



普通高等教育规划教材

# 材料成形原理

胡礼木 崔令江 李慕勤 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

TB3  
132

普通高等教育规划教材

# 材料成形原理

主 编 胡礼木 崔令江 李慕勤

参 编 王 华 徐纪平 谭险峰

张元好

主 审 刘书华 侯英玮



机械工业出版社

本教材系统阐述了材料成形的基本原理,即成形过程中的能流、物流和信息流规律及其物理本质,涵盖了铸造原理、塑性成形原理和熔焊原理的基本内容,并对它们之间的共性部分进行了有机的整合,对个性部分也作了有选择性的重点论述。

全书共分七章,主要内容包括:材料成形的基本问题及发展概况;材料成形热过程;金属的凝固;材料成形过程中的化学冶金;金属塑性变形的物理基础;塑性变形力学基础;成形缺陷与质量控制等。

本书注重理论分析,更注重其实际应用:既有一定的理论深度,又注意深浅适度。本书适合作为材料成形与控制工程专业应用型本、专科学生学习教材,也可作为相关专业学生和工程技术人员的参考用书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理/胡礼木等主编. —北京:机械工业出版社, 2005.5  
普通高等教育规划教材  
ISBN 7-111-16416-4

I. 材... II. 胡... III. 工程材料—成型—高等学校—教材  
IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第028525号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张祖凤 冯春生

责任编辑:董连仁 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年6月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·11.375印张·442千字

定价:28.00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

封面无防伪标均为盗版

## 普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会名单

**主任:** 刘国荣 湖南工程学院  
**副主任:** 左健民 南京工程学院  
陈力华 上海工程技术大学  
鲍 泓 北京联合大学  
王文斌 机械工业出版社

**委员:** (按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院  
任淑淳 上海应用技术学院  
何一鸣 常州工学院  
陈文哲 福建工程学院  
陈 陵 扬州大学  
苏 群 黑龙江工程学院  
娄炳林 湖南工程学院  
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)  
童幸生 江汉大学

## 材料成形及控制工程专业教材编委会

主任：计伟志 上海工程技术大学  
副主任：李 尧 江汉大学  
王卫卫 哈尔滨工业大学（威海）

委员：（按姓氏笔画排序）

王高潮 南昌航空学院  
邓 明 重庆工学院  
齐晓杰 黑龙江工程学院  
肖小亭 广东工业大学  
李慕勤 佳木斯大学  
张 旭 湖南工程学院  
周述积 湖北汽车工业学院  
侯英玮 大连铁道学院  
胡礼木 陕西理工学院  
胡成武 株洲工学院  
施于庆 浙江科技学院  
贾俐俐 南京工程学院  
翁其金 福建工程学院  
傅建军 华北航天工业学院

# 序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化和我国加入WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员,特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于2001年、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的马·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向造成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。



⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人才,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

### 1. 保证基础, 确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

### 2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与工程实际相结合,构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针:知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为:“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上,挑选出最基本的内容、方法及典型应用;“新”指在将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容,以适应科学技术发展的需要,妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进,用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容,并将这些按新的教学系统重新组织;“广”指在保持本学科基本体系下,处理好与其相邻以及交叉学科的关系;“用”指注重理论与实际融会贯通,特别是注入工程意识,包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

### 3. 抓住重点、合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设,并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设,并力争做好与之配套的电子教材的建设。

### 4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验,又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务,以确保教材质量。

我们相信,本套系列教材的出版,对我国工程应用型人才培养质量的提高必将产生积极作用,会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光,高瞻远瞩,及时提出并组织编写这套系列教材,他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作,并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件,在此深表衷心感谢!

