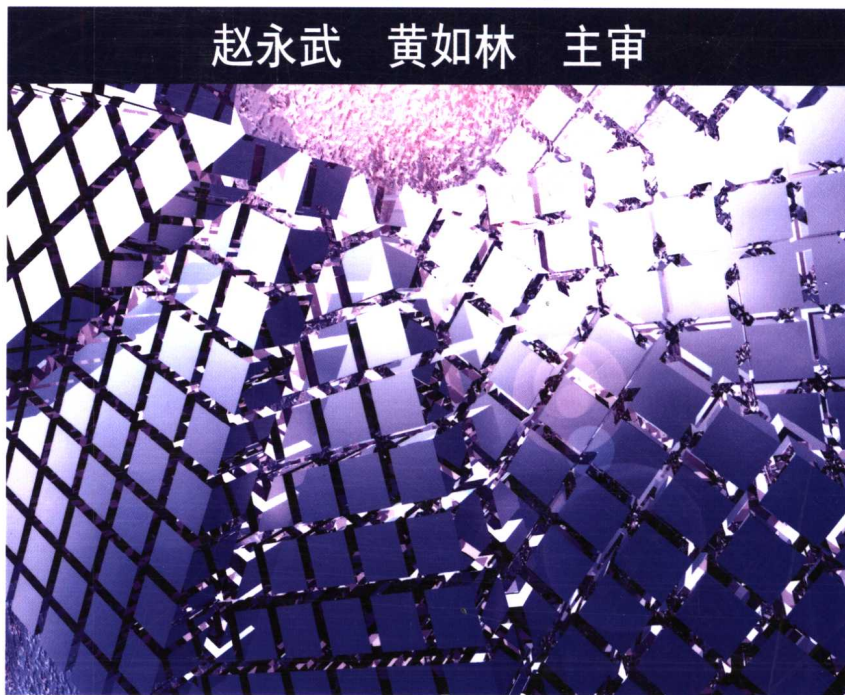


高等学校教材

# 材料成形工艺基础

刘新佳 姜银方 蔡郭生 主编

赵永武 黄如林 主审



CHEMICAL INDUSTRY PRESS



化学工业出版社

高等学校教材

# 材料成形工艺基础

刘新佳 姜银方 蔡郭生 主编  
赵永武 黄如林 主审



化学工业出版社

·北京·

本书以教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》和《重点高等工科院校金工系列课程改革指南》为依据,以零件的形状结构设计与成形工艺的适应性为主线,介绍了机械制造工程中除机械加工以外的材料成形技术,包括金属材料的凝固成形(铸造)、塑性成形(锻压)、连接成形(焊接)和粉末成形,工程塑料、橡胶、陶瓷制品的成形;同时介绍了包括快速成形等有关材料成形的先进技术及其发展趋势。

本书可作为高等学校本科机械类、近机械类专业学生教材,也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材和有关专业科技人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺基础/刘新佳,姜银方,蔡郭生主编.  
北京:化学工业出版社,2006.8  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-9207-5

I. 材… II. ①刘…②姜…③蔡… III. 工程材料-  
成型-工艺-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第097600号

---

高等学校教材

### 材料成形工艺基础

刘新佳 姜银方 蔡郭生 主编

赵永武 黄如林 主审

责任编辑:程树珍 陈丽

文字编辑:陈喆

责任校对:李林

封面设计:潘峰

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 353千字

2006年9月第1版 2006年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9207-5

定价:24.00元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

本教材是为适应高校专业设置的调整和合并而提出的教改要求，以国家教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》中材料成形技术基础的教学基本内容和要求为编写依据。为与目前机械类专业少学时、宽口径、重技能的教学改革要求相适应，在适度、够用的前提下以精简理论、加强基础、注重应用、拓宽知识面、更新教材内容为基本原则。

本教材的内容体系是依据重点高等工科院校“工程材料及机械制造基础”系列课程改革指南中材料成形技术基础课程改革参考方案，在总结近几年工程材料及机械制造基础系列课程教改成果的基础上，在遵循材料科学与工程体系的基础上，以机械工业中广泛使用的工程材料的成形技术为研究对象，兼顾与系列课程中“金工实习”和“工程材料”课程在教学内容上的衔接。内容编排上在探索教材新结构的同时保证教材内容的科学性、继承性、适用性和相对的稳定性。

本教材在内容的选择上注意根据材料科学与工程的发展，顺应制造工程的实际需要，在重点介绍工程上广泛使用的金属材料成形工艺的同时，适量地介绍非金属材料、新型材料的成形以及新技术、新工艺等方面的有关知识，尽可能实现教材内容的现代化。注重理论联系实际，学以致用，重视材料坯件成形的工艺设计和结构设计，以加强学生实际工程技术能力的培养。采用最新的国家标准和行业标准，增加生产中广泛应用的相关图表、资料、经验公式和工艺设计实例，以增加实用性。

为培养学生的创造性思维能力和独立分析与解决实际问题的能力，本书在各章末均附有难度不等的习题，旨在帮助学生及时理解、消化本章内容。同时，为适应少学时的教学要求，我们还同步编写了《工程材料及成形工艺基础学习指导》，进一步帮助学生正确理解并掌握教学内容。

本书由刘新佳、姜银方、蔡郭生主编，由江南大学“太湖学者”特聘教授、博士生导师赵永武教授以及黄如林副教授担任主审，并参考了相关的文献资料，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者  
2006年9月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>1 金属凝固成形工艺 .....</b>	<b>3</b>
1.1 金属凝固成形理论基础 .....	3
1.1.1 合金的铸造性能 .....	3
1.1.2 常用合金铸件的生产 .....	13
1.2 金属凝固成形工艺方法 .....	21
1.2.1 砂型铸造 .....	21
1.2.2 特种铸造 .....	26
1.2.3 金属凝固成形技术的新进展 .....	37
1.3 金属凝固成形工艺设计 .....	38
1.3.1 浇注位置和分型面的选择 .....	38
1.3.2 铸造工艺参数的确定 .....	42
1.3.3 铸造工艺简图绘制 .....	45
1.4 金属凝固成形件结构设计 .....	48
1.4.1 砂型铸造工艺对铸件结构的要求 .....	48
1.4.2 合金的铸造性能对铸件结构的要求 .....	52
1.4.3 铸造方法对铸件结构工艺性的要求 .....	56
习题 .....	59
<b>2 金属塑性成形工艺 .....</b>	<b>63</b>
2.1 金属塑性成形理论基础 .....	65
2.1.1 金属的塑性成形性能 .....	65
2.1.2 金属变形的一般规律 .....	67
2.2 金属塑性成形工艺方法 .....	68
2.2.1 锻造 .....	68
2.2.2 板料冲压 .....	77
2.2.3 其他塑性成形工艺方法 .....	86
2.2.4 金属塑性成形技术的新进展 .....	92
2.3 金属塑性成形工艺设计 .....	94
2.3.1 自由锻工艺规程的制定 .....	94
2.3.2 锤上模锻工艺规程的制定 .....	97
2.3.3 冲压工艺规程的制定 .....	101
2.4 金属塑性成形件结构设计 .....	103
2.4.1 自由锻件的结构设计 .....	103

