

普通高等教育机电类规划教材

材料成形技术基础

主 编 施江澜
副主编 赵占西 顾用中

 机械工业出版社
China Machine Press



普通高等教育机电类规划教材

材料成形技术基础

主 编 施江澜
副主编 赵占西 顾用中
参 编 袁 勤 周 洪 于 赞
主 审 汤崇熙



机械工业出版社

本书属普通高等教育机电类规划系列教材之一,是根据1997年全国专业调整会议精神,为适应高等工科教育专业改革和按学科(专业大类)培养学生的需要进行编写的。

本书以零件形状结构设计与成形方法适应性为主线,讲述工程材料除切削加工以外的各种成形方法,介绍了当今材料成形的新工艺、新技术、新进展,并介绍了粉末冶金、工程塑料、橡胶、陶瓷、复合材料成形等内容,并强化了常用成形方法选择的实例分析。

全书共分六章:金属液态成形、金属塑性成形、连接成形、粉末冶金成形、非金属材料成型和材料成形方法选择。章后附有复习思考习题。

本书可作为普通高等院校机械类专业的教科书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/施江澜主编. —北京:机械工业出版社,2001.8(2006.7重印)
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-02657-8

I. 材… II. 施… III. 工程材料-成型-加工-高等学校-教材
IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第042508号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:常燕宾 高文龙 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006年7月第1版·第5次印刷

169mm×239mm·8.75印张·336千字

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

序

人类满怀激情刚刚跨入充满机遇与挑战的 21 世纪。这个世纪是经济全球化、科技创新国际化的世纪，是新经济占主导地位的世纪，是科学技术突飞猛进、不断取得新突破的世纪。这个世纪对高等教育办学理念、体制、模式、机制和人才培养等各个方面都提出了全新的要求，培养的人才必须具备新思想新观念、不断创新、善于经营和开拓市场、有团队精神等素质。

机械高等工程教育是我国高等教育的重要组成部分，21 世纪对它的挑战同样是严峻的。随着现代科学技术的迅猛发展，特别是微电子技术、信息技术的发展，它们与机械技术紧密结合，从而形成传统制造技术、信息技术、自动化技术、现代管理技术等相交融、渗透的先进制造技术，使制造业和制造技术的内涵发生了深刻的变化。面向 21 世纪的机械制造业正从以机器为特征的传统技术时代迈向以信息为特征的系统技术时代。制造技术继续沿着 20 世纪 90 年代展开的道路前进。制造技术和自动化水平的高低已成为一个国家或地区经济发展水平的重要标志。而目前我国的制造技术与国际先进水平还有较大差距，亟需形成我国独立自主的现代制造技术体系。面对这一深刻的变化和严峻的形势，我们必须认真转变教育思想，坚持以邓小平同志提出的“三个面向”和江泽民同志提出的“四个统一”为指导，以持续发展为主题，以结构优化升级为主线，以改革开放为动力，以全面推进素质教育和改革人才培养模式为重点，以构建新的教学内容和课程体系、深化方法和手段改革为核心，努力培养素质高、应用能力与实践能力强、富有创新精神和特色的应用性的复合型人才。

基于上述时代背景和要求，由机械工业出版社、江苏省教育厅（原江苏省教委）、江苏省以及部分省外高等工科院校成立了教材编审委员会，并组织编写了机械工程及自动化专业四个系列成套教材首批 30 本，作为向新世纪的献礼。

这套教材力求具有以下特点：

(1) 科学定位。本套教材主要用于应用性本科人才的培养。

(2) 强调实际、实践、实用，体现“浅、宽、精、新、用”。所谓“浅”，就是要深浅适度；所谓“宽”，就是知识面要宽些；所谓“精”，就是要少而精，不繁琐；所谓“新”，就是要跟踪应用学科前沿，跟踪技术前沿，推陈出新，反映时代要求，反映新理论、新思想、新材料、新技术、新工艺；所谓“用”，就是要理论联系实际，学以致用。

