

“十二五”普通高等教育本科规划教材

# 材料成形工艺

刘万辉 主编 曲立杰 成 烨 副主编



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

# 材料成形工艺

刘万辉 主编 曲立杰 成 烨 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书由8章组成,系统介绍了金属液体成形(铸造)、焊接成形、塑性成形(锻造、冲压、挤压等)加工工艺的相关原理、工艺设计、生产设备、缺陷检测手段;同时,阐述了无机非金属材料成形工艺、高分子材料成形工艺、复合材料成形工艺,以及粉末冶金成形与新型快速成形技术等内容。本书的特点是通用性较强,并具有较强的实用性。

本书既可以作为高等院校材料类专业的教材使用,也可供相关专业技术人员参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺/刘万辉主编. —北京:化学工业出版社, 2014.8

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-21976-3

I. ①材… II. ①刘… III. ①工程材料-成形-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第231621号

---

责任编辑:杨 菁

文字编辑:李锦侠

责任校对:陶燕华

装帧设计:张 辉

---

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17½ 字数457千字 2014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

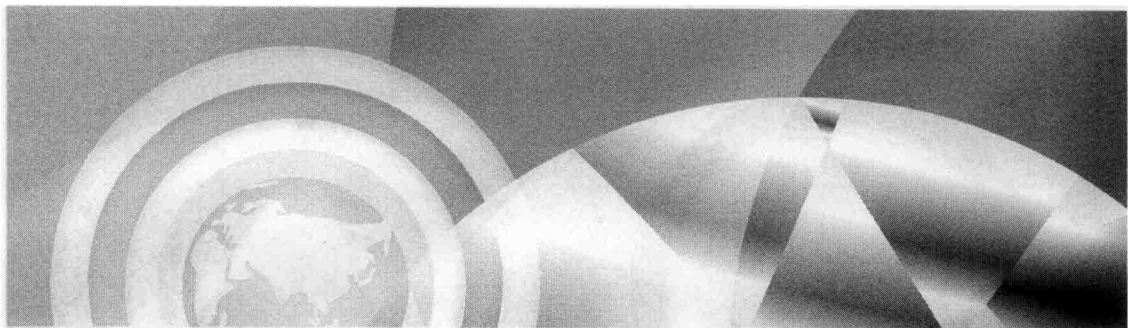
网 址: <http://www.cip.com.cn>

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:46.00元

版权所有 违者必究



# 前言

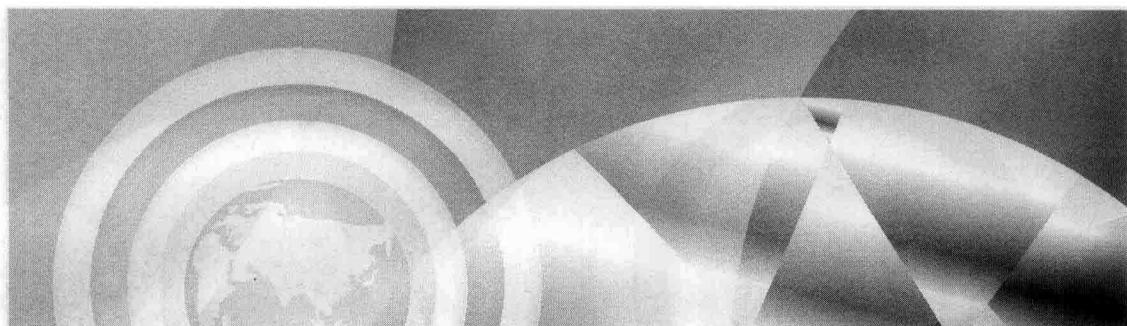
随着我国高等教育体制改革的不断深入,越来越多的本科院校把培养应用型人才作为人才培养的重要目标,强化培养能够充分利用专业知识和基本技能,从事现场技术指导和工程管理工作,具有较强社会适应能力和竞争能力的高素质应用型人才。应用型本科教育对促进中国经济社会发展,满足对高层次应用型人才的需要,以及推进中国高等教育大众化进程起到了积极作用。应用型本科院校的教学内容应该以培养学生的创新意识、工程实践能力和职业素质为主线,更加注重与生产实践的结合。

《材料成形工艺》是工科院校材料类、机械类专业所开设的课程,与工程实际有着密切的联系,主要讲解工程材料的成形加工方法、工艺技术、设计原则、生产设备等相关内容,是一门相对重要的专业课程。通过学习该门课程,不仅可使学生构筑工程技术的理论根基,还可培养学生理论联系实际,解决工程问题的能力。本教材主要为满足应用型本科院校材料专业的教学需要而编写。内容上依托于应用型人才培养方案及要求,弱化材料变形原理的分析和论证,突出工艺实践性,重点阐述材料成形领域的成形过程、加工手段、设计原则、缺陷检测,以及相关设备的操作规程等知识。各章节内容的编写力求深入浅出,依据相关实例阐述相关知识点,注重理论结合实践,重视知识体系及内容的实用性,力争做到既能很好地体现专业层次,又能促进应用型专业人才的培养。本教材除作为相关专业的本科教材外,也可作为从事材料加工、生产的专业技术人员的参考书。

