



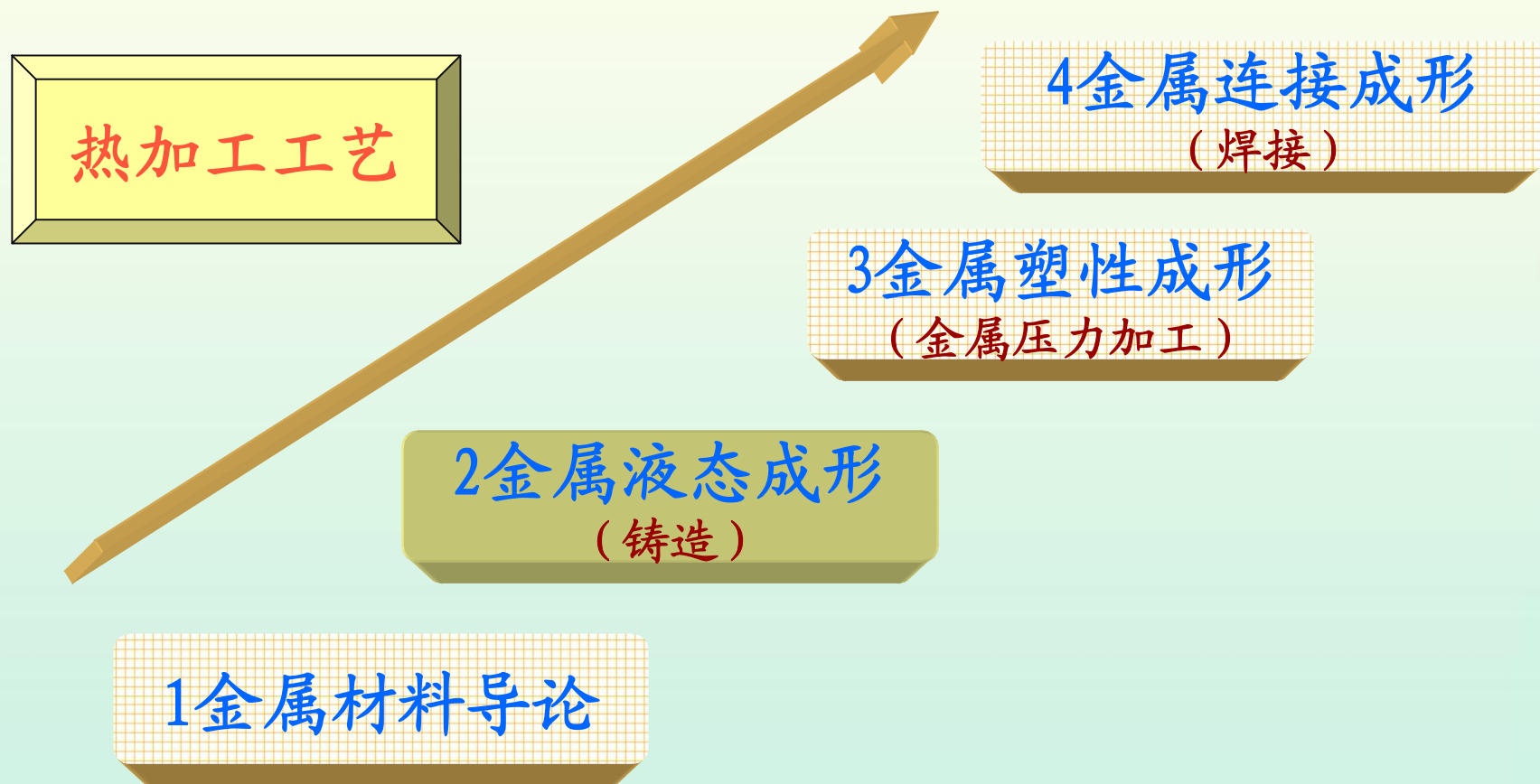
**武汉理工大学**  
wuhan university of technology

# 金属工艺学

多媒体课件



# 热加工工艺基础



## 上次课内容的回顾

铁碳合金（组织、状态图、两种反应、四把火）

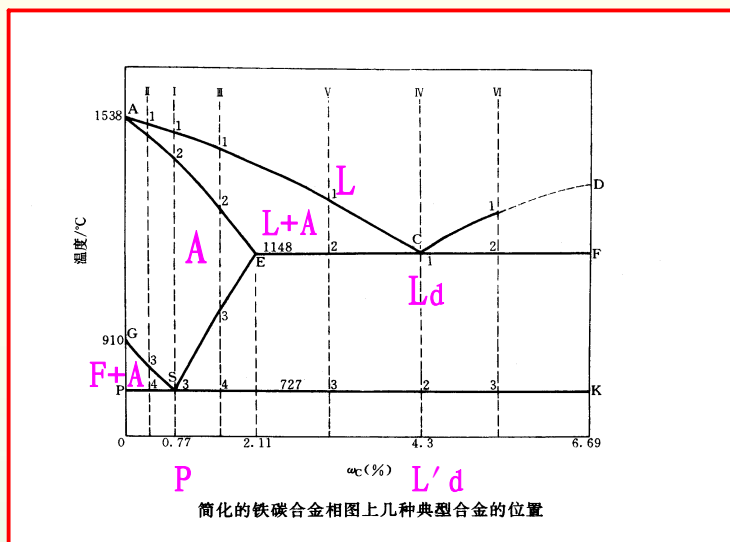
铁素体：碳溶解在  $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体（F）

