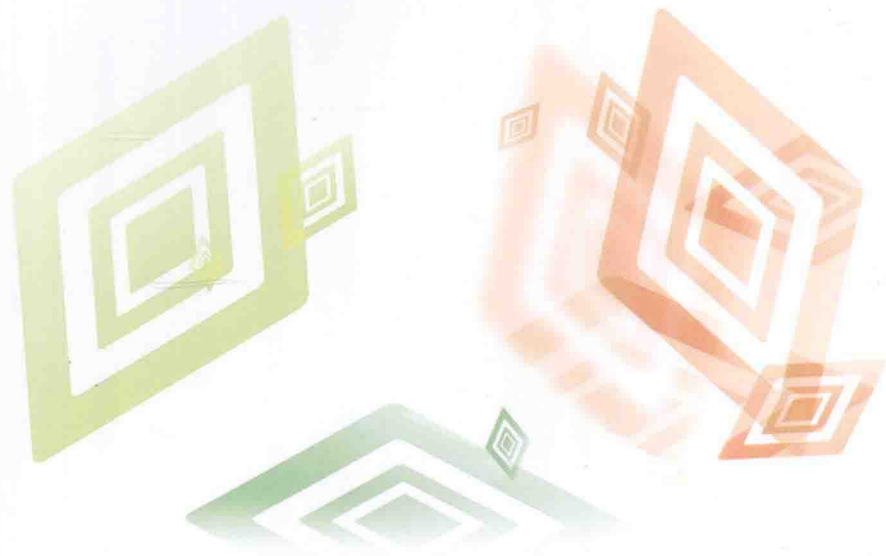




高职高专“十二五”规划教材

国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果



# 铸造合金及熔炼技术

ZHUZAO HE

LIAN JISHU

主编 丰洪微



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

高职高专“十二五”规划教材

国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果

# 铸造合金及熔炼技术

主编 丰洪微

北京  
冶金工业出版社  
2013

## 内 容 提 要

本书分为铸造合金原理、铸铁及熔炼技术、铸钢及熔炼技术、铸造有色合金及熔炼技术4个学习情境,主要讲述了铸铁、铸钢及铸造有色合金的结晶原理、组织及性能特点、化学成分的确 定、熔制工艺及熔炼设备等方面的知识,与生产实际联系紧密。

本书可作为高职高专院校冶金技术专业的教学用书,也可供冶金企业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铸造合金及熔炼技术 / 丰洪微主编. —北京: 冶金工业出版社, 2013. 12

高职高专“十二五”规划教材. 国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果

ISBN 978-7-5024-6546-9

I. ①铸… II. ①丰… III. ①铸造合金—熔炼—高等职业教育—教材 IV. ①TG136

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第030782号

出版人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 杨 帆 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6546-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2013年12月第1版, 2013年12月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 18.25印张; 435千字; 273页

**38.00元**

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街46号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

**内蒙古机电职业技术学院**  
**国家骨干高职院校建设“冶金技术”项目成果**  
**教材编辑委员会**

- 主任** 白培珠 内蒙古自治区经济和信息化委员会 副主任  
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 理事长
- 张美清 内蒙古机电职业技术学院 院长  
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 常务副理事长
- 副主任** 任玉祥 内蒙古自治区经济和信息化委员会原材料工业处 处长  
校企合作发展理事会冶金分会 理事长
- 王文儒 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司 常务副总经理
- 孙振斌 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司 副总经理
- 侯永旺 鄂尔多斯电力冶金股份有限公司 党委书记 副总经理
- 贾振国 包头钢铁集团公司 纪委书记
- 修世敏 内蒙古霍林河煤业集团有限责任公司 副总经理
- 孙喜平 内蒙古机电职业技术学院 副院长  
内蒙古机电职业技术学院校企合作发展理事会 秘书长
- 委员** 邓忠贵 戴英飞 周立平 内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司
- 闫学良 吴彦宁 大唐内蒙古鄂尔多斯铝硅科技有限公司
- 夏长林 于 鹏 包头钢铁集团稀土高科股份有限公司
- 赵占峰 张俊龙 包头钢铁集团华美稀土高科有限公司
- 贾佼成 鲍永强 中铝集团包头铝业集团公司
- 马海疆 高 琪 鄂尔多斯集团化工集团公司
- 刘国征 武 斌 包钢稀土研究院
- 史晓光 张 敬 内蒙古方圆科技有限公司
- 曹新胜 张建军 内蒙古光泰铝业有限公司
- 陈 强 董拥军 包头亚新隆顺特钢有限公司
- 石 富 刘敏丽 张秀玲 内蒙古机电职业技术学院
- 秘书** 王 优 (010-64046165, wangy82@aliyun.com) 冶金工业出版社

# 目 录

学习情境1 铸造合金原理 .....	1
【学习目标】 .....	1
任务 1.1 液态金属结构与性质分析 .....	1
【任务描述】 .....	1
【任务分析】 .....	1
【知识准备】 .....	1
1.1.1 液态金属的结构 .....	1
1.1.2 液态金属的物理性质 .....	2
任务 1.2 液态金属结晶过程分析 .....	3
【任务描述】 .....	3
【任务分析】 .....	3
【知识准备】 .....	3
1.2.1 液态金属中晶核的形成 .....	3
1.2.2 液态金属中晶体的长大 .....	4
任务 1.3 铸造合金的流动性 .....	6
【任务描述】 .....	6
【任务分析】 .....	6
【知识准备】 .....	6
任务 1.4 铸造合金自由线收缩的测定 .....	11
【任务描述】 .....	11
【任务分析】 .....	11
【知识准备】 .....	11
1.4.1 铸造合金的收缩性 .....	11
1.4.2 铸件中的缩孔和缩松 .....	14
任务 1.5 铸造应力、变形与裂纹 .....	16
【任务描述】 .....	16
【任务分析】 .....	16
【知识准备】 .....	16
1.5.1 铸造应力 .....	16
1.5.2 铸铁的变形 .....	22
1.5.3 铸件的裂纹 .....	22
任务 1.6 铸造合金中的偏析、气体和夹杂物 .....	24

