t_1 \sim t_2$): II 杆冷却较快,率先进入弹性状态,而 I 杆由于冷却速度较慢仍停留在塑性状态。此阶段粗、细杆的收缩亦不相同,通过横梁的作用,收缩快的杆内产生拉应力,收缩较小的产生压应力。但由于厚杆 I 处于塑性状态,在应力的作用下其发生微量塑性变形,以缓解所产生的应力,故此阶段铸件内亦不产生残留应力(图 10d)。

③ 弹性阶段 ($t_2 \sim t_3$): 当铸件冷却到更低温度时,粗、细杆均进入弹性状态。此时粗杆

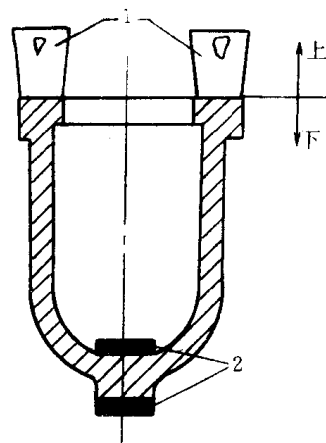


图 1-9 冒口、冷铁的应用

1—冒口 2—冷铁

I 的温度高于细杆 II，在其后的冷却过程中 I、II 杆降到同一温度时，粗杆的收缩量必定会大于细杆。但由于横梁的作用，I、II 杆必须保持同一长度，故粗杆的收缩受到细杆的强烈阻碍，其内产生拉应力，同时细杆内亦产生压应力。这种应力被保存在铸件内部，形成热应力（图 1-10e）。

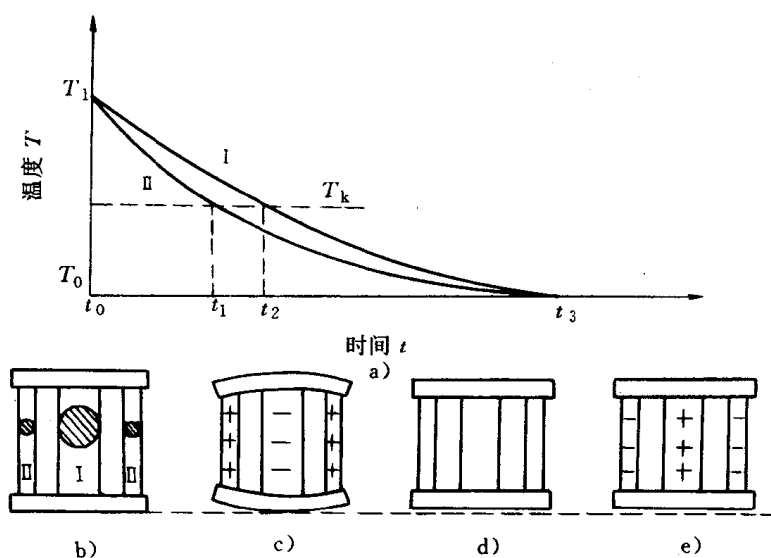


图 1-10 框形铸件热应力形成过程

+表示拉应力 -表示压应力

由以上分析可以看出，铸件壁厚不均匀，凝固冷却后其内将产生残余内应力。内应力的性质为：横截面积较大的厚大部分受到拉伸，产生拉应力；而横截面积较小的细薄部分受到压缩，产生压应力，铸件的壁厚差别越大，合金的线收缩率越高，弹性模量越大，则铸件内产生的热应力就越大。

2) 固态相变应力 铸件由于固态相变，各部分体积发生不均衡变化而引起的应力。铸件在凝固以后的冷却过程中如果有固态相变发生（例如钢和铸铁的共析转变），则晶体的体积就会发生变化。若此时铸件各部分温度均匀一致，则相变同时发生，可能不产生应力；若铸件壁厚不均，冷却过程中存在着温度差，则各部分的相变不同时发生，其体积变化不均衡而导致产生相变应力。

3) 收缩应力 铸件在固态收缩时，因受到铸型、型芯、浇冒口、箱挡等外力的阻碍而产生的应力。图 1-11 所示的套筒铸件中，筒身及内孔在固态收缩中将受到型砂和型芯的机械阻碍，其内部将产生拉应力。

收缩应力一般为临时应力，随着造成收缩应力原因的解除，如铸件落砂清理后，应力自行消除。但如果收缩应力大于相应温度下的强度极限时将会导致裂纹。

综上所述，铸造应力是热应力、固态相变应力和收缩应力的矢量和。根据不同情况，三种应力有时互相抵消，有时互相叠加，有的是临时性的，有的则残留下来。铸件铸出后存在于铸件不同部位的内应力称为残留应力。