奥氏体：碳溶解在  $\gamma$ -Fe 中的间隙固溶体（A）

渗碳体：铁与碳形成的金属化合物（ $\text{Fe}_3\text{C}$ ）

珠光体：是奥氏体发生共析转变所形成的铁素体  
与渗碳体的共析体（P）

莱氏体：是液态铁碳合金发生共晶转变所形成的奥氏体  
与渗碳体的共晶体（Ld）



### 两种反应：

- 1、共晶反应
- 2、共析反应

### 钢的分类及选材

碳素钢

合金钢

碳素结构钢（0.38%C）

优质碳素结构钢（0.2-0.7%C用途广）

碳素工具钢（T8等）

合金结构钢

合金工具钢

特殊性能钢

退火：降低硬度，便于机加工。  
消除应力。

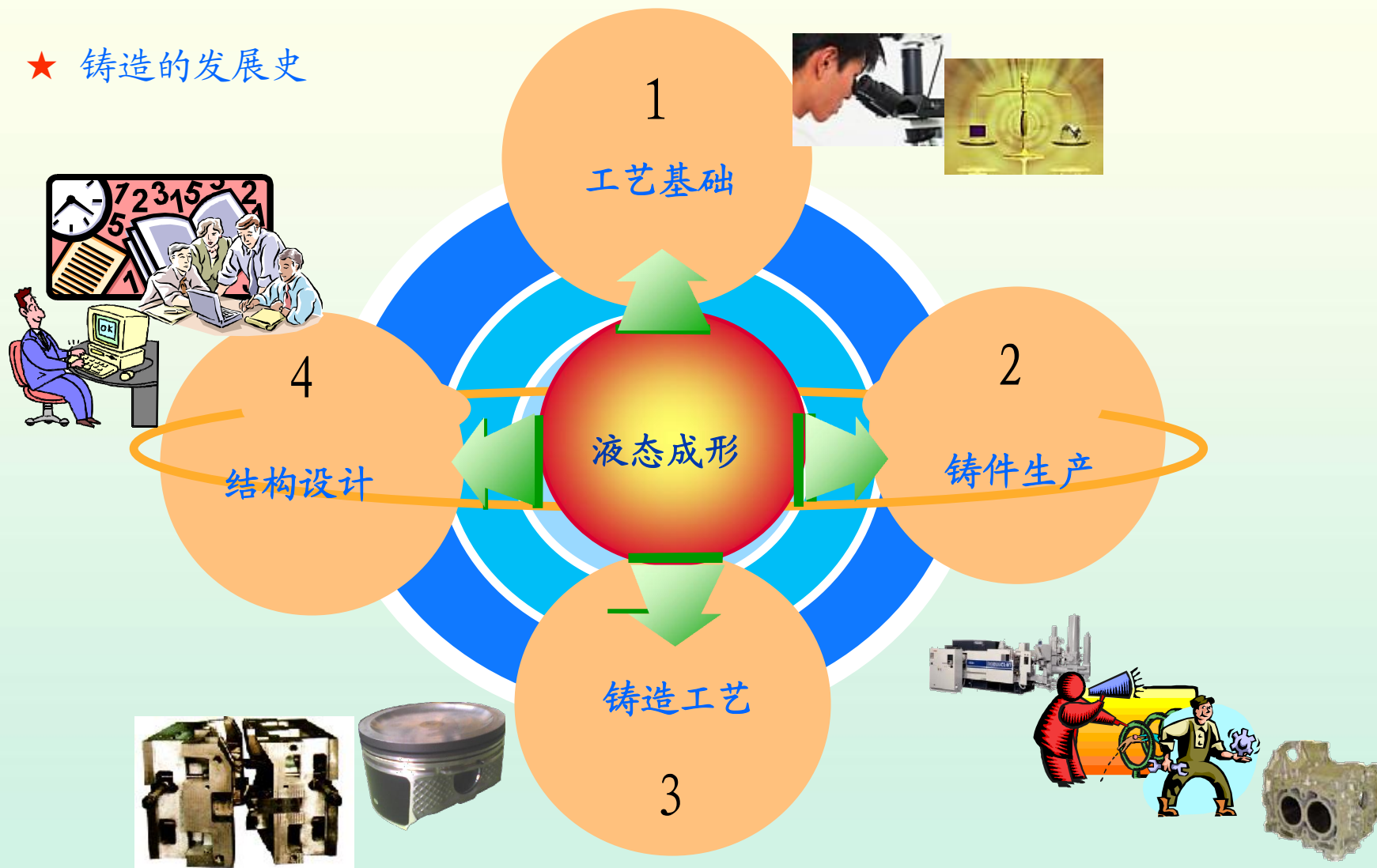
正火：用于普通结构件的最终热处理

淬火：获得马氏体（M）组织。

回火：主要是消除淬火内应力，降低钢的脆性，防止产生裂纹

## 第二篇 液态成形（铸造）

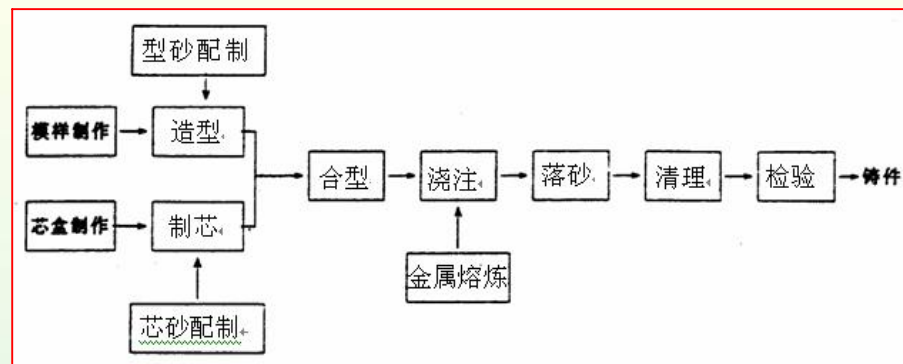
### ★ 铸造的发展史



## 第五章 铸造工艺基础

### 什么是金属的液态成形？

将熔炼好的液态金属浇入与零件形状相适应的铸型空腔中，待其冷却凝固，以获得毛坯或零件的工艺方法，亦称铸造。

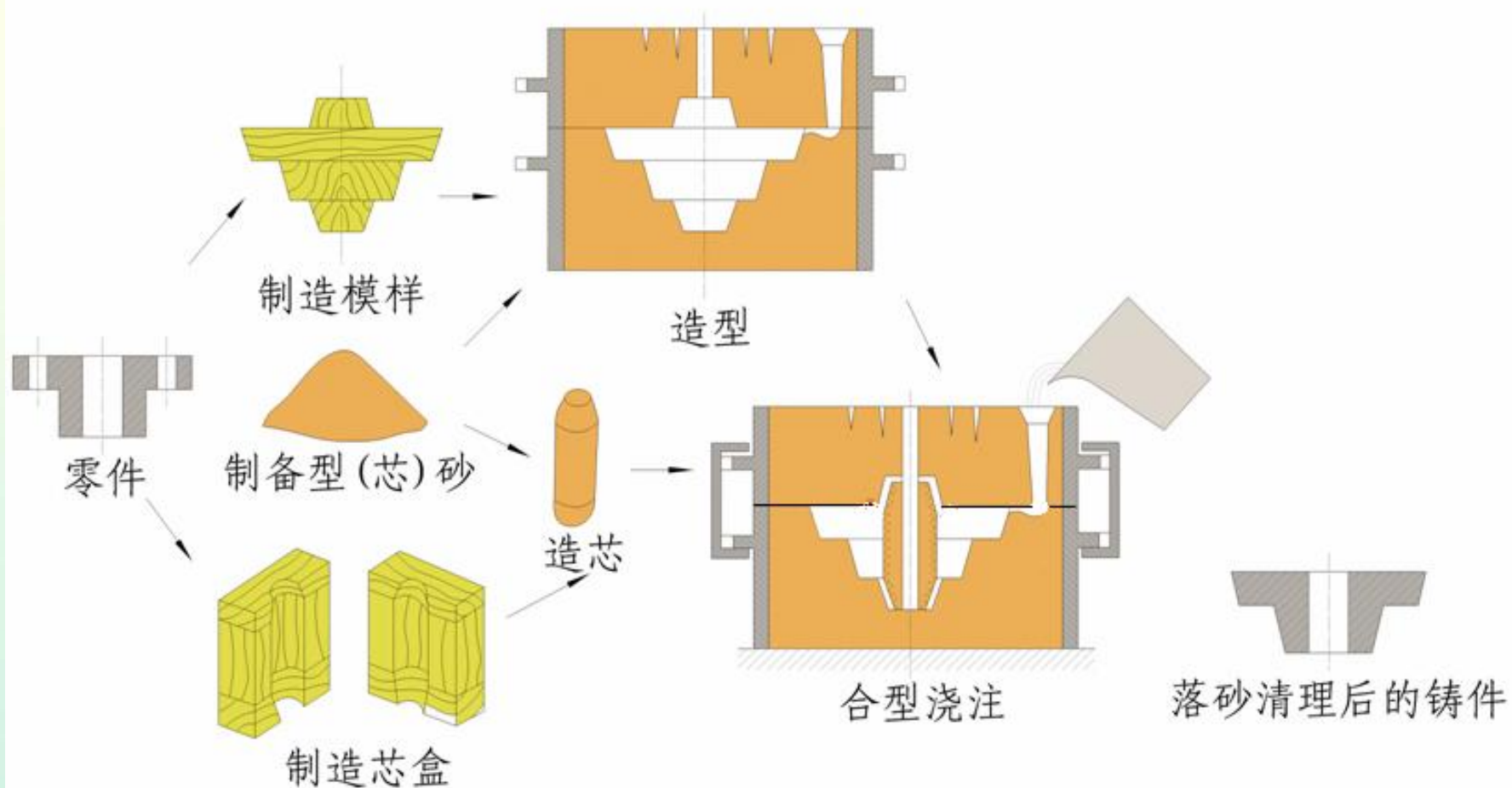


### 金属的液态成形的方法：

金属的液态成形是制造毛坯、零件的重要方法之一。按铸型材料的不同，金属液态成形可分为砂型铸造和特种铸造（包括压力铸造、金属型铸造等）。其中砂型铸造是最基本的液态成形方法，所生产的铸件要占铸件总量的80%以上。

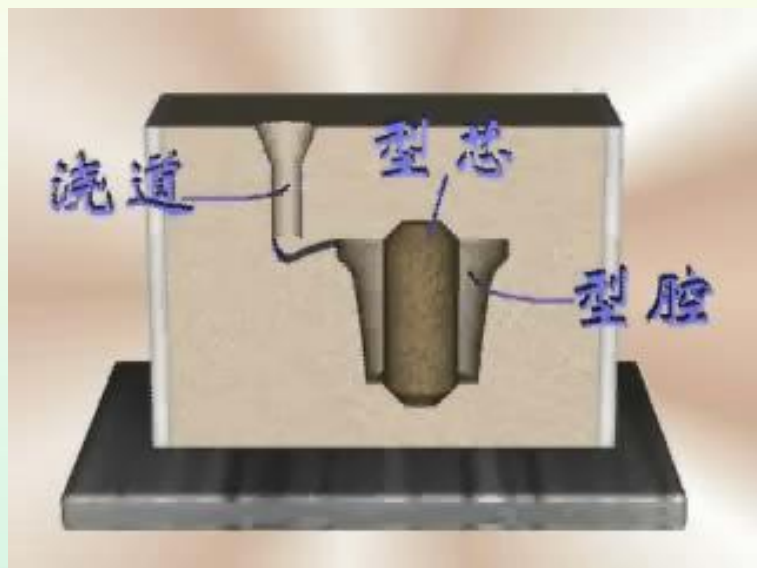


# 砂型铸造过程



铸件生产过程流程示意图

# 液态成型的优点



1

适于做复杂外形，特别是复杂内腔的毛坯

2

对材料的适应性广，铸件的大小几乎不受限制

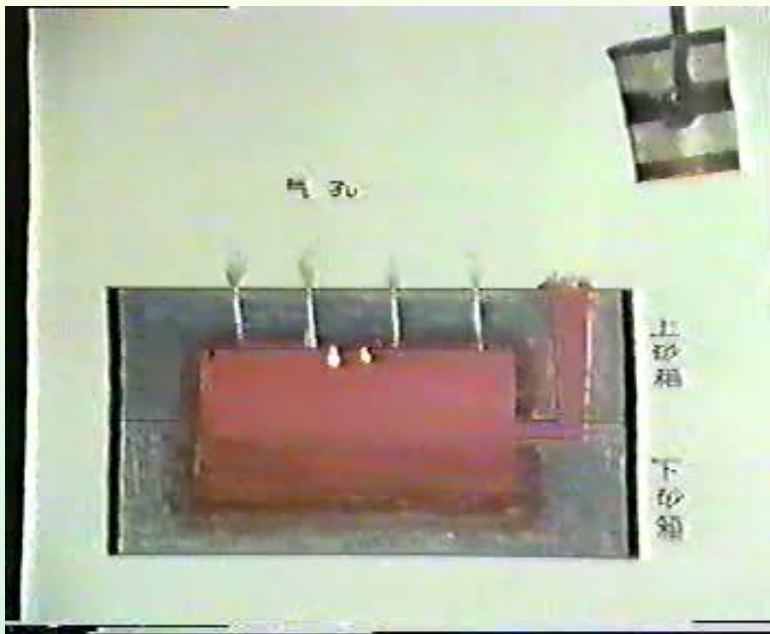
3

成本低，原材料来源广，价格低廉，一般不需要昂贵的设备

4

对于某些塑性很差的材料(如铸铁等)是制造其毛坯或零件的唯一成型工艺

# 液态成型的缺点



1

工艺过程比较复杂，一些工艺过程还难以控制

2

液态成形零件内部组织的均匀性、致密性一般较差

3

零件易出现缩孔、缩松、气孔、砂眼、夹渣、裂纹等缺陷，产品质量不够稳定

4

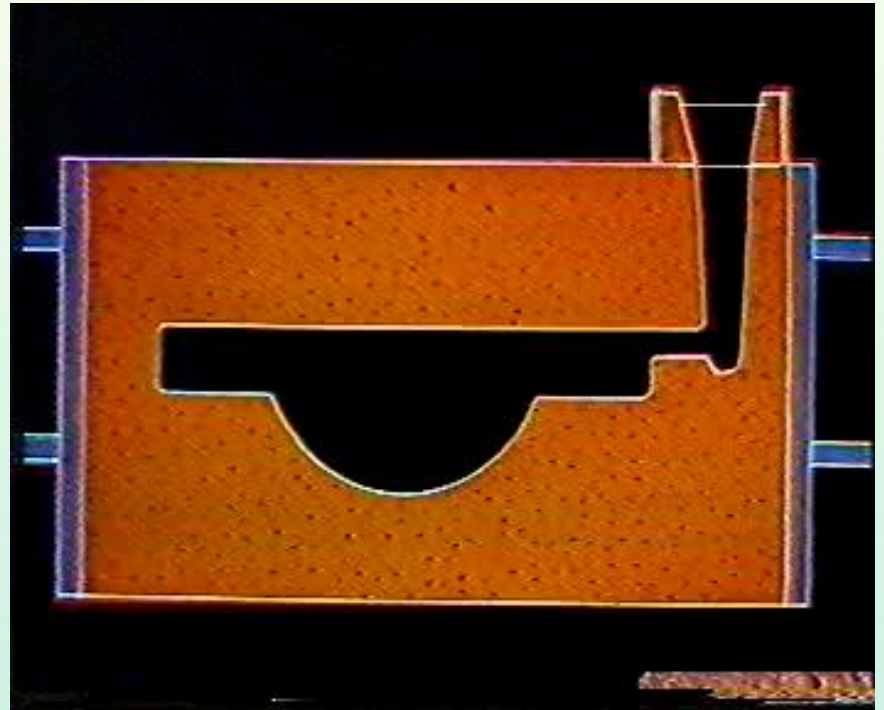
由于铸件内部晶粒粗大，组织不均匀，且常伴有缺陷，其力学性能比同类材料的塑性成形低



## 气孔缺陷



## 夹砂缺陷



# 液态合金的工艺性能

液态合金的工艺性能表征为液态合金的  
铸造性能



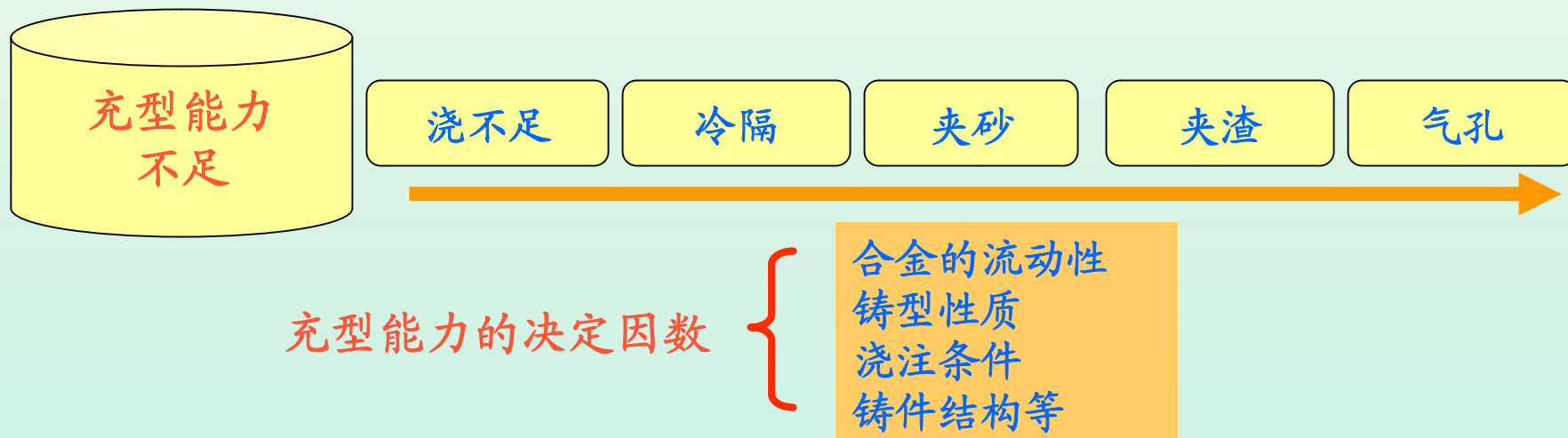
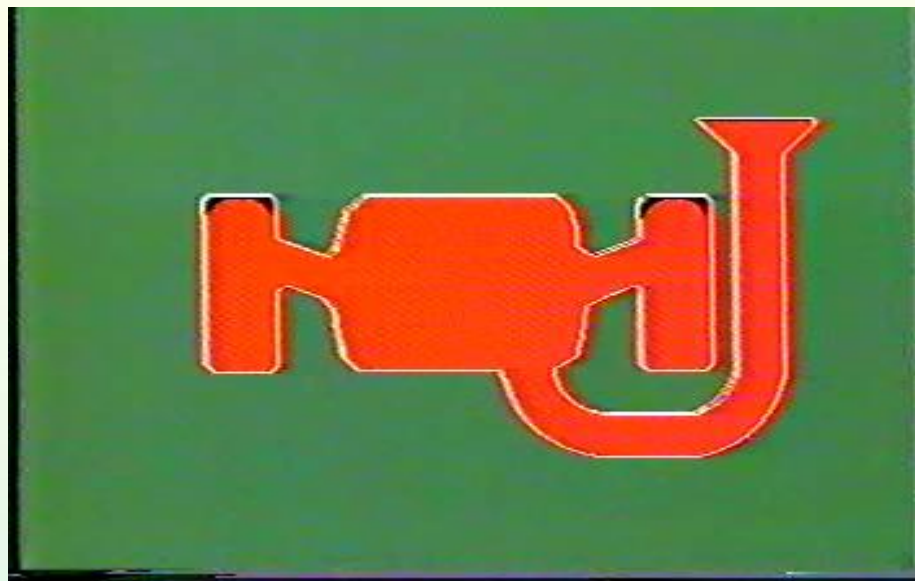
通常是指合金的流动性、凝固特性、  
收缩性、吸气性及偏析等性能。