# 学习情境1 铸造合金原理

## 【学习目标】

- (1) 了解铸造合金的液态结构、物理性质及结晶凝固特点。
- (2) 掌握影响铸件质量的工艺性能（也称为铸造性能，包括流动性、收缩性、偏析、气体及夹杂物等）。

## 任务1.1 液态金属结构与性质分析

### 【任务描述】

在铸造生产过程中，铸件是由液态金属转变为固体金属的结晶过程而得到的。而液态金属冷却时会产生体积的变化，固相的析出、凝固过程中溶质的再分配，气体和夹杂物的析出等。这些变化都与铸件的母体即液态金属的结构与物理性质密切相关。

### 【任务分析】

了解液态金属的结构，可以控制其结晶过程，改善铸件的性能。

### 【知识准备】

#### 1.1.1 液态金属的结构

由金属学原理可知，固态金属都是晶体，其中的原子都是在较大范围内按照特定的晶格类型呈现有规则的排列，我们把固态金属的这种结构特征称为“远程有序”结构。而当固态金属加热时，随着加热温度的提高，原子的热振动加剧，振幅增大，活化原子数增多，原子在点阵中频繁跳跃，点阵内的空位数增加；对于多晶体还可使晶界产生移动，从而使金属的体积膨胀。

由于原子在三维方向都有相邻的原子，彼此的振动方向又是随机的。因此，常常相互碰撞并传递能量，从而使有的原子能量增大或减小，使有的原子能量大于或远远大于原子的平均能量，有的小于或远远小于原子的平均能量。这种能量的不均匀性称为能量起伏。

当温度达到熔点时，多晶体晶粒之间的结合受到极大的破坏，晶粒之间更容易产生相对运动，使原有晶粒逐渐失去固有的形状和尺寸。为了使金属由固态转变为液体，还需要不断提供能量使原子间的结合进一步破坏，使晶粒进一步瓦解为小的原子集团，称为“近程有序”。这时外部提供的能量并不是使金属的温度进一步升高，而是使原子间的结合进一步破坏，我们把金属由固态转变为液态时所吸收的能量称为熔化潜热。几种金属的熔化潜热比较，见表1-1。

表 1-1 几种金属的熔化潜热

金属名称	铝	铜	铁	锌	铬
熔化潜热/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	10.5	13.0	16.2	8.2	16.5

能量起伏理论是我们了解物质微观运动的一个重要概念。用此理论可以解释金属的熔化、蒸发、扩散、凝聚和固态相变等一系列物理、化学过程。

从微观上看，液态金属是由许多强烈游动的原子集团和空穴所组成，温度越高，原子集团越小，空穴越多，能量起伏越大，游动越快。所有的原子集团都处在瞬息万变状态，时而长大，时而变小，时而产生，时而消失，即时聚时散，时有时无。我们把金属的这种现象称为结构起伏。用此可以解释液态金属的流动性。只要在重力场的作用下，其外形就能随着铸型型腔而变化。

合金都是由两种或两种以上元素组成，不同元素间的原子结合力是不相同的，结合能力较强的原子容易聚集到一起而排斥别的原子。这就造成在游动的原子集团中有的 A 种原子多，有的 B 种原子多。我们把这种原子集团间成分不均匀现象称为浓度起伏，如图 1-1 所示。

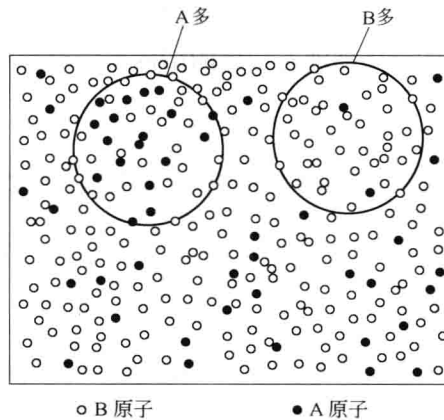


图 1-1 液态金属中浓度起伏示意图

### 1.1.2 液态金属的物理性质

液态金属的物理性质对金属的浇注、凝固过程及铸件质量都有很大的影响。

(1) 熔点和熔化热。各种纯金属的熔点差别很大，如 K 为  $63.7^{\circ}\text{C}$ ，Fe 为  $1538^{\circ}\text{C}$ ，Al 为  $660.37^{\circ}\text{C}$ ，Cu 为  $1083^{\circ}\text{C}$ 。纯金属在一定的温度下熔化和结晶，而大部分合金（除共晶成分合金外）则有一个熔化或结晶温度区间，其大小取决于合金的种类和成分。

各种金属的熔化热差别也很大，如 Cu 为  $54.5\text{kJ/mol}$ ，Fe 为  $16.2\text{kJ/mol}$ ，Al 为  $10.7\text{kJ/mol}$ ，Zn 为  $6.7\text{kJ/mol}$ ，Sn 为  $7.2\text{kJ/mol}$  等。具有熔化温度区间的合金，熔化时所吸收的热量包括真正的熔化热和从固相线加热到液相线所吸收的热量。

