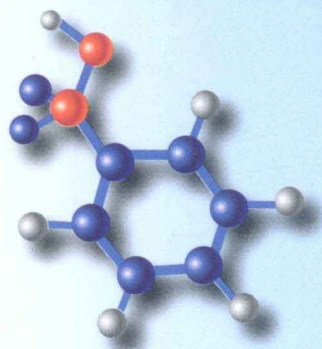




21世纪全国高等院校材料类 **创新型** 应用人才培养规划教材



MATERIALS

材料成形原理

主 编 周志明 张 驰
主 审 赵 震

- 精选内容：介绍成形原理发展脉络与内容体系
- 结合案例：展现最新案例有效辅助课程教与学
- 突出实用：内容编排注重提高学生的职业技能

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

材料成形原理

主 编	周志明	张 驰		
副主编	黄伟九	徐 春		
参 编	李小平	胡建军	夏 华	
	彭成允	唐丽文	周 涛	
	罗 静	詹 捷		
主 审	赵 震			



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地阐述了材料液态成形、塑性成形和连接成形过程中的各种规律及其物理本质。全书不仅结合国内外最新的研究进展,还分析和阐述了材料成形最新的研究成果及应用实例,使学生了解最新的研究进展及与本课程相关的知识。全书共分16章,其中第1章至第5章主要介绍了液态成形过程中的理论知识;第6、7章讲述了材料在各种成形过程中的冶金反应原理、成形缺陷的产生及控制;第8章介绍了特殊条件下的成形;第9章至第12章系统地阐述了金属塑性加工的力学基础知识;第13章至第16章结合工程实际应用,阐述金属塑性加工中的各种影响因素的特点及作用。

本书可以作为材料成型及控制工程、材料加工工程专业的本、专科生教材,也可供金属材料工程、热加工、机械和船舶工程等专业的师生和相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理/周志明,张驰主编. —北京:北京大学出版社,2011.9
(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-19430-0

I. ①材… II. ①周…②张… 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(2011)第172293号

书 名:材料成形原理

著作责任者:周志明 张 驰 主编

责任编辑:童君鑫

标准书号:ISBN 978-7-301-19430-0/TG·0021

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路205号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱:pup_6@163.com

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 27.5印张 638千字

2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷

定 价:49.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

- | | |
|--------------|----------------|
| 白培康（中北大学） | 陈华辉（中国矿业大学） |
| 崔占全（燕山大学） | 杜彦良（石家庄铁道大学） |
| 杜振民（北京科技大学） | 耿桂宏（北方民族大学） |
| 关绍康（郑州大学） | 胡志强（大连工业大学） |
| 李楠（武汉科技大学） | 梁金生（河北工业大学） |
| 林志东（武汉工程大学） | 刘爱民（大连理工大学） |
| 刘开平（长安大学） | 芦笙（江苏科技大学） |
| 裴坚（北京大学） | 时海芳（辽宁工程技术大学） |
| 孙凤莲（哈尔滨理工大学） | 孙玉福（郑州大学） |
| 万发荣（北京科技大学） | 王春青（哈尔滨工业大学） |
| 王峰（北京化工大学） | 王金淑（北京工业大学） |
| 王昆林（清华大学） | 卫英慧（太原理工大学） |
| 伍玉娇（贵州大学） | 夏华（重庆理工大学） |
| 徐鸿（华北电力大学） | 余心宏（西北工业大学） |
| 张朝晖（北京理工大学） | 张海涛（安徽工程大学） |
| 张敏刚（太原科技大学） | 张锐（郑州航空工业管理学院） |
| 张晓燕（贵州大学） | 赵惠忠（武汉科技大学） |
| 赵莉萍（内蒙古科技大学） | 赵玉涛（江苏大学） |

序 言

近年来,国内外的材料成形技术飞速发展,而材料成形的理论知识在传统理论体系不断完善的基础上,结合国内外材料成形理论研究的最新进展,以及教学实践中的经验和创新,取得了长足的进步,这为材料成形理论的发展提供了强大的动力。本教材是为适应新教学大纲需要,为材料成型及控制工程、材料加工工程专业编写的。