合金铸造性能是选择铸造金属材料，确定铸件的铸造  
工艺方案及进行铸件结构设计的依据。

## 5.1 液态合金的充型

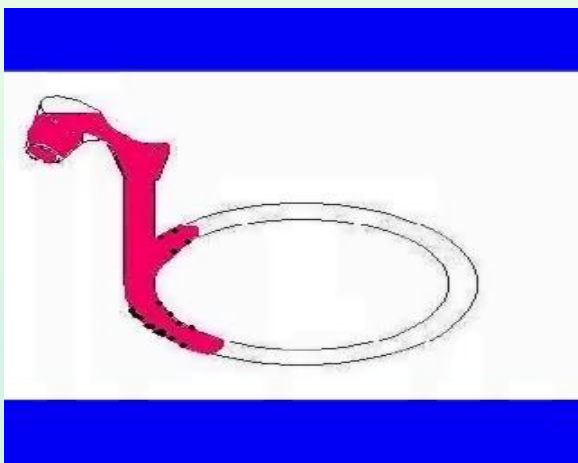
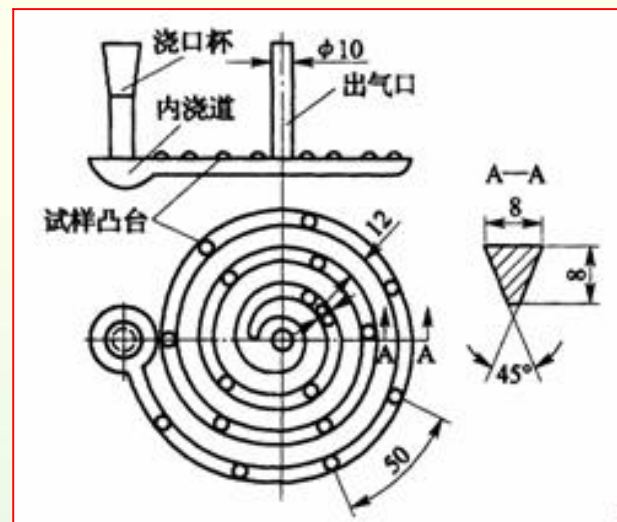
**充型能力——** 液态金属  
充满铸型型腔，获得形状  
准确、轮廓清晰铸件的能力。



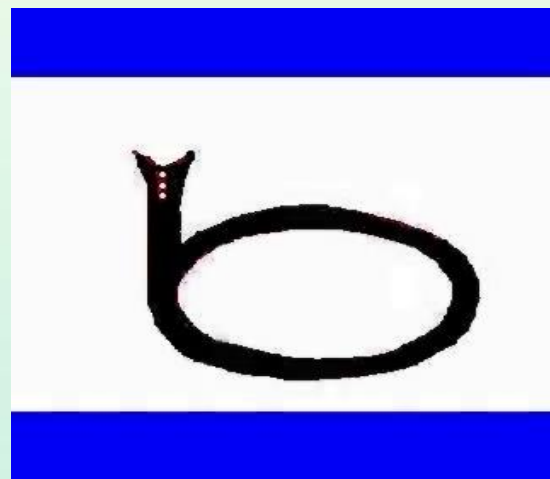
## 5.1.1 合金的流动性

### 测试合金充型能力的方法:

如右图, 将合金液浇入铸型中, 冷凝后测出充满型腔的试样长度。浇出的试样越长, 合金的流动性越好, 合金充型能力越好。



铸钢的流动性

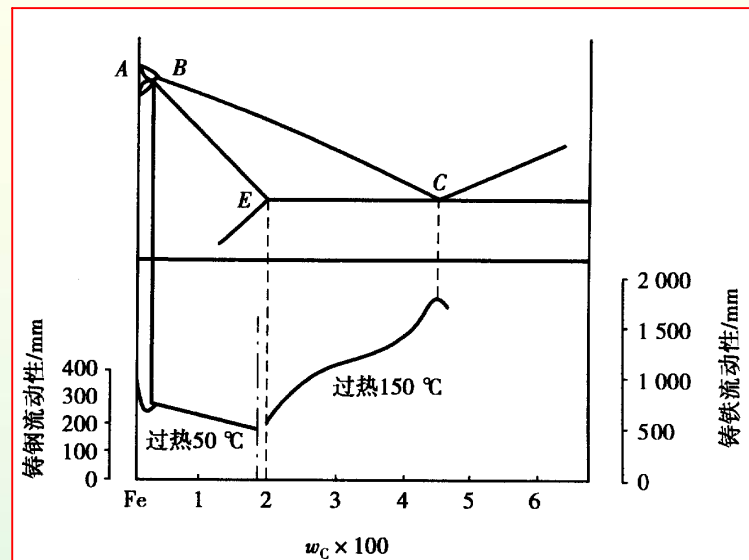


铸铁的流动性

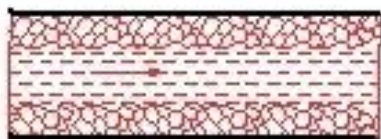
### 几种不同合金流动性的比较

## 合金流动性的决定因数

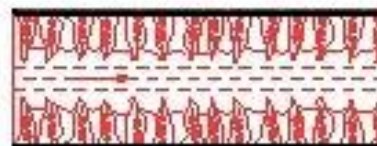
**化学成分:** 同种合金中成分不同的合金具有不同的结晶特点，流动性也不同。



**结晶特性:** 恒温下结晶，流动性较好；两相区内结晶，流动性较差。



(a) 在恒温下凝固



(b) 在一定的温度范围内凝固

结晶特性对流动性的影响



## 5.1.2 浇注条件

### 浇注条件

浇注温度

浇注温度越高，液态金属的粘度越小，过热度高，金属液内含热量多，保持液态的时间长，充型能力强。

充型压力

液态金属在流动方向上所受的壓力称为充型压力。充型压力越大，充型能力越强。

浇注系统

浇注系统的结构越复杂，则流动阻力越大，充型能力越差。

## 5.1.3 铸型填充条件

(1) **铸型的蓄热能力**——即铸型从金属中吸收和储存热量的能力。

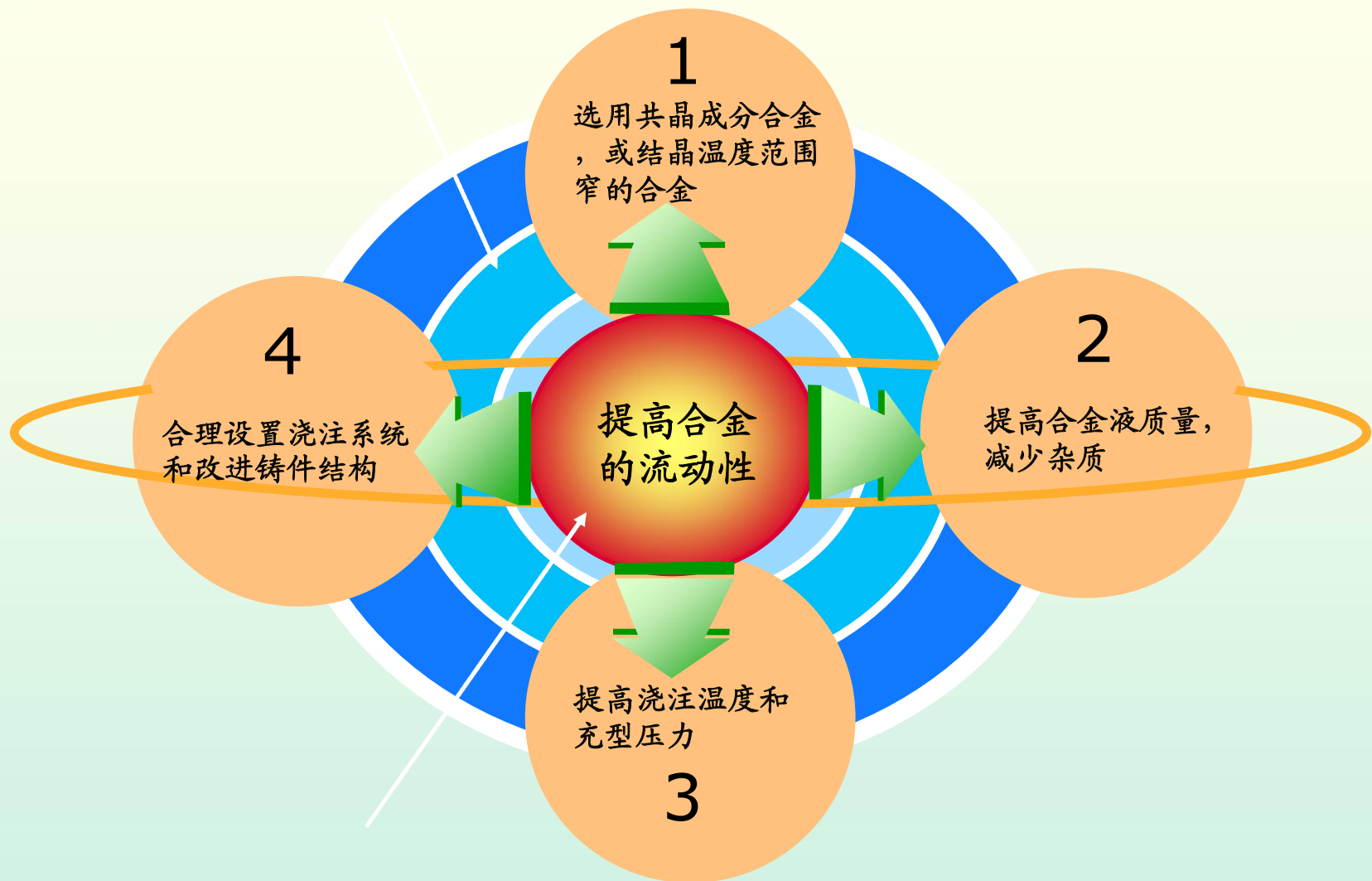
铸型材料的导热系数和比热愈大，对液态合金的激冷能力愈强，合金的充型能力就愈差。

(2) **铸型温度**

(3) **铸型中的气体**

(4) **铸件结构**

铸件壁厚过薄、壁厚急剧变化或有大的水平面时，都使金属液流动困难。

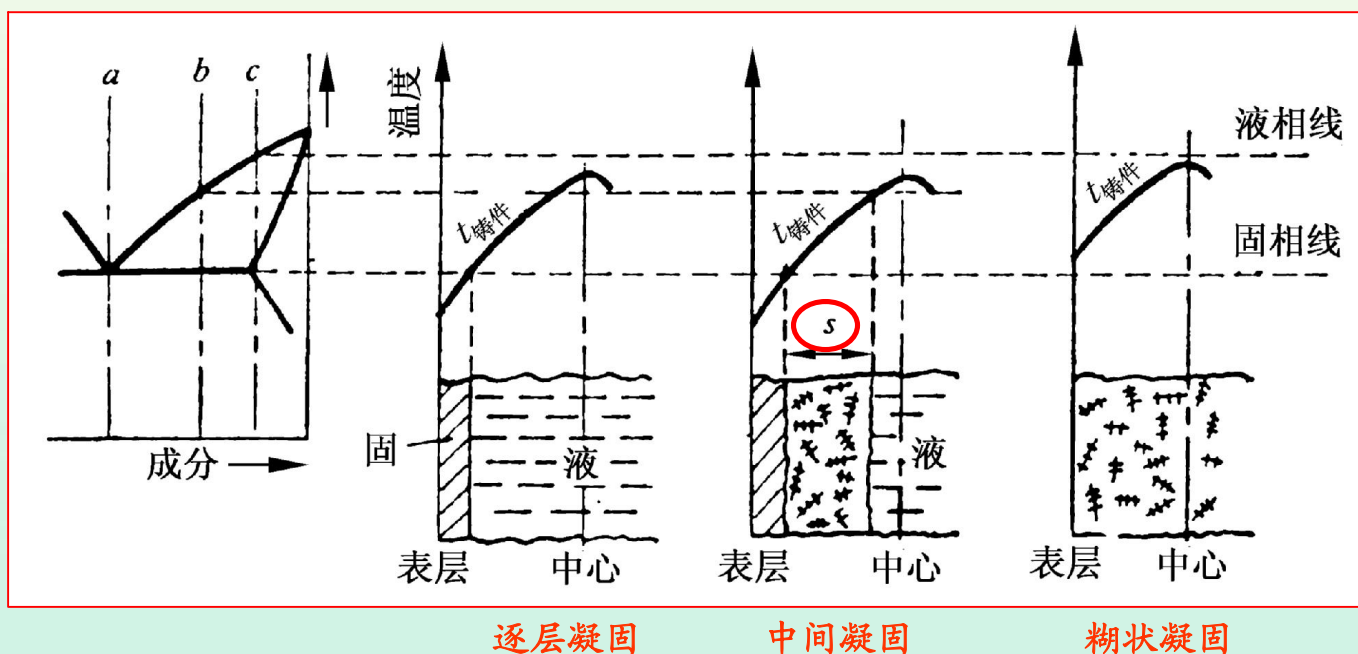


## 5.2 铸造合金的凝固与收缩

### 5.2.1 铸造合金的凝固

#### 一、铸件的凝固方式

在铸件的凝固过程中，截面一般存在三个区域，即液相区、凝固区、固相区。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。铸件的凝固方式就是依据凝固区的宽窄来划分的。



## 二、影响凝固方式的因素

影响铸件凝固方式的主要因素是合金的**结晶温度范围**和**铸件的温度梯度**。

### 1、合金的结晶温度范围

合金的结晶温度范围愈小，凝固区域愈窄，愈倾向于逐层凝固。

如砂型铸造时，低碳钢为逐层凝固；高碳钢因结晶温度范围甚宽，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(图中  $T_1 \rightarrow T_2$ )，则其对应的凝固区由**宽变窄**。