编委会主任 刘国荣教授  
湖南工程学院院长

# 前 言

材料成形与控制工程专业是按照国家教育部新颁布的专业目录,由原铸造、锻压(模具)、焊接等专业合并改造而成的,到目前为止还处于摸索与建设阶段。尽管在专业改造大方向、专业内涵等原则问题上,大多数高校的观点已趋于大同,但在专业课程设置和课程内容选择等方面,各校的做法却大不一样。尤其是专业课程教材,目前已经公开出版的虽寥寥无几,但在编写风格上却截然不同。

作为地方工科院校中的应用型本科,其培养目标是基础知识扎实、专业口径宽、实践能力强的面向基层、面向生产第一线的工程技术人才。由此决定了它在培养模式和课程设置上应有自己的特色,在教材内容选择与编写风格方面也应体现这一点。

材料成形原理是材料成形与控制工程专业的基础理论课。它的目的在于阐明液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)和连接成形(焊接)过程中的能流、物流和信息流规律及其物理本质。本教材包括了铸造原理、塑性成形原理和熔焊原理的基本内容,对其中共性的部分进行了有机的整合,对个性部分也作了有选择性的重点阐述。本书既注重理论分析,更注重实际应用;既有一定的理论深度,又注意深浅适度,以后续课程够用、学生已有知识基础能够接受、便于学生自学为限。学生学完本课程后,将对材料成形过程及其基本原理有实质性的、深入的理解,为他们日后从事材料成形技术工作、提高材质、控制成形产品质量、开发新材料,以及探索新材料成形技术奠定坚实的理论基础。

本教材是在高等学校材料成形及控制工程专业应用型本科全国协作组的组织及指导下编写的,其编写大纲是该协作组在2003年8月于湖北省十堰市举行的全体协作组成员会议上讨论通过的。2004年8月,教材书稿在山东省威海市召开的教材审稿会上通过了评审,并根据评审意见进行了修改。

本书共分七章。第1章对整个材料加工过程中的物流、能流和信息流本质进行了综合性的论述,进而引出了材料成形中的一些基本问题,并简要介绍了材料成形技术的发展现状;第2章描述了材料成形中的热过程,其中主要介绍了焊接温度场和焊接热循环,同时介绍了液态成形中的温度场;第3章主要论述了金属的凝固热力学与动力学、凝固过程中的传质、单相合金和多相合金的凝固以及焊接熔池的凝固等;第4章讲述了材料成形过程中的化学冶金原理,主要内容包括





气体对金属的作用、熔渣与金属的反应、液态金属与铸型界面的反应以及固态金属在加热过程中的物理、化学变化等；第5章介绍了金属塑性变形的物理基础，如金属塑性变形的机理、塑性加工中金属的塑性行为及其组织与性能的变化规律、金属的超塑性以及塑性成形中的外摩擦与润滑；第6章阐述了塑性成形的力学基础，如应力分析、应变分析、屈服准则、应力应变关系、真实应力-应变曲线，并重点介绍了几种求解塑性成形问题的方法；第7章分析了材料成形中一些常见缺陷（如变形、裂纹、气孔、夹杂、缩孔、缩松、偏析、起皱和折叠等）的产生机理及其影响因素，进而提出了预防和控制这些缺陷的方法与措施。

本书由陕西理工学院的胡礼木教授、哈尔滨工业大学威海分校的崔令江教授和佳木斯大学的李慕勤教授主编。胡礼木负责全书的统稿工作并撰写前言，编写了第1章、第2章、第3章的3.8节、第4章的4.6节、第7章的7.1、7.2节和7.5.3小节；崔令江编写了第6章的6.1~6.4节；李慕勤编写了第4章的4.1~4.5节；陕西理工学院的王华编写了第3章的3.1~3.5节；上海工程技术大学的徐纪平编写了第6章的6.5~6.9节和第7章的7.6节；南昌航空工业学院的谭险峰编写了第5章；湖北汽车工业学院的张元好编写了第3章的3.6、3.7、3.9节和第7章的7.3~7.5节。