本书由长期从事材料工程专业教学工作的教师编写,全书共分为8章。由刘万辉担任主编,曲立杰、成烨担任副主编。具体分工如下:常熟理工学院刘万辉编写第1、2、6章,佳木斯大学曲立杰编写第3章,江苏科技大学成烨编写第4、7章,袁婷编写第5、8章,王剑、鲍爱莲、孙德勤参与了部分章节内容的整理与校核。全书由刘万辉负责统稿。同时,在教材编写和出版过程中,得到了编写人员所在单位的领导及老师们的大力支持,以及常熟理工学院教材基金的资助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏及欠妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者  
2014.6



# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 金属液态成形        | 1  |
| 1.1 液态金属成形工艺基础      | 1  |
| 1.1.1 液态金属的流动性及充型能力 | 1  |
| 1.1.2 铸造合金的凝固与收缩性   | 4  |
| 1.1.3 铸造合金的缩孔与缩松    | 7  |
| 1.1.4 铸造合金中的偏析      | 8  |
| 1.1.5 铸件的内应力、变形与裂纹  | 9  |
| 1.1.6 铸件中的夹杂与气孔     | 11 |
| 1.2 常用的铸造合金         | 12 |
| 1.2.1 铸铁            | 12 |
| 1.2.2 铸钢            | 13 |
| 1.3 砂型铸造            | 14 |
| 1.3.1 造型与制芯         | 14 |
| 1.3.2 工艺设计          | 17 |
| 1.4 特种铸造            | 24 |
| 1.4.1 熔模铸造          | 24 |
| 1.4.2 金属型铸造         | 26 |
| 1.4.3 压力铸造          | 26 |
| 1.4.4 低压铸造          | 28 |
| 1.4.5 离心铸造          | 28 |
| 1.4.6 挤压铸造          | 29 |
| 1.4.7 消失模铸造         | 30 |
| 1.5 金属液态成形技术的发展     | 31 |
| 1.5.1 半固态金属铸造成形技术   | 31 |
| 1.5.2 喷射沉积成形技术      | 32 |
| 第 2 章 焊接成形工艺        | 34 |
| 2.1 焊接成形理论基础        | 34 |