本教材对材料成形的理论知识做了全面、系统的介绍,科学地划分了材料成形理论的几大重点内容,涉及原理、现象等内容,可靠地介绍了有关国内外成形原理发展的现状,内容新颖、丰富。编者在撰写过程中重视推陈出新,对传统的经典内容加以精选,强调少而精,也反映了当代材料成形原理的最新成就。

本教材的编者队伍中许多是中青年骨干教师。他们多年来从事有关材料成形技术及理论的教学和科研工作,年富力强,精力充沛,具有新思维、新概念。他们完善和推广了“成形理论”的内涵,符合新时期行业发展的规律。纵观其内容,本教材吸取了目前同类教材的长处,以基础理论为主线,恰当规划了金属液态成形原理、金属塑性成形原理等主要理论体系结构,既注重学科内容上的系统性、完整性,又体现了现代工程技术的综合性、实用性。这也将有力地提升课程的教学效果,有利于提高学生的专业素质。作为地方工科院校中的教学研究型大学,其主要目标是培养基础知识扎实、专业技能宽泛、实践水平突出的面向解决生产实际问题的一线工程技术人才。由此决定在培养模式和教材内容的选择上应该具有自己的特色,本教材的内容选择和编写风格集中体现了这一点。

本教材的一大特色就是有机地结合了现代材料成形的新案例来诠释材料成形理论知识,让无形的、抽象的理论以更加真实的实践内容展现在我们面前。这不仅有利于我们教学工作者在教学实践中完善教学内容,而且对本专业的学生自学有一定的辅助作用,这也使得这本教材成为本领域基础知识的传媒工具,这是以往该类教材所不具备的。

为了突出这本教材主体鲜明,纲举目张,编者引入统一连贯的理论框架来概括材料成形过程中丰富多彩的内容,在充分反映成形理论的完整性的同时,又体现出了科学概念上的一致性。而本教材的重点内容就放在涉及材料成形技术理论的规律性上,对材料成形技术和制备工艺等具体的工艺性措施只是略有涉及。随着现代科技水平的不断进步,材料成形的技术也取得了突飞猛进的发展。而伴随着许多新材料的大量涌现,对材料成形的理论知识的细分提出了不小的挑战。在研究新技术、新工艺的时候,理论体系的完善显得尤为重要。编者在准备撰写本教材之前就做了大量的基础研究工作,掌握了理论体系的重点框架,对后期教材的编写有很大的帮助。

当前教育战线对大学生的培养模式提出了更多更高的要求,希望本教材在 21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养的教学实践中发挥更大的作用。

中国工程院院士

前 言

本书是为适应新教学大纲需要，为材料成型及控制工程、材料加工工程专业编写的。“材料成形原理”作为本专业的一门技术基础课程，对于本专业的教学有十分重要的意义。目前，国内有关“材料成形原理”的教材较多，但编写风格截然不同。本书在编写过程中结合国内外材料成形理论研究的最新进展及教学实践中的经验和创新，参考近年来国内外出版的有关材料成形理论的专著和文献，在充分吸收现有教材精华的基础上，尽量体现“宽口径、厚基础、高素质”的人才培养要求。本书也可供金属材料工程、热加工及机械、船舶等工程专业的师生和工程技术人员参考。

本书系统地阐述了液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)和连接成形(焊接)过程中的各种规律及其物理本质。全书结合国内外最新的研究进展，分别将金属材料液态成形和连接成形的共性有机地结合，将金属材料塑性成形过程的现象与原理有机结合。本书还结合材料成形最新的研究成果及应用实例，使学生了解最新的研究进展及与本课程相关的知识。并将液态成形和连接成形的凝固部分、化学冶金、成形缺陷与控制等共性的方面有机地结合起来阐述其材料成形的现象与原理，并通过案例分别将塑性成形的现象与原理结合分析。

