

高等学校适用教材

机械制造技术

王丽英 主编



中国计量出版社

国家

数字

利用，

事人协

条特别

超星读

读书十

所规定

里数字

表甲力

方从超

双方签

当事入

书卡卡

高等学校适用教材

机械制造技术

王丽英 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术/王丽英主编. —北京: 中国计量出版社, 2003.1

高等学校适用教材

ISBN 7-5026-1719-1

I. 机… II. 王… III. 机械制造工艺—高等学校—教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 102214 号

内 容 提 要

本书是根据原国家教委最新颁布的课程基本要求, 为适应宽口径专业培养目标而编写的。全书共 10 章, 涵盖了原金属工艺学热加工、冷加工以及机械制造工艺学的知识。内容包括: 铸造、塑性成形、焊接、切削加工工艺基础、现代制造技术、典型表面的加工、机械加工工艺规程设计、机器装配工艺过程设计、数控加工技术、先进的生产模式与制造系统。

本书结构严谨、叙述简明, 在保证基本内容的基础上, 增加了新工艺、新知识, 以反映现代机械制造技术的前沿。

本书是高等工科院校机械类专业教材, 也可作电视大学、函授大学、成人高等教育、夜大学等学校的教材或参考书, 同时也可供机械制造专业的工程技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlbcb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 21.25 字数 505 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—3000 定价: 32.00 元

编委会名单

主 编 王丽英

主 审 林功成

编 者 (按章节顺序排列)

庞云芝 曹志清

刘 彬 付建西

前 言

随着教学改革的不断深入和发展,为适应我国社会主义建设事业的高速发展对高级技术人才的培养要求,吸收国际社会对人才培养的先进经验,我国专业技术人才培养目标从原来专业划分过细的“计划经济”模式,向着适应当前科学技术高速发展的“市场经济”要求转变。教育部将原机械类专业面狭窄的众多专业,改为“机械工程及自动化”和“机械制造及自动化”等少数几个专业面较宽的专业。专业面拓展后,为保证拓展后专业的新教学要求,对机械制造系列课程的学时做了相应的缩减,而对教学内容却提出了更高的要求。为适应这种教学形势,迫切需要进行课程体系改革,对原相关课程进行有机重组。原“机械制造基础”与“机械制造工艺学”两门课程将合并为新的“机械制造基础”课程。本书正是基于这一要求而编写的。

本书具有如下特色:

1. 将原“机械制造基础”冷加工部分与“机械制造工艺学”合并、重组,删除了重复的内容,使之更加紧凑、连贯。
2. 注重实用的工艺基础理论的介绍,对机械制造中陈旧的工艺方法进行了精减。
3. 较大篇幅地吸收了现代制造业中的新材料、新技术以及计算机在机械制造业中的应用等新工艺知识,以拓展学生的思路、扩大学生的视野。
4. 体现技术经济、管理、环保等概念,力求从生产、成本、质量、管理、市场、竞争、环保和先进体系的角度来全面考虑制造工艺。

本书为高等院校机械类专业的教材,也可供从事机械制造业的工程技术人员参考。

本书由北京化工大学王丽英副教授任主编,北京化工大学曹志清副教授、庞云芝讲师、刘彬硕士以及北京服装学院付建西高级工程师参加编写。具体分工如下:庞云芝(第一、二章,第三章第一、二、三、四节);王丽英(第四章,第五章第一节,第六、七、八章);曹志清(第五章第二、三节);刘彬(第三章第五节,第九章);付建西(第十章)。全书由北京化工大学林功成教授主审。

本书初稿完成后,先由茅惠祥副教授等对初稿进行认真细致的审阅,提出了不少宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢,并向对本书的编写给予了热情指导和具体建议的翟丰安教授、贺建云博士表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请同行和读者不吝指教。