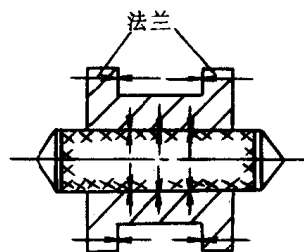


图 1-11 受砂型和型芯阻碍的铸件

(2) 铸造应力的防止和消除措施 铸造应力的存在对铸件的危害极大, 它将影响铸件的精度和使用寿命, 甚至导致铸件的变形和开裂。减小和消除铸造应力的方法如下:

1) 采用同时凝固的原则 铸造应力的产生, 总是和铸件不均匀地凝固冷却有关, 预防热应力的基本途径是尽量减少铸件各部位间的温度差, 采用同时凝固的原则。同时凝固是指通过设置冷铁、布置浇口位置等工艺措施, 使铸件各部分在凝固过程中温差尽可能小。如图 1-12 所示, 浇口开在薄壁处, 厚壁处安放冷铁, 从而实现同时凝固。

采用同时凝固原则可以有效地减小铸造应力, 同时不用或少用冒口, 工艺简单, 节省金属。但同时凝固往往使铸件中心区域出现缩松, 影响铸件的致密性。故同时凝固一般主要应用于收缩较小的合金, 如灰铸铁以及对气密性要求不高的铸件。

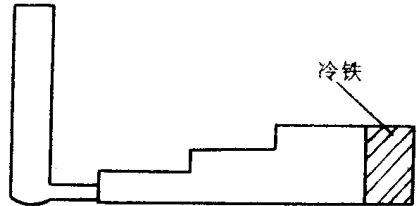


图 1-12 同时凝固原则

2) 提高铸型温度 使整个铸件缓慢冷却, 以减小铸型各部分的温度差。

3) 改善铸型和型芯的退让性 避免铸件在凝固后的冷却过程中受到机械阻碍。

4) 进行去应力退火 这是一种消除铸造应力最彻底的方法。

(3) 铸件的变形和防止 如前所述, 存有热应力的铸件, 其厚大的部分受拉伸, 薄的部分受压缩。但铸件的这种状态是不稳定的, 它总是力图通过变形来减缓应力, 以达到稳定状态。显然, 只有原来受压的部分伸长、受拉的部分缩短, 才能缓解铸件中的残留应力。

1) 铸件变形 图 1-13 所示为铸件变形示意图。图 a 和图 b 为壁厚不同的相连 T 形杆铸件, 当杆 I 厚杆 II 薄时, 冷却凝固后厚杆 I 内产生拉应力, 而薄杆 II 内产生压应力。两杆都有力图恢复原状的趋势, 若铸件的刚度不够, 则厚杆 I 内凹变短, 薄杆 II 外凸, 整个铸件发生弯曲变形, 见图 1-13a; 反之, 当杆 I 薄而杆 II 厚时, 则将发生反向翘曲, 见图 1-13b。图 1-13c 为大平板铸件, 尽管其壁厚均匀, 但其中心部分的冷却速度低于边缘的冷却速度, 故冷却速度慢的中心部分受拉应力的作用, 而边缘处则受压应力的作用; 除具有反膨胀物理性质的合金 (如灰铸铁、锑、铋等) 外, 一般铸型下面比上面先凝固, 铸件产生如图所示的翘曲变形。

2) 切削加工变形 存有内应力的铸件在铸态下虽无明显变形, 但经切削加工后, 应力重新分布, 反而会产生新的变形甚至开裂。这种经切削加工后产生的变形称为切削加工变形。

图 1-14 所示圆柱体铸件, 浇注后的冷却凝固过程中, 心部较表层冷却速度慢, 故铸件的心部产生拉应力 (+), 表层产生压应力 (-) (图 1-14a), 两种应力处于平衡态。

如车削此铸件的外圆, 当外表面被加工掉一层后, 心部所受拉应力减小, 铸件缩短 (图 1-14b); 如在此铸件的中心钻孔, 表层所受压应力减小, 铸件变长 (1-14c); 若侧面刨去一层, 则会产生图 1-14d

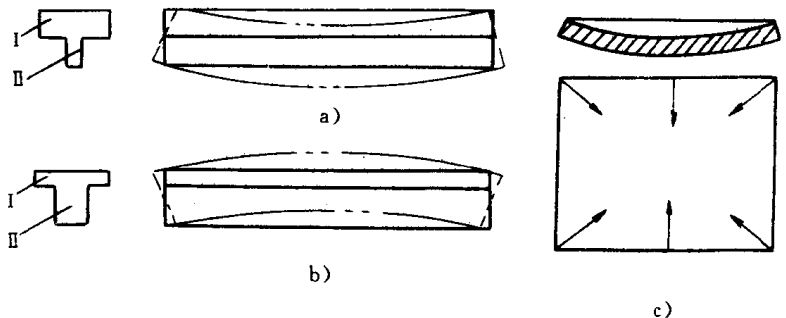


图 1-13 铸件变形示意图

a)、b) T 形杆铸件 c) 平板铸件