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 2.1.1 | 焊接分类                  | 34 |
| 2.1.2 | 焊接电弧                  | 35 |
| 2.1.3 | 焊接熔池的化学冶金             | 36 |
| 2.1.4 | 焊接接头的组织与性能            | 37 |
| 2.1.5 | 焊接应力与变形               | 38 |
| 2.2   | 常见焊接方法                | 44 |
| 2.2.1 | 焊条电弧焊                 | 44 |
| 2.2.2 | 埋弧焊                   | 49 |
| 2.2.3 | CO <sub>2</sub> 气体保护焊 | 53 |
| 2.2.4 | 氩弧焊                   | 56 |
| 2.2.5 | 等离子弧焊接                | 57 |
| 2.2.6 | 电渣焊                   | 59 |
| 2.2.7 | 电阻焊                   | 59 |
| 2.2.8 | 火焰焊接                  | 60 |
| 2.2.9 | 钎焊                    | 61 |
| 2.3   | 常用金属材料的焊接             | 62 |
| 2.3.1 | 钢的焊接性                 | 62 |
| 2.3.2 | 碳素钢的焊接工艺              | 64 |
| 2.3.3 | 低合金结构钢的焊接             | 65 |
| 2.3.4 | 不锈钢的焊接                | 66 |
| 2.3.5 | 异种钢的焊接                | 67 |
| 2.3.6 | 铝及其合金的焊接              | 68 |
| 2.3.7 | 铜及铜合金的焊接              | 70 |
| 2.3.8 | 铸铁的焊接                 | 71 |
| 2.4   | 焊接件的结构工艺性             | 73 |
| 2.4.1 | 焊缝布置                  | 73 |
| 2.4.2 | 焊接接头形式和坡口形式的选择        | 75 |
| 2.5   | 焊接缺陷与检验               | 76 |
| 2.5.1 | 常见焊接缺陷及防止措施           | 76 |
| 2.5.2 | 焊接接头的检验               | 78 |
| 2.5.3 | 焊接检验的依据               | 80 |
| 第3章   | 塑性成形工艺                | 81 |
| 3.1   | 塑性加工概论                | 81 |
| 3.1.1 | 塑性变形对金属组织和性能的影响       | 81 |
| 3.1.2 | 金属的可锻性                | 82 |
| 3.1.3 | 塑性成形基本规律              | 84 |
| 3.2   | 锻造与冲压                 | 85 |
| 3.2.1 | 自由锻                   | 85 |
| 3.2.2 | 模锻                    | 94 |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 3.2.3      | 锻造设备               | 99         |
| 3.2.4      | 板料冲压               | 100        |
| 3.3        | 挤压                 | 102        |
| 3.3.1      | 挤压的特点和分类           | 103        |
| 3.3.2      | 常见挤压方法             | 104        |
| 3.3.3      | 挤压过程中金属的变形         | 105        |
| 3.3.4      | 挤压时影响金属流动的因素       | 107        |
| 3.3.5      | 挤压变形参数和挤压力         | 108        |
| 3.4        | 拉拔                 | 109        |
| 3.4.1      | 拉拔的分类和特点           | 109        |
| 3.4.2      | 拉拔过程中金属的变形         | 111        |
| 3.4.3      | 拉拔的变形指数            | 112        |
| 3.4.4      | 实现拉拔的基本条件          | 112        |
| 3.5        | 轧制                 | 113        |
| 3.5.1      | 轧制产品及应用            | 113        |
| 3.5.2      | 轧材生产方法             | 114        |
| 3.5.3      | 轧制工艺流程             | 115        |
| 3.5.4      | 轧制过程的建立            | 117        |
| 3.5.5      | 中厚板生产简介            | 121        |
| <b>第4章</b> | <b>无机非金属材料加工工艺</b> | <b>123</b> |
| 4.1        | 玻璃的生产加工工艺          | 123        |
| 4.1.1      | 玻璃的成分              | 123        |
| 4.1.2      | 玻璃的熔制过程            | 124        |
| 4.1.3      | 玻璃熔制温度制度           | 125        |
| 4.1.4      | 玻璃的成形              | 127        |
| 4.1.5      | 玻璃的退火和钢化           | 133        |
| 4.1.6      | 玻璃制品的深加工           | 135        |
| 4.2        | 陶瓷的生产加工工艺          | 138        |
| 4.2.1      | 陶瓷的概念及分类           | 138        |
| 4.2.2      | 陶瓷制品烧成过程分析         | 139        |
| 4.2.3      | 普通陶瓷的基本制备工艺        | 141        |
| 4.2.4      | 特种陶瓷的生产            | 150        |
| <b>第5章</b> | <b>高分子材料成形工艺</b>   | <b>152</b> |
| 5.1        | 高分子材料的成形性能         | 152        |
| 5.2        | 塑料成形               | 154        |
| 5.2.1      | 塑料概述               | 154        |
| 5.2.2      | 塑料注射成形             | 157        |
| 5.2.3      | 塑料挤出成形             | 164        |
| 5.2.4      | 塑料压制成形             | 170        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.2.5 其他塑料成形工艺 .....      | 173 |
| 5.3 橡胶成形 .....            | 174 |
| 5.3.1 橡胶概述 .....          | 174 |
| 5.3.2 橡胶的加工工艺流程 .....     | 176 |
| 5.3.3 橡胶的成形工艺 .....       | 177 |
| <b>第6章 复合材料成形工艺</b> ..... | 184 |
| 6.1 聚合物基复合材料 .....        | 184 |
| 6.1.1 聚合物基复合材料概述 .....    | 184 |
| 6.1.2 聚合物基复合材料成形工艺 .....  | 186 |
| 6.2 金属基复合材料 .....         | 198 |
| 6.2.1 金属基复合材料概述 .....     | 198 |
| 6.2.2 金属基复合材料的成形工艺 .....  | 200 |
| 6.3 陶瓷基复合材料 .....         | 207 |
| 6.3.1 陶瓷基复合材料概述 .....     | 207 |
| 6.3.2 陶瓷基复合材料的成形工艺 .....  | 213 |
| 6.4 复合材料的二次加工成形 .....     | 219 |
| 6.4.1 常规二次加工技术 .....      | 220 |
| 6.4.2 复合材料特种加工技术 .....    | 222 |
| <b>第7章 粉末冶金成形技术</b> ..... | 224 |
| 7.1 粉末的基本性能 .....         | 224 |
| 7.2 粉末冶金的工艺流程 .....       | 226 |
| 7.2.1 粉料制备 .....          | 226 |
| 7.2.2 粉末预处理 .....         | 230 |
| 7.2.3 粉末的压制成形 .....       | 230 |
| 7.2.4 烧结工艺 .....          | 233 |
| 7.2.5 后处理 .....           | 236 |
| 7.3 粉末冶金模具 .....          | 237 |
| 7.4 粉末冶金制品的结构工艺性 .....    | 239 |
| 7.5 粉末冶金常见缺陷及改进措施 .....   | 241 |
| 7.6 粉末冶金技术的新进展 .....      | 242 |
| 7.6.1 粉末的制备新工艺 .....      | 242 |
| 7.6.2 新型粉末成形技术 .....      | 244 |
| 7.6.3 新型烧结工艺 .....        | 249 |
| <b>第8章 新型快速成形技术</b> ..... | 251 |
| 8.1 快速成形的原理及过程 .....      | 251 |
| 8.1.1 快速成形技术的原理 .....     | 252 |
| 8.1.2 快速成形的工艺过程 .....     | 252 |
| 8.2 快速成形工艺 .....          | 253 |
| 8.2.1 光固化成形工艺 .....       | 253 |

|                      |            |
|----------------------|------------|
| 8.2.2 分层实体制造工艺 ..... | 257        |
| 8.2.3 选区激光烧结 .....   | 260        |
| 8.2.4 熔融沉积制造 .....   | 263        |
| 8.2.5 激光立体成形 .....   | 265        |
| 8.2.6 三维打印技术 .....   | 268        |
| <b>参考文献</b> .....    | <b>272</b> |

# 第1章

## 金属液态成形

金属液态成形,通常又称铸造,是指把符合一定化学成分要求的液态金属浇注到预制的铸型中,使之在重力或外力的作用下冷却、凝固而形成毛坯或零件。通过液态成形铸出的金属毛坯或零件称为铸件。液态金属成形在国民经济中占有极其重要的地位。液态金属成形适合制造形状复杂,特别是具有内腔的零件,易实现机械化、半自动化生产,尺寸精度高,加工余量少,可利用废旧零件和再生材料,故生产成本相对较低。通常,毛坯铸件需要经过后续的机械加工,才能成为各种机器零件;只有少数尺寸精度和表面粗糙度等达到使用要求的铸件才作为零部件直接应用。