编 者
2002 年 12 月

目 录

第一章 铸造	(1)
第一节 液态成形基础	(1)
一、合金的铸造性能	(1)
二、合金的充型能力	(3)
三、铸造性能对铸件质量的影响	(4)
四、铸件的气孔	(8)
第二节 常用铸造合金的铸造性能	(9)
一、铸铁	(9)
二、铸钢件生产	(12)
第三节 砂型铸造工艺设计	(13)
一、造型方法的选择	(13)
二、浇注位置与分型面的选择	(16)
三、工艺参数的选择	(18)
第四节 铸造工艺设计中的环保意识	(20)
第五节 特种铸造	(21)
一、熔模铸造	(21)
二、金属型铸造	(22)
三、压力铸造	(23)
四、低压铸造	(24)
五、离心铸造	(25)
六、主要铸造方法的比较	(26)
第六节 铸件结构设计	(27)
一、砂型铸造工艺对铸件结构设计的要求	(27)
二、合金铸造性能对铸件结构设计的要求	(29)
第七节 铸造新技术	(34)
一、铸造凝固新工艺	(34)
二、铸件凝固过程的数值模拟技术	(37)
三、微观组织的模拟	(37)
四、CAD/CAE/CAM 在铸造工艺中的应用	(37)
思考与练习题	(40)
第二章 塑性成形	(43)
第一节 塑性成形基础	(43)
一、金属塑性变形的实质	(43)
二、塑性变形后金属的组织 and 性能	(44)

三、锻造比	(46)
四、金属的锻造性能	(46)
五、塑性成型的基本规律	(48)
第二节 自由锻	(49)
一、自由锻工序	(49)
二、自由锻工艺规程的制定	(51)
第三节 模锻	(55)
一、模锻的特点与应用	(55)
二、锤上模锻	(56)
三、胎模锻	(64)
四、其他设备上的模锻	(65)
第四节 板料冲压	(69)
一、板料冲压的特点与应用	(69)
二、板料冲压的基本工序	(70)
第五节 锻压件结构工艺性	(75)
一、自由锻锻件的结构工艺性	(75)
二、模锻件的结构工艺性	(76)
三、板料冲压件结构工艺性	(77)
第六节 其他塑性成型方法	(79)
一、精密模锻	(79)
二、旋转模锻	(79)
三、轧制成型	(80)
四、挤压成型	(82)
第七节 塑性成型新工艺	(83)
一、超塑性成型	(83)
二、高能成型	(87)
思考与练习题	(90)
第三章 焊接	(93)
第一节 熔焊	(93)
一、焊条电弧焊的焊接过程	(93)
二、焊条电弧焊的冶金过程及特点	(94)
三、焊条	(96)
四、焊接接头的组织性能	(99)
五、焊接的应力与变形	(101)
六、其他熔焊方法介绍	(105)
第二节 常用金属的焊接性能	(111)
一、金属的焊接性	(111)
二、钢的焊接性能	(112)
三、铸铁的焊接性能	(114)

四、有色金属的焊接性能	(116)
第三节 焊接结构设计	(117)
一、焊接结构件材料的选择	(117)
二、焊接方法的选择	(118)
三、焊件的焊缝布置	(119)
四、焊接接头的工艺设计	(121)
第四节 其他焊接技术	(123)
一、压焊	(123)
二、钎焊	(127)
第五节 焊接过程现代控制技术	(128)
一、焊接过程传感的发展	(128)
二、焊接过程控制系统	(129)
三、智能控制方法在焊接中的应用	(129)
四、计算机在焊接控制系统中的作用	(130)
思考与练习题	(131)
第四章 切削加工工艺基础	(135)
第一节 切削加工概述	(135)
一、金属切削加工的特点和发展方向	(135)
二、切削运动与切削要素	(135)
第二节 金属切削刀具	(137)
一、刀具材料	(138)
二、刀具切削部分的几何参数	(139)
第三节 金属切削过程中的物理现象	(142)
一、切削变形	(143)
二、积屑瘤	(143)
三、切削力	(144)
四、切削热	(144)
五、刀具磨损和刀具耐用度	(145)
第四节 普通刀具切削加工方法综述	(145)
一、车削加工	(145)
二、钻削加工	(147)
三、镗削加工	(153)
四、铣削加工	(155)
五、刨削加工	(157)
六、插削加工	(158)
七、拉削加工	(158)
第五节 磨削加工方法综述	(160)
一、磨削过程	(160)
二、磨削的工艺特点	(161)