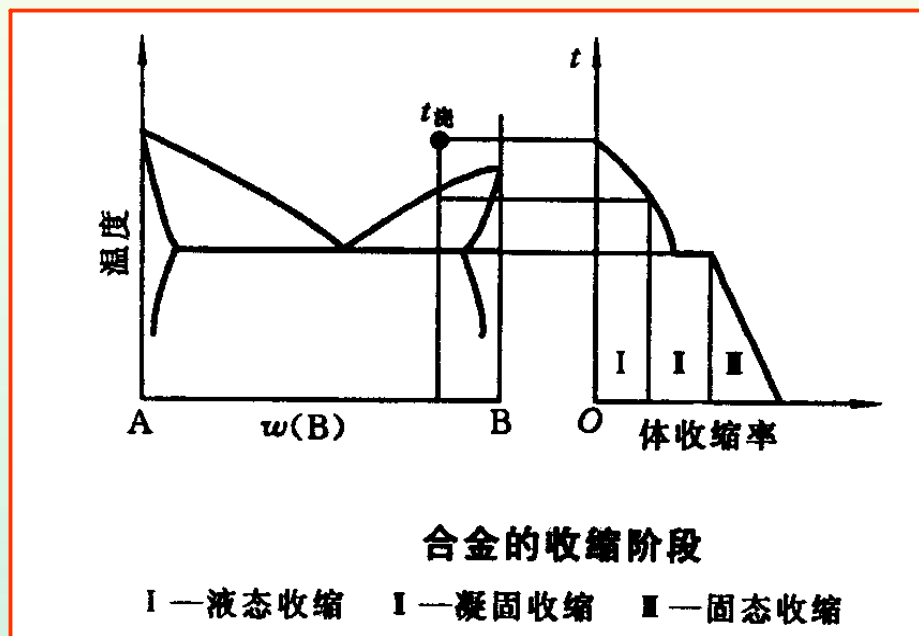


倾向于逐层凝固的合金(如灰口铸铁、铝硅合金等)便于铸造，应尽量选用。若必须采用倾向于糊状凝固合金(如锡青铜、铝铜合金、球墨铸铁等)时，可考虑采用适当的工艺措施(例如选用金属型铸造)，以减小其凝固区域。

## 5.2.2 铸造合金的收缩

铸件在**液态、凝固态和固态冷却**过程中所发生的体积减小的现象，称为收缩。收缩是多种铸造缺陷（如缩孔、缩松、裂纹、变形等）产生的根源。

### 一、合金的收缩阶段



合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金的体积缩小，常称为**体收缩**；合金的固态收缩能引起铸件尺寸的缩小，常称为**线收缩**。



## 二、影响收缩的因素

影响合金收缩的主要因素有以下几个方面：

### 1、化学成分

铸铁中促进石墨形成的元素增加，收缩减小；阻碍石墨形成的元素增加，收缩增大。

在灰口铸铁中，碳是形成石墨的元素；硅是促进石墨形成的元素；硫是强烈阻碍石墨化的元素；锰可抵消硫对石墨化的阻碍作用，故适量的锰可使铸铁的收缩减小。

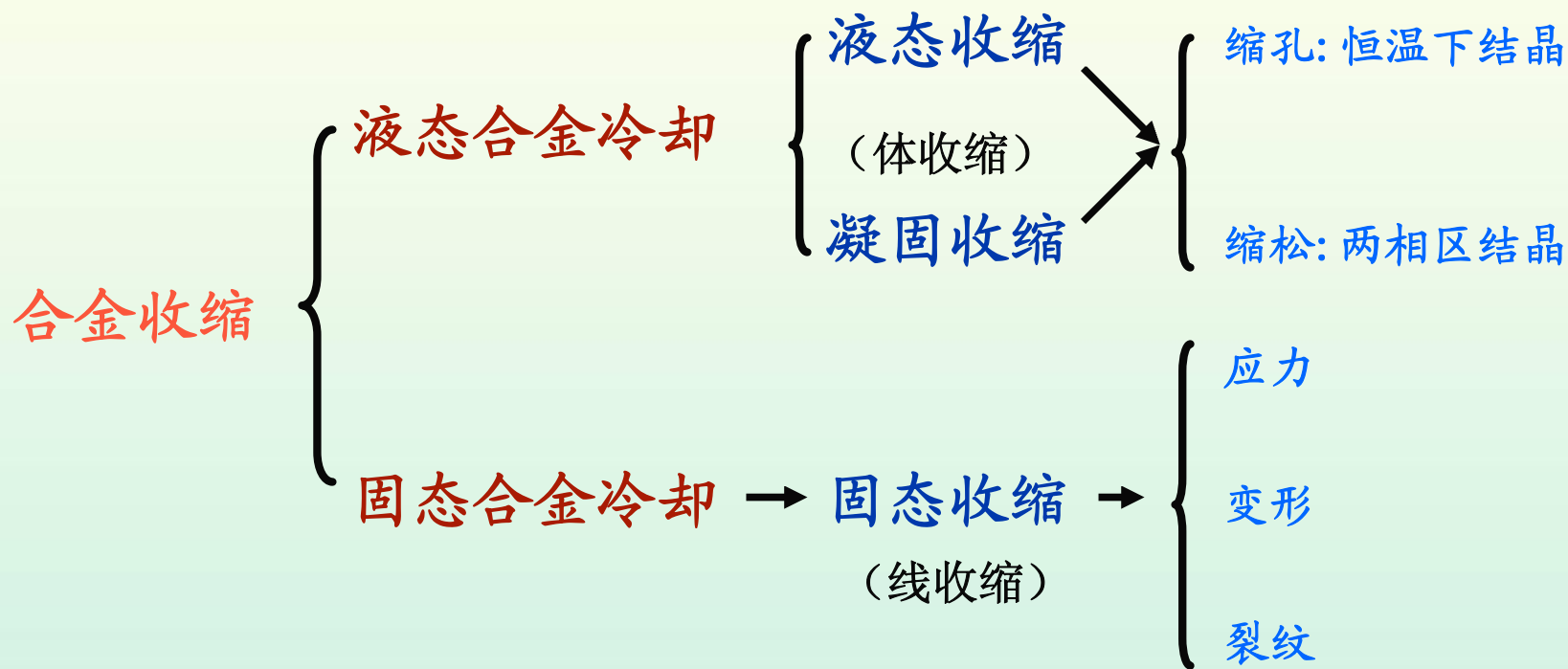
### 2、浇注温度

合金的浇注温度越高，过热度越大，液态收缩量也越大，故总收缩量增加。通常在满足流动性要求的前提下，应尽量采用低温浇注以减少液态收缩。

### 3、铸件结构与铸型条件

合金在铸型中的线收缩大多不是自由收缩，而是受阻收缩。这些阻力来源于铸件各部分收缩时受到的相互制约及铸型和型芯对铸件收缩的阻碍。

合金的收缩给液态成形工艺带来许多困难，会造成许多铸造缺陷。（如：缩孔、缩松、裂纹、变形等）。

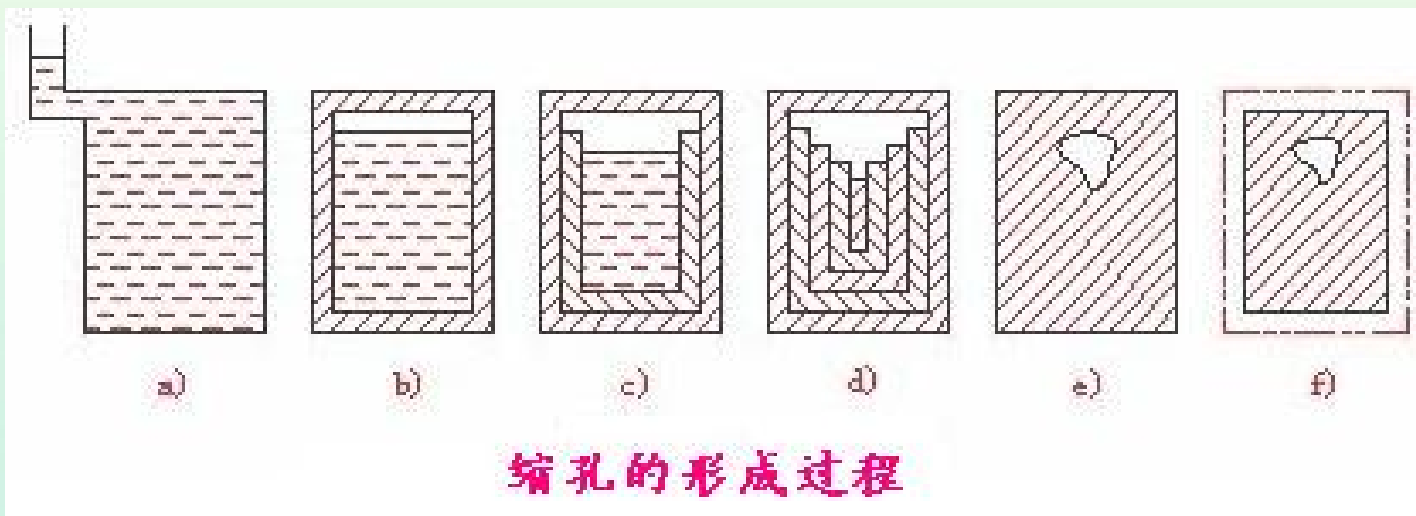


## 5.2.3 铸件中的缩孔与缩松

液态金属在铸型内凝固过程中，由于液态收缩和凝固收缩导致体积缩小，若其收缩得不到补充，就在铸件最后凝固的部分形成孔洞。大而集中的孔洞称为**缩孔**，细小而分散的孔洞称为**缩松**。

### 一、缩孔的形成

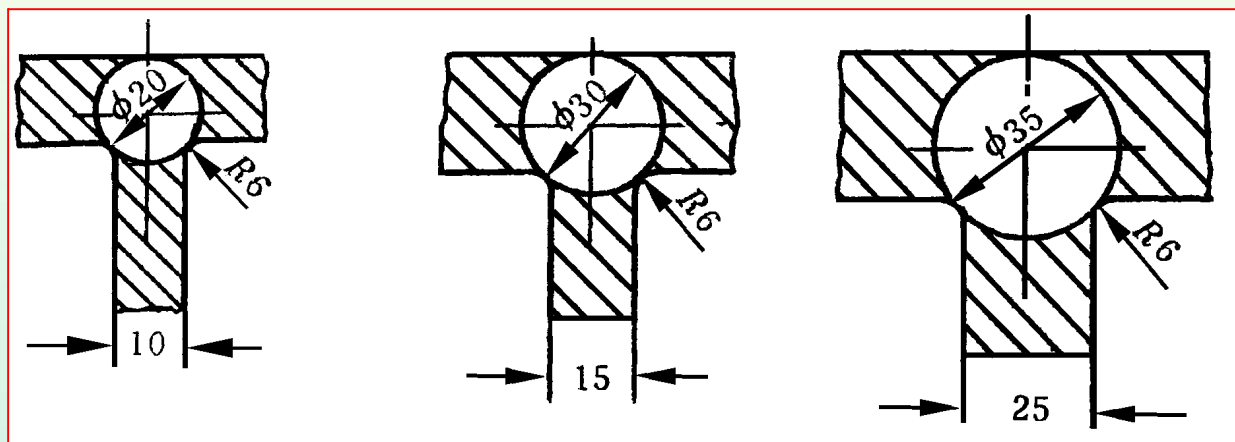
纯金属、共晶成分和凝固温度范围窄的合金，浇注后在型腔内是由表及里的**逐层凝固**。在凝固过程中，如得不到合金液的补充，在铸件**最后凝固的地方**就会产生缩孔。