### 1.1 液态金属成形工艺基础

金属液态成形一般包括金属的熔炼、造型、浇注和冷却凝固等工艺过程。液态合金的铸造性能是影响铸件成型质量和铸造工艺的重要因素,一般包括铸造合金的流动性,凝固与收缩特性,以及偏析与裂纹倾向性等。

#### 1.1.1 液态金属的流动性及充型能力

##### 1.1.1.1 液态金属的流动性

合金的流动性是指液态金属本身的流动能力,是金属的铸造性能之一,与合金的化学成分、温度、杂质含量及其物理性质有关。合金流动性好,易于充满薄而复杂的型腔,获得形状完整、轮廓清晰的铸件,避免出现冷隔、浇不足等缺陷;同时,液态合金中气体、夹杂物能够及时浮出,避免产生气孔和夹渣缺陷;并且,有利于充填和弥合铸件在凝固期间产生的缩孔或因收缩受阻产生的微裂纹。测试铸造合金流动性的方法很多,一般通过浇铸“流动性试样”来评价。试样的形状可以分为:螺旋线形、球形、水平直棒形、楔形、U形等。其中,螺旋线形试样应用得最普遍,以合金液的流动长度表示其流动性,如图 1-1 所示。

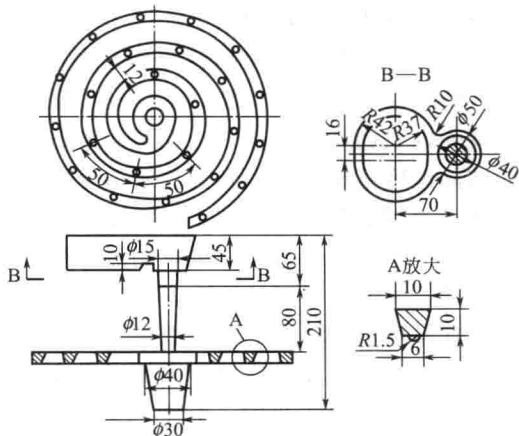


图 1-1 螺旋线形流动性试样

根据液态金属浇注后所形成的螺旋线长度确定流动性的好坏。螺旋线长度越长，流动性就越好。表 1-1 所列为用螺旋线形法测得的几种常用合金的流动性，由表 1-1 可看出，常用铸造合金中，铸铁、硅黄铜的流动性最好，铸钢的流动性最差。

表 1-1 常用合金的流动性

| 合金种类及化学成分                                                 |                    | 铸型种类 | 铸型温度/℃  | 螺旋线长度/mm |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|------|---------|----------|
| 铸铁                                                        | $w_C + Si = 6.2\%$ | 砂型   | 1300    | 1800     |
|                                                           | $w_C + Si = 5.9\%$ | 砂型   | 1300    | 1300     |
|                                                           | $w_C + Si = 5.2\%$ | 砂型   | 1300    | 1000     |
|                                                           | $w_C + Si = 4.2\%$ | 砂型   | 1300    | 600      |
| 铸钢                                                        | $w_C = 0.40\%$     | 砂型   | 1600    | 100      |
|                                                           |                    |      | 1640    | 200      |
| 铝硅合金(硅铝明)                                                 |                    | 金属型  | 680~720 | 700~800  |
| 锡青铜( $w_{Sn} = 9\% \sim 11\%$ ; $w_{Zn} = 2\% \sim 4\%$ ) |                    | 砂型   | 1040    | 420      |
| 镁合金(Mg-Al-Zn)                                             |                    | 砂型   | 700     | 400~600  |
| 硅黄铜( $w_{Si} = 1.5\% \sim 4.5\%$ )                        |                    | 砂型   | 1100    | 1000     |

影响铸造合金流动性的主要因素有：合金的物理性质、化学成分、结晶特点等。

(1) 合金的物理性质

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。在相同条件下，液态合金的表面张力越小，黏度越小，流动性就越好；反之，则流动性就越差。

(2) 合金的结晶特点

一般来说在合金的结晶过程中放出热量越多，则液态合金保持时间就越久，流动性就越好。对于纯金属和共晶成分的合金，因其结晶潜热多，提高流动性的作用比结晶温度范围较宽的合金大。结晶晶粒的形状对流动性也有影响。在固定结晶温度，合金形成球状及规则形状晶粒的流动性比形成树枝状晶粒的好。

(3) 合金的化学成分

铸造合金的熔点及结晶温度范围随其化学成分而变化，导致合金的流动性也随之不同。其中，纯金属和共晶成分的合金流动性最好。随着结晶温度范围的扩大，初生树枝晶已使凝固的硬壳内表面参差不齐，从而阻碍液态金属的流动，因此，从流动性考虑，以选用共晶成分或结晶温度范围较窄的合金作铸造合金（例如，灰口铸铁、硅黄铜等）为宜。铁碳合金的流动性与含碳量的关系如图 1-2 所示。