全书共分16章。第1章至第5章系统地介绍了液态成形过程中的基础理论知识；第6、7章讲述了材料在各种成形过程中的冶金反应原理、成形缺陷及预防措施；第8章介绍了特殊条件下的成形方法；第9章至第12章系统地讲述了金属塑性加工的力学基础知识；第13章至第16章结合工程实际应用，阐述金属塑性加工中的各种影响因素的特点及作用。

本书由重庆理工大学周志明、张驰主编，重庆理工大学黄伟九和上海应用技术学院徐春为副主编。全书由周志明统稿，上海交通大学赵震教授主审。黄伟九编写第1章，李小平编写第2章，胡建军编写第3章，詹捷和彭成允编写第4章，唐丽文编写第5章，周涛和夏华编写第6章，周志明编写第7章并撰写了前言和绪论，罗静编写第8章。徐春编写第9~11章，张驰编写第12~16章。重庆理工大学的雷彬彬、曹敏敏、向荣、骆静、周宝仓、胡洋等参加了部分资料收集整理工作。本书在编写过程中还得到北京大学出版社及编者单位有关领导和老师的支持与帮助，在此一并感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正！

编 者
2011年7月

北京大学出版社材料类相关教材书目

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
1	金属学与热处理	7-5038-4451-5	朱兴元, 刘忆	24	2007.7
2	材料成型设备控制基础	978-7-301-13169-5	刘立君	34	2008.1
3	锻造工艺过程及模具设计	7-5038-4453-1	胡亚民, 华林	30	2008.6
4	材料成形 CAD/CAE/CAM 基础	978-7-301-14106-9	余世浩, 朱春东	35	2008.8
5	材料成型控制工程基础	978-7-301-14456-5	刘立君	35	2009.2
6	铸造工程基础	978-7-301-15543-1	范金辉, 华勤	40	2009.8
7	材料科学基础	978-7-301-15565-3	张晓燕	32	2009.8
8	模具设计与制造	978-7-301-15741-1	田光辉, 林红旗	42	2009.9
9	造型材料	978-7-301-15650-6	石德全	28	2009.9
10	材料物理与性能学	978-7-301-16321-4	耿桂宏	39	2010.1
11	金属材料成形工艺及控制	978-7-301-16125-8	孙玉福, 张春香	40	2010.2
12	冲压工艺与模具设计(第2版)	978-7-301-16872-1	牟林, 胡建华	34	2010.6
13	材料腐蚀及控制工程	978-7-301-16600-0	刘敬福	32	2010.7
14	摩擦材料及其制品生产技术	978-7-301-17463-0	申荣华, 何林	45	2010.7
15	纳米材料基础与应用	978-7-301-17580-4	林志东	35	2010.8
16	热加工测控技术	978-7-301-17638-2	石德全, 高桂丽	40	2010.8
17	智能材料与结构系统	978-7-301-17661-0	张光磊, 杜彦良	28	2010.8
18	材料力学性能	978-7-301-17600-3	时海芳, 任鑫	32	2010.8
19	材料性能学	978-7-301-17695-5	付华, 张光磊	34	2010.9
20	金属学与热处理	978-7-301-17687-0	崔占全, 王昆林, 吴润	50	2010.10
21	特种塑性成形理论及技术	978-7-301-18345-8	李峰	30	2011.1
22	材料科学基础	978-7-301-18350-2	张代东, 吴润	34	2011.1
23	DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程	978-7-301-18392-2	胡建军, 李小平	34	2011.1
24	原子物理与量子力学	978-7-301-18498-1	唐敬友	28	2011.1
25	模具 CAD 实用教程	978-7-301-18657-2	许树勤	28	2011.4
26	金属材料学	978-7-301-19296-2	伍玉娇	38	2011.8
27	材料科学与工程专业实验教程	978-7-301-19437-9	向嵩, 张晓燕	25	2011.9
28	金属液态成型原理	978-7-301-15600-1	贾志宏	35	2011.9
29	材料成形原理	978-7-301-19430-0	周志明, 张弛	49	2011.9
30	金属组织控制技术与设备	978-7-301-16331-3	邵红红, 纪嘉明	38	2011.9
31	材料工艺及设备	978-7-301-19454-6	马泉山	45	2011.9
32	材料分析测试技术	978-7-301-19533-8	齐海群	28	2011.9