全书由大连交通大学的刘书华教授和侯英玮教授主审。他们对书稿进行了认真的审阅并提出了许多宝贵的修改意见，仅此深表谢意。

本书在编写过程中还得到机械工业出版社及有关兄弟院校领导和老师的支持与帮助，在此一并感谢。

由于编者的水平和经验有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2004年12月

# 目 录

## 序 前言

<b>第1章 材料成形基本问题及发展概况</b> .....	1
1.1 机器制造的一般过程 .....	1
1.2 材料加工的基本要素和流程 .....	2
1.2.1 材料流程(物流) .....	2
1.2.2 能量流程 .....	3
1.2.3 信息流程 .....	5
1.3 液态成形的基本问题和发展概况 .....	6
1.3.1 基本问题 .....	6
1.3.2 发展概况 .....	7
1.4 塑性成形的基本问题及发展概况 .....	9
1.4.1 基本问题 .....	9
1.4.2 发展概况 .....	10
1.5 焊接成形的基本问题和发展概况 .....	16
1.5.1 基本问题 .....	16
1.5.2 发展概况 .....	17
思考与练习 .....	20
参考文献 .....	20
<b>第2章 材料成形热过程</b> .....	22
2.1 焊接热过程的基本特点 .....	22
2.2 焊接过程的热效率和焊件上加热区的热能 分布 .....	23
2.2.1 焊接过程的热效率 .....	23
2.2.2 焊件上的热能分布 .....	25
2.3 焊接温度场 .....	26
2.3.1 焊接传热的基本形式 .....	26



2.3.2	热传导基本方程 .....	27
2.3.3	焊接温度场数学解析的假定条件 .....	29
2.3.4	瞬时热源的热传导方程 .....	30
2.3.5	电弧焊时的温度场及其数学模型 .....	32
2.3.6	影响焊接温度场的因素 .....	37
2.4	焊接热循环 .....	42
2.4.1	焊接热循环的概念 .....	42
2.4.2	焊接热循环的主要参数 .....	42
2.4.3	影响焊接热循环的因素 .....	50
2.4.4	多层焊的热循环 .....	54
2.5	焊接热影响区的组织与性能变化 .....	57
2.5.1	热影响区在焊接加热时的组织转变特点 .....	57
2.5.2	焊后冷却时的组织转变 .....	58
2.6	液态成形过程中的传热 .....	62
2.6.1	液态成形中的温度场 .....	62
2.6.2	铸件凝固时间的计算 .....	67
2.6.3	在几种典型铸型条件下的温度分布特点 .....	69
	思考与练习 .....	71
	参考文献 .....	72
<b>第3章</b>	<b>金属的凝固</b> .....	<b>73</b>
3.1	液态金属的结构和性质 .....	73
3.1.1	固体金属的加热与熔化 .....	73
3.1.2	液态金属的结构 .....	75
3.1.3	液态金属的性质 .....	79
3.1.4	液态金属的流动性及充型能力 .....	86
3.2	凝固热力学与动力学 .....	90
3.2.1	液态金属(合金)凝固热力学 .....	90
3.2.2	均质形核(自发形核) .....	92
3.2.3	异质形核(非均质形核) .....	95
3.2.4	纯金属晶体长大 .....	98
3.3	液态金属在凝固过程中的传质及液体流动 .....	104
3.3.1	凝固过程中的传质 .....	104
3.3.2	凝固过程中的液体流动及其对凝固	



组织的影响 .....	110
3.4 凝固过程中成分过冷及其对晶体生长形态的影响 .....	112
3.4.1 凝固过程中成分过冷的形成 .....	112
3.4.2 成分过冷对单相合金凝固过程的影响 .....	114
3.5 多相合金的凝固 .....	119
3.5.1 共晶合金的凝固 .....	119
3.5.2 偏晶合金和包晶合金的凝固 .....	129
3.6 金属基复合材料的凝固 .....	130
3.6.1 金属基人工复合材料的凝固 .....	131
3.6.2 自生复合材料的凝固 .....	132
3.7 铸件凝固组织的形成与控制 .....	134
3.7.1 铸件宏观凝固组织的特征及形成机理 .....	135
3.7.2 铸件宏观凝固组织的控制 .....	137
3.8 熔池凝固及焊缝金属组织 .....	139
3.8.1 熔池结晶的特点和结晶形态 .....	139
3.8.2 焊缝组织 .....	142
3.9 液态金属在特殊条件下的凝固成形 .....	145
3.9.1 快速凝固 .....	145
3.9.2 定向凝固 .....	147
思考与练习 .....	149
参考文献 .....	150
<b>第4章 材料成形过程中的化学冶金 .....</b>	<b>151</b>
4.1 材料成形过程中化学冶金的特点 .....	151
4.2 气体对金属的作用 .....	157
4.2.1 气体的来源及存在形式 .....	157
4.2.2 气体在液态金属中的溶解 .....	158
4.2.3 气体对焊接质量的影响 .....	162
4.2.4 气体的控制措施 .....	163
4.3 熔渣与金属的反应 .....	166
4.3.1 焊接熔渣 .....	166
4.3.2 活性熔渣对金属的氧化 .....	171
4.3.3 焊缝金属的脱氧 .....	173
4.3.4 硫和磷的控制 .....	175
4.4 液态金属与铸型界面的反应 .....	176