三、磨削的应用	(162)
第六节 精密加工方法综述	(166)
一、研磨	(166)
二、珩磨	(167)
三、小粗糙度磨削	(167)
四、超硬磨料砂轮磨削	(168)
五、超精加工	(168)
六、抛光	(169)
第七节 机械加工精度和表面质量	(169)
一、机械加工精度	(169)
二、机械加工表面质量	(171)
思考与练习题	(173)
第五章 现代制造技术	(175)
第一节 超精密加工方法综述	(175)
一、超精密加工	(175)
二、微细加工	(177)
三、纳米级加工	(178)
第二节 特种加工	(179)
一、概论	(179)
二、电火花加工	(180)
三、数控电火花线切割加工技术	(185)
四、电化学加工技术	(187)
五、超声波加工技术	(191)
六、激光加工技术	(193)
七、电子束加工技术和离子束加工技术	(194)
八、各种特种加工方法的综合比较	(196)
九、复合加工简介	(198)
第三节 快速成型技术	(199)
一、概述	(199)
二、光敏树脂(立体印刷)快速成型	(201)
三、层合快速成型	(203)
四、熔融沉积快速成型	(205)
思考与练习题	(207)
第六章 典型表面的加工	(208)
第一节 外圆面加工方案	(208)
一、外圆面的技术要求	(208)
二、外圆面加工方案分析	(208)
第二节 内圆面加工方案	(209)
一、内圆面的技术要求	(210)

二、内圆面加工方案分析	(210)
第三节 平面加工方案	(211)
一、平面的技术要求	(211)
二、平面加工方案分析	(212)
第四节 螺纹表面的加工	(213)
第五节 齿形加工	(215)
思考与练习题	(218)
第七章 机械加工工艺规程设计	(220)
第一节 基本概念	(220)
一、机械产品生产过程与机械加工工艺过程	(220)
二、机械加工工艺过程及其组成	(220)
三、生产类型	(222)
四、机械加工工艺规程的作用及格式	(223)
五、制订机械加工工艺规程的步骤	(225)
第二节 零件结构工艺性分析	(226)
第三节 机床夹具与工件定位	(228)
一、工件的装夹	(228)
二、机床夹具的组成和分类	(229)
三、工件的定位	(231)
第四节 定位基准的选择	(234)
一、基准的概念及分类	(234)
二、定位基准的选择	(235)
第五节 工艺路线的制订	(237)
一、加工经济精度与表面加工方法的选择	(237)
二、工序顺序安排	(239)
三、工序的集中与分散	(240)
四、加工阶段的划分	(240)
第六节 加工余量及工序尺寸的确定	(241)
一、加工余量的确定	(241)
二、工序尺寸与公差的确定	(242)
第七节 工艺尺寸链	(243)
一、尺寸链的定义及特点	(243)
二、尺寸链的组成	(243)
三、尺寸链的计算	(243)
四、尺寸链在工艺过程中的应用	(245)
第八节 典型零件加工工艺过程	(248)
一、轴类零件的加工过程	(248)
二、套筒类零件的加工过程	(252)
三、箱体零件的加工过程	(255)