**缩孔形成的条件：**铸件呈逐层凝固方式凝固，成分为纯金属或共晶成分的合金。

**缩孔产生的基本原因：**是合金的液态收缩和凝固收缩值大于固态收缩值，且得不到补偿。

缩孔产生的部位在铸件**最后凝固区域**，如壁较厚大的上部或铸件两壁相交处，这些地方称为**热节**。热节位置可用画内接圆的方法确定。

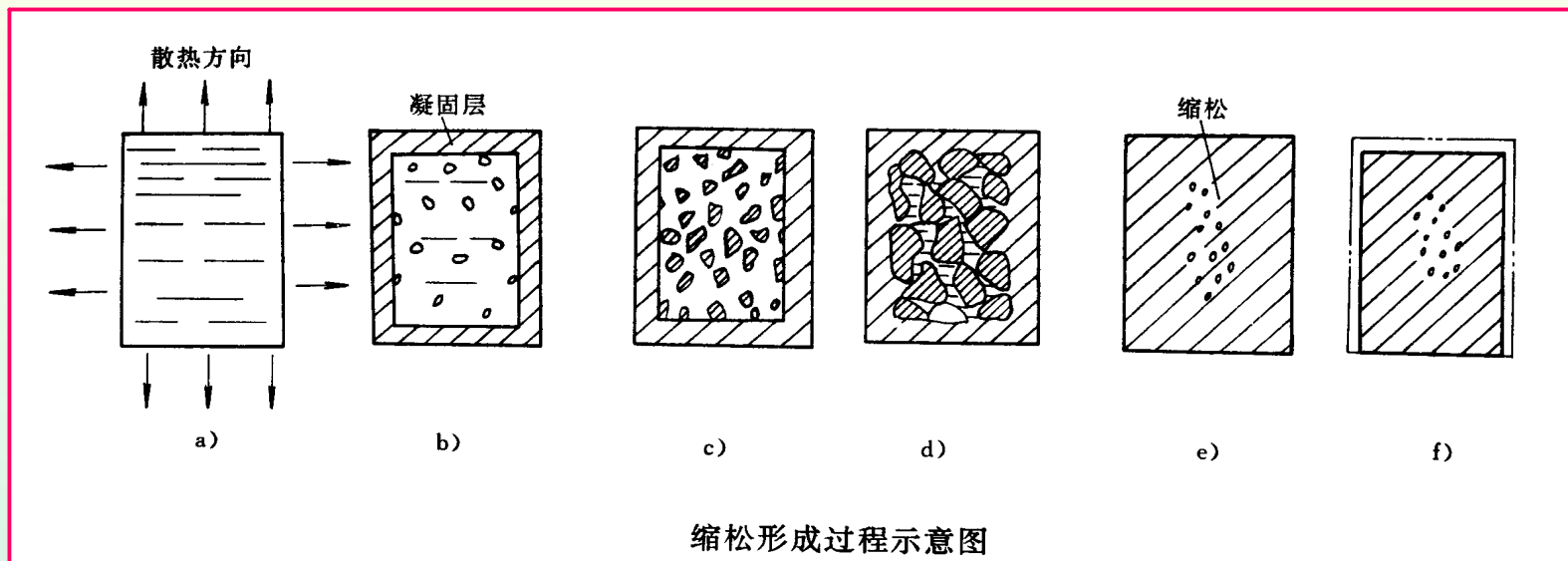


用画内切圆法确定缩孔位置

合金的液态收缩和凝固收缩愈大、浇注温度愈高、铸件愈厚，缩孔的体积愈大。

## 二、缩松的形成

铸件最后凝固的收缩未能得到补充，或者结晶温度范围宽的合金呈**糊状凝固**，凝固区域较宽，液、固两相共存，树枝晶发达，枝晶骨架将合金液分割开的小液体区难以得到补缩所致。



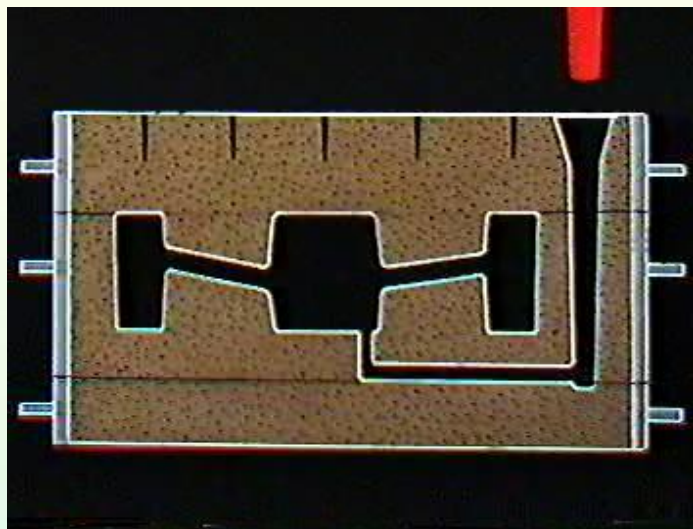
**缩松形成的条件：**铸件主要呈糊状凝固方式凝固，成分为非共晶成分或有较宽结晶温度范围的合金。

**形成缩松的基本原因：**是合金的液态收缩和凝固收缩值大于固态收缩值。

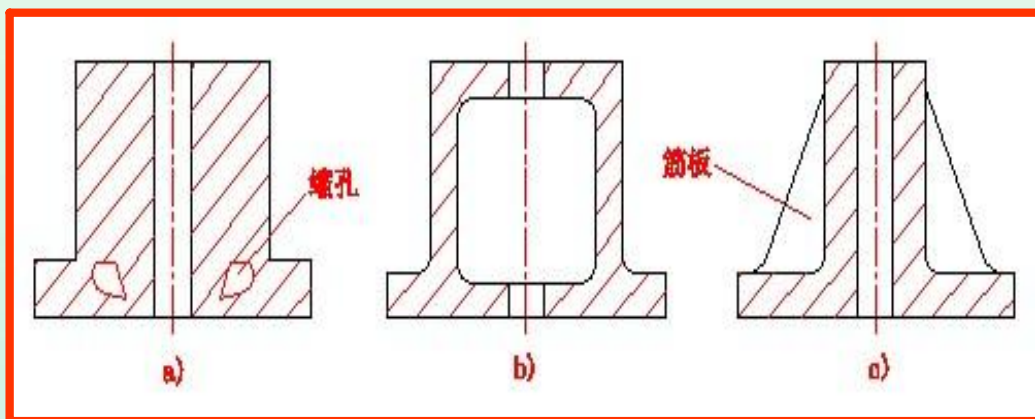
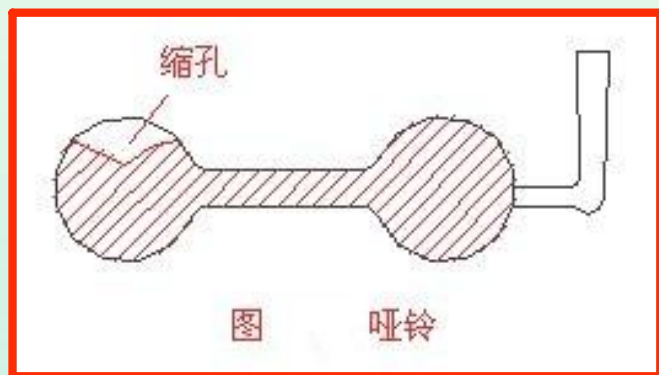
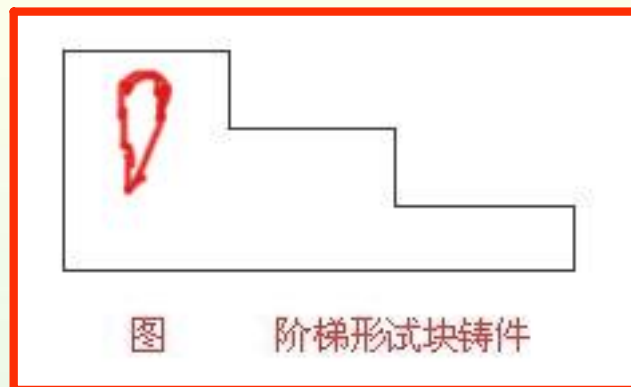
缩松一般出现在铸件壁的轴线区域、冒口根部、热节处，也常分布在集中缩孔的下方。



## 缩孔与缩松的形成演示



## 缩孔易出现的部位

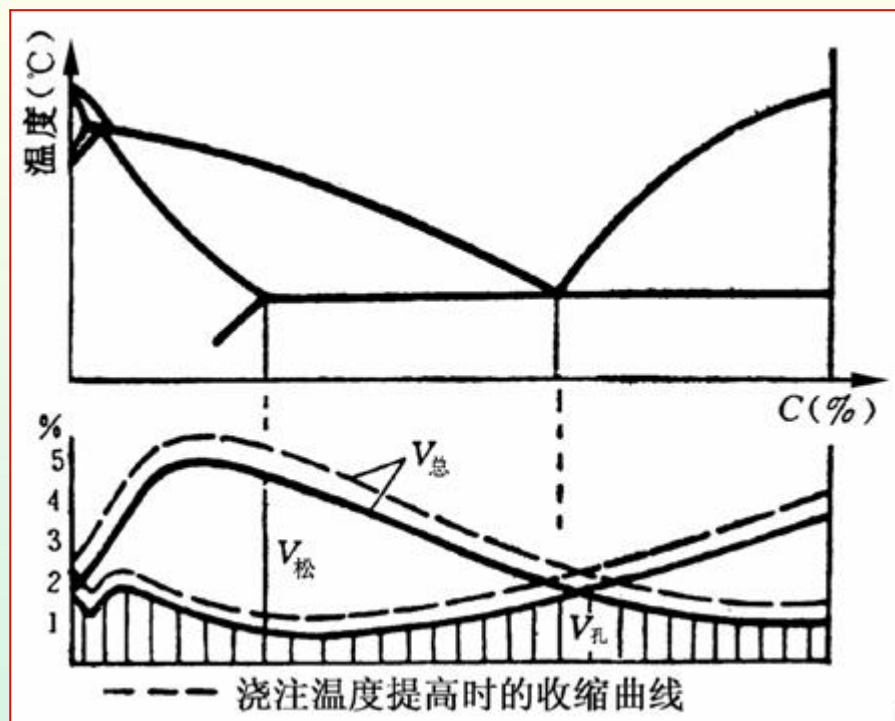


## 三、影响缩孔和缩松形成的因素

### 1、合金成分

结晶温度范围越小的合金，产生缩孔的倾向越大；结晶温度范围越大的合金，产生缩松的倾向越大。

纯铁、共晶铸铁容易形成缩孔。若浇口设置恰当，缩孔可全部转移到冒口中，而获得致密铸件。远离共晶成分的亚共晶铸铁，易形成缩松，基体组织的致密性差。



铁碳合金成分和体积收缩的关系

$V_{总}$ —总体积收缩容积； $V_{孔}$ —缩孔容积； $V_{松}$ —缩松容积

## 2、浇注条件

提高浇注温度时，合金的总体积收缩和缩孔倾向增大。

浇注速度很慢或向冒口中不断补浇高温合金液，使铸件液态和凝固收缩及时得到补偿，铸件总体积收缩减小，缩孔容积也减小。

## 3、铸型材料

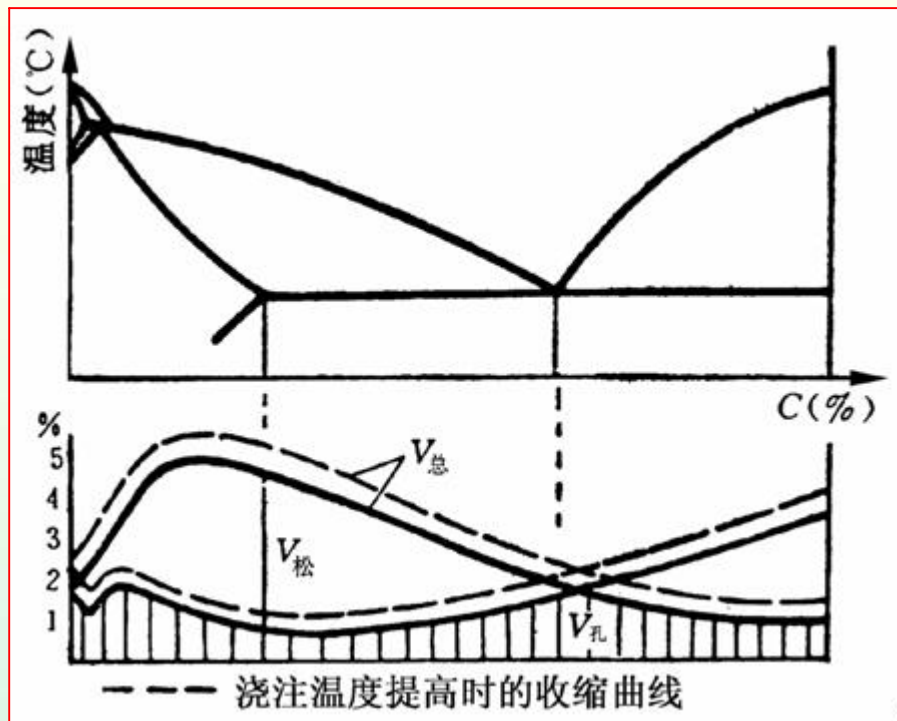
铸型材料对铸件冷却速度影响很大。

湿型比干型的冷却能力大，使凝固区域变窄，缩松减少。金属型的冷却能力更大，故缩松更显著减少。

$V_{\text{总}}$ —总体积收缩容积； $V_{\text{孔}}$ —缩孔容积； $V_{\text{松}}$ —缩松容积

## 4、铸件结构

铸件结构与形成缩孔、缩松的关系极大，设计时必须予以充分注意。



铁碳合金成分和体积收缩的关系

# 上次课内容的回顾

## 合金的充型能力

影响充型能力的因数

合金的流动性

化学成分、结晶特性

铸型性质

铸型的蓄热能力、铸型温度、铸型中的气体和铸型的结构

浇注条件

浇注温度

充型压力

浇注系统

铸件结构

结晶特性: 恒温下结晶, 流动性较好; 两相区内结晶, 流动性较差

## 液态金属的凝固与收缩

凝固方式有: 逐层凝固、糊状凝固、中间凝固

合金的收缩: 液态收缩、凝固收缩、固态收缩

影响收缩的因素: 化学成分(c含量)、浇注温度、铸件结构、铸型条件

合金的收缩会造成许多铸造缺陷。(如: 缩孔、缩松)。

影响缩孔和缩松形成的因素: 合金成分、浇注条件、铸型材料、铸件结构



## 四、缩孔和缩松的防止方法

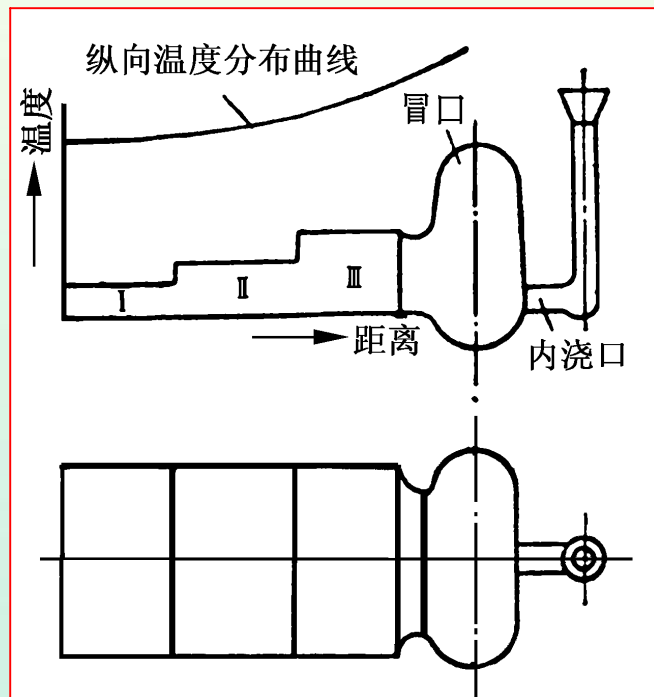
缩孔和缩松都使铸件的力学性能下降，缩松还可使铸件因渗漏而报废。因此，必须根据技术要求，采取适当的工艺措施予以防止。