2.4.2	锤上模锻件的结构设计 .....	104
2.4.3	冲压件结构设计 .....	105
	习题 .....	107
<b>3</b>	<b>金属焊接成形工艺</b> .....	110
3.1	金属焊接成形理论基础 .....	110
3.1.1	熔焊冶金过程 .....	110
3.1.2	焊接应力与变形 .....	113
3.1.3	焊接质量检验 .....	117
3.1.4	金属的焊接性 .....	119
3.2	金属焊接成形工艺方法 .....	121
3.2.1	熔焊 .....	121
3.2.2	压焊 .....	129
3.2.3	钎焊 .....	134
3.2.4	金属焊接成形技术的新进展 .....	136
3.3	金属焊接成形工艺及焊件结构设计 .....	137
3.3.1	焊接材料 .....	137
3.3.2	焊件结构材料的选择 .....	139
3.3.3	焊接方法的选择 .....	145
3.3.4	焊接工艺参数的选择 .....	146
3.3.5	焊件结构设计 .....	146
3.3.6	典型焊件的工艺设计 .....	151
	习题 .....	152
<b>4</b>	<b>粉末冶金</b> .....	155
4.1	粉末冶金工艺过程 .....	155
4.1.1	粉末制备 .....	156
4.1.2	成形 .....	157
4.1.3	烧结 .....	159
4.1.4	后处理 .....	160
4.2	粉末冶金制品的结构设计 .....	160
4.3	粉末冶金制品的常见缺陷分析 .....	163
4.4	粉末冶金成形技术的新进展 .....	164
4.4.1	超微粉末制备技术 .....	164
4.4.2	粉末注射成形 (PIM) .....	164
4.4.3	温压成形工艺 .....	164
	习题 .....	165
<b>5</b>	<b>非金属材料成形工艺</b> .....	166
5.1	工程塑料的成形 .....	166
5.1.1	工程塑料成形工艺基础 .....	166
5.1.2	工程塑料成形方法 .....	168
5.1.3	塑料制品的结构设计 .....	175
5.2	橡胶的成形 .....	180
5.2.1	压制成形 .....	180

5.2.2	注射成形	180
5.2.3	挤出成形	180
5.2.4	压铸成形	181
5.3	胶接成形工艺	181
5.3.1	胶接工艺过程	181
5.3.2	胶接的应用	183
5.4	陶瓷材料的成形	184
5.4.1	粉体加工	184
5.4.2	工程陶瓷成形方法	184
5.5	复合材料的成形	188
5.5.1	树脂基复合材料成形	188
5.5.2	金属基复合材料的成形	190
5.5.3	陶瓷基复合材料的成形	191
	习题	191
<b>6</b>	<b>快速成形技术</b>	192
6.1	快速成形的原理与特点	192
6.1.1	快速成形原理	192
6.1.2	快速成形的特点	192
6.2	快速成形工艺方法	193
6.2.1	光固化 (SL) 工艺	193
6.2.2	熔融堆积成形 (FDM) 工艺	194
6.2.3	选择性激光烧结 (SLS) 工艺	195
6.2.4	三维印刷 (3DP) 工艺	195
6.2.5	无模铸造制造 (PCM) 工艺	196
6.3	快速成形技术的应用及发展趋势	196
6.3.1	快速成形技术的应用	196
6.3.2	快速成形技术的发展趋势	198
	习题	198
<b>7</b>	<b>毛坯成形工艺选择</b>	199
7.1	毛坯成形工艺选择的原则	199
7.1.1	成形方法必须满足适用性要求	199
7.1.2	成形方法应当满足经济性要求	199
7.1.3	成形方法满足环保要求	200
7.2	毛坯成形工艺选择的方法	200
7.2.1	毛坯成形方法选择的依据	200
7.2.2	常用成形方法的比较	204
7.3	典型机械零件成形方法的选择	204
7.3.1	轴杆类零件	204
7.3.2	盘套类零件	205
7.3.3	箱体类零件	206
7.3.4	毛坯成形方法选择实例	206
	习题	209
	<b>参考文献</b>	210

# 绪 论

任何机器或设备都是由相应的零件装配而成的，而机械零件则是用原材料经一系列的加工过程而制成的，材料成形加工是生产各种零件或零件毛坯的主要方法。材料成形的方法种类繁多，涉及的物理、化学和力学现象十分复杂，是一个多学科交叉、融合的研究和应用领域。按传统的学科分类方法，材料成形技术可分为：凝固（或称液态）成形技术（铸造）、塑性成形技术（锻压）、焊接（连接）成形技术、粉末冶金成形技术、非金属材料成形技术等。大多数机械零件是用上述方法制成毛坯，然后经机械加工（车、铣、刨、磨、钳等），使之具有符合要求的尺寸、形状、相对位置和表面质量。为了便于切削加工或提高使用性能，有的零件还需要在毛坯制造和机械加工过程中穿插不同的热处理工序，对于表面有特殊性能要求的零件还需要进行表面成形加工。