(3) 强调特色。就是要体现一般工科院校的特点、特色，符合一般工科院校

的实际教学要求，不盲目追求教材的系统性和完整性。

(4) 以学生为本。本套教材尽量体现以学生为本、以学生为中心的教育思想，不为教而教，要有利于培养学生自学能力和扩展知识能力，为学生今后持续创造性学习打好基础。

当然，本套教材尽管主观上想以新思想、新体系、新面孔出现在读者面前，但由于是一种新的探索以及其它可能尚未认识到的因素，难免有这样那样的缺点甚至错误，敬请广大教师和学生以及其他读者不吝赐教，以便再版时修正和完善。

本套教材的编审和出版得到了机械工业出版社、江苏省教育厅以及各主审、主编和参编学校的大力支持和配合，在此，一并表示衷心感谢。

普通高等教育机械工程及自动化专业机电类规划教材编审委员会

主任 邱坤荣

2001年元月于南京

前 言

本书根据 1997 年全国专业调整会议精神,为适应我国当前高等工科教育专业改革和按学科(专业大类)培养学生的需要进行编写,此教材为普通高等教育机电类规划教材之一。

本书是根据机械学科培养目标,以研究常用工程材料成形方法为主的综合性技术基础课教材。它对原《热加工工艺基础》的传统内容进行了精选、拓宽与加深,以零件形状结构与成形方法适应性为主线,讲述工程材料除切削加工以外的各种成形方法,包括金属液态成型、金属塑性成形、材料连接成形、粉末冶金成形以及塑料、橡胶、陶瓷等非金属材料成型及复合材料成型等,并适当介绍了当今材料成形的新工艺、新技术、新进展。

为加强对学生的能力素质培养,以适应 21 世纪飞速发展的科技、工业形势的需要,针对机械类大口专业培养目标,吸取国内兄弟院校教改和课程建设的成果,以及多种版本相关教材的优点,在以下几方面作了探索。

1. 广泛取材,比较全面地阐述了工程材料的各种成形方法,包括使用最多、最常用的或先进的和现代的成形方法。介绍了粉末冶金、工程塑料、橡胶、陶瓷、复合材料成形等内容。

2. 全书以培养学生分析零件结构工艺性与成形工艺适应性的基本能力素质为主线,突出了成形方法的实施,优缺点比较,适应的零件结构形状尺寸特点和适用条件等内容。

3. 强化了常用成形方法的选择思路及实例分析,以及在选择成形方法时应具有的质量、成本、环保、竞争等意识。

4. 各章后面附有复习思考习题,可供选用。

学习本书内容之前,应修完《工程制图》、《金工实习》、《工程材料》、《互换性与技术测量》等先行课程。

本书可作为普通高等院校机械类专业的教科书,也可供相关工程技术人员参考。

本书第一章和第四章由赵占西编写,其中第一章的第三节由于贇编写,第二章由顾用中、周洪编写,第三章由袁勤编写,第五章由顾用中、施江澜编写,第六章由施江澜编写。全书主编施江澜,副主编赵占西、顾用中。

本书由东南大学汤崇熙教授担任主审,东南大学多位专家对书稿亦提出了许多宝贵意见,谨此表示衷心感谢。

感谢常州技术师范学院在本书编写过程中给予的支持。

由于编者水平有限，书中定有许多错误与欠妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2001 年 2 月

目 录

序 前 言

第一章 金属液态成形	1
第一节 金属液态成形工艺基础	2
第二节 砂型铸造	12
第三节 特种铸造	31
第四节 常用合金铸件生产及铸造方法的选择	43
第五节 与液态成形相关的新工艺、新技术简介	59
习题	62
第二章 金属塑性成形	66
第一节 金属塑性变形基础	67
第二节 自由锻	73
第三节 模锻	84
第四节 板料冲压	95
第五节 其它塑性成形方法	112
第六节 常用塑性成形方法的选择	120
习题	121
第三章 连接成形	125
第一节 电弧焊	126
第二节 其它焊接方法	146
第三节 常用金属材料的焊接	156
第四节 焊接件的结构工艺性	163
第五节 胶接	170
习题	173
第四章 粉末冶金成形	176
习题	199
第五章 非金属材料成形	201
第一节 塑料成形	201