### 一、控制铸件的凝固过程

实践证明，只要能使铸件实现“**顺序凝固**”(定向凝固)或“**同时凝固**”，尽管合金的收缩较大，也可获得没有缩孔的致密铸件。

“**顺序凝固**”原则是让铸件远离冒口的地方先凝固，靠近冒口的地方次凝固，最后才是冒口本身凝固，实现以厚补薄，将缩孔转移到冒口中去。

“**顺序凝固**”适用于收缩大或壁厚差别较大，易产生缩孔的合金铸件，如铸钢、高强度灰口铸铁和可锻铸铁等。

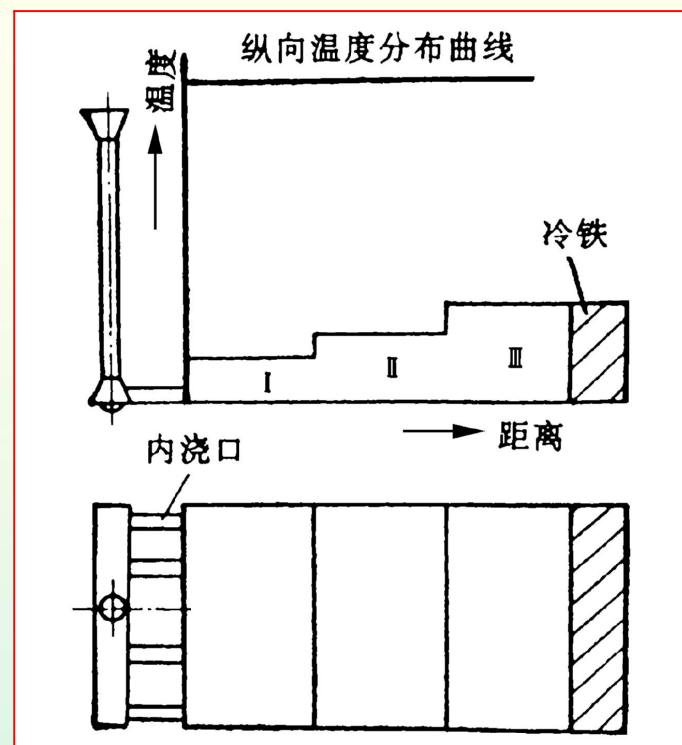


顺序凝固原则示意图



“同时凝固”原则，就是从工艺上采取必要的措施，使铸件各部分的冷却速度尽量相等，以达到铸件各部分几乎同时凝固完结。

“同时凝固”原则，适用于碳、硅含量较高的灰口铸铁和球墨铸铁。



同时凝固原则示意图

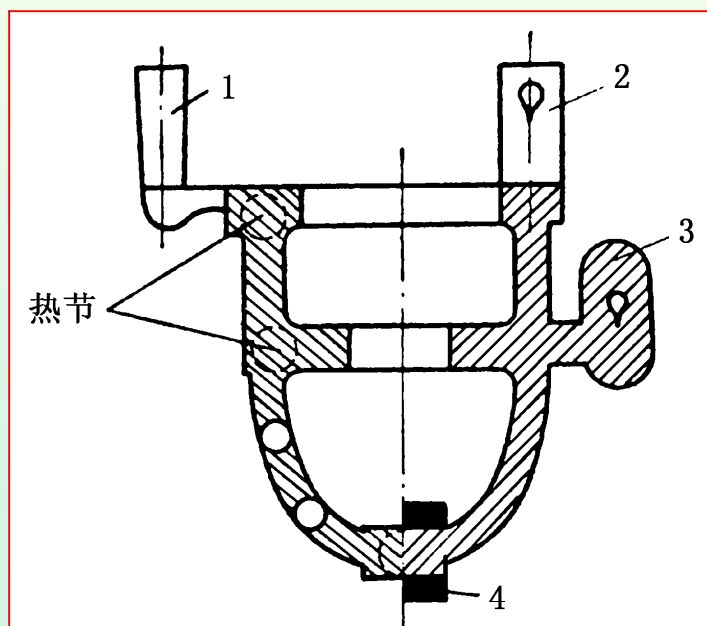
采用“顺序凝固”时，尽管冒口补缩作用好，但冷却速度不一致，易产生铸造应力、变形及裂纹等缺陷；冒口消耗金属多，降低了铸件的出品率，并且，冒口切割较为困难。

采用“同时凝固”时，铸件出现裂纹、应力和变形的倾向性小，不必设置冒口，使工艺简化，又能节省金属材料，而且，提高了铸造的出品率。

## 二、合理应用冒口、冷铁等工艺措施

冒口一般设置在铸件厚壁处和热节部位，是防止缩孔、缩松最有效的措施，冒口的尺寸应保证冒口比铸件补缩部位凝固得晚，并有足够的金属液供给。

冷铁通常是用铸铁、钢和铜等金属材料制成的激冷物。放入铸型内，用以加大铸件某一部分的冷却速度，调节铸件的凝固顺序。



阀体铸件的冒口和冷铁位置

1—浇口；2—明冒口；3—暗冒口(或边冒口)；4—冷铁

# 解决缩孔的方法演示

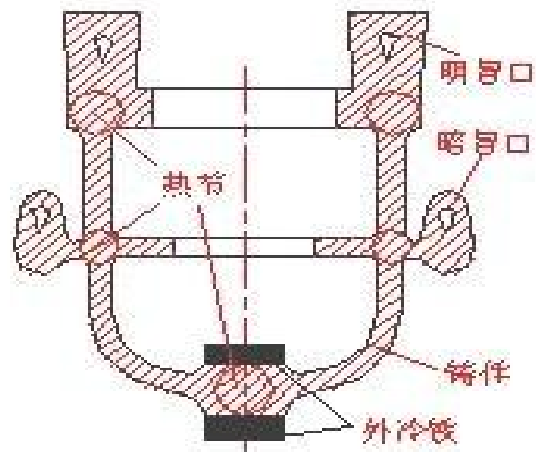
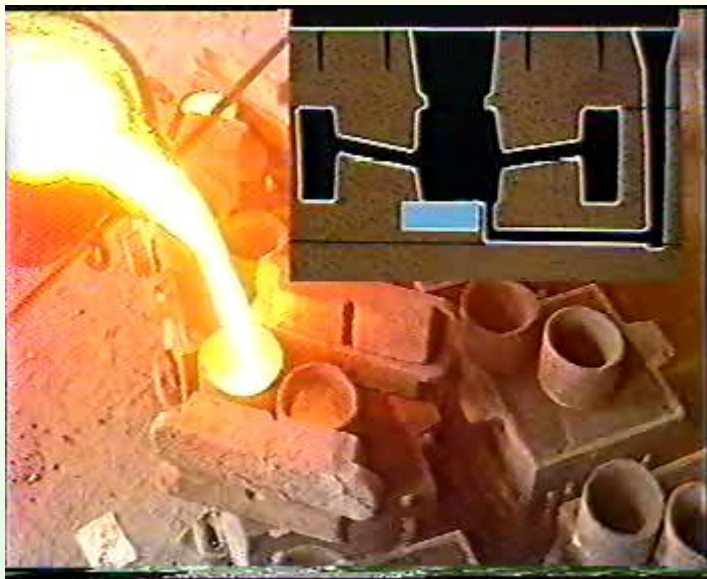
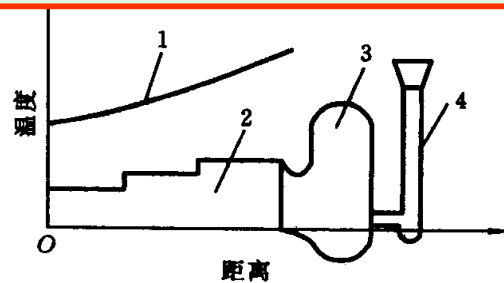
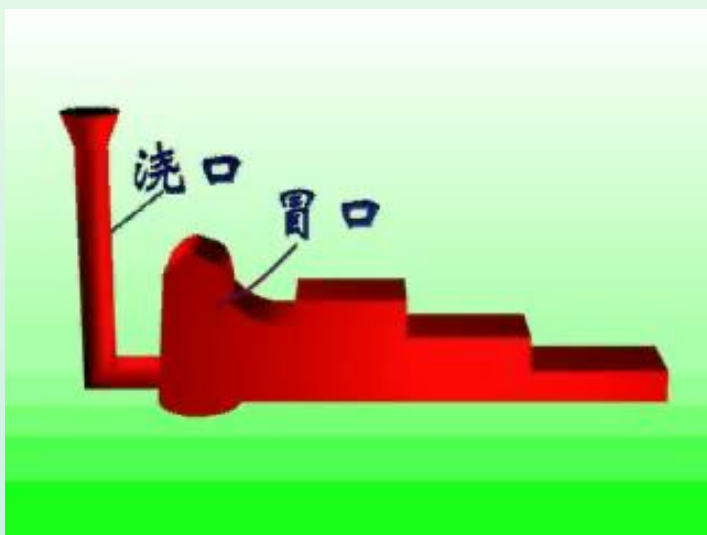