由于传统的材料成形过程——铸造、锻造和焊接技术中，都有一个对坯料进行加热的过程，因此，材料成形技术曾被称为材料热加工工艺，这是一门研究如何用热加工方法将材料加工成机器零件和结构，并研究如何保证、评估、提高这些零件和结构的安全可靠度和寿命的科学。然而，现代科学技术的飞速发展、大量新材料新技术的应用、材料与成形技术的一体化使材料成形技术的内容已远远超出了传统的热加工范围，例如常温下的冷冲压、超声波焊接、物理气相沉积、化学气相沉积以及近几年发展起来的激光快速成形等成形技术，这些工艺方法已远远超出了传统的成形技术的概念，因此，现代材料成形技术可定义为：一切用物理、化学、冶金原理制造机器部件和结构，或改进机器部件化学成分、微观组织及性能的方法。其任务不仅是要研究如何使机器部件获得必要的几何尺寸，同时还要研究如何通过过程控制获得一定的化学成分、组织结构和性能，从而保证机器部件的安全可靠度和寿命。

金属的凝固成形利用液体的流动性，可以制作结构复杂的零件坯料或工程构件。凝固成形已有几千年的历史，正是由于青铜器的铸造和铸铁的生产应用，使人类的历史从石器时代迈入了青铜器时代，进而进入了铁器时代，极大地推动了社会生产力的进步。近代铸造技术的应用更为广泛，铸造成形的构件占到整个机械制造部件的50%以上，中国铸件年产量已超过1400万吨，超过美国成为了世界铸件生产第一大国。金属的塑性成形利用热态或冷态下固态金属具有的良好塑性，在外力作用下通过塑性流变可以生产具有较高力学性能的坯料或零件。塑性成形也已有数千年的生产历史，古代兵器的制造，至今还十分锋利的战国时期宝剑，无不具有高超的材料技术和塑性成形技术含量。机械零部件的制造对塑性成形的依赖更多，汽车、机床等机械的齿轮和轴类部件均需要通过塑性成形的方法制造坯料，全世界有75%的钢材是经塑性加工成形的。焊接技术通过实现坯料间的连接成形，可以实现优化设计和充分利用型材。焊接成形的工程应用也十分广泛，各种桥梁、构架、船舶均需要焊接成形，目前，有45%的金属结构用焊接得以成形。现代焊接方法的出现，节省了大量的材料和工时，是许多构件制作不可缺少的成形方法。

材料成形加工技术未来的重要发展方向将是轻量化、精确化、高效化。以汽车制造为例，美国新一代汽车研究计划（PNGV）的近期目标是每100km油耗减少到3L。汽车重量减轻10%可使燃烧效率提高7%，并减少10%的污染。为了达到这一目标，要求整车重量



要减轻 40%~50%，其中车体和车架的重量要求减轻 50%，动力及传动系统必须减轻 10%。适应这一发展方向，新型汽车中使用的钢铁等黑色金属用量将大幅度减少，而轻质的铝、镁合金用量将显著增加，例如，美国福特汽车公司的新车型中铝合金将从 129kg 增加到 333kg，镁合金将从 4.5kg 增加到 39kg，这其中提出了多项材料关键成形加工技术。精密成形技术 (net shape forming) 和准精密成形技术 (near net shape forming) 要求材料成形加工制造向更轻、更薄、更精、更强、更韧及成本低、周期短、质量高的方向发展，目前，已成为成形技术领域研究的重点，包括中国在内的很多国家都投入了大量的人力和物力进行研究，其研究范围和深度正在不断扩大和深入。基于自由成形 (free form fabrication) 的思想而发展起来的快速成形技术，改变了传统的先在型腔内成形毛坯、再经机械加工获得零件的传统工艺路线，而是通过激光束等高能量束逐点扫描产生材料堆积或固化而获得所需要的零件。由于该方法能直接利用 CAD 系统所产生的数据模型快速成形所需的零件，尤其适用于形状复杂、批量不大、交货时间短的产品生产或成形样件的制造，因此，该技术一经问世便取得了飞速的发展。目前，基于自由成形原理的多种技术和方法已进入了实用阶段，如光固化 (stereolithography, SL) 成形技术、选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 成形技术、分层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM) 成形技术、熔融堆积 (fused deposition modeling, FDM) 成形技术、三维印刷 (three dimensional printing, 3DP) 成形技术等。这些技术的发展和运用已引起成形技术的一场变革，并正在改变着传统的机械制造业。

中国已是制造大国，仅次于美国、日本、德国，位居世界第四。但中国虽是制造大国，作为制造业的主体，作为汽车、电力、石化、造船、机械等支柱产业的基础技术，材料成形加工技术与工业发达国家相比，仍有很大差距，例如：重大工程的关键铸锻件，如长江三峡水轮机的第一个叶轮仍从国外进口，航空工业发动机及其他重要的动力机械的前沿核心成形制造技术尚有待突破。只有使用先进的材料加工技术，才能获得高质量产品的结构和性能，因此，大力加强和重视材料成形技术与科学的发展，将是振兴中国制造业的关键。

“材料成形工艺基础”是机械类专业必修的一门综合性的技术基础课。本课程主要涉及机械制造工程中工程材料的基本成形技术，其基本内容包括除机械加工以外的其他材料成形技术，包括金属材料的凝固成形、塑性成形、焊接成形和粉末成形、工程塑料、橡胶、工程陶瓷、复合材料的成形以及快速成形等有关材料成形的先进技术及其发展趋势等。期望通过本课程的教学，使学生初步掌握各种材料成形技术的基本原理和工艺方法，并具有一定的综合分析和处理材料成形实际问题的能力，具有根据毛坯或制品能正确选择成形方法和制定工艺及参数的初步能力；具有综合运用工艺知识分析零件结构工艺性的初步能力；了解有关新材料、新工艺、新技术及其发展趋势。为学习后续其他有关课程及今后从事机械设计与制造方面的工作，奠定必要的技术基础。

鉴于本课程具有的内容上的广泛性、高度的综合性和极强的实践性的特点，学习中要注意调整和改进学习方法，注重主动学习、自主学习，提高学习效率，理论联系实际地学习，自觉培养独立分析问题与解决问题的能力，在掌握基本理论的前提下，加强实践操练，通过实践操练加深对所学知识的理解和掌握，提高对所学知识的运用能力，使所学知识得到巩固与提高，从而真正达到上述的学习目的。

# 1 金属凝固成形工艺

金属凝固成形习惯上称为铸造。铸造是将熔融金属浇注、压射或吸入铸型型腔中，待其凝固后而获得一定形状和性能的铸件的工艺方法。绝大多数铸件需要经过机械加工后才能成为各种机器零件；少数铸件也可直接作为成品或零件使用。