第二节	塑料制品的结构工艺性	215
第三节	橡胶成形	222
第四节	陶瓷的成形	226
第五节	复合材料成形	234
习题		244
第六章	材料成形方法选择	246
第一节	材料成形方法选择的原则与依据	246
第二节	常用机械零件的毛坯成形方法选择	253
第三节	毛坯成形方法选择举例	256
习题		263
参考文献		266

第一章 金属液态成形

金属液态成形又称为铸造，它是将液态金属在重力或外力作用下充填到型腔中，待其凝固冷却后获得所需形状和尺寸的毛坯或零件，即铸件的方法。是成形毛坯或机器零件的重要方法之一。

金属材料在液态下一次成形，具有很多优点。

(1) 适应性广，工艺灵活性大。工业上常用的金属材料如铸铁、碳素钢、合金钢、非铁合金等，均可在液态下成形，特别是对于不宜压力加工或焊接成形的材料，该生产方法具有特殊的优势。并且铸件的大小、形状几乎不受限制，质量从零点几克到数百吨，壁厚从 1mm 到 1000mm 均可。

(2) 最适应形状复杂，特别是具有复杂内腔的毛坯或零件的成形，如复杂箱体、机架、阀体、泵体、缸体等。

(3) 成本较低。铸造用原料大都来源广泛，价格低廉，铸件与最终零件的形状相似、尺寸相近，节省材料。

但液态成型也给铸造带来某些问题，如铸造组织疏松，晶粒粗大，铸件内部常有缩孔、缩松、气孔等缺陷产生，导致铸件力学性能，特别是冲击性能较低。铸造涉及的工序很多，难以精确控制，铸件质量不稳定。由于目前仍以砂型铸造为主，自动化程度还不很高，且属于热加工行业，因而工作环境较差。大多数铸件只是毛坯件，需经过切削加工才能成为零件。

铸造在工业生产中应用广泛，而且，随着特种铸造方法的发展，更可以生产出少或无切削加工的、力学性能更高的铸件。

铸造从造型方法来分，可分为砂型铸造和特种铸造两大类。其中砂型铸造工艺如图 1-1 所示。

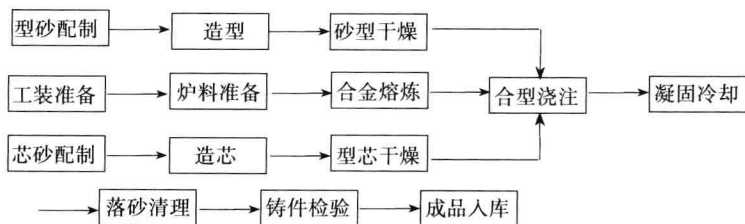


图 1-1 砂型铸造工艺流程图

第一节 金属液态成型工艺基础

一、熔融合金的流动性及充型

液态合金充满型腔是获得形状完整、轮廓清晰合格铸件的保证，铸件的很多缺陷都是在此阶段形成的。为此，必须研究液态合金充满型腔的规律，以便掌握和控制这个过程。

(一) 熔融合金的流动性

1. 流动性 液态合金充满型腔，形成轮廓清晰、形状和尺寸符合要求的优质铸件的能力，称为液态合金的流动性。

当合金的流动性差时，铸件易产生浇不到、冷隔、气孔和夹杂等缺陷。流动性好的合金，易于充满型腔，有利于液态金属中的气体和非金属夹杂物上浮，也有利于对铸件进行补缩。

合金流动性的差异，通常以螺旋形流动性试样的长度来衡量，如图 1-2 所示。显然，在相同的浇注条件下，浇出的试样越长，合金的流动性越好。在常用铸造合金中，灰铸铁、硅黄铜的流动性最好，铸钢的流动性最差。常用合金的流动性数值见表 1-1。