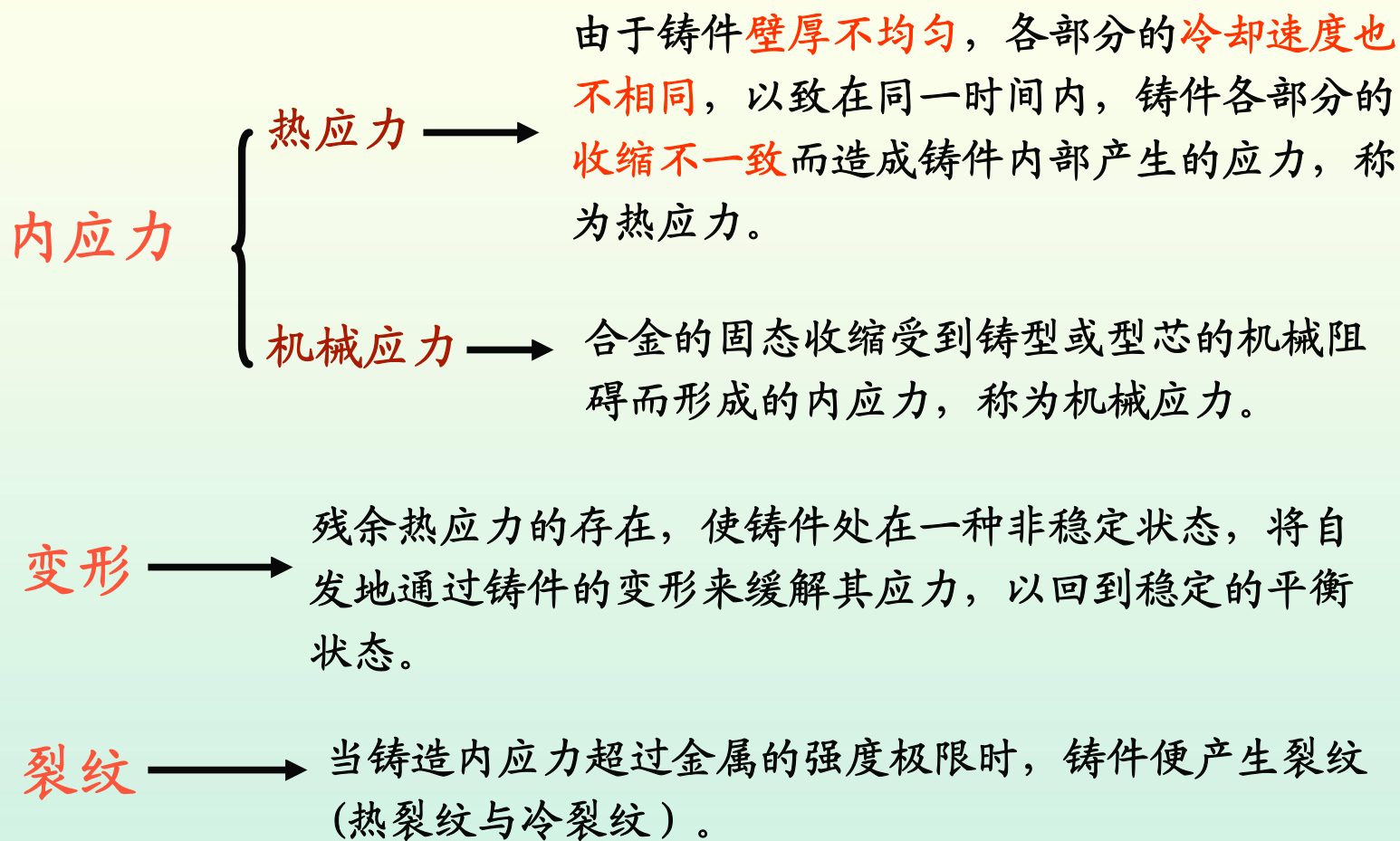
图 阀体铸件的顺序凝固



铸件的定向凝固

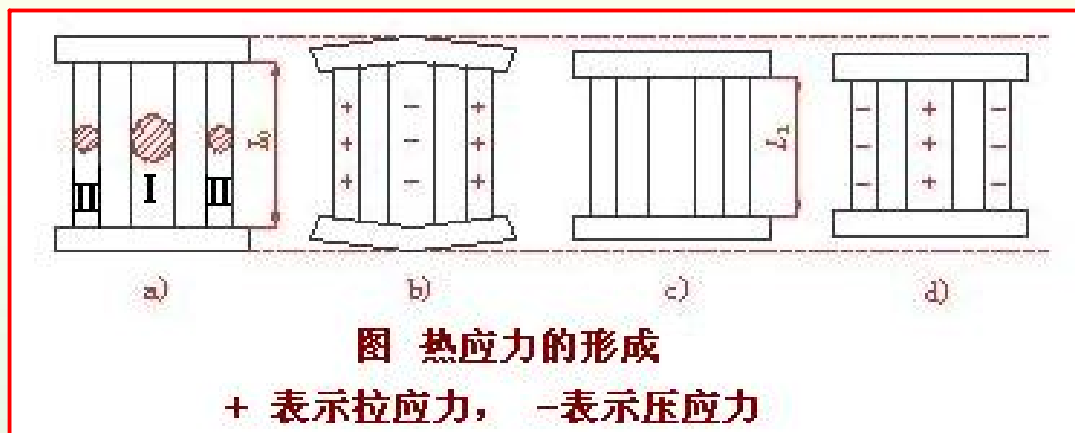
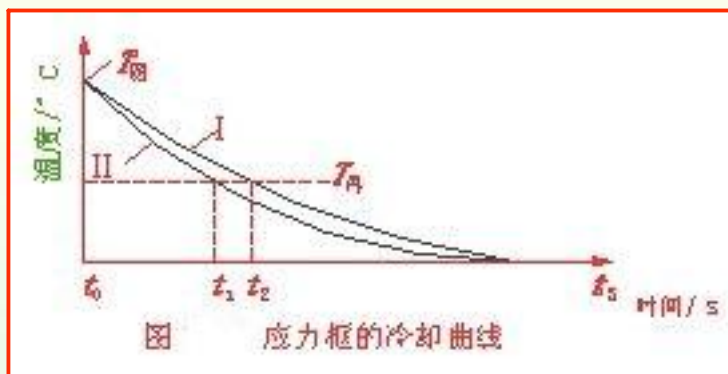
- 1—温度分布曲线 2—铸件  
 3—冒口 4—浇注系统

## 5.3 铸造内应力、变形与裂纹



## 5.3.1 铸造内应力的形成

### 一、热应力



$t_0 \text{ — } t_1$  高温阶段，塑性状态，内应力通过塑性变形消除

$t_1 \text{ — } t_2$  II 杆弹性状态，I 塑性状态，II 杆受拉应力，I 受压应力，内应力通过 I 塑性变形消除

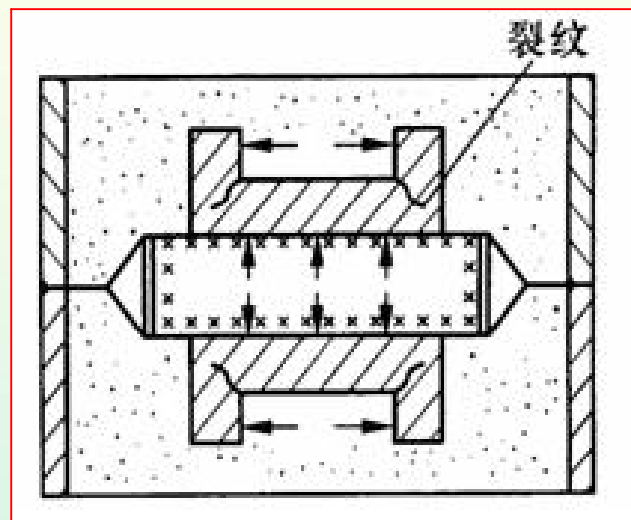
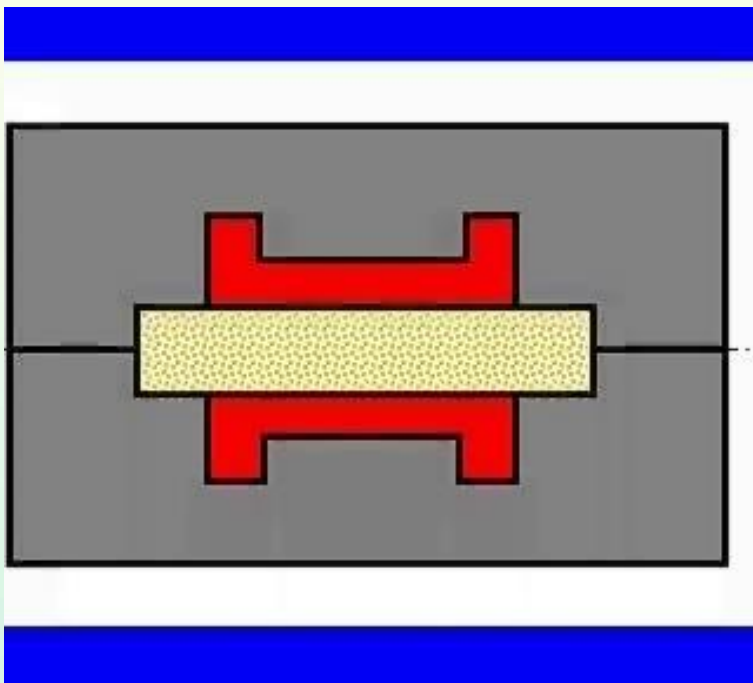
$t_2 \text{ — } t_3$  I、II 杆弹性状态，I 比 II 温度高，I 收缩大于 II，I 收缩受 II 的阻碍，产生拉应力

热应力使铸件的厚壁或心部受拉伸，薄壁或表层受压缩。



## 二、机械应力

铸件冷却到弹性状态以后，由于受到铸型、型芯和浇、冒口等的机械阻碍而产生的应力，称机械应力。



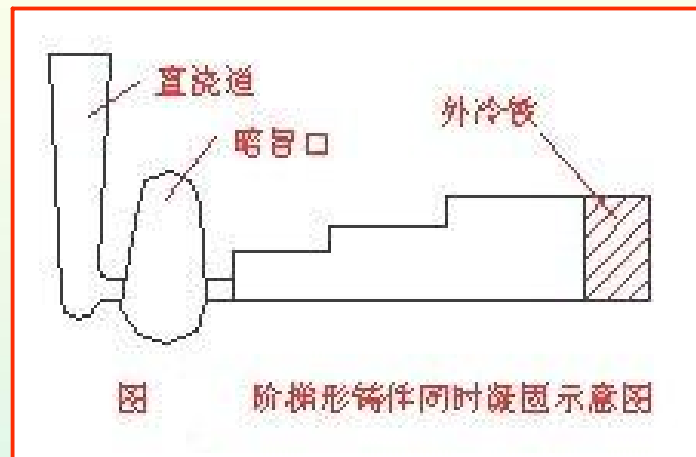
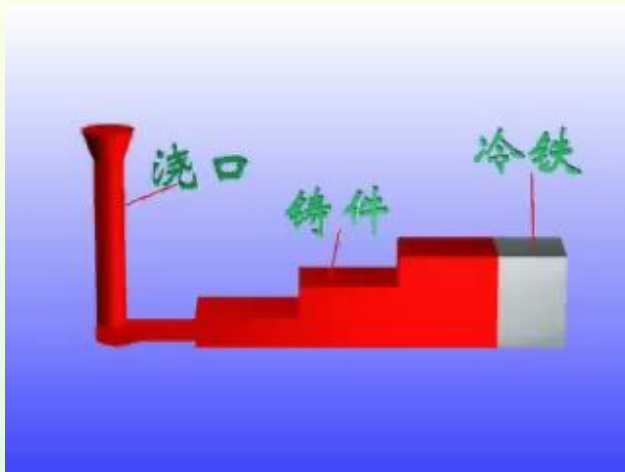
法兰的机械应力

**机械应力：**应适时开箱加以解决。

机械应力与热应力共同作用，当大于材料的**强度极限**时会导致**裂纹**的形成。

### 三、减小和消除铸造应力的方法

1、工艺方面：尽量采用合理的铸造工艺，使铸件的凝固过程符合同  
时凝固原则



2、造型工艺上：采取相应措施以减小铸造应力，如改善铸型、型芯的退让性(型芯、砂内加入木屑、焦炭沫等附加物，控制舂砂松紧度)，合理设置浇、冒口等。

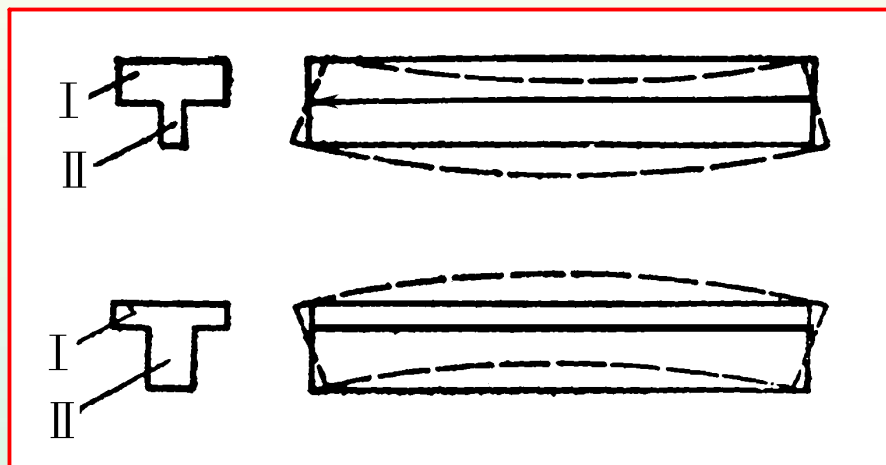
3、铸件结构上：尽量避免牵制收缩的结构，使铸件各部分能自由收缩  
(**铸件的结构尽可能对称、铸件的壁厚尽可能均匀**)。