铸造是金属材料凝固成形的一种重要工艺方法。在工业生产中，铸件所占比重相当大，如机床、内燃机中，铸件占总质量的70%~90%，拖拉机和农用机械中占50%~70%。铸造与其他成形方法相比，具有下列特点。

## (1) 成形方便，适应性广

铸件的轮廓尺寸可由几毫米到数十米；壁厚由几毫米到几百毫米，质量由几克到几百吨。可以制造外形复杂，尤其是具有复杂内腔的铸件。例如，机床床身、内燃机的缸体和缸盖、箱体等的毛坯均为铸件。从黑色金属、非铁金属到难熔合金均可采用铸造方法成形，特别是某些塑性差的材料，如铸铁等，只能用铸造方法制造毛坯。铸造既可用于单件、小批量生产，也可用于成批及大批量生产。

## (2) 生产成本低、经济性好

铸件在一般机器中约占总质量的40%~80%，而成本只占机器总成本的25%~30%。成本低廉的原因是：与锻件相比，其动力消耗小，铸件形状、尺寸与零件比较接近，节约机加工工时和金属材料；铸件所用材料来源广，且可以利用金属废料和废机件。

## (3) 铸件质量不够稳定，力学性能较差

铸造生产工序较多，影响铸件质量的因素复杂，有些工艺过程难以控制，因而铸件质量不够稳定，废品率较高；铸件显微组织粗大，内部易产生缩孔、缩松、气孔、砂眼等缺陷，其力学性能不如同类材料的锻件高；铸件表面较粗糙，尺寸精度不高。

## (4) 生产条件较差，劳动强度高

目前广泛使用的砂型铸造，大多属于手工操作，工人的劳动强度大，生产条件差。

随着新工艺、新技术、新材料、新设备的应用，铸造生产环境大大改善，工人劳动强度大幅度降低，铸件质量和经济效益亦在不断提高，它将改变人们对铸造生产的传统观念和认识，也使得铸造的应用范围越来越广。

## 1.1 金属凝固成形理论基础

### 1.1.1 合金的铸造性能

铸造合金在铸造过程中呈现出的工艺性能，称为合金的铸造性能。合金的铸造性能主要是指流动性、收缩性、偏析和吸气性等。铸件的质量与合金的铸造性能密切相关，其中流动性和收缩性对铸件的质量影响最大。

#### 1.1.1.1 液态金属的充型能力

液态合金充满铸型型腔获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力，称为液态金属的充型能力。充型能力首先决定于液态金属本身的流动能力（即内因），同时又受铸型性质、浇注条

件、铸件结构（即外因）等因素的影响。因此，充型能力是上述各种因素的综合反映。

### (1) 合金的流动性

液态金属本身的流动能力称为金属的流动性。液态合金的流动性好，则充型能力强，有利于壁薄和形状复杂铸件的成形；有利于液态合金中非金属夹杂物和气体的上浮与排除；有利于合金凝固收缩时的补缩作用。若流动性不好，充型能力就差，铸件就容易产生浇不足、冷隔、夹渣、气孔和缩松等缺陷。

液态合金的流动性通常用螺旋形试样的长度来衡量，如图 1-1 所示。在相同的铸型及浇注条件下，浇注出的螺旋形试样愈长，金属的流动性愈好。

### (2) 影响液态合金流动性的因素

主要有合金种类、成分、温度、杂质含量和其他物理性能等。

① 合金的种类 合金的流动性与合金的熔点、导热系数、合金液的黏度等物理性能有关。常用铸造合金中，灰铸铁流动性最好，硅黄铜、铝硅合金次之。铸钢的熔点高，在铸型中散热快，凝固快，流动性差；铝合金导热性能好，流动性也较差。

② 合金的成分 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。

纯金属及共晶成分合金的结晶是在恒温下进行的，结晶由铸件壁表面开始逐层向中心凝固，凝固层的内表面较为光滑，对尚未凝固的金属流动阻力小，金属流动的距离长。此外，对共晶成分的合金，由于其熔点最低，在相同浇注温度下，过热度（浇注温度与合金熔点的温差）大，液态金属存在的时间较长。因此，纯金属及共晶成分合金的流动性最好。

非共晶合金的结晶是在一定温度范围内进行的，铸件断面上有“固-液”双相并存区域。在此区域初生的树枝状晶使凝固层内表面参差不齐，阻碍液态合金的流动，因而对未结晶的液态合金的流动产生较大的阻力，流动性较差。合金的结晶温度范围越宽，树枝状晶越发达，对金属流动的阻力越大，金属的流动性就越差。

图 1-2 为铁碳合金的碳质量分数与流动性的关系。可见，纯铁和共晶铸铁的流动性最好，亚共晶铸铁和碳钢随着凝固温度范围变宽，流动性变差。铸铁的流动性比铸钢好。

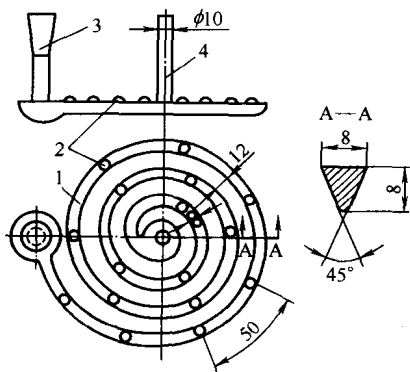


图 1-1 螺旋形试样

1—试样；2—试样凸点；3—浇口；4—出气口

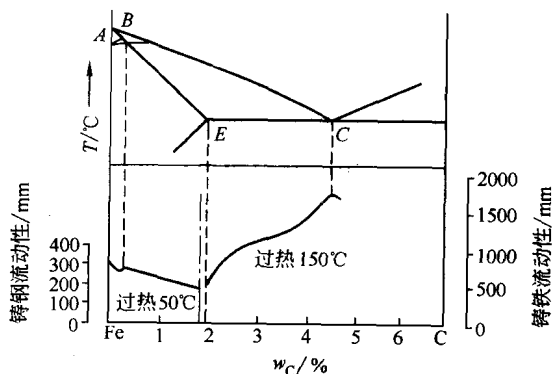


图 1-2 铁碳合金的碳质量分数与流动性的关系

③ 合金的质量热容、密度和热导率 合金的质量热容是单位质量物质升高单位温度的热容。合金的质量热容和密度越大，在相同的过热度下，合金所含的热量越多，保持高温的时间越长，流动性也越好。合金的热导率越小，热量散失越慢，流动性也越好。