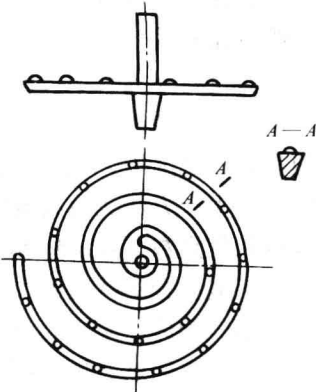


图 1-2 螺旋形试样

表 1-1 常用合金的流动性（砂型，试样截面 8mm×8mm）

合金种类	铸型种类	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
铸铁 $w_{C+Si}=6.2\%$	砂型	1300	1800
	砂型	1300	1300
	砂型	1300	1000
	砂型	1300	600
铸钢 $w_C=0.4\%$	砂型	1600	100
	砂型	1640	200
铝硅合金（硅铝明）	金属型（300℃）	680~720	700~800
镁合金（含 Al 和 Zn）	砂型	700	400~600
锡青铜（ $w_{Sn}\approx 10\%$ ， $w_{Zn}\approx 2\%$ ）	砂型	1040	420
硅黄铜（ $w_{Si}=1.5\%\sim 4.5\%$ ）	砂型	1100	1000

2. 影响合金流动性的因素 化学成分对合金流动性的影响最为显著。纯金属和共晶成分的合金，由于是在恒温下进行结晶，液态合金从表层逐渐向中心凝固，固液界面比较光滑，对液态合金的流动阻力较小，这种凝固称为逐层凝固。同时，共晶成分合金的凝固温度最低，可获得较大的过热度，推迟了合金的凝固，故流动性最好。其它成分的合金是在一定温度范围内结晶的，由于初生树枝状晶体与液体金属两相共存，粗糙的固液界面使合金的流动阻力加大，合金的流动性大大下降，这种凝固称为糊状凝固。合金的结晶温度区间越宽，流动性越差。

Fe-C 合金的流动性与含碳量之间的关系如图 1-3 所示。由图可见，亚共晶铸铁随含碳量增加，结晶温度区间减小，流动性逐渐提高，越接近共晶成分，合金的流动性愈好。

(二) 影响熔融合金充型的条件

合金的充型能力除了受合金本身流动性的影响外，同时又受到很多工艺因素的影响。

1. 浇注条件 提高合金的浇注温度和浇注速度，以及增大静压头的高度会使合金的充型能力提高。但浇注温度太高，将使合金的收缩量增加，吸气增多，氧化严重，铸件有时会产生严重的粘砂和胀砂缺陷。因此每种合金都有一定的浇注温度范围。一般铸钢为 1520~1620℃；铸铁为 1230~1450℃；铝合金为 680~780℃。

2. 铸型 铸型的温度低，热容量大，表示铸型从合金中吸收并储存热量的能力越强，铸型的导热性越好，表示传导热量的能力越强，从而导致使合金保持在液态的时间越短，充型能力下降；当铸型的发气量大、排气能力较低时，合金的流动受到阻碍，会使合金的充型能力下降；浇注系统和铸型的结构越复杂，合金在充型时的阻力越大，充型能力就下降。

二、液态合金的收缩

(一) 收缩的概念

液态合金在凝固和冷却过程中，体积和尺寸减小的现象称为液态合金的收缩。收缩是绝大多数合金的物理本性之一。收缩能使铸件产生缩孔、缩松、裂纹、变形和内应力等缺陷，影响铸件质量，为了获得形状和尺寸符合技术要求、组织致密的合格铸件，必须研究合金收缩的规律。