第九节 生产率和经济性	(258)
一、生产率	(258)
二、工艺方案的经济性评价	(260)
思考与练习题	(263)
第八章 机器装配工艺过程设计	(268)
第一节 概述	(268)
一、机器装配的基本概念	(268)
二、装配精度与零件精度间的关系	(268)
第二节 装配尺寸链	(269)
一、装配尺寸链的基本概念	(269)
二、装配尺寸链的计算方法	(269)
第三节 保证装配精度的装配方法	(270)
一、互换装配法	(270)
二、分组装配法	(272)
三、修配装配法	(273)
四、调整装配法	(276)
第四节 装配工艺规程的制订	(278)
一、制订装配工艺规程的基本原则及原始资料	(278)
二、制订装配工艺规程的步骤、方法和内容	(278)
思考与练习题	(280)
第九章 数控加工技术	(282)
第一节 概述	(282)
一、数控技术与数控机床	(282)
二、数控机床的组成	(283)
三、数控机床的工作原理	(284)
四、数控机床的分类	(285)
五、数控加工技术的发展	(287)
第二节 数控机床加工	(287)
一、数控机床的加工特点和应用	(287)
二、数控机床加工程序的编制内容	(288)
三、数控车床加工	(288)
四、数控铣床加工	(290)
五、数控加工中心	(292)
第三节 数控加工工艺基础	(295)
一、基本概念	(295)
二、数控加工工艺的内容	(295)
三、数控加工工艺的特点	(295)
四、数控加工工艺的特殊要求	(296)
五、数控加工工艺基本原则和工序设计	(296)

第四节 典型零件的数控加工	(297)
一、数控加工工艺设计	(297)
二、对零件图进行数学处理	(300)
三、程序编制	(300)
思考与练习题	(301)
第十章 先进的生产模式与制造系统	(302)
第一节 计算机集成制造系统 CIMS	(302)
一、CIM 和 CIMS 的基本概念	(302)
二、CIMS 的系统构成	(303)
三、CIMS 中的集成技术	(306)
四、CIMS 发展简况	(307)
五、CIMS 研究和应用中值得注意的几个问题	(308)
第二节 并行工程系统 CE	(309)
一、并行工程的定义和内涵	(309)
二、并行工程的运行机理和工作模式	(309)
三、并行工程的特点与效益	(310)
四、并行工程的工程实现	(311)
第三节 精良生产系统 LP	(312)
一、精良生产的提出与内涵	(312)
二、精良生产的目标	(313)
三、精良生产系统的主要措施	(313)
第四节 敏捷制造系统 AM	(315)
一、敏捷制造的概念和内涵	(315)
二、敏捷制造的特征	(315)
三、敏捷制造研究的内容	(316)
四、实现敏捷制造的主要措施	(317)
第五节 虚拟制造系统 VMS	(318)
一、虚拟制造系统的定义和内涵	(318)
二、虚拟制造技术	(318)
三、虚拟制造系统	(319)
四、VMS 的功能及其体系结构	(319)
第六节 绿色制造系统	(320)
思考与练习题	(322)
参考文献	(323)

第一章 铸 造

铸造是将液态金属浇铸到铸型中,冷却凝固后获得毛坯或零件的一种成形方法。这种方法主要有以下优点:

(1) 适应性强

铸件的大小、重量几乎不受限制(重量可从几克到几百吨);可制造形状复杂或具有复杂内腔的毛坯或零件(如箱体、机架、缸体、床身等)。

(2) 成本低

铸造所用的材料来源广泛,其中包括金属料(生铁、铝、铜等)、回炉料(浇冒口、废铸件、旧机件等)和废料(下脚料等)。

铸造在机械制造业中广泛应用,铸造过程是一个极其复杂的物理化学过程,并具有与生产实践经验紧密结合的特点。过程中的每个工艺环节,例如铸件结构设计、工艺设计、型(芯)砂处理、造型(芯)、熔炼、浇注、凝固及冷却、清理等都会影响铸件质量,所以传统的铸造生产方法生产出的铸件很易出现浇不足、缩孔、夹渣、气孔、裂纹、晶粒粗大等缺陷,且很难控制,严重地影响了铸件的质量和性能。

计算机技术的发展,改造了传统的铸造行业。目前,世界各国铸造成形加工技术的研究发展方向是:①重大工程中的特大型铸件的关键铸造技术;②精确成形技术(Net Shape Casting),例如铸件的轻量化、强韧化、精密化及工艺的复合化将是精确铸造成形技术发展的主要内容;③用计算机模拟仿真技术来逐步代替传统的经验性研究方法。