④ 杂质与含气量 在液态合金中，凡能形成高熔点夹杂物的元素均会降低合金的流动性。如灰铸铁中锰和硫，反应生成的  $MnS$  熔点高达  $1650^{\circ}C$ ，钢中  $MnO$  ( $1785^{\circ}C$ )、 $SiO_2$

(1710℃)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2050℃)、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (1900℃)、VC (2050℃)、BN (3000℃)、TiC (3180℃) 等以及铝、镁合金中的氧化物夹杂, 都使合金的流动性下降。但是, 在熔融合金中呈液态的夹杂物由于熔点较低, 在熔融合金的温度下有较大的过热, 使合金的黏度减小, 提高合金的流动性。如用酸性炉熔炼的钢液, 其夹杂物多为熔点较低的硅酸盐, 在同样过热条件下, 熔融钢液的流动性比在碱性炉中熔炼的要好。熔融金属中含气量愈少, 合金的流动性愈好。

### (3) 影响合金充型能力因素

合金的流动性对充型能力的影响最大, 此外, 铸型和工艺条件也会改变合金的充型能力。

#### ① 浇注条件 主要指浇注温度、充型压力和浇注速度。

i. 浇注温度: 浇注温度对合金充型能力有决定性影响。在一定范围内, 浇注温度越高, 合金流动性越好。因为浇注温度高, 液态金属所含的热量多, 在同样冷却条件下, 保持液态的时间长, 流动性好; 浇注温度越高, 合金的黏度越低, 液体在铸型中的流动阻力减小, 合金能够流动较长的距离; 浇注温度越高, 传给铸型的热量多, 使铸型的温度升高, 可以减缓铸型对金属的激冷作用, 因而有利于液体金属的充型。因此, 对薄壁铸件或流动性较差的合金, 为防止浇不足和冷隔等缺陷的产生, 可适当提高浇注温度。但浇注温度过高, 液态合金的收缩增大, 吸气量增加, 氧化严重, 铸件易产生缩孔、缩松、气孔、粘砂、粗晶等缺陷。故在保证充型能力足够的前提下, 尽量降低浇注温度, 一般在合金熔点以上100~150℃。

ii. 充型压力: 充型压力越大, 液态合金在流动方向上的驱动力就越大, 充型能力也越好。砂型铸造时, 充型压力是由直浇道的静压力产生的, 适当提高直浇道的高度, 可提高充型能力。但过高的砂型浇注压力, 易使铸件产生砂眼、气孔等缺陷。在低压铸造、压力铸造和离心铸造时, 因人为加大了充型压力, 故充型能力较强, 从而易获得轮廓清晰、组织致密的铸件。

iii. 浇注速度: 浇注速度越快, 充型的动压力越大。但浇注速度太快, 易冲坏砂型, 且可能使型腔内的气体来不及逸出, 从而形成砂眼、气孔等缺陷及呛火等问题。生产中用控制浇注时间的方法来控制浇注速度。

此外, 浇注系统结构越复杂, 流动阻力越大, 充型能力就越低。

#### ② 铸型条件 铸型对合金充型能力也有显著影响, 这主要体现在以下三个方面。

i. 铸型的蓄热能力, 即铸型从液态合金吸收并储存热量的能力。铸型的蓄热能力越大, 铸型对液态合金的冷却能力越强, 使合金保持液态的时间就越短, 充型能力下降。如金属型铸造比砂型铸造充型能力差, 容易产生浇不足等缺陷。

ii. 铸型温度, 铸型的温度越高, 铸型和金属液之间的温差越小, 金属液冷却速度就越慢, 保持液态时间就越长, 使合金充型能力提高。如金属型铸造和熔模铸造时, 常将铸型预热到数百度。

iii. 铸型中的气体, 由于液态金属的热作用, 型腔中的气体膨胀, 型砂中的水分汽化、有机物燃烧和分解, 而使铸型产生大量气体, 如果铸型的透气性差, 则型腔内的气体压力迅速增大, 阻碍熔融金属的充型。为此, 应适当降低型砂的含水量和发气物质含量, 以及开设必要的排气孔和增设排气冒口。

③ 铸件结构 若铸件壁厚小, 有大的水平面时, 则液态合金散热速度快, 其充型能力差。若铸件结构复杂, 则液态合金流动时的阻力大, 其充型能力差。因此, 在进行铸件结构设计时, 铸件的形状应力求简单, 壁厚应大于规定的最小允许壁厚。对于形状复杂、薄壁、大平面的铸件, 应尽量选择流动性好的合金或采取其他相应措施。

综上所述, 为获得健全的铸件, 应尽量选用流动性好的合金, 同时采取措施提高合金的

充型能力，如提高浇注温度和压头、合理设计浇注系统和改进铸件结构等。

### 1.1.1.2 液态合金的凝固与收缩

铸件的缩孔、缩松、应力、裂纹等缺陷与液态金属的凝固过程有关，因此认识合金的凝固规律具有十分重要的意义。

#### (1) 凝固方式

在铸件凝固过程中，其断面上一般存在三个区域，即液相区、固相区和液固两相区（又称凝固区），其中液固两相区对铸件质量的影响最显著。通常根据液固两相区的宽窄将铸件的凝固方式分为逐层凝固、糊状凝固和中间凝固方式，如图 1-3 所示。

① 逐层凝固 当合金的结晶温度范围很小（如纯金属或共晶合金），或铸件截面温度梯度很大时，铸件断面上凝固区域宽度几乎等于零，已凝固层与液相区之间界限清晰。随着温度的下降，固体层不断加厚，逐步达到铸件中心，如图 1-3(a) 所示。

② 糊状凝固 若合金的结晶温度范围很宽，且铸件断面上的温度梯度较平坦，则在凝固的某段时间内铸件表层不能形成明显的固相区，其凝固区域贯穿整个铸件断面，铸件的凝固先呈糊状而后固化，如图 1-3(c) 所示。