合金的收缩经历如下三个阶段，如图 1-4 所示。

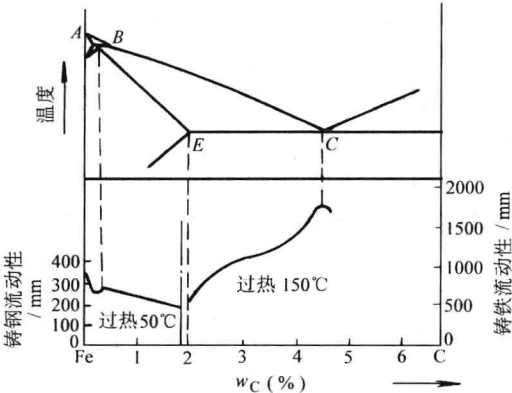


图 1-3 Fe-C 合金的流动性与含碳量的关系

- (1) 液态收缩。从浇注温度 ($T_{\text{浇}}$) 到凝固开始温度 (即液相线温度 T_1) 间的收缩。
- (2) 凝固收缩。从凝固开始温度 (T_1) 到凝固终止温度 (即固相线温度 T_s) 间的收缩。
- (3) 固态收缩。从凝固终止温度 (T_s) 到室温间的收缩。

合金的收缩率为上述三个阶段收缩率的总和。

因为合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金体积的缩减,故常用单位体积收缩量 (即体收缩率) 来表示。合金的固态收缩不仅引起体积上的缩减,同时还使铸件在尺寸上减小,因此常用单位长度上的收缩量 (即线收缩率) 来表示。

不同合金的收缩率不同。常用合金中,铸钢的收缩率最大,灰铸铁最小。几种铁碳合金的体积收缩率见表 1-2。常用铸造合金的线收缩率见表 1-3。

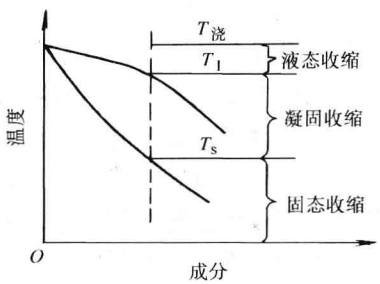


图 1-4 合金收缩的三个阶段

表 1-2 几种铁碳合金的体积收缩率

合金种类	含碳量 w_C (%)	浇注温度 /℃	液态收缩 φ (%)	凝固收缩 φ (%)	固态收缩 φ (%)	总体积收缩 $\varphi_{\text{总}}$ (%)
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3.0	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

表 1-3 常用铸造合金的线收缩率 (%)

合金种类	灰铸铁	可锻铸铁	球墨铸铁	碳素铸钢	铝合金	铜合金
线收缩率	0.8~1.0	1.2~2.0	0.8~1.3	1.38~2.0	0.8~1.6	1.2~1.4

对于同一种合金来说,化学成分不同,其收缩率也略有差别。例如,碳素铸钢随含碳量的增加,其结晶温度范围变宽,凝固收缩率增大。几种铸造碳钢的凝固时体积收缩率见表 1-4。

表 1-4 铸造碳钢的凝固时体积收缩率 (%)

含碳量 w_C	0.10	0.25	0.35	0.45	0.70
凝固时体积收缩率 φ	2.0	2.5	3.0	4.3	5.3

灰铸铁在凝固时有石墨化膨胀,故随碳当量增加,凝固时体积收缩减小,如图 1-5 所示。

(二) 铸件的缩孔和缩松

1. 缩孔和缩松的形成 液态合金充满型腔后，在冷却凝固过程中，若液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补足，则在铸件的最后凝固部位会形成一些孔洞。按照孔洞的大小和分布，可将其分为缩孔和缩松两类。