(2) 液态金属的热膨胀和凝固收缩。绝大多数金属的液态密度都比固态时小，如 Cu 为  $7.93\text{g/cm}^3$ ，Al 为  $2.35\text{g/cm}^3$ ，Zn 为  $6.92\text{g/cm}^3$ 。原因是在液态时金属原子的热运动

加剧,空位和空穴增多,体积也明显膨胀。同理,几乎所有金属(除 Bi、Sb、Si 外),凝固时体积都要缩小,如 Al 凝固时的体收缩为 6.6%,Cu 为 2.6%,Bi 为 -3.32% (膨胀为负)。金属的这一特性对铸件的形成过程十分重要,并且受到合金的种类、成分及合金中含气量的影响。

(3) 液态金属的黏度。液体在层流运动时,各液层之间有摩擦力,称为液体的内摩擦,其妨碍着液体的流动。此种内摩擦阻力称为黏度,是液态金属的物理特性之一。

通常用动力黏度系数来表示液态金属黏度的大小。据实验测定:Al 在 800℃ 为 0.0014Pa·s, Cu 在 1145℃ 为 0.0034Pa·s, Pb 在 411℃ 为 0.0021, Fe 在 1540℃ 为 0.004Pa·s。

液态金属的黏度对金属在铸型中的流动性,金属中气体、夹杂物、熔渣等上浮,以至铸件的补缩均有明显的影响。液态金属的黏度大小与许多因素有关,如温度、压力、化学成分及杂质含量等。几乎所有金属的黏度都随温度的升高而降低,液态金属中固态杂质的数量愈多,黏度也愈大。同一合金的成分不同,黏度也有差别。如共晶成分的铁碳合金,在相同条件下,其黏度要比其他成分的低。

(4) 液态金属的表面张力。由于液相表面的质点受到周围质点对它的作用力,并且不平衡。因此,产生一个欲把表面质点拉向液体内部的力,促使其表面积减小,此力称为表面张力。

液态金属表面张力的大小,对液态金属的充型及是否能获得轮廓清晰的健全铸件影响较大。相同条件下表面张力小的液态金属较表面张力大的有利于充型,在制定铸造工艺时要给以考虑。一般情况下,为了保证液态金属充满薄壁铸型,克服因表面张力而产生的附加压力,就需要适当加高压头。

## 任务 1.2 液态金属结晶过程分析

### 【任务描述】

我们所使用的各种铸件都是通过由液态转变为固态的结晶过程得到的,为了获得所需要的铸件组织和性能,就必须搞清楚金属结晶过程的基本规律,以便指导生产,控制铸件的铸态组织和性能。

### 【任务分析】

金属或合金的结晶过程,在温度起伏、结构起伏和浓度起伏的作用下,同样是由晶核的形成和晶体的长大这两个基本过程组成。

### 【知识准备】

#### 1.2.1 液态金属中晶核的形成

图 1-2 是金属的实际冷却曲线,液态金属并不是冷却到理论结晶温度  $T_0$  后就立刻开始结晶的,而只有当液态金属的过冷度  $\Delta T$  达到一定数值  $\Delta T_1$  后才开始形成固体晶核。

由于结晶条件不同,可能会出现两种不同的形核方式:即自发行核和非自发行核。



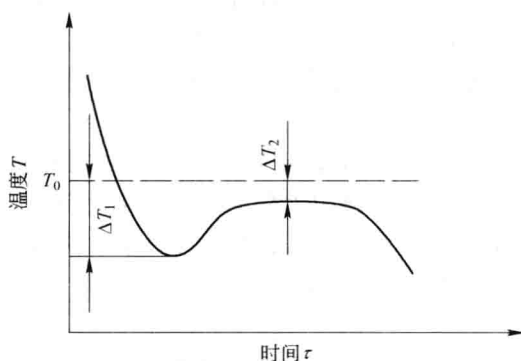


图 1-2 金属的实际冷却曲线

(1) 自发形核。也称均质形核，它是液态金属中存在的此起彼伏的原子集团，当过冷到  $\Delta T_1$  时，其中一部分就成为结晶的核心。过冷度愈大，形成的晶核也就愈多，晶粒也就愈细。实验指出，自发形核所需的过冷度较大，约为金属熔点的 20% 左右。因此，在铸造合金的实际结晶过程中，自发形核的可能性很小。

(2) 非自发形核。也称非均质形核，它是以液态金属中的杂质、固体质点及其他外来表面为基础，当液态金属过冷到平衡结晶温度以下时，依附在这些表面上的某些原子集团就成为结晶核心。在实际液态金属中固体质点愈多，结晶过冷度就愈大，形成的晶粒也就愈细。

实验还证明，非自发形核所需的过冷度远比自发形核小，仅为理论结晶温度的 2% 左右。因此，铸造合金结晶的形核方式多以非自发形核为主。

### 1.2.2 液态金属中晶体的长大

在液态金属中晶核形成以后，结晶条件及结晶速度不同对结晶后晶体的形状、大小以及性能都有很大的影响。

#### 1.2.2.1 晶核长大的机理

晶核的长大机理与固-液相界面处的结构有关。晶核与液相界面有两种类型：即平整界面和粗糙界面。

(1) 平整界面及侧面长大机理。固相界面上原子层的排列基本上是满的，如图 1-3 (a) 中，虚线以上只有少量的孤立原子 A，这些原子是不稳定的，时而脱离，时而长大，但界面总的来说是平整的。这种界面上的单原子和晶面的结合较弱，长大速度很慢，所需的过冷度也较大，我们称这种长大为侧面长大。而且这种界面多出现在非金属物质的结晶中。