③ 中间凝固 金属的结晶温度范围较窄，或结晶温度范围虽宽，但铸件截面温度梯度大，铸件断面上的凝固区域宽度介于逐层凝固与糊状凝固之间，如图 1-3(b) 所示。

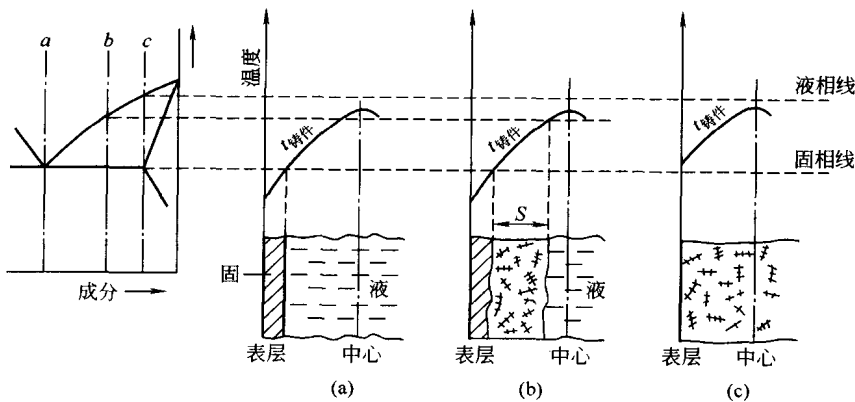


图 1-3 铸件的凝固方式

铸件质量与其凝固方式密切相关。逐层凝固时，固液界面比较光滑，对未结晶金属液的流动阻力小，故流动性好、补缩性好，铸件产生冷隔、浇不足、缩松等缺陷的倾向小。糊状凝固时，发达的初生树枝晶布满整个铸件断面，对金属液的阻碍作用大，故流动性很差。铸件易产生冷隔、浇不足、缩松等缺陷。在常用合金中，灰铸铁、铝硅合金等倾向于逐层凝固，易于获得紧实铸件；球墨铸铁、锡青铜、铝铜合金等倾向于糊状凝固，为获得紧实铸件常需采用适当的工艺措施，以便补缩或减小其凝固区域。

#### (2) 合金的收缩及其影响因素

① 收缩 液态金属在冷却凝固过程中，体积和尺寸减小的现象称为收缩。收缩是铸造合金本身的物理性质，是形成缩孔、缩松、变形和裂纹等缺陷的根本原因。

铸造合金从浇注到冷至室温要经历下列三个互相联系的收缩阶段。

液态收缩——从浇注温度冷却至凝固开始温度（即液相线温度）间的收缩。

凝固收缩——从凝固开始温度冷却到凝固终止温度（即固相线温度）间的收缩。

固态收缩——从凝固终止时的温度冷却到室温之间的收缩。

合金的总收缩率为上述三阶段收缩的总和。液态收缩和凝固收缩表现为铸件的体积缩

小，常用体积收缩率即单位体积的百分收缩量表示，它们使型腔内金属液面下降，是铸件产生缩孔和缩松缺陷的根本原因。固态收缩也会引起体积的变化，在铸件各个方向上都表现出线尺寸的减小，可用线收缩率即单位长度的百分收缩量来表示。它对铸件的形状和尺寸精度影响最大，是铸件产生内应力、变形、裂纹的主要原因。

② 影响收缩的因素 主要有化学成分、浇注温度、铸件结构与铸型条件等。

i. 化学成分：合金种类不同，其收缩率不同。几种常用铸造合金的体积收缩率见表 1-1。由表可见，铸钢和白口铸铁的收缩大，灰铸铁收缩小。这是由于灰铸铁结晶时所含的碳大多以石墨形式析出，石墨比体积（单位质量物质的体积）大，使铸铁体积膨胀（每析出 1% 的石墨，铸件体积约增加 2%），因而抵消了一部分收缩。可见，灰铸铁中碳质量分数愈高，收缩愈小。

表 1-1 几种常用铸造合金的体积收缩率

合金种类	碳的质量分数 $w_c/\%$	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态收缩率 $\epsilon_v/\%$	凝固收缩率 $\epsilon_v/\%$	固态收缩率 $\epsilon_v/\%$	总体积收缩率 $\epsilon_v/\%$
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰口铸铁	3.5	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

ii. 浇注温度：合金浇注温度越高，过热度越大，液态收缩越大。

iii. 铸件结构与铸型条件：铸件的收缩并非自由收缩，而是受阻收缩。其阻力来源于两个方面：一是由于铸件壁厚不均匀，使各部分冷却速度不同，收缩的先后不一致，相互制约而产生阻力；二是铸型和芯子对铸件收缩产生的机械阻力。铸件收缩时受阻越大，实际收缩率就越小。显然，铸件的的实际线收缩率比合金的自由线收缩率小。因此，在设计模样时，应根据合金的材质，铸件的形状、尺寸等，选用适当的收缩率。

### (3) 铸件的缩孔和缩松

液态金属在冷却凝固过程中，若液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充，则在铸件最后凝固的部位形成一些孔洞。根据孔洞的大小和分布，可将其分为缩孔和缩松两类。

① 缩孔 是由合金收缩产生的集中在铸件上部或最后凝固部位、容积较大的孔洞。有时经切削加工可暴露出来。其形状极不规则，多呈倒锥形，内表面较粗糙。

缩孔形成的条件是铸件以逐层凝固方式进行凝固，其形成过程如图 1-4 所示。当熔融合金充满铸型型腔后，随温度下降，合金产生液态收缩。当内浇口尚未凝固时，型腔内所减少的合金液可从浇注系统得到补充，液面不下降仍保持充满状态 [图 1-4(a)]。随着热量不断散失，靠近型腔表面的金属率先凝固结壳，此时内浇道被冻结，形成的硬壳如同一个里面充满熔融金属的密闭容器 [图 1-4(b)]。当硬壳内合金液的液态收缩和凝固收缩大于硬壳的固态收缩时，则随温度下降，固体层加厚，内部剩余液体的体积不断变小，液面下降，在铸件