电子书(PDF版)、电子课件和相关教学资源下载地址: <http://www.pup6.cn/> 欢迎下载。

欢迎免费索取样书, 可在网站上在线填写样书索取信息。

联系方式: 010-62750667, 童编辑, tjxin_0405@163.com, pup_6@126.com, 欢迎来电来信。

目 录

绪论	1	2.3.3 影响温度场的因素	43
第1章 液态成形基础	5	习题	46
1.1 液态金属的结构	6	第3章 液态金属的凝固形核及 生长方式	48
1.1.1 固体金属的加热膨胀与 熔化	7	3.1 凝固的热力学条件	50
1.1.2 液态金属的结构特点及 分析	8	3.1.1 液-固相变驱动力	50
1.2 液态合金的性质	14	3.1.2 曲率、压力对物质熔点的 影响	51
1.2.1 液态合金的粘滞性	14	3.1.3 溶质平衡分配 系数(K_0)	52
1.2.2 液态合金的表面张力	16	3.2 均质形核	53
1.3 液态金属的流动性与充型能力	22	3.2.1 形核功及临界半径	54
1.3.1 液态金属流动性及充型 能力的基本概念	22	3.2.2 形核率	55
1.3.2 液态金属停止流动机理与 充型能力	23	3.3 非均质形核	55
1.3.3 影响充型能力的因素及 促进措施	24	3.3.1 非均质形核形核功	56
习题	29	3.3.2 非均质形核的形核	57
第2章 液态成形中的传热	31	3.4 晶体的生长	58
2.1 传热基本原理	32	3.4.1 固-液界面结构及其 影响因素	58
2.1.1 温度场与传热学的基本 理论	32	3.4.2 晶体生长方式	60
2.1.2 凝固传热的基本方程	34	3.4.3 晶体生长速度	61
2.1.3 凝固温度场的求解方法	35	3.4.4 晶体生长中位错的形成	62
2.2 凝固过程中的温度场	36	习题	63
2.2.1 凝固温度场的测量	36	第4章 单相合金与多相合金的结晶	64
2.2.2 铸件的凝固时间	37	4.1 凝固过程中的传质	66
2.2.3 界面热阻与实际凝固 温度场	40	4.1.1 液相中完全混合的 溶质再分配	66
2.3 熔焊过程中的温度场	41	4.1.2 液相中有对流作用的 溶质再分配	68
2.3.1 焊接温度场的一般特征	41	4.1.3 液相中只有扩散的 溶质再分配	69
2.3.2 焊接温度场的表达式	41	4.2 凝固过程中的成分过冷	73
		4.2.1 成分过冷的判别式	73



4.2.2	成分过冷的过冷度	76
4.3	单相合金的结晶	76
4.3.1	热过冷及其对纯金属 液固界面形态的影响	76
4.3.2	成分过冷对合金固溶体 晶体形貌的影响规律	77
4.3.3	窄成分过冷作用下的胞状 组织的形成及其形貌	78
4.3.4	较宽成分过冷作用下的 枝晶生长	79
4.3.5	等轴晶的形成与 内生长	80
4.3.6	枝晶间距	81
4.4	多相合金的结晶	82
4.4.1	共晶合金的凝固	82
4.4.2	偏晶合金和包晶合金的 凝固	91
	习题	95
第5章	结晶组织的形成及控制	96
5.1	铸件宏观凝固组织的特征及 形成机理	98
5.1.1	铸件宏观凝固组织的 特征	98
5.1.2	铸件宏观凝固组织的 形成机理	99
5.2	铸件宏观结晶组织的控制	102
5.2.1	铸件结晶组织对铸件 性能的影响	102
5.2.2	铸件宏观组织的控制 途径和措施	102
5.3	熔池凝固及焊缝金属组织	106
5.3.1	焊接熔池的凝固	106
5.3.2	熔池凝固的特点	108
5.3.3	焊缝金属凝固组织的 形态	110
5.3.4	焊缝金属的组织	113
5.3.5	熔池凝固组织的细化	116
	习题	117