(2) 粗糙界面及垂直长大机理。如图 1-3 (b) 所示，固相表面最外几个原子层 A 约有 50% 的位置是空的。这种界面结构很容易把从液相迁移来的原子 B 联结起来。因此，长大的速度就很快，生长所需要的过冷度也很小，这种长大称为垂直长大。大多数金属晶体的长大属于这种方式，也称这种界面为金属型界面。

#### 1.2.2.2 晶体长大的形态

晶体长大的形态因结晶条件不同而不同。当过冷度很小时，液体内呈正的温度梯度，

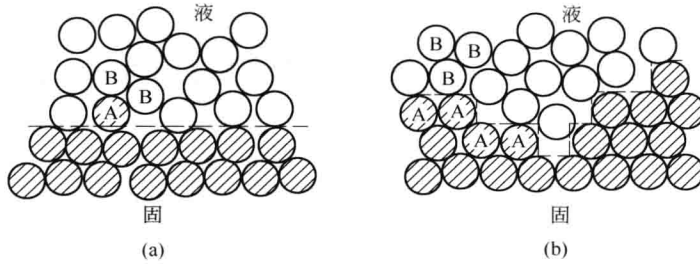


图 1-3 液-固界面的两种结构  
(a) 平整界面; (b) 粗糙界面

如图 1-4 (a) 所示。从液-固界面起，沿晶体的长大方向，液体温度递增时，结晶潜热只能通过已经结晶的固体来散发，长大速度决定于固体的温度梯度和导热能力。这时固-液交界面（相界面）上的任何局部的凸出伸向温度高于熔点的液体内的凸出点必然会重新熔化。所以在相界面上，固相只能以平面向前推进，使晶体在长大的过程中保持比较规则的外形。

当结晶过程中释放出的大量结晶潜热使界面上的温度高于周围液态金属的温度时，会在相界面前沿的液体中造成所谓的负温度梯度，如图 1-4 (b) 所示，这时相界面上如果出现局部的凸出点，它将伸向过冷度较大的液体中，并以高于周围晶体的长大速度长大，这就破坏了平面长大的相界面。

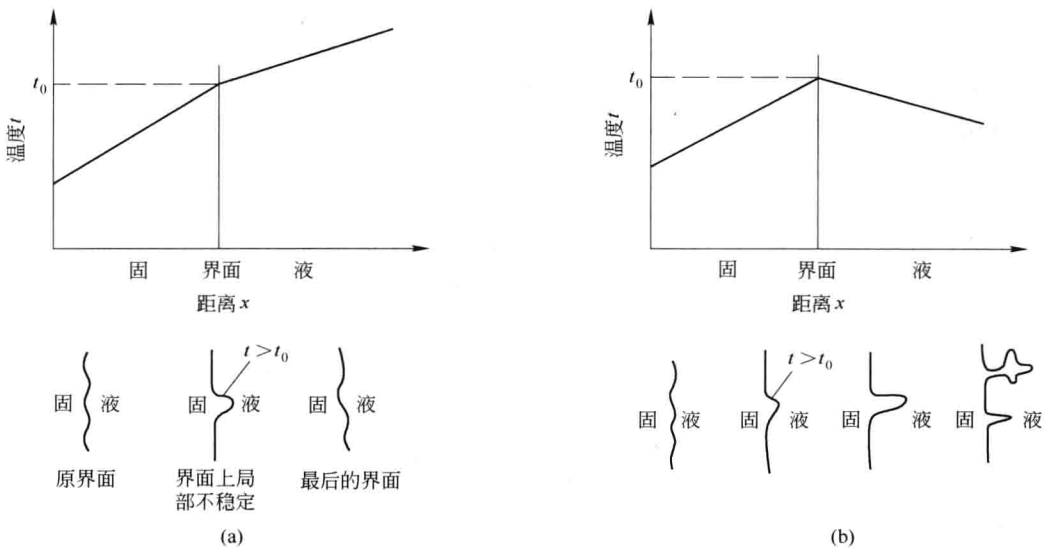


图 1-4 存在温度梯度时界面的推出方式

(a) 正温度梯度时界面的变化; (b) 负温度梯度时界面的变化

通常，这种局部凸出而又迅速生长所形成的晶体，又可以从侧面破坏，长出旁边的分枝，这就是所谓的树枝状成长。另外，由于合金凝固时，在界面前沿的液相中出现溶质元素富集和结晶温度的变化，改变了固-液界面前沿的过冷情况，使界面前沿的液相产生生成

分过冷现象。成分过冷也和负温度梯度一样有利于树枝状结晶的生长。

## 任务 1.3 铸造合金的流动性

### 【任务描述】

合金的流动性是指液体合金本身的流动能力，是合金的铸造性能之一，它与合金的成分、温度、杂质含量及其物理性能有关。

### 【任务分析】

影响合金流动性因素有：合金成分、结晶潜热、黏度、表面张力、熔制工艺等。

### 【知识准备】

纯金属和共晶成分合金在固定的温度下凝固，已凝固的固体层从铸件表面逐层向中心推进，与未凝固的液体之间界面分明，而且固体层内表面比较光滑，对液体的流动阻力小，直至析出较多的固相时，才停止流动，所以此类合金液流动时间较长，流动性好。对于具有较宽结晶温度范围的合金，其结晶温度范围越宽，铸件断面上存在的液—固两相区就越宽，枝晶也越发达，阻力越大，合金液停止流动就越早，流动性就越不好。通常，在铸造铝合金中，Al—Si 合金的流动性好；在铸造铜合金中，黄铜比锡青铜的流动性好，就是这个道理。