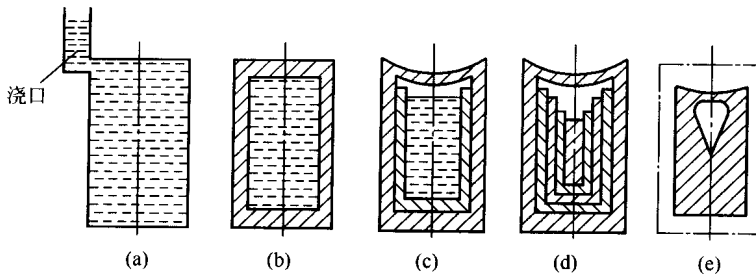


图 1-4 缩孔形成过程示意图

上部出现空隙 [图 1-4(c)]。凝固结束时在铸件上部形成如图 1-4(d) 的孔洞。已形成缩孔的铸件继续冷却到室温时, 由于固态收缩, 铸件的外形轮廓有所减小, 缩孔的绝对体积略有减少, 但缩孔体积与铸件体积的比值保持不变, 缩孔被保留下来 [图 1-4(e)]。

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

② 缩松 是指铸件断面上出现的分散而细小的缩孔。缩松形成的条件是铸件以糊状(体积)凝固方式进行凝固。由于铸件截面上一定的宽度区域为液固两相区, 发达的初生树枝晶将液体金属分割成一个个互不相通的小熔池, 而熔池内的液体在凝固时产生的收缩得不到金属液的补偿, 最终形成大量细小而分散的孔洞, 即缩松。

缩松分为宏观缩松和微观缩松。宏观缩松多分布在铸件最后凝固的部位, 如铸件的中心轴线处或缩孔的下方, 用肉眼或借助于放大镜可以看出(图 1-5); 显微缩松则是存在于晶粒之间的微小孔洞, 这种缩松的分布面积更为广泛, 有时遍及整个截面, 只有借助显微镜才能观察出来。显微缩松在铸件中难以完全避免, 它对一般铸件危害性较小, 故不把它当作缺陷看待。但对气密性、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, 使铸件中的缩孔和缩松在一定的范围内互相转化。

通过以上对缩孔和缩松形成过程的分析, 可得到以下规律。

- i. 合金的液态收缩和凝固收缩越大(如铸钢、铝青铜等), 铸件越易形成缩孔。
- ii. 结晶温度范围宽的合金, 倾向于糊状凝固, 易形成缩松。纯金属和共晶成分合金, 倾向于逐层凝固, 易形成集中缩孔。

③ 缩孔和缩松的防止 缩孔和缩松使铸件的有效承载面积减少, 而且在孔洞部位易产生应力集中, 使铸件力学性能下降。缩孔和缩松还使铸件的气密性、物理性能和化学性能下降。缩孔和缩松严重时, 会导致铸件报废。由此生产中常采取必要的工艺措施予以防止。

防止铸件产生缩孔的有效措施是使铸件实现“定向(顺序)凝固”。所谓定向凝固就是在铸件上可能出现缩孔的厚大部位安放冒口, 使铸件上远离冒口的部位先凝固(图 1-6 中的 I 部分), 然后是靠近冒口的部位凝固(图 1-6 中的 II、III 部分), 最后才是冒口本身的凝固。按照这样的凝固顺序, 先凝固部分的收缩, 由后凝固部分的合金液来补充; 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, 将缩孔转移到冒口之中。最后将冒口切除, 就可以获得致密的铸件。

为了实现定向凝固, 在设置冒口的同时, 还可在铸件上某些厚大部位增设冷铁。如图 1-7 所示的铸件可能产生缩孔的厚大部分不止一个, 若仅靠顶部冒口的补缩, 难以保证底部厚大部位不出现缩孔。为此工艺上采用冒口与冷铁联合作用, 在该凸台的型壁上安放了两块外冷铁, 加快了该处的冷却速度, 使厚度较大的凸台反而最先凝固, 从而实现了自下而上的

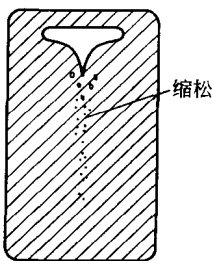


图 1-5 宏观缩松

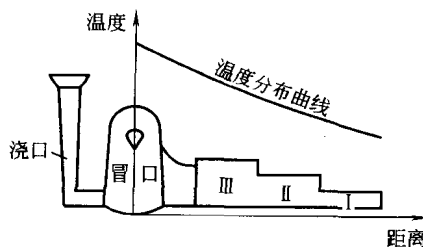


图 1-6 定向凝固示意图

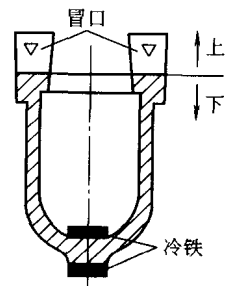


图 1-7 冷铁的应用

定向凝固，防止了凸台处缩孔、缩松的产生。由此可以看出，冷铁的作用只是增大铸件局部的冷却速度，用以控制铸件的凝固顺序，它本身并不起补缩作用。总之，冒口和冷铁的合理使用，可造成铸件的定向凝固，有效地消除缩孔、缩松（主要是宏观缩松）缺陷，故广泛应用于收缩大或壁厚差较大的易产生缩孔的铸件，如铸钢、高强度铸铁和可锻铸铁等。

准确地估计铸件上缩孔可能产生的位置是合理安置冒口和冷铁的主要依据。生产中确定缩孔位置的常用方法有“凝固等温线法”、“内切圆法”和“计算机凝固数值模拟法”等。

所谓凝固等温线法，就是在铸件截面上从冷却表面开始逐层向内侧绘制凝固等温线，直到与最窄截面上的凝固等温线接触为止。此时，凝固等温线不相连接的地方，就是铸件最后凝固区域，也就是缩孔的位置。图 1-8(a) 所示是用凝固等温线法确定工字形截面铸件的缩孔位置，图 1-8(b) 所示是实际铸件解剖后的缩孔位置。

内切圆法常用来确定铸件中相交壁处的缩孔位置，如图 1-8(c) 所示。可见，即使铸件两个相交的壁厚相同，但在结合处内切圆直径也较大，因而最后凝固，成为容易产生缩孔的位置。铸件上内切圆直径大于壁厚的地方称为热节。除相交壁以外，铸件肥厚处、转弯处和靠近内浇口的部位也容易形成凝固缓慢的热节，这些部位最容易形成缩孔。