铸铁中的其他合金元素也影响流动性。在铸铁中硅的作用和碳相似，硅量增加，液相线温度下降，故在同样过热度下，铸铁的流动性随硅量的增加而提高，如图 1-3 所示。

磷含量增加，铸铁的流动性增大，如图 1-4 所示。这主要是由于液相线温度下降，黏度下降，同时由于磷共晶增加，固相线温度也下降。但通常不用增加含磷量的方法提高铸铁的流动性，以防使铸铁变脆。对于艺术品铸件要求轮廓清楚，花纹清晰，而又几乎不承受载荷，故可适当增加含磷量，以提高铁液的充型能力。

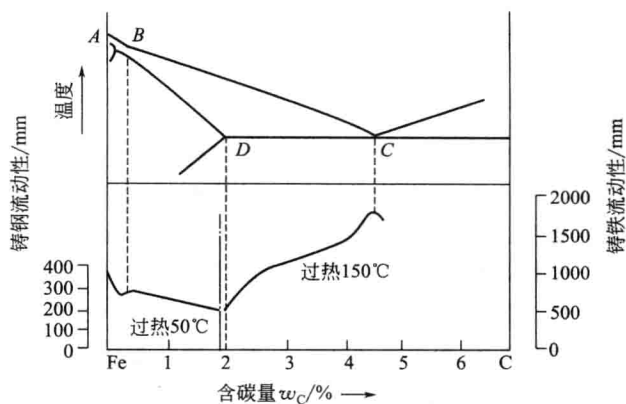


图 1-2 铁碳合金的流动性与含碳量的关系

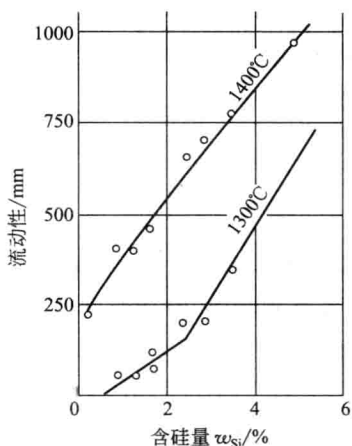


图 1-3 铸铁的流动性与含硅量的关系

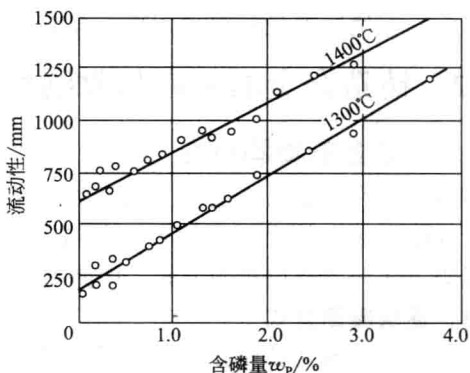


图 1-4 铸铁的流动性与含磷量的关系

### 1.1.1.2 液态金属的充型能力

液态金属的充型能力是指液态金属充满铸型型腔，获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力，在铸件生产过程中占有很重要的位置。一些铸造缺陷（如，浇不足、冷隔、砂眼等）都是在液态金属充型不利的情況下产生的。充型能力首先取决于金属本身的流动能力，同时受外界条件，如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素的影响，是各种因素的综合反映。

#### (1) 金属性质方面的因素

液态金属本身的流动能力（流动性）能够显著影响铸造合金的充型能力。因此，影响液态金属流动性的合金成分、温度、杂质含量及其物理性质等因素也会对其充型能力有明显的影响。流动性好的液态金属易于充满薄而复杂的型腔，获得形状完整、轮廓清晰的铸件，避免出现冷隔、浇不足等缺陷；合金流动性好，液态金属中的气体、夹杂物能够及时浮出，避免产生气孔和夹渣缺陷。

#### (2) 铸型性质方面的因素

铸型中，可以通过减小金属流动阻力、增加液态金属的流动速度、降低金属液的冷却速度来改善合金的充型能力。铸型的型腔过窄、直浇道过低、浇注系统截面积过小或布置不合理、型砂中水分过多或透气不足、铸型排气不顺畅、铸型材料导热性过大等，均会降低充型

能力。因此，在铸件设计时必须保证铸件的壁厚大于规定的“最小壁厚”。铸造工艺设计上，采取加高直浇道、扩大内浇道截面积、增加出气口、烘干铸型、铸型表面刷涂料等相应措施提高液态金属的充型能力。

(3) 浇注条件的因素

浇注条件对液态金属的充型能力的影响主要包括浇注温度、充型压力和浇注系统等。一般情况下，浇注温度越高，液态金属的黏度越小，过热度越高，金属液所含热量越多，液态保持时间越长，充型能力越强。但是浇注温度过高，合金收缩量增加，吸气增多，氧化也更严重，铸件易形成缩孔、缩松、粘砂、气孔等缺陷。因此，在保证充型能力足够的前提下，尽可能做到“高温出炉，低温浇注”。液态金属在流动方向上所受的壓力（充型压力）越大，充型能力越强，如压铸、低压铸造等工艺方法。同时，浇注系统的结构越复杂，则流动阻力越大，充型能力越差。

(4) 铸件结构的因素

衡量铸件结构特点的因素主要是折算厚度和复杂程度，它们对液态金属的充型能力也有较大影响。折算厚度（也叫当量厚度或模数）为铸件体积与铸件表面积之比。铸件的折算厚度越大，热量散失越慢，充型能力就越好。另一方面，铸件结构越复杂，液态金属的流动阻力就越大，充填铸型就越困难，液态合金的充型能力就越差。