第6章	材料成形过程中的 冶金反应原理	118
6.1	材料成形过程中的冶金 反应特点	119
6.1.1	液态成形的冶金 反应特点	120
6.1.2	连接成形的冶金 反应特点	120
6.2	液态金属与气体的相互作用	122
6.2.1	焊接区气体的来源	122
6.2.2	液态金属与气体的 反应	124
6.3	液态金属与熔渣的相互作用	131
6.3.1	熔渣	131
6.3.2	熔渣的成分和分类	132
6.3.3	熔渣的物理性能	134
6.3.4	活性熔渣对金属的 氧化	136
6.3.5	脱氧处理	137
6.3.6	金属中硫和磷的控制	139
6.4	合金化处理	141
6.4.1	合金化的目的	141
6.4.2	合金化的方式	141
6.4.3	合金化的效果	141
6.4.4	工艺条件对冶金反应的 影响	142
	习题	145
第7章	成形缺陷的产生及控制	146
7.1	合金中的成分偏析	147
7.1.1	微观偏析	148
7.1.2	宏观偏析	150
7.2	气孔与夹杂物	153
7.2.1	气孔	153
7.2.2	夹杂物	159
7.3	缩孔与缩松	164
7.3.1	金属的收缩	164
7.3.2	缩孔与缩松的分类及 特征	167

7.3.3 缩孔与缩松的形成机理	168	9.4.2 应力张量不变量	234
7.3.4 影响缩孔与缩松的因素及防止措施	171	9.4.3 应力椭球面	234
7.4 内应力	174	9.4.4 主应力图	235
7.4.1 内应力的形成	174	9.5 主剪应力和最大剪应力	236
7.4.2 残余应力的分布	178	9.6 应力偏张量和应力球张量	238
7.4.3 控制内应力的措施	180	9.7 八面体应力和等效应力	239
7.5 变形与裂纹	181	9.7.1 八面体应力	239
7.5.1 变形	181	9.7.2 等效应力	240
7.5.2 热裂纹	188	9.8 应力平衡方程	240
7.5.3 冷裂纹	197	9.9 平面状态与轴对称状态	242
习题	206	9.9.1 平面状态	242
第8章 特殊条件下的成形	207	9.9.2 轴对称状态	244
8.1 快速凝固	209	9.10 应力莫尔圆	244
8.1.1 快速凝固基本原理	209	9.10.1 平面应力状态下的莫尔圆	245
8.1.2 急冷凝固技术及特点	209	9.10.2 平面应变状态下的应力莫尔圆	246
8.1.3 快速凝固晶态合金的组织 and 性能特征	212	9.10.3 三向应力莫尔圆	246
8.1.4 快速凝固非晶态材料的性能特征	212	9.11 应力理论实例	248
8.2 定向凝固	213	习题	251
8.2.1 定向凝固工艺参数	214	第10章 应变理论	253
8.2.2 常用定向凝固方法	215	10.1 位移及其分量	254
8.2.3 定向凝固技术的应用	216	10.2 应变及其分量	256
8.3 非重力凝固	219	10.3 应变分量与位移分量关系	258
8.3.1 微重力凝固	219	10.4 应变分析	259
8.3.2 超重力凝固	221	10.5 主应变、主剪应变和体积应变	261
8.4 其他凝固技术	222	10.6 应变张量、应变球张量与应变偏张量	263
8.4.1 电磁悬浮熔炼	222	10.7 八面体应变和等效应变	263
8.4.2 真空电弧熔炼	222	10.8 变形连续条件	264
习题	225	10.9 变形几何理论实例	265
第9章 应力理论	226	习题	267
9.1 外力与应力	228	第11章 屈服条件	269
9.2 点的应力状态	230	11.1 屈服准则的概念	270
9.3 任意斜面上的应力确定	231	11.1.1 有关材料性质的一些基本概念	270
9.4 主应力、应力张量不变量、应力椭球面和主应力图	233	11.1.2 屈服准则	271
9.4.1 主应力	233		