4.5 合金化处理	178
4.6 固态金属在加热过程中的物理、化学变化	180
思考与练习	182
参考文献	182
<b>第5章 金属塑性变形的物理基础</b>	<b>184</b>
5.1 金属塑性变形的机理及特点	184
5.1.1 概述	184
5.1.2 塑性变形机理	185
5.1.3 塑性变形的特点	190
5.1.4 合金的塑性变形	191
5.2 金属塑性加工中组织和性能变化的基本规律	193
5.2.1 冷塑性变形时金属组织和性能的变化	193
5.2.2 热塑性变形时金属组织和性能的变化	195
5.3 金属在塑性加工过程中的塑性行为	197
5.3.1 金属的塑性和塑性指标	197
5.3.2 金属的化学成分及组织对塑性的影响	200
5.3.3 变形温度对金属塑性的影响	203
5.3.4 应变速率对金属塑性的影响	205
5.3.5 变形力学条件对金属塑性的影响	207
5.3.6 其他因素对金属塑性的影响	210
5.3.7 提高金属塑性的基本途径	212
5.4 金属的超塑性变形	213
5.4.1 基本概念	213
5.4.2 超塑性的种类	213
5.4.3 细晶超塑性的力学特征	214
5.4.4 影响细晶超塑性的主要因素	214
5.4.5 超塑性变形时显微组织的变化	215
5.4.6 超塑性变形时力学性能的变化	215
5.4.7 超塑性变形机理	215
5.5 金属塑性成形中的外摩擦	217
5.5.1 金属塑性成形中摩擦的特点	217
5.5.2 摩擦对塑性成形过程的影响	218
5.5.3 塑性成形中摩擦的分类及机理	218
5.5.4 描述接触表面上摩擦切应力的数学	



表达式.....	219
5.5.5 影响摩擦因数的主要因素 .....	220
5.5.6 塑性成形中的润滑 .....	221
思考与练习 .....	224
参考文献.....	225
<b>第6章 塑性成形力学基础 .....</b>	<b>226</b>
6.1 应力分析.....	226
6.1.1 基本概念 .....	226
6.1.2 斜切面上的应力 .....	228
6.1.3 主应力.....	228
6.1.4 应力张量 .....	230
6.1.5 应力莫尔圆 .....	233
6.1.6 过受应力作用点的典型平面 .....	234
6.1.7 应力平衡微分方程.....	237
6.1.8 平面应力与平面应变状态 .....	237
6.1.9 轴对称应力状态 .....	239
6.2 应变状态分析 .....	241
6.2.1 应变和主应变图 .....	241
6.2.2 质点的应变状态 .....	244
6.2.3 应变与位移的关系方程 .....	246
6.2.4 应变的连续方程 .....	247
6.2.5 应变增量和应变速率张量 .....	248
6.3 屈服准则.....	249
6.3.1 米塞斯屈服准则 .....	250
6.3.2 屈雷斯加屈服准则 .....	250
6.3.3 米塞斯准则及屈雷斯加准则的几何 图形.....	250
6.3.4 各向同性应变硬化材料的后继屈服 表面与固体现实应力空间 .....	254
6.4 塑性变形时的应力应变关系 .....	256
6.4.1 增量理论 .....	256
6.4.2 全量理论 .....	260
6.4.3 应力应变顺序对应规律及其应用 .....	262
6.5 真实应力-应变曲线.....	264
6.5.1 拉伸试验确定的真实应力-应变曲线 .....	265