这里,我们将从影响铸件质量的因素入手,了解有关铸造成形的理论知识,为选择铸造合金和铸造方法,实现计算机模拟仿真技术打好基础,做到以科学理论来指导铸造生产。

第一节 液态成形基础

一、合金的铸造性能

合金的铸造性能是指合金在铸造的整个过程中,为获得外形正确、内部无缺陷的铸件而表现出来的性能。铸造性能是一个复杂的综合性能,合金的物理性能(如流动性、收缩性等)和工艺因素对它都有很大的影响。

1. 合金的流动性

它是指液态金属本身的流动能力。合金的流动性好,易充满型腔,便于浇注出轮廓清晰、薄而复杂的铸件;有利于非金属夹杂物和气体的上浮与排出,还有利于对合金的凝固过程所产生的收缩进行补缩,防止铸件产生冷隔、浇不足、气孔、夹杂等缺陷。

合金的流动性通常用“螺旋形流动性试样”(图1-1)的长度来衡量。在同样的浇注条件下,获得的螺旋形试样越长,合金的流动性越好。不同种类的合金其流动性不同,常用铸

减小的因素,都可使金属液的流动性得到改善。如在铁液中加入微量元素磷,它不仅使铸铁的表面张力明显下降,而且可形成低熔点共晶,缩小铁碳合金的凝固温度范围,因而可提高铁液的流动性。

2. 合金的收缩

铸造合金从液态冷却到室温的过程中,其体积和尺寸缩小的现象,称为收缩。它包括以下三个阶段:

(1) 液态收缩

从浇注温度到凝固开始温度(即液相线温度)间的收缩。

(2) 凝固收缩

从凝固开始温度到凝固终止温度(即固相线温度)间的收缩。

(3) 固态收缩

从凝固终止温度到室温间的收缩。

其中,液态收缩和凝固收缩都使合金体积减小,若得不到金属液的及时补充,铸件内则会形成缩孔或缩松;固态收缩通常表现为铸件外形尺寸的减小,直接影响铸件的形状和尺寸精度,若固态收缩受阻,铸件内会形成应力、变形、裂纹等。

影响收缩的因素有:

(1) 化学成分

合金成分越接近纯金属或共晶合金,该合金的收缩越小。对铁碳合金来说,灰铸铁的收缩最小,铸钢收缩最大。

(2) 浇注温度

浇注温度愈高,合金的液态收缩率愈大,氧化吸气能力愈强,产生缩孔、缩松及气孔等缺陷的倾向愈大。一般将浇注温度控制在高于液相线温度 $50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 铸型条件和铸件结构

实际生产中,铸件的尺寸(壁厚)及结构不同,会导致其各部分的冷却速度不同,使它们的收缩互相受阻;同时,铸型和型芯材料的退让性也影响合金的收缩。

二、合金的充型能力

液态合金充满型腔,形成轮廓清晰、形状完整的铸件的能力,称作液态合金的充型能力。合金的充型能力差,铸件将产生浇不足、冷隔等缺陷,从而降低铸件的尺寸精度、形状精度和力学性能。

合金的流动性、铸型条件、浇注条件和铸件结构等因素都会影响合金的充型能力。

(1) 合金的流动性

凡是能提高合金流动性的因素都可使合金的充型能力得到改善。

(2) 铸型条件

主要是指铸型材料、铸型温度和铸型排气能力。

①铸型材料 铸型材料的物理性能如导热系数和比热影响合金的充型。导热系数和比热大,对金属液的激冷能力就强,金属液在其中保持液态的时间就短,因而合金的充型能力就差。例如液态合金在金属型中的充型能力比在砂型中的差,因而易产生浇不足等缺陷。