缩孔是指集中在铸件上部或最后凝固部位、容积较大的孔洞。缩孔多呈倒圆锥形，内表面粗糙。

缩松是指分散在铸件某些区域内的细小缩孔。当缩松和缩孔的容积相同时，缩松的分布面积要比缩孔大得多。

(1) 缩孔的形成。主要出现在金属在恒温或很窄温度范围内结晶，铸件壁呈逐层凝固方式的条件下。如图 1-6 所示。液态合金充满型腔（图 1-6a）后，由于铸型的吸热，靠近型腔表面的金属很快凝固成一层外壳，而内部仍然是高于凝固温度的液体（图 1-6b）。温度继续下降，外壳加厚，内部液体因液态收缩和补充凝固层的凝固收缩，体积缩减，液面下降，使铸件内部出现了空隙（图 1-6c）。至内部完全凝固，在铸件上部形成缩孔（图 1-6d）。继续冷至室温，整个铸件发生固态收缩，缩孔的绝对体积略有减小（图 1-6e）。

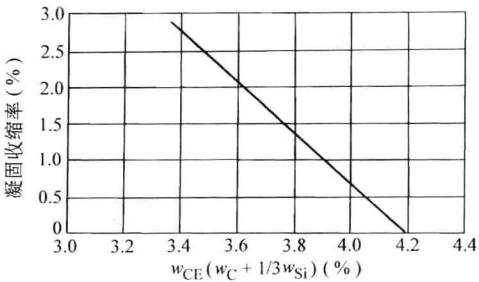


图 1-5 灰铸铁的凝固收缩率与碳当量的关系

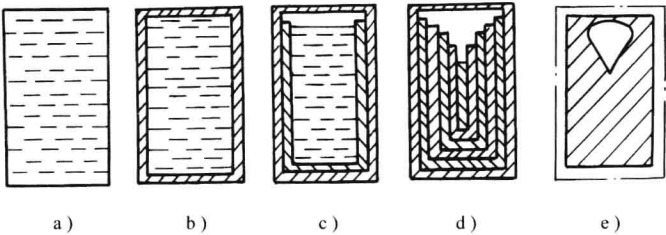


图 1-6 缩孔形成过程示意图

合金的液态收缩和凝固收缩越大，浇注温度越高，铸件的壁越厚，缩孔的容积就越大。

(2) 缩松的形成。主要出现在呈糊状凝固方式的合金中或断面较大的铸件壁中，是被树枝状晶体分隔开的液体区难以得到补缩所致。缩松大多分布在铸件中心轴线处、热节处、冒口根部、内浇道附近或缩孔下方，如图 1-7 所示。对气密性、力学性能、物理性能或化学性能要求很高的铸件，必须设法减少缩松。

生产中可采用一些工艺措施（如控制冷却速度）来控制铸件的凝固方式，使产生缩孔和缩松的倾向在一定条件下、一定范围内相互转化。

2. 缩孔和缩松的防止 缩孔和缩松都会使铸件的力学性能下降，缩松还可使

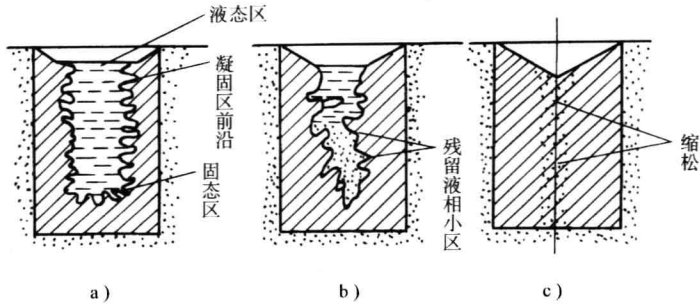


图 1-7 缩松示意图

铸件因渗漏而报废。因此，必须采取适当的工艺措施，防止缩孔和缩松的产生。

防止产生缩孔的有效措施，是使铸件实现“定向凝固”。所谓定向凝固，是在铸件可能出现缩孔的厚大部位，通过安放冒口等工艺措施，使铸件上远离冒口的部位最先凝固（图 1-8 I 区），尔后是靠近冒口的部位凝固（图 1-8 II、III 区），冒口本身最后凝固。按照这样的凝固顺序，先凝固部位的收缩，由后凝固部位的金属液来补充；后凝固部位的收缩，由冒口中的金属液来补充，从而使铸件各个部位的收缩均能得到补充，而将缩孔转移到冒口之中。冒口为铸件的多余部分，在铸件清理时去除。