1.1.2 铸造合金的凝固与收缩性

1.1.2.1 合金的凝固特性

铸造合金在一定温度范围内结晶凝固时，其断面一般存在三个区域，即固相区、液-固共存区和液相区，其中液-固共存区对铸件质量影响最大，通常根据液-固共存区的宽窄将铸件的凝固方式分为逐层凝固方式、中间凝固方式和体积凝固方式。

(1) 逐层凝固方式

对于纯金属或共晶成分合金在凝固过程中不存在液、固相共存的凝固区，如图 1-5(a) 所示，故断面上外层的固体和内层的液体由一条界线清楚地分开。随着温度的下降，固体层不断加厚，液体层不断减薄，固体和液体始终保持接触，直到中心层全部凝固，这种凝固方式称为逐层凝固。

(2) 体积凝固方式

合金的凝固温度范围很宽或铸件断面温度分布曲线较为平坦时，在某段时间内，液、固共存的凝固区贯穿整个铸件断面，如图 1-5(c) 所示，这种凝固方式称为体积凝固方式或糊状凝固。

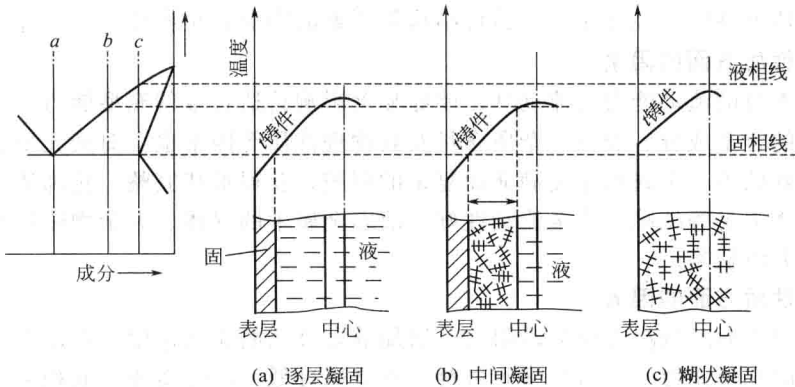


图 1-5 铸件的凝固方式

状凝固方式。

(3) 中间凝固方式

介于逐层凝固和体积凝固之间的凝固方式称为中间凝固方式，如图 1-5(b) 所示。大多数合金均属于中间凝固方式，例如，中碳钢、白口铸铁等。

如图 1-5 所示，液-固相共存区域的宽度是由合金的结晶温度范围及温度梯度两个量来决定的。凝固区域的宽度是划分凝固方式的一个准则。在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中，碳钢的结晶温度范围随碳含量的增加而增加。因此，在砂型铸造中，低碳钢近于逐层凝固方式，中碳钢为中间凝固方式，高碳钢近于体积凝固方式。由于液态合金的结晶过程不同，逐层凝固又可分为内生壳状凝固和外生壳状凝固，见表 1-2。

表 1-2 三种铸造合金的不同凝固特性

| 合金种类 | 碳素钢    | 灰口铸铁   | 球墨铸铁 |
|------|--------|--------|------|
| 凝固方式 | 逐层凝固   |        | 体积凝固 |
|      | 外生壳状凝固 | 内生壳状凝固 |      |
| 示意图  |        |        |      |

碳素钢的金属溶液凝固时，外生晶粒从铸型壁处开始结晶，并形成相对光滑的凝固前沿，相向前进的凝固前沿不断向铸件中心的液相逐层推进，在铸件中心会合，结束凝固。这种凝固形式被称为外生壳状凝固方式。由于凝固初期形成的外生壳具有较高的承载能力，凝固时液相补缩通道畅通，铸件接受补缩（受补）能力高。灰口铸铁或有色金属的液态金属凝固时，晶粒在金属液内部形核、长大，按内生生长方式结晶。铸型壁处的晶粒能迅速散失热量，因此，结晶速度快，形成固体外壳和粗糙的凝固前沿，属于内生壳状凝固方式。

1.1.2.2 铸造合金的收缩性

将具有一定过热度的铸造合金液体浇入铸型，合金从高温液态冷却到固态的某一温度时所发生的体积和尺寸减小的现象称为收缩。收缩是铸造合金的物理本性，是其重要铸造性能之一，也是铸件产生缩孔、缩松、热应力、变形及裂纹等铸造缺陷的根本原因。通常，用体积改变量（体收缩  $\epsilon_L$ ）来表示铸造合金由液态到常温的收缩；用线尺寸改变量（线收缩  $\epsilon_S$ ）来表示合金在固态时的收缩。

铸造合金由液态冷却到常温，一般可分为三个阶段：液态收缩阶段（Ⅰ），凝固收缩阶段（Ⅱ），固态收缩阶段（Ⅲ），如图 1-6 所示。

液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔、缩松缺陷的基本原因。而铸造应力是因为固态收缩受阻而引起的，甚至会产生变形和裂纹缺陷，影响铸件的尺寸精度。