结晶潜热是估量纯金属和共晶成分合金流动性的一个重要因素。凝固过程中释放的潜热越多，则使其保持液态的时间就越长，流动性就越好。因此，当将具有相同过热度的六种纯金属浇入冷的金属型中时，就会出现 Al 的流动性最好，Pb 的流动性最差，Zn、Sb、Cd、Sn 依次居中的情况。对于结晶温度范围宽的合金，结晶潜热对流动性似乎影响不大，但对于初生晶为非金属相，并且合金在液相线温度以下以液—固混合状态，在不大的压力下流动时，非金属相的结晶潜热可能是一个重要影响因素。例如，在相同过热度下的 Al—Si 合金的流动性在共晶成分处并非最大，而在过共晶区里出现一段继续增加的现象，就是由于此时初生晶为块状非金属相 Si，且其结晶潜热大的缘故。

合金的比热容和密度越大，热导率越小，则在相同的过热度下，保持液态的时间越长，流动性就越好，反之亦然。此外，合金的流动性还受液体合金的黏度、表面张力等物理性能的影响。

流动性好的合金，充填铸型的能力强。在相同的铸造条件下，良好的流动性，有利于合金液良好地充满铸型，以得到形状、尺寸准确，轮廓清晰的致密铸件；有利于使铸件在凝固期间产生的缩孔得到合金液的补缩；有利于使铸件在凝固末期受阻而出现的热裂得到合金液的充填而弥合。因此，合金具有良好的流动性有利于防止浇不足、补缩不足及热裂等缺陷的产生。

当然，还应当指出，在实际生产中，当合金牌号一定（即合金液本身的流动能力一定）的情况下，除加强熔炼工艺控制（如加强去气除渣处理）外，采取改善铸型工艺和适当提高浇注温度的办法，可有效提高合金液充填铸型的能力。

在讨论合金液流动性时，常将合金液在凝固过程中（即凝固温度区间）停止流动的

温度称为零流动性温度，将合金液加热至零流动性温度以上同一过热度时所测得的流动性称为真正流动性，将在同一浇注温度下所测得的流动性称为实际流动性，参见图 1-5。但在一般情况下，零流动性温度很难确定，故无特殊说明时，所说流动均指实际流动性。

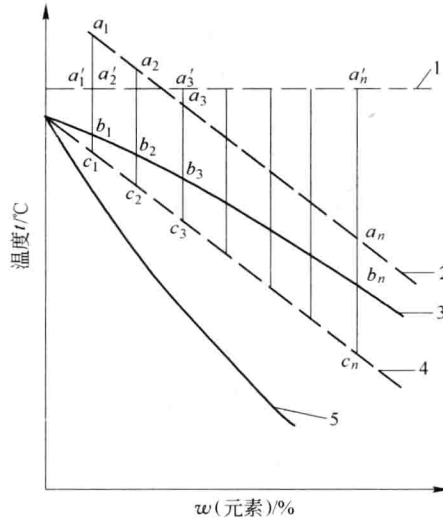


图 1-5 各种流动性的示意图

1—实际流动性的浇注温度线；2—真正流动性的浇注温度线（指过热度相同：  
 $a_1 c_1 = a_2 c_2 = \dots = a_n c_n$ ）；3—液相线；4—零流动性线；5—固相线

测试铸造非铁合金的流动性方法很多，按试样的形状可以分为：螺旋试样、水平直棒试样、楔形试样和球形试样等。前两种是等截面试样，以合金液的流动长度表示其流动性；后两种是等体积试样，以合金液未充满的长度或面积表示其流动性。流动性试样所用的铸型分为：砂型和金属型。在对比某种合金和经常生产的合金的流动性时，应该明确规定测试条件，采取同样的浇注温度（或同样的过热度）和同样的铸型，否则对比就没有意义。

测定铸造非铁合金的流动性时，最常采用的是螺旋试样法。此法可分为标准法和简易法。标准法采用同心三螺旋流动性测试装置，试样形状及尺寸如图 1-6 所示，铸型的合型图如图 1-7 所示；简易法采用单螺旋流动性测试装置，试样形状及尺寸如图 1-8 所示，铸型的合型图如图 1-9 所示。试样铸型的基本结构包括外浇道、直浇道和使合金液沿水平方向流动的具有倒梯形断面的螺旋线形沟槽。沟槽中每隔 50mm 有一个凹点，用以直接读出螺旋线的长度。

通常，试样采取湿型浇注，铸型为水平组合型，铸型的最小吃砂量应大于 20mm，铸型采用捣实造型方法成型，砂的紧实度控制在  $1.6 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$  铸型型腔表面应光滑完整，标距点应明显准确，铸型扎的排气孔不得穿透型腔。

在测试过程中，环境温度控制在  $5 \sim 40^\circ\text{C}$ ，相对湿度控制在 30% ~ 85%，铸型应保持水平状态，并须避开磁场、振动等干扰因素的影响；铸型放置时间不应超过 1h；采用热电偶和二次仪表在浇包内测量浇注温度，并控制浇注温度在合金液相线以上  $50 \sim 90^\circ\text{C}$