4、去应力退火；**人工时效**；**自然时效**。

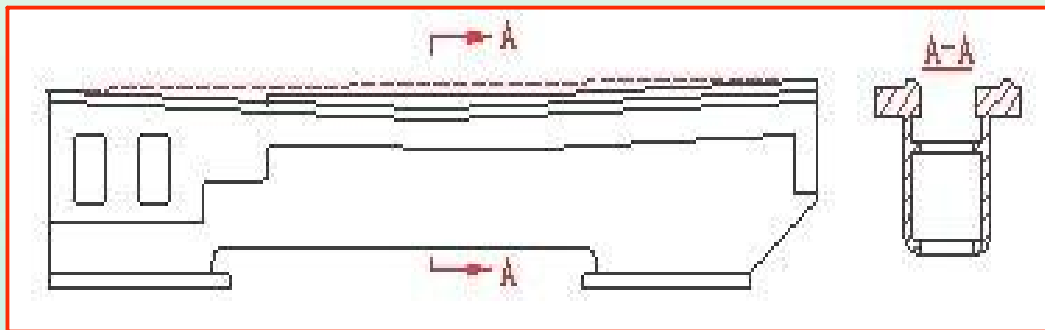
## 5.3.2 铸件的变形

具有残余应力的铸件是不稳定的，它将自发地通过变形来减缓其内应力，以便趋于稳定状态。

只有原来受拉伸部分产生压缩变形、受压缩部分产生拉伸变形，才能使残余内应力减小或消除。



厚部、心部受拉应力，出现内凹变形；薄部、表面受压应力，出现外凸变形



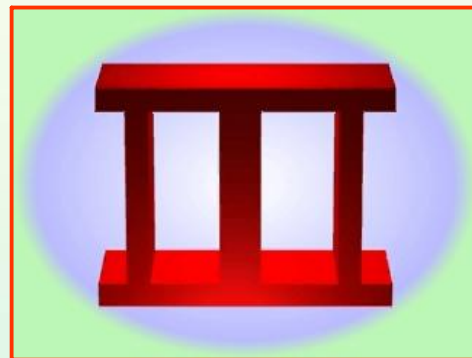
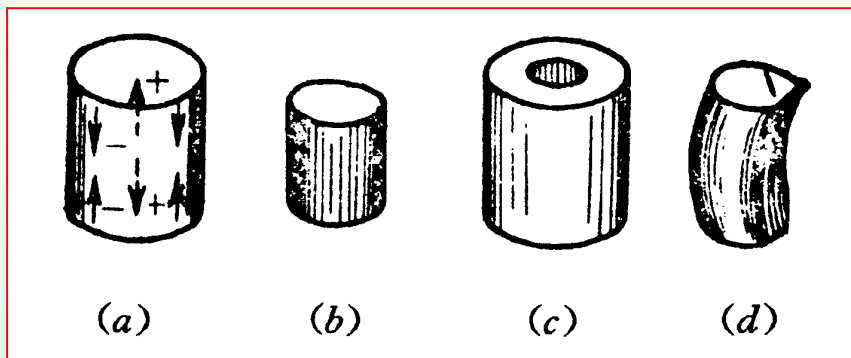
车床床身挠曲变形



一、将一**刚**生产出来的圆柱体铸件，作如下加工：

- 1、将铸件外表面车掉一层；
- 2、将心部钻一通孔；

问：在这两种情况下其长度会发生什么变化？



二、若将应力框中间的粗杆沿中间锯断：

问：应力框中间的间隙会发生什么变化？

防止变形的方法与防止铸造应力的方法基本相同。此外，工艺上还可采取某些措施，如**反变形法**；对某些重要的易变形铸件，可采取提早落砂，落砂后立即将铸件放入炉内焖火的办法消除机械应力。

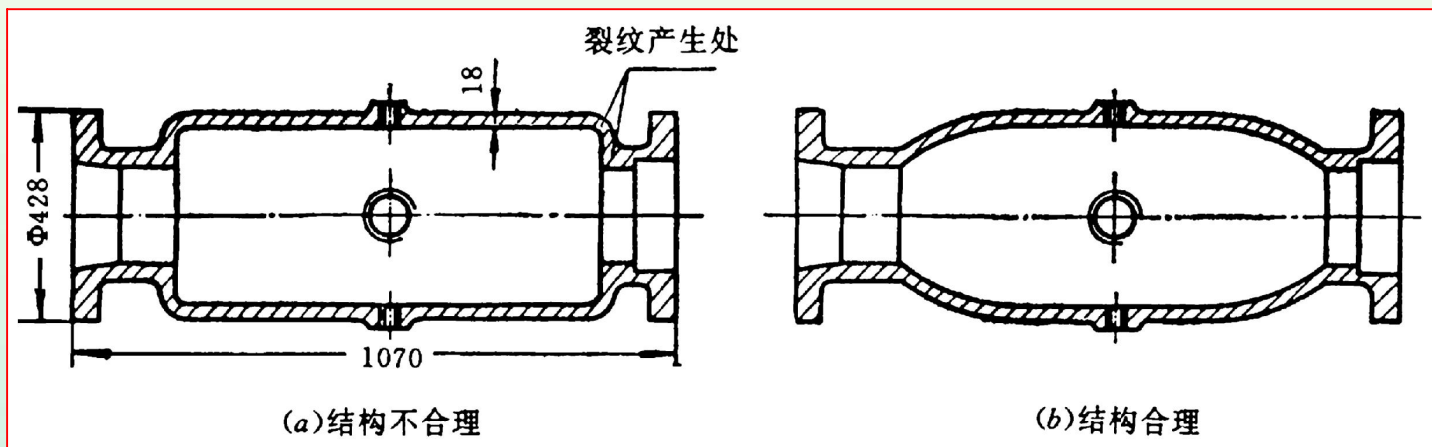
### 5.3.3 铸件的裂纹

当铸造应力超过金属的强度极限时，铸件便产生裂纹，裂纹是严重的铸造缺陷，必须设法防止。按裂纹形成的温度范围可分为**热裂**和**冷裂**两种。

#### 一、热裂

热裂是在凝固末期高温下形成的裂纹。其形状特征是缝隙宽、形状曲折、缝内呈氧化色。

热裂一般分布在应力集中部位(尖角或断面突变处)或热节处。

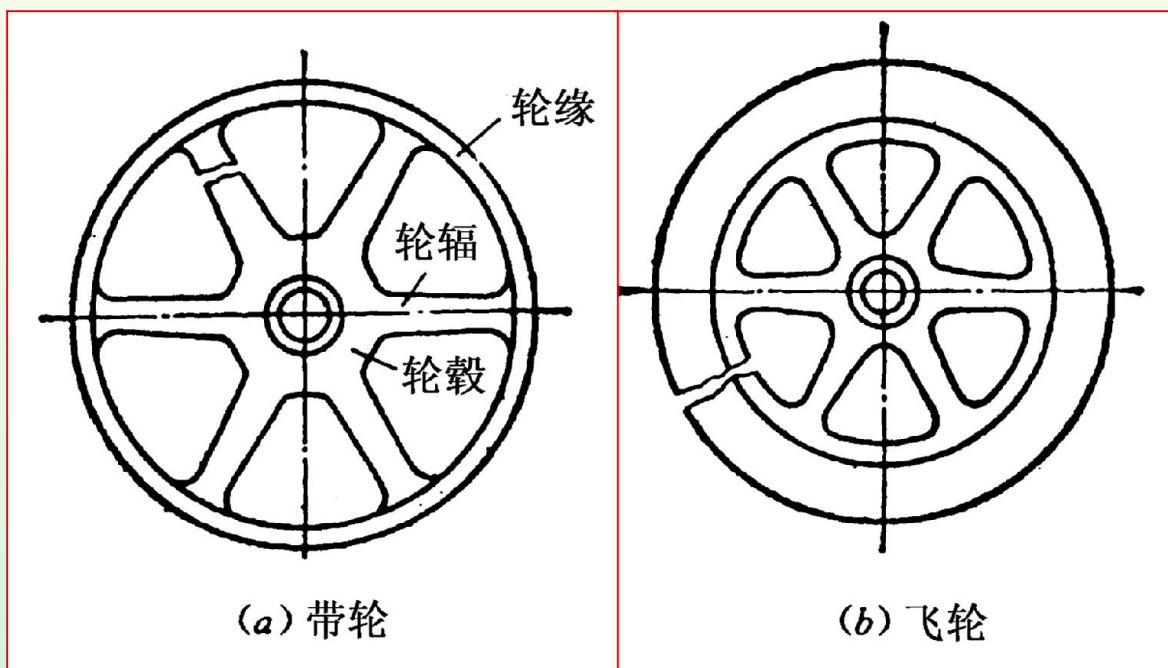


防止热裂的方法：使铸件结构合理，减小浇、冒口对铸件收缩的机械阻碍，内浇口设置应符合同时凝固原则。此外减少合金中有害杂质硫、磷含量，可提高合金高温强度，特别是硫增加合金的热脆性，使热裂倾向大大提高。



## 二、冷裂

冷裂是铸件处于弹性状态即在较低温下形成的裂纹。其形状特征是裂纹细小、连续直线状，有时缝内呈轻微氧化色。



防止冷裂的方法是尽量减小铸造应力。

## 5.4 铸件中的气孔与偏析



### 5.4.1 铸件的气孔

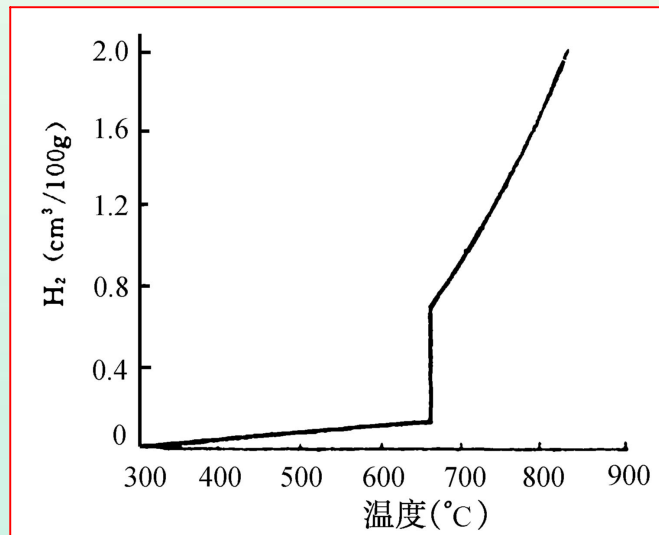
气孔是铸件中最常见的缺陷，它是由于金属液中的气体未能排除，在铸件中形成气泡所致。

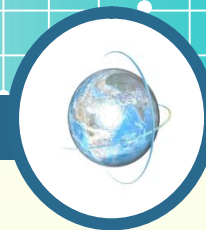
按照气体的来源，铸件中的气孔主要分为：因金属原因形成的“析出性气孔”、因铸型原因形成的“浸入性气孔”、因金属与铸型相互化学作用形成的“反应性气孔”三种。

#### 一、析出性气孔

溶解于金属液中的气体在冷凝过程中，因气体溶解度下降而析出，铸件因此而形成的气孔称为析出气孔。

合金的过热度愈高，气体的含量愈高。析出性气孔的特征是分布面积大，有时遍及整个截面。

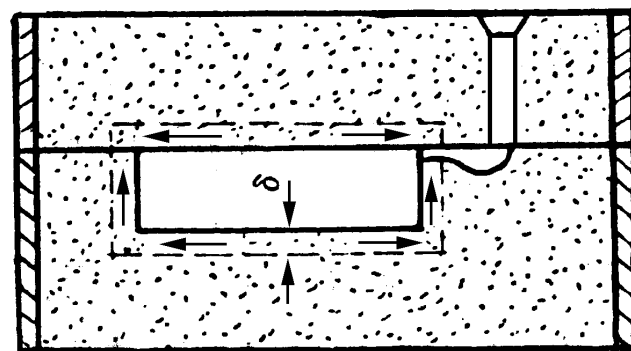




## 二、浸入性气孔

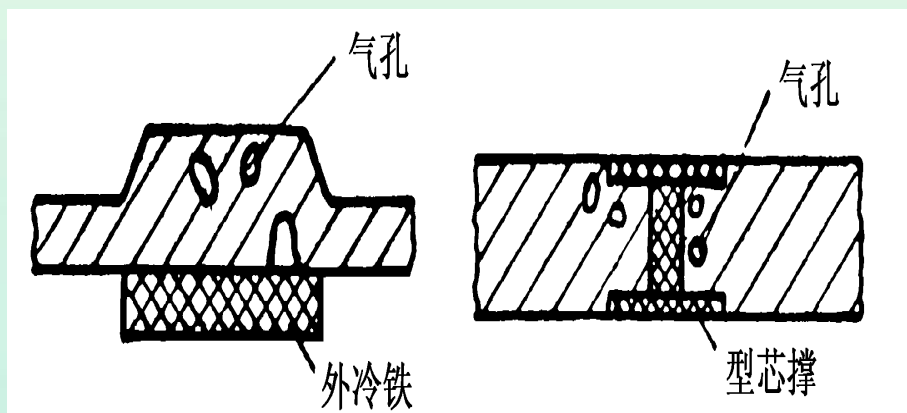
侵入气孔是由于砂型表面层聚集的气体浸入金属液中而形成的气孔。

侵入气孔的特征是：多位于上表面附近，尺寸较大，呈椭圆形或梨形，孔的内表面被氧化。

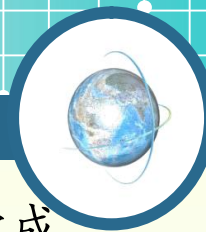


## 三、反应性气孔

浇入铸型中的金属液与铸型材料、型芯撑、冷铁或熔渣之间，因化学反应产生气体而形成的气孔，统称反应气孔。



## 5.4.2 铸件的偏析



在铸件凝固后，其截面上的不同部位，以至晶粒内部，产生化学成分的不均匀现象，称为铸造偏析。铸造偏析可分为微观偏析和宏观偏析两大类。

### 一、微观偏析

微小范围内化学成分不均匀的现象称为微观偏析，如枝晶偏析(晶内偏析)、晶界偏析等。

### 二、宏观偏析

在较大范围内化学成分不均匀的现象称宏观偏析，又称区域偏析，如正偏析、反偏析和比重偏析等。

**宏观偏析会使铸件的力学性能、气密性和切削加工性能变坏。**

# 小 结