(1) 液态收缩

合金从浇铸温度冷却到开始凝固的液相线温度时所产生的收缩称为液态收缩。其间，合金处于液态，因而，液态收缩会引起型腔内液面下降。

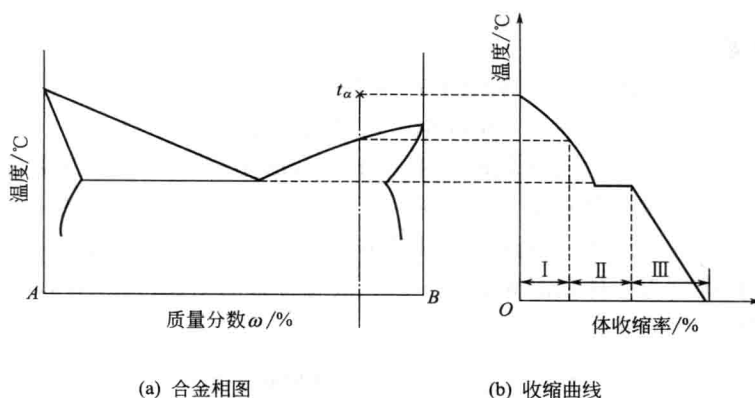


图 1-6 铸造合金收缩的三个阶段

I—液态收缩；II—凝固收缩；III—固态收缩

## (2) 凝固收缩

合金从液相线温度（开始凝固的温度）冷却到固相线温度（凝固终止的温度）时的体积收缩称为凝固收缩。常见各种纯金属的凝固体收缩率见表 1-3，其收缩率的大小与合金的结晶温度范围及状态的改变有关。

表 1-3 各种纯金属的凝固体收缩率

| 金属种类                     | Al   | Mg   | Cu  | Co  | Fe   | Zn   | Ag   | Sn   | Pb   | Sb    | Bi   |
|--------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|------|
| 收缩率 $\varepsilon_v / \%$ | 6.24 | 4.83 | 4.8 | 4.8 | 4.09 | 4.44 | 4.35 | 2.79 | 2.69 | -0.93 | -3.1 |

## (3) 固态收缩

合金从凝固终止温度冷却到室温之间的体积收缩为固态收缩，通常表现为铸件外形尺寸的减小，对铸件的尺寸精度影响较大，常用线收缩率表示。影响合金收缩的因素主要有合金的化学成分、浇铸温度等。若铸造合金的线收缩不受铸型等外部条件的阻碍，称为自由线收缩；否则，称为受阻线收缩。在常用的铸造合金中，铸钢的收缩最大，灰铸铁的最小。常用铸造合金的铸件线收缩率如表 1-4 所列。

表 1-4 常用铸造合金的铸件线收缩率

| 合金类别      |           | 收缩率 / %  |          |
|-----------|-----------|----------|----------|
|           |           | 自由收缩     | 受阻收缩     |
| 灰铸铁       | 中小型与小型件   | 1.0      | 0.9      |
|           | 中、大型铸件    | 0.9      | 0.8      |
|           | 圆筒形件的长度方向 | 0.9      | 0.8      |
|           | 圆筒形件的直径方向 | 0.7      | 0.5      |
| 孕育铸铁      |           | 1.0~1.5  | 0.8~1.0  |
| 可锻铸铁      |           | 0.75~1.0 | 0.5~0.75 |
| 球墨铸铁      |           | 1.0      | 0.8      |
| 白口铸铁      |           | 1.75     | 1.5      |
| 铸造碳钢和低合金钢 |           | 1.6~2.0  | 1.3~1.7  |
| 含铬高合金钢    |           | 1.3~1.7  | 1.0~1.4  |

| 合金类别                               | 收缩率/%   |         |
|------------------------------------|---------|---------|
|                                    | 自由收缩    | 受阻收缩    |
| 铸造铝硅合金                             | 1.0~1.2 | 0.8~1.0 |
| 铸造铝镁合金                             | 1.3     | 1.0     |
| 铝铜合金( $\omega_{Cu}=7\%\sim 18\%$ ) | 1.6     | 1.4     |
| 锡青铜                                | 1.4     | 1.2     |
| 铸黄铜                                | 1.8~2.0 | 1.5~1.7 |

铸铁结晶时，内部的碳大部分以石墨的形态析出，石墨的密度较小，析出时所产生的体积膨胀弥补了部分凝固收缩；灰铸铁中，碳是石墨的形成元素，硅是促进石墨化的元素，所以铸铁碳硅含量越高，收缩越小；硫能阻碍石墨的析出，使铸铁收缩率增大；适当地增加锰的含量，由于锰与铸铁中的硫形成  $MnS$ ，可抵消硫对石墨化的阻碍作用，使铸铁收缩率减小。一般浇注温度越高，过热度越大，合金液态收缩也越大，形成缩孔的倾向就越大。

1.1.3 铸造合金的缩孔与缩松

铸件在冷却凝固时所产生的液态收缩和凝固收缩远远大于固态收缩。因此，在铸件最后凝固的区域因得不到液态金属或合金的补充而产生孔洞。容积大而比较集中的孔洞称为缩孔，细小且分散的孔洞称为缩松。缩孔的形状不规则，孔壁粗糙，一般位于铸件的热节处。缩松常隐藏于铸件的内部，分散在铸件的轴线区域、厚大部位、冒口根部和内浇口附近，在铸件外观上不易被发现。当缩松与缩孔容积相同时，缩松的分布面积要比缩孔大得多。