②铸型温度 在金属型铸造和熔模铸造时,常将铸型预热,以减少液态合金与铸型的温差;或在金属型型腔表面喷涂不同的涂料,调节金属型的冷却速度,使其充型能力得到

提高。

③铸型排气能力 在金属液的热作用下, 铸型中的气体膨胀, 型砂中的水分汽化, 以及其中的有机粘结剂的燃烧生成的气体都会影响合金的充型, 若铸型排气能力差, 同时浇注速度又快时, 型腔中生成的气体来不及排出, 而阻碍金属液的流动, 降低充型能力。

(3) 浇注条件

包括浇注温度、充型压力。

①浇注温度 浇注温度高, 金属液的表面张力和粘度降低, 因此合金的充型能力随浇注温度的提高而上升。对于薄壁铸件或流动性差的合金可适当提高浇注温度, 以防浇不足和冷隔缺陷。但浇注温度过高, 金属液的收缩增大, 吸气量增大, 氧化严重, 容易导致缩孔、缩松、粘砂、气孔、晶粒粗大等缺陷, 因此, 在保证充型能力足够的条件下, 浇注温度不宜过高。通常, 灰口铸铁浇注温度为 $1200 \sim 1380^{\circ}\text{C}$, 铸钢为 $1520 \sim 1620^{\circ}\text{C}$, 铝合金为 $680 \sim 780^{\circ}\text{C}$ 。

②充型压力 提高浇注时的液体静压力或浇注速度可使充型能力增加。如增加直浇道的高度, 协调浇注系统各组元的截面积比例关系, 根据铸件结构及其大小确定合适的浇注时间等, 以增加充型压力, 提高浇注速度, 减少浇注时的热量损失; 也可以用人工加压方法(低压铸造、压力铸造、真空吸铸和离心铸造等)来提高金属液的充型压力。

(4) 铸件结构

铸件的厚度和复杂程度, 决定了铸型型腔的结构特点。

①铸件的壁厚 在同样的浇注条件下, 壁厚较大的铸件由于它与铸型的接触表面积相对较小, 热量散失较慢, 金属液的充型能力较高。铸件的壁厚越薄, 金属液越不易填满型腔。

②铸件结构复杂程度 铸件的结构越复杂, 铸型对金属液充型时的阻力就越大, 因此要求铸件结构在满足使用要求的条件下, 尽量简单。

三、铸造性能对铸件质量的影响

铸造性能对铸件质量的影响很大。收缩易使铸件产生缩孔、缩松、变形、应力和裂纹等缺陷; 合金流动性差, 易使铸件产生浇不足、冷隔等缺陷。

1. 缩孔和缩松

(1) 缩孔和缩松的形成

在合金的结晶过程中, 因金属液态收缩和凝固收缩得不到金属液的及时补充时, 铸件在其最后凝固部位或热节处将形成表面粗糙、形状极不规则的孔洞, 容积较大的孔洞称其为缩孔; 若孔洞在铸件截面积上弥散分布, 呈细小或裂隙状, 则称其为缩松。

铸件内产生缩孔或是缩松, 主要取决于铸造合金的凝固温度范围的大小。一般来说, 纯金属、共晶成分合金和窄凝固温度范围的合金, 形成缩孔的倾向性大; 宽凝固温度范围的合金形成缩松的倾向性大。缩孔和缩松的形成过程如图 1-3, 图 1-4 所示。

(2) 缩孔和缩松的防止措施

缩孔和缩松将使铸件力学性能、气密性和物理化学性能大大降低, 缩松还可使铸件因渗漏而成为废品, 因此, 缩孔和缩松是铸件的重要缺陷, 应采取适当的铸造技术、工艺措施加以防止。