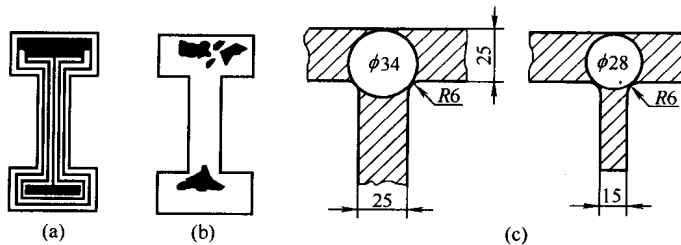


图 1-8 缩孔位置的确定

计算机凝固数值模拟法是在计算机上利用凝固模拟软件对实际铸件的凝固过程进行模拟计算，它可以较为准确地给出铸件最后凝固部位，从而得出铸件上可能产生缩孔的位置。这种方法不仅能给出缩孔的位置，更重要的是能优化铸造工艺，提高铸件的工艺出品率。

顺序凝固方法虽然有效地防止了缩孔和缩松的产生，但使铸件各部分的温差加大，冷却速度不一致，易产生内应力、变形和裂纹，同时消耗金属也多，工艺出品率较低，切削费工。因此，这种方法主要用于收缩较大、凝固温度范围较小的合金，如铸钢、碳硅质量分数低的灰铸铁、铝青铜等合金以及壁厚差别较大的铸件。

结晶温度范围宽的合金倾向于糊状凝固，发达的树枝晶布满了整个截面，使冒口的补缩通道受阻，即使采用顺序凝固也很难避免显微缩松。一般可采取下列措施。

i. 合理选择铸造合金：应尽量采用接近共晶成分的或结晶温度范围窄的合金。

ii. 增大铸件的冷却速度：对于给定成分的铸件，在一定的浇注条件下，缩孔和缩松的总容积是一定的。适当地增大铸件的冷却速度可促进缩松向缩孔转化。例如：在砂型铸造中，湿型比干型对铸件的激冷能力强，使铸件的凝固区域变窄，缩松量减少，而缩孔体积增加；在金属型铸造时，铸型的激冷能力更大，缩松的量显著减小。

iii. 加压补缩：将铸型置于压力罐中，浇注后使铸件在压力下凝固，可显著减少显微缩松。此外，采用压力铸造、离心铸造等方法使铸件在压力下凝固，可有效地防止缩孔和缩松。

#### (4) 铸造应力、变形、裂纹

① 铸造应力 铸件在凝固和随后的冷却过程中，收缩受到阻碍而引起的内应力称为铸造应力。这些铸造应力可能是在冷却过程中暂时存在的，当引起应力的原因消除后，应力随



之消失，称临时应力；也可能是长期存在的，在铸件内部一直保留到室温，称残余应力。铸造应力是铸件产生变形和裂纹的根本原因。最常见的铸造应力有热阻碍引起的热应力和机械阻碍引起的机械应力。

i. 热应力：铸件在凝固和冷却过程中，不同部位由于不平衡的收缩而引起的应力称热应力。热应力是一种铸造残留应力，落砂后它仍存在于铸件内。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的过程中应力状态的变化。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，如果金属收缩受阻产生较小的应力作用，则金属可以产生塑性变形使应力自行消除。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。只有当应力大于金属的屈服强度，金属产生一定的塑性变形后，应力才有可能稍微松弛。

下面以框形铸件为例，分析残留热应力的形成过程。如图 1-9 所示的框形铸件由中间的粗杆 I、两侧完全相同的细杆 II 以及联系它们的上、下横梁所组成。假设铸件完全凝固后，两杆从同一温度  $T_{固}$  开始冷却，最后室温下达到同一温度，两杆的固态冷却曲线如图 1-9 所示， $T_{再}$  为塑性-弹性临界转变温度。在冷却过程中，I、II 两杆始终存有温度差，由于在同一时期内，两杆的固态收缩不一致，从而产生了热应力。其形成过程可分三个阶段来说明。

塑性阶段 ( $t_0 \sim t_1$ )：两杆温度均高于  $T_{再}$ ，粗杆 I 和细杆 II 均处于塑性状态。细杆降温较快，若能自由收缩，其收缩量必定会大于粗杆而变得比粗杆短；由于粗细杆之间有横梁联系，互相制约，两者只能收缩到同一长度。此时粗杆受压产生压应力，而细杆受拉产生拉应力 [图 1-9(b)]。但由于此时粗、细杆均处于塑性状态，所产生的瞬时应力通过其本身的塑性变形而自行消失，故此阶段铸件内无残留应力。

弹性、塑性阶段 ( $t_1 \sim t_2$ )：II 杆冷却较快，率先进入弹性状态，而 I 杆由于冷却速度较慢仍停留在塑性状态。此阶段粗、细杆的收缩亦不相同，通过横梁的作用，收缩快的杆内产生拉应力，收缩较小的产生压应力。但由于厚杆 I 处于塑性状态，在应力的作用下其发生微量塑性变形，从而缓解了所产生的应力，故此阶段铸件内亦不产生残留应力 [图 1-9(c)]。

弹性阶段 ( $t_2 \sim t_3$ )：当铸件冷却到更低温度时，粗、细杆均处于弹性状态。此时，两杆长度相同，但温度不同。粗杆 I 温度较高，还会产生较大的收缩；细杆 II 温度较低，收缩已趋于停止。因此，粗杆 I 的进一步收缩，必然受到细杆 II 的强烈阻碍。于是，杆 II 受压，

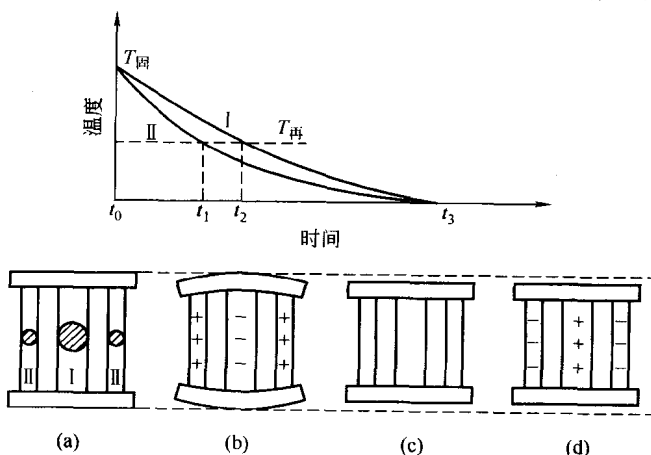


图 1-9 热应力的形成 (+表示拉应力；-表示压应力)