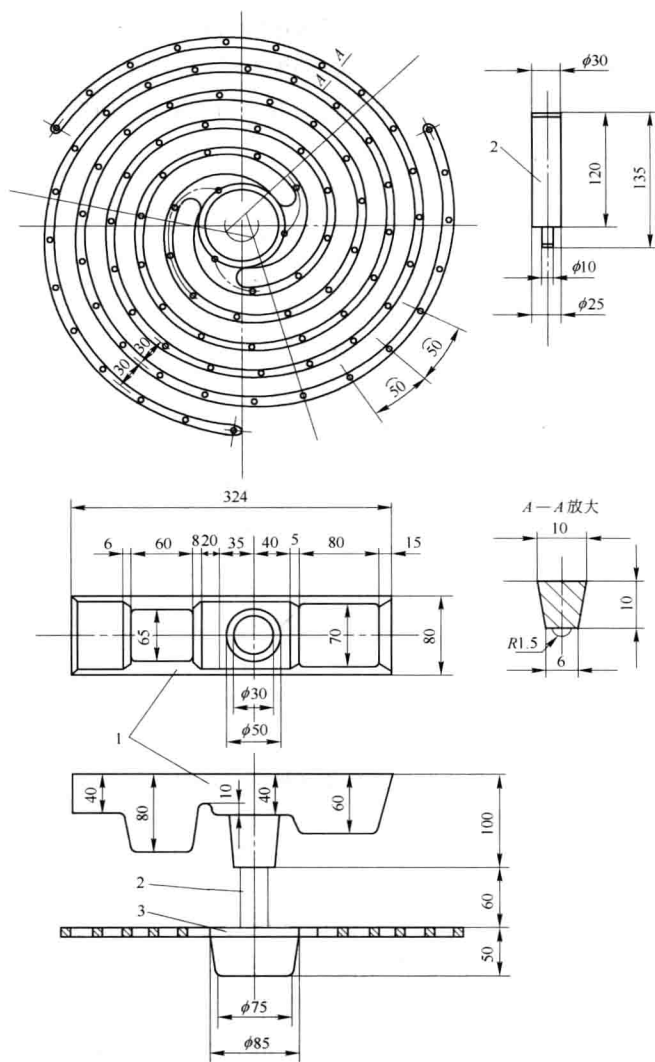


图 1-6 同心三螺旋流动性试样形状尺寸

1—外浇道模样；2—直浇道模样；3—同心三螺旋模样

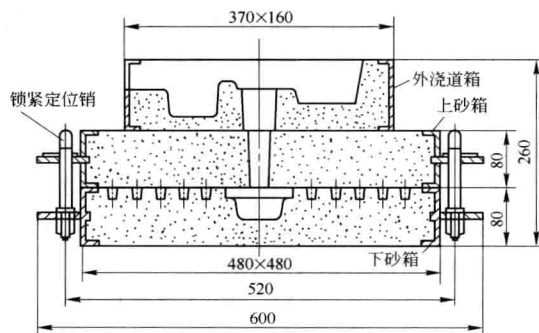


图 1-7 标准法测试合金流动性的铸型合型图

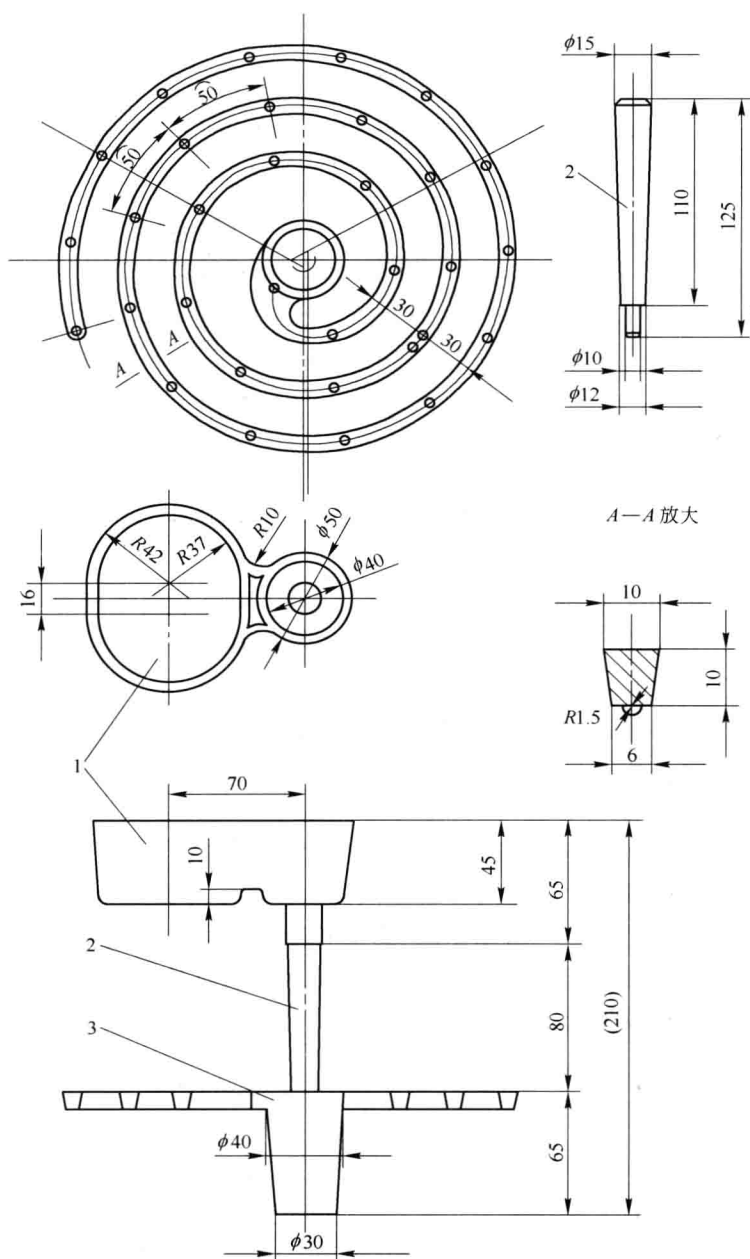


图 1-8 单螺旋流动性试样形状尺寸

1—外浇道模样；2—直浇道模样；3—单心螺旋模样

(熔点高的合金取上限, 熔点低的合金取下限); 测温后立即浇注, 浇注液流要平稳而无冲击; 试样浇注后需经自然冷却半小时再打箱; 清理后即知浇成的螺旋试样长度; 最后, 合金的流动性由螺旋线的流动长度 (mm) 和对应的浇注温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 来判定。标准法以每次测试的三个同心螺旋线长度的算术平均值为测试结果; 简易法以三次同种合金相同浇注温度下的单螺旋长度的算术平均值为测试结果。

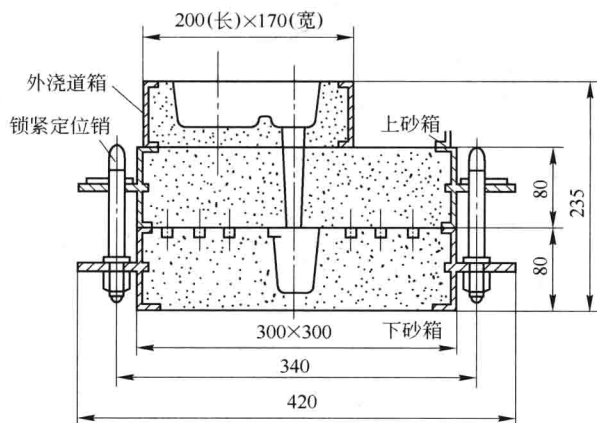


图 1-9 简易法测试合金流动性的铸型合型图

还须说明，当试样产生缩孔、缩陷、夹渣、气孔、砂孔、浇不到等明显铸造缺陷时；当试样由于浇注“跑火”引起严重飞边时；当试样表面粗糙度不合格（即  $Ra \geq 25 \mu\text{m}$ ）时，其测试结果应视为无效。

采用螺旋试样法的优点是：试样型腔较长，而其轮廓尺寸较小，烘干时不易变形，浇注时易保持水平位置。其缺点是：合金液的流动条件和温度条件随时在改变，影响其测试之准确度。