对共晶成分或窄凝固温度范围的合金来说, 只要能使铸件实现向着冒口的“顺序凝固”, 一般都可获得没有缩孔的致密铸件。

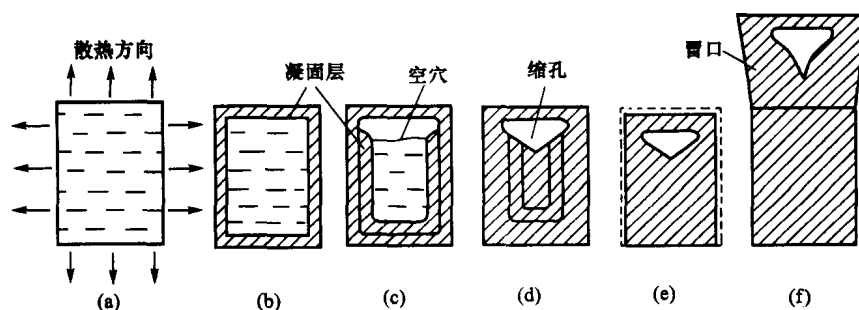


图 1-3 缩孔形成过程示意图

(a) 充型后液态收缩从浇注系统得到补偿；(b) 铸件表层凝固结壳，内浇口冻结；(c) 液态收缩和凝固收缩速度快于固态收缩，液面下降，金属液与硬壳顶面分离；(d) 凝固后铸件上部形成倒锥形缩孔；(e) 固态收缩，铸件尺寸缩小；(f) 若铸件顶部设置冒口，缩孔将移至冒口内

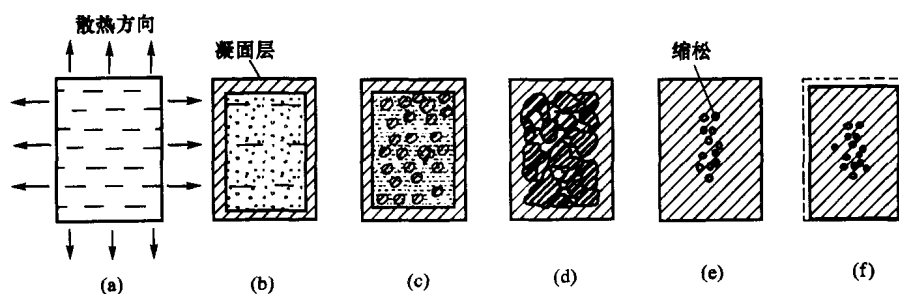


图 1-4 缩松形成过程示意图

(a), (b) 同缩孔；(c), (d) 继续凝固，固相不断长大，形成许多封闭区域；
(e) 封闭区域得不到金属液的补充，形成很多小而分散的孔洞；(f) 固态收缩

顺序凝固是指在铸件可能出现缩孔的厚大部位(如热节、内浇道、冒口颈等)通过安放冒口、冷铁等工艺措施，使远离冒口部位率先凝固，然后向着冒口方向逐点先后有序地凝固，冒口则是最后凝固(图1-5)。按照这样的顺序凝固，先凝固收缩的部位，可得到后凝固部位的金属液的及时补充，冒口中的金属液将最后凝固，缩孔移至冒口之中，而获得无缩孔的铸件。这里冒口起补缩作用，在铸件清理时将其去除。

为了实现顺序凝固，在安放冒口的同时，还可采取在铸件上某些厚大部位放置冷铁；另外，根据铸件的结构特点，选择合适的浇注系统，特别是内浇道的形式及位置开设等。

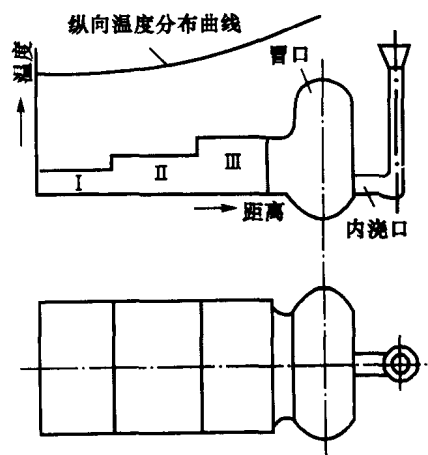


图 1-5 顺序凝固原则示意图