为了实现定向凝固，在安放冒口的同时，还可在铸件上某些厚大部位增设冷铁。如图 1-9 所示，铸件的厚大部位不止一个，仅靠顶部冒口，难以向底部的凸台补缩，为此，在该凸台的型壁上安放了两块外冷铁。冷铁加快了铸件在该处的冷却速度，使厚度较大的凸台反而最先凝固，从而实现了自下而上的定向凝固，防止了凸台处缩孔、缩松的产生。可以看出，冷铁仅是加快某些部位的冷却速度，以控制铸件的凝固顺序，本身并不起补缩作用。冷铁通常用铸钢或铸铁加工制成。

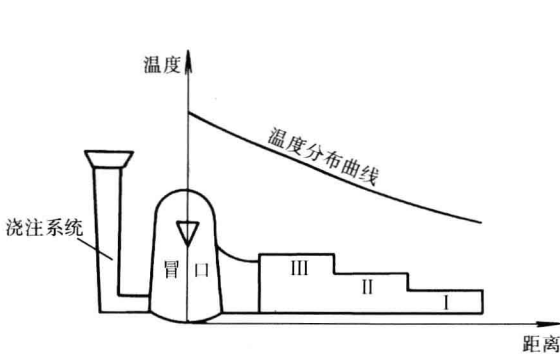


图 1-8 定向凝固示意图

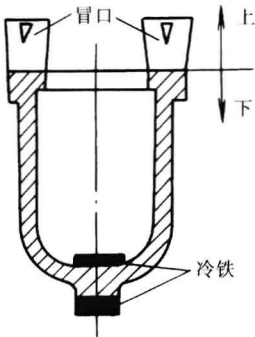


图 1-9 冷铁的应用

正确判断铸件上缩孔或缩松可能产生的部位，是合理设置冒口和冷铁的重要依据。在实际生产中，常以画“凝固等温线法”和“内切圆法”，近似找出缩孔的部位，如图 1-10 所示。图中等温线未曾通过的铸件中心部位和内切圆直径最大处，即为容易产生缩孔的热节。近年来，日趋成熟的计算机凝固数值模拟技术，可以帮助预测缩孔或缩松产生的位置。

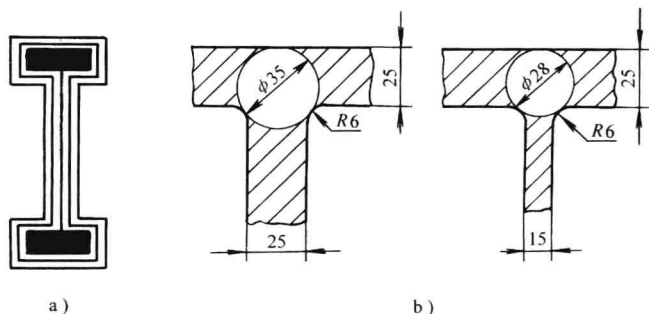


图 1-10 缩孔位置的确定

a) 等温线法 b) 内切圆法

采用定向凝固，虽然可以有效防止铸件产生缩孔，但却耗费许多金属和工时，增加铸件成本。同时，定向凝固加大了铸件各部分之间的温度梯度，促使铸件的变形和裂纹倾向加大。因此，定向凝固主要用于体收缩大的合金，如铝青铜、铝硅合金和铸钢等。

对于结晶温度范围很宽的合金，由于倾向于糊状凝固，结晶开始之后，发达的树枝状骨架布满了整个截面，使冒口的补缩通道严重受阻，因而难以避免缩松的产生。显然，选用近共晶成分或结晶温度范围较窄的合金，是防止缩松产生的有效措施。此外，加大铸件的冷却速度，或加大结晶压力，可达到部分防止缩松的效果。