6.5.2	真实应力-应变曲线的近似数学表达式	267
6.5.3	变形温度和应变速率对真实应力-应变曲线的影响	268
6.6	主应力法	269
6.6.1	主应力法的基本原理	269
6.6.2	主应力法的应用实例	270
6.7	滑移线法	273
6.7.1	塑性平面应变状态下的应力状态及滑移线的基本概念	273
6.7.2	汉基 (H. Hencky) 应力方程	275
6.7.3	滑移线场的建立	276
6.7.4	滑移线法的应用举例	280
6.8	上限法	284
6.8.1	虚功原理和最大散逸功原理	284
6.8.2	上限法原理	285
6.8.3	上限法在平面应变问题中的应用	286
6.9	有限元法简介	288
	思考与练习	288
	参考文献	291
<b>第7章</b>	<b>成形缺陷与质量控制</b>	<b>292</b>
7.1	应力与变形	292
7.1.1	铸造应力及变形	292
7.1.2	焊接应力及变形	298
7.1.3	塑性成形时的内应力	315
7.2	裂纹	319
7.2.1	热裂纹	319
7.2.2	冷裂纹	321
7.2.3	应力腐蚀裂纹	324
7.2.4	消除应力裂纹	326
7.2.5	塑性成形裂纹	327
7.3	气孔与夹杂	328
7.3.1	气孔	328
7.3.2	夹杂物	333
7.4	缩孔与缩松	335
7.4.1	缩孔与缩松的形成机理	335



7.4.2 影响缩孔与缩松的因素及防止措施.....	336
7.5 化学成分不均匀性 (偏析) .....	338
7.5.1 微观偏析 .....	339
7.5.2 宏观偏析 .....	340
7.5.3 焊缝中的成分偏析 .....	342
7.6 机械缺陷 .....	344
7.6.1 起皱 .....	344
7.6.2 折叠 .....	346
思考与练习 .....	348
参考文献 .....	348



# 第 1 章 材料成形基本问题及发展概况

## 1.1 机器制造的一般过程

任何机器或设备，大至船舶、飞机、机床、车辆，小至仪器、仪表、工具、量具，都是由相应的零件装配而成。这些零件又是由金属材料或非金属材料经过加工而成。零件或材料的加工方法多种多样，归纳起来有以下几类：

(1) 成形加工。这种加工主要用来改变材料的形状和尺寸，有时还兼有改变材料性能的作用。成形加工方法主要有液态成形（铸造）、塑性成形（锻压）、连接成形（焊接）、塑料成形和粉末压制等。

(2) 切削加工。这种加工是用来进一步改变材料的形状和尺寸，使之达到一定的精度和表面粗糙度。它包括车削、铣削、刨削、磨削、钻削、镗削等传统的切削加工方法以及特种加工方法，如电火花加工、超声波加工、激光加工、电解加工等。

(3) 热处理加工。用来改变材料或零件的组织 and 性能。常用的热处理加工方法有退火、正火、淬火、回火等。

(4) 表面加工。用来改变零件的表面状况和性能，它包括表面形变和淬火强化、化学热处理、表面喷涂、气相沉积镀膜等。

零件制成以后，再经过检验、装配、调试等过程，最后形成机器或设备。图 1-1 是机器或设备的一般制造过程示意图。

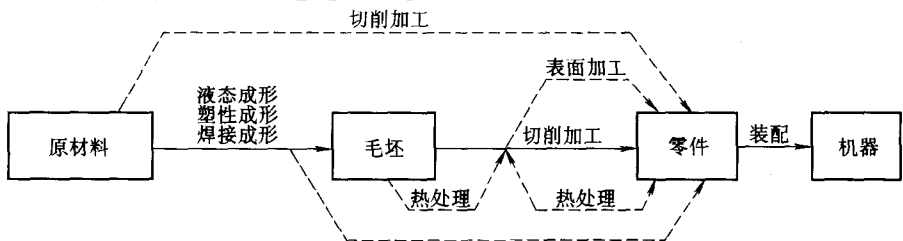


图 1-1 机器制造一般过程示意图