水平直棒试样法是测试铸造非铁合金流动性的另一种常用方法，其铸型结构如图 1-10 所示，一般多采用金属型。试验时将合金液浇入铸型中并测量合金液流程的长度。采用此法时，合金流动方向不变，故流动阻力影响较小。但采用砂型时，型腔很长，要保持在很长的长度上断面面积不变并在浇注时处于完全水平状态是有困难的；如采用金属型，其型温难以控制，故灵敏较低。

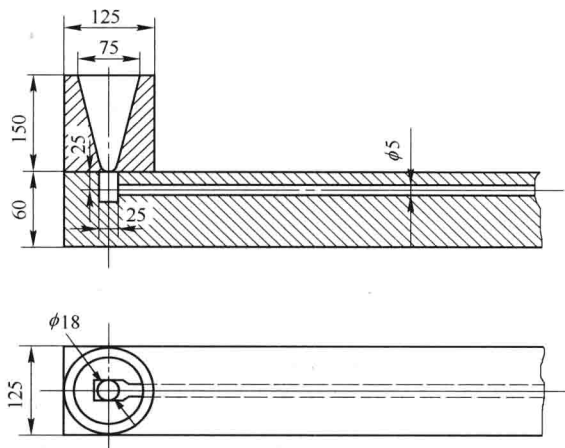


图 1-10 水平直棒试样法测试合金流动性的铸型合型图

## 任务 1.4 铸造合金自由线收缩的测定

### 【任务描述】

收缩不仅是铸造合金本身的物理性质，又是铸件中许多缺陷，如缩孔、缩松、热裂、应力、变形和裂纹等产生的基本原因，是合金的重要铸造性能之一。它对铸件质量（如获得符合要求的几何形状和尺寸，致密的优质铸件）有着很大的影响。

### 【任务分析】

合金的收缩经历三个相互联系的阶段：液态收缩阶段、凝固收缩阶段及固态收缩阶段。

### 【知识准备】

#### 1.4.1 铸造合金的收缩性

##### 1.4.1.1 收缩的基本概念

液态合金当温度下降而由液态转变为固态时，因为金属原子由近程有序逐渐转变为远程有序，以及空穴的减少或消失，一般都会发生体积减小。液态合金凝固后，随温度的继续下降，原子间的距离还要缩短，体积也进一步减小。铸造合金在液态、凝固态和固态冷却的过程中，由于温度的降低而发生的体积减小现象，称为铸造合金的收缩性。

铸造合金由液态到常温的收缩可用体积改变量来表示，称为体收缩。合金在固态时的收缩，除了用体积改变量表示外，还可用长度改变量来表示，称为线收缩。因为在设计和制造模样时，线收缩更有意义。