11.2	屈雷斯加屈服准则	272	13.1.1	塑性成形时摩擦的特点	304
11.3	米塞斯屈服准则	273	13.1.2	外摩擦在压力加工中的作用	305
11.4	屈服准则几何表达	275	13.2	金属塑性加工中的摩擦与润滑理论	306
11.4.1	两向应力状态的屈服轨迹	275	13.2.1	摩擦的分类	306
11.4.2	屈服准则在主应力空间中的表达	276	13.2.2	摩擦机理	306
11.4.3	π 平面上的屈服轨迹	277	13.2.3	塑性加工时接触表面摩擦力的计算	307
11.5	硬化材料的屈服准则简介	277	13.3	影响摩擦的主要因素	308
11.6	屈服条件实例	279	13.3.1	金属的种类和化学成分	308
	习题	280	13.3.2	工具材料及其表面状态	309
第12章	塑性本构关系	282	13.3.3	接触面上的单位压力	309
12.1	弹性本构关系	284	13.3.4	变形温度	309
12.2	塑性变形时应力应变的关系特点	287	13.3.5	变形速度	310
12.2.1	加载路径与加载历史	287	13.3.6	润滑剂	310
12.2.2	加载与卸载准则	287	13.4	摩擦系数测定	310
12.3	增量理论	288	13.4.1	夹钳轧制法	311
12.3.1	列维-米塞斯增量理论	288	13.4.2	圆环镦粗法	312
12.3.2	应力应变速率关系方程 塑性流动理论	290	13.5	塑性加工的工艺润滑	313
12.3.3	普朗特-路埃斯增量理论	291		习题	322
12.4	塑性变形的全量理论	292	第14章	金属的塑性变形	323
12.5	真实应力-应变曲线	293	14.1	金属塑性的基本概念及测定方法	325
12.5.1	基于拉伸试验确定的应力-应变曲线	294	14.1.1	金属塑性的基本概念	325
12.5.2	基于单向压缩试验确定的应力-应变曲线	298	14.1.2	金属塑性的测定方法	325
12.5.3	真实应力-应变曲线与数学模型	299	14.1.3	塑性图	327
12.6	塑性本构关系实例	300	14.2	影响塑性的主要因素及提高塑性的途径	327
	习题	302	14.2.1	影响金属塑性的内部因素	328
第13章	金属塑性加工中的摩擦与润滑	303	14.2.2	影响金属塑性的外部因素	330
13.1	金属塑性加工中摩擦的特点与作用	304	14.2.3	提高金属塑性的主要途径	335
			14.3	金属的超塑性	335
			14.3.1	超塑性的种类	336
			14.3.2	细晶超塑性的特征	336