1.1.3.1 产生缩孔与缩松的原因

缩孔的形成过程如图 1-7 所示。假定所浇注的合金的结晶温度范围很窄，铸件是由表及里逐层凝固的。图 1-7(a) 为铸型充满初始状态，因铸型吸热，金属液温度下降，发生液态收缩，但它可以从浇注系统中得到补充。因此，此期间型腔总是充满着金属液。当铸件外表温度下降到凝固温度时，铸件表面凝固成一层硬壳，并使内浇道凝固，如图 1-7(b) 所示。进一步冷却时，硬壳内的金属液因温度降低产生液态收缩，以及对形成硬壳的凝固收缩的补缩，从而金属液面下降。尽管，固态硬壳也会因为温度降低而使铸件尺寸缩小。但是，由于液态收缩和凝固收缩总是超过硬壳的固态收缩，因此，液面下降脱离顶部的硬壳，如图 1-7(c) 和图 1-7(d) 所示。如此进行下去，硬壳不断增厚，液面不断下降，待金属全部凝固后，在铸件上部或最后凝固的部位就形成一个倒锥形的缩孔，如图 1-7(e) 所示。

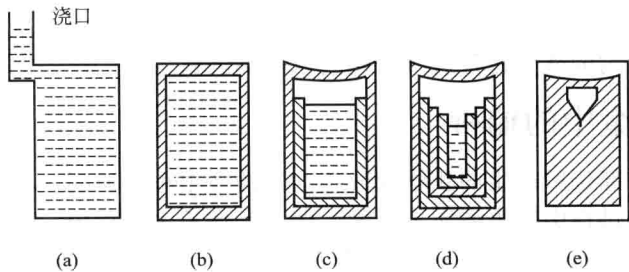


图 1-7 铸件中缩孔形成过程示意图

缩松产生的原因和缩孔一样，也是由于液态收缩和凝固收缩大于固态收缩。但是，形成缩松的基本条件是合金的结晶温度范围较宽，树枝晶发达，合金以体积方式凝固，液态和凝固收缩所形成的细小、分散孔洞得不到外部液态金属的补充，一般多分布于铸件的轴线区域、厚大部位或浇口附近。

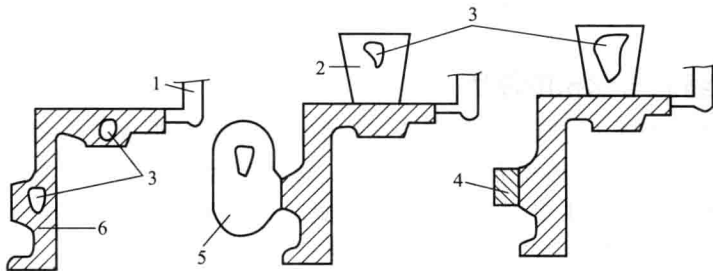
### 1.1.3.2 防止缩孔和缩松的相应措施

缩孔和缩松均使铸件的力学性能、气密性、物理性能以及化学性能降低，以致成为废品。因此，要选择适宜的铸造合金，因为铸造合金的液态收缩越大，则缩孔形成的倾向越大；合金的结晶温度范围越宽，凝固收缩越大，则形成缩松的倾向也越大。

缩孔、缩松的形成除了主要受合金成分影响外，还受到浇注温度、铸型条件及铸件结构的影响。浇注温度高，合金的缩孔倾向大；湿型铸型材料比干型的冷却能力强，缩松减少，金属型铸型的冷却能力更强，则缩松显著减少；铸件结构与缩孔、缩松的关系很大，设计时应予以充分考虑，如壁厚相差不宜过大，厚壁部位应设置冒口或冷铁等。

降低浇注温度和减慢浇注速度，增加铸型的激冷能力，通过调整化学成分，增加在凝固过程中的补缩能力，对于灰口铸铁可促进凝固期间的石墨化等，都有利于减少缩孔和缩松的形成。为使铸件在凝固过程中建立良好的补缩条件，通过控制铸件的凝固顺序（如采用冒口和冷铁配合），使之符合“顺序凝固”或“同时凝固”原则，尽量地使缩松转化为缩孔，并使缩孔出现在铸件最后凝固的地方。

顺序凝固是采取一定措施，如合理选择内浇道在铸件上的引入位置 and 高度、开设冒口、放置冷铁等，使铸件从远离冒口的部分先凝固，然后向着冒口凝固，最后才是冒口本身凝固，形成一个顺序凝固的过程，如图 1-8 所示。主要用于凝固收缩大、凝固温度范围较小的合金。如铸钢、高牌号灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和黄铜等。



(a) 缩孔位置 (b) 加冒口补缩 (c) 用冷铁和冒口补缩

图 1-8 用冒口和冷铁消除缩孔的示意图

1—浇注系统；2—顶冒口；3—缩孔；4—冷铁；5—侧冒口；6—铸件

同时凝固是从工艺上采取措施，保证铸件结构上各部分之间没有温差或使温差尽量小，使铸件各部分基本同时凝固，一般用于凝固温度范围大、以体积方式凝固的合金，容易产生缩松的合金，壁厚均匀的薄壁铸件或气密性要求不高的铸件。

### 1.1.4 铸造合金中的偏析

铸件截面上不同部位所产生的化学成分不均匀的现象称为偏析。产生偏析的主要原因是由于铸造合金在结晶过程中发生溶质再分配，即在晶体长大过程中，合金的结晶速度大于溶质元素的扩散速度，使先析出的固相与液相的成分不同，先结晶的部分与后结晶的部分化学成分也不相同，甚至同一晶粒内各部分的成分也不一样。根据偏析产生的范围大小可分为微