假设合金从温度  $t_0$  下降到  $t_1$  时，其体积和长度的变化如下：

$$V_1 = V_0 [1 - \alpha_v(t_0 - t_1)] \quad (1-1)$$

$$L_1 = L_0 [1 - \alpha_l(t_0 - t_1)] \quad (1-2)$$

式中  $V_0, V_1$ ——合金在  $t_0$  和  $t_1$  时的体积， $m^3$ ；

$L_0, L_1$ ——合金在  $t_0$  和  $t_1$  时的长度， $m$ ；

$\alpha_v, \alpha_l$ ——合金在  $t_0$  和  $t_1$  温度范围的体收缩系数和线收缩系数， $1/^\circ C$ ，它是温度的函数（一般均取某一温度区间的平均值）。

在实际生产中，通常以单位体积或单位长度的相对变化量来表示合金的收缩量，称为收缩率（用  $\varepsilon$  表示）。当温度由  $t_0$  下降到  $t_1$  时，其体收缩率（ $\varepsilon_v$ ）和线收缩率（ $\varepsilon_l$ ）分别为：

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \alpha_v(t_0 - t_1) \times 100\% \quad (1-3)$$

$$\varepsilon_l = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% = \alpha_l(t_0 - t_1) \times 100\% \quad (1-4)$$

线收缩率与体收缩率之间的关系，在固态收缩时可近似表示为： $\varepsilon_v = \varepsilon_l$ 。

$\varepsilon$  是  $\alpha$  与温度差的乘积，既与合金的性质有关，又与温度区间的大小有关。

铸造合金由液态冷却到常温，其体收缩率随温度的变化可用图 1-11 表示。从图中可



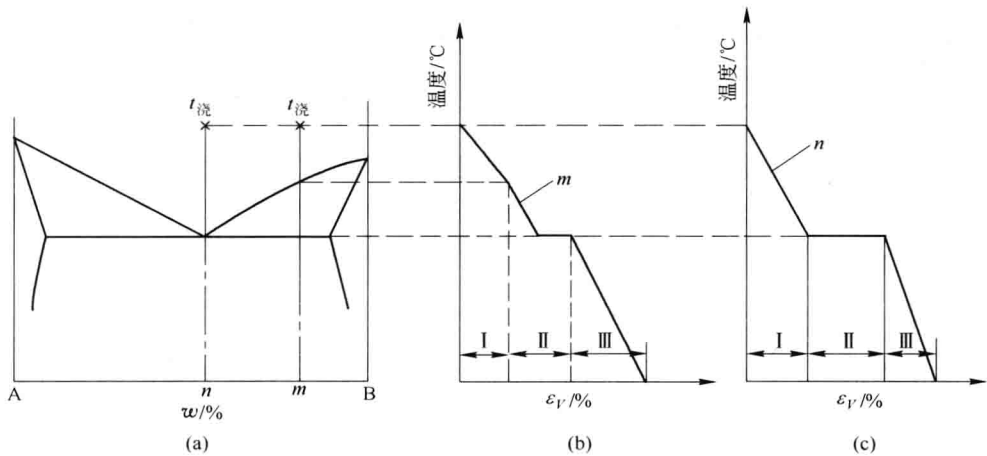


图 1-11 铸造合金收缩过程示意

(a) 合金状态图；(b) 具有结晶温度范围合金 ( $m$  成分) 的收缩过程；

(c) 共晶合金 ( $n$  成分) 的收缩过程

见，合金的收缩经历三个相互联系的阶段：液态收缩阶段（Ⅰ）；凝固收缩阶段（Ⅱ）；固态收缩阶段（Ⅲ）。

铸造合金在不同阶段的收缩性是不同的，而且对铸件质量也有不同的影响。

### A 液态收缩

当液态合金从浇注温度  $t_{\text{浇}}$  冷却至开始凝固的液相线温度  $t_{\text{液}}$  时的收缩，由于合金是处于液体状态，故称其为液态收缩，表现为型腔内液面的降低。液态收缩率  $\varepsilon_{V\text{液}}$  可用下式表示：

$$\varepsilon_{V\text{液}} = \alpha_{V\text{液}} (t_{\text{浇}} - t_{\text{液}}) \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $\alpha_{V\text{液}}$ ——合金在  $t_{\text{浇}}$  到  $t_{\text{液}}$  温度范围内的液态体收缩系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

$t_{\text{浇}}$ ——液态金属的浇注温度， $^\circ\text{C}$ ；

$t_{\text{液}}$ ——合金的液相线温度， $^\circ\text{C}$ 。

从式中可以看出，提高浇注温度  $t_{\text{浇}}$ ，或因成分改变而降低  $t_{\text{液}}$ ，都会使  $\varepsilon_{V\text{液}}$  增加； $\alpha_{V\text{液}}$ （随着合金的化学成分和温度的不同而变化）增大，则  $\varepsilon_{V\text{液}}$  也增大。

### B 凝固收缩

对于具有一定结晶温度范围的合金，由液态/液转变为固态/固时，由于合金处于凝固状态，故称为凝固收缩。这类合金的凝固体收缩率主要包括温度降低（与合金的结晶范围有关）和状态改变（状态改变时的体积变化）两部分。

对于纯金属和共晶合金而言，凝固期间的体收缩率  $\varepsilon_{V\text{液}}$  只有因状态的改变而引起的收缩，故一般是一个定值，见表 1-2。

表 1-2 各种金属的凝固体收缩率

金属种类	Al	Mg	Cu	Co	Fe	Zn	Ag	Sn	Pb	Sb	Bi
$\varepsilon_{V\text{液}}/\%$	6.24	4.83	4.8	4.8	4.44	4.35	4.09	2.79	2.69	0.93	3.1