(三) 铸造应力

铸件在凝固之后的继续冷却过程中，若固态收缩受到阻碍，将会在铸件内部产生内应力。这些内应力有的是在冷却过程中暂存的，有的则一直保留到室温，称为残余内应力。铸造内应力有热应力和机械应力两类，它们是铸件产生变形和裂纹的基本原因。

1. 热应力的形成 由于铸件壁厚不均匀，各部分冷却速度不同，以致在同一时期铸件各部分收缩不一致而引起。

为了分析热应力的形成，首先必须了解金属自高温冷却到室温时应力状态的变化。固态金属在弹-塑临界温度以上的较高温度时，处于塑性状态，在应力作用下会产生塑性变形，变形之后，应力可自行消除。而在弹-塑临界温度以下，金属呈弹性状态，在应力作用下发生弹性变形，变形之后，应力仍然存在。

以图 1-11a 所示的框形铸件来分析热应力的形成。该铸件中的杆 I 较粗，杆 II 较细。当铸件处于高温阶段（图中 $T_0 \sim T_1$ 间），两杆均处于塑性状态，尽管两杆的冷却速度不同，收缩不一致，但瞬时的应力均可通过塑性变形而自行消失。继续冷却后，冷速较快的杆 II 已进入弹性状态，而粗杆 I 仍处于塑性状态（图中 $T_1 \sim T_2$ 间）。冷却开始时，由于细杆 II 冷却快，收缩大于粗杆 I，所以细杆 II 受拉伸，粗杆 I 受压缩（图 1-11b），形成了暂时内应力，但这个内应力随之因粗杆 I 的微量塑性变形（压短）而消失（图 1-11c）。当进一步冷却到更低温度时（图中 $T_2 \sim T_3$ ），已被塑性压短的粗杆 I 也处于弹性状态，此时，尽管两杆长度相同，但所处的温度不同。粗杆 I 的温度较高，还会进行较大的收缩；细杆 II 的温度较低，收缩已趋停止。因此，粗杆 I 的收缩必然受到细杆 II 的强烈阻碍，于是，细杆 II 受压缩，粗杆 I 受拉伸，直到室温，形成了残余内应力（图 1-11d）。

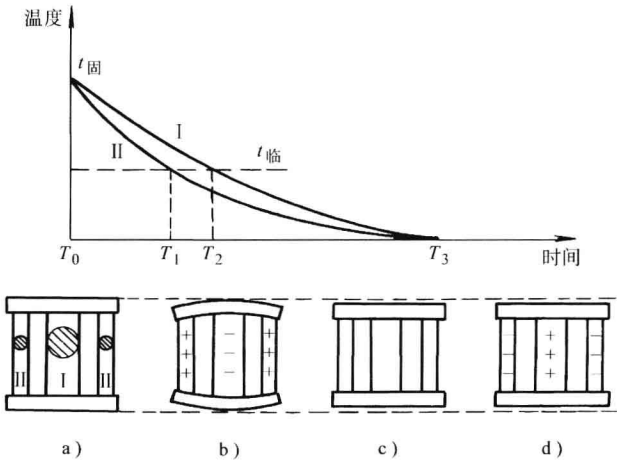


图 1-11 热应力的形成
+ 表示拉应力 - 表示压应力

由此可见，不均匀冷却使铸件的厚壁或心部受拉应力，薄壁或表层受压应力。铸件的壁厚差别愈大，合金的线收缩率愈高，弹性模量愈大，热应力也愈大。

2. 机械应力的形成 机械应力是合金的线收缩受到铸型或型芯的机械阻碍而形成的内应力，如图 1-12 所示。

机械应力使铸件产生拉伸或切应力，是暂时存在的，在铸件落砂之后，这种内应力便可自行消除。但机械应力在铸型中可与热应力共同起作用，增大了某些部位的拉应力，增加了铸件的裂纹倾向。

3. 减小应力的措施 在铸造工艺上采取“同时凝固原则”，尽量减小铸件各部位间的温度差，使铸件各部位同时冷却凝固，如在铸件的厚壁处加冷铁，并将