14.3.3 影响超塑性的 主要因素	338	15.4.5 滑移线场的速度场 理论	382
14.3.4 超塑性的应用	338	15.5 滑移线法的应用	384
14.4 单晶体和多晶体的塑性变形 ...	339	15.6 塑性极值原理及上限法	388
14.4.1 单晶体的塑性变形	339	15.6.1 概述	388
14.4.2 多晶体的塑性变形	341	15.6.2 虚功原理	389
14.5 金属在塑性变形中的硬化	344	15.6.3 最大散逸功原理	389
14.5.1 单晶体的加工硬化	345	15.6.4 上限定理	390
14.5.2 多晶体的加工硬化	345	15.7 上限法的应用	391
14.5.3 影响加工硬化的因素 ...	346	15.7.1 Johnson 上限模式及 应用	391
14.6 金属塑性变形的不均匀性与 残余应力	348	15.7.2 Avitzur 连续速度场 上限模式及应用	395
14.6.1 金属塑性变形的 不均匀性	348	15.8 金属塑性成形有限元法简介 ...	397
14.6.2 基本应力与附加应力 ...	348	15.8.1 金属塑性成形的有限元法 概述	397
14.6.3 残余应力	349	15.8.2 金属塑性成形的弹塑性 有限元概述	399
14.7 金属在塑性变形过程中的 断裂	349	15.8.3 金属塑性成形的刚塑性 有限元概述	400
14.7.1 断裂的物理本质	350	15.8.4 金属体积成形有限元模拟 系统概述	400
14.7.2 影响断裂类型的因素 ...	352	习题	404
14.7.3 塑性加工中金属的 断裂	352		
习题	358		
第 15 章 塑性成形力学的工程 应用	359	第 16 章 金属塑性变形对组织和 性能的影响	407
15.1 金属塑性成形问题的求解 方法概述	360	16.1 冷变形中组织和性能的变化 ...	409
15.2 主应力法及其求解要点	361	16.1.1 组织的变化	409
15.3 主应力法的应用	364	16.1.2 性能的变化	410
15.3.1 直角坐标平面应变 问题解析	364	16.2 冷变形金属在加热时的组织 性能变化	411
15.3.2 圆柱坐标平面应变 问题解析	368	16.2.1 回复与再结晶概念	411
15.4 滑移线的基本理论	371	16.2.2 回复	411
15.4.1 滑移线场的基本概念 ...	371	16.2.3 再结晶	412
15.4.2 汉盖应力方程—— 滑移线沿线力学方程 ...	374	16.2.4 晶粒长大	412
15.4.3 滑移线的几何性质	376	16.3 金属在热变形过程中的回复与 再结晶	413
15.4.4 应力边界条件和 滑移线场的建立	378	16.3.1 动态回复和动态 再结晶	413
		16.3.2 热加工后的静态回复和 静态再结晶	416



16.4 热变形过程中金属组织性能的变化	417	16.5 温加工变形中的组织性能变化	418
16.4.1 热加工变形中金属组织性能的变化	417	习题	420
16.4.2 热加工过程的实验分析	418	附录 张量和应力张量	421
		参考文献	424

绪 论

1. 材料成形原理概述

材料(Material)是人类社会进步和人民生活水平提高不可或缺、赖以生存和发展的物质基础。材料是指人类社会所能接受的、可经济地制造有用物品的物质。20世纪70年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。20世纪80年代以高技术群为代表的新技术革命,又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。当前最关注的三大问题,资源、能源与环境都与材料有密切关系。生产材料是消耗资源与能源的大户,也是造成环境污染的主要源头,但是材料又是开发能源和治理环境污染的重要保障。

使材料成为零件、部件、构件等制品的工艺过程称为“材料成形”。材料成形有两种含义:一是成形(Forming),即金属在外界压力的作用下,借助于模具通过材料的塑性变形来获得模具所给予的形状、尺寸和性能的产品;二是成型(Moulding),它是指液态或半固态的金属或非金属材料在外界压力(或自身重力)的作用下,通过流动充填模型(模具)的型腔来获得与型腔的形状和尺寸一致的产品。材料成形一般包括传统的铸造、锻压、焊接等方式。随着科学技术的发展和新材料、新工艺的不断涌现,材料成形的内涵和外延有了很大的拓宽,材料成形向精密成形(Net Shape Forming)和准精密成形(Near Net Shape Forming)、复合成形等方向发展。

材料成形是一个材料、能量、信息不断变化的过程。不管何种材料,不管采用什么方式成形,在成形过程中均遵循金属学、冶金学、物理化学、热力学、塑性力学等学科的基本定律。材料成形原理(Principle of Materials Processing)是基于上述基础理论在材料成形中的应用而形成的技术理论。不同的材料种类(金属、非金属、复合材料)和材料形态(液态、固态、粉末、半固态)的成形,形成了相应的材料成形原理。如金属学、冶金学、热力学、物理、化学等在指导铸造工艺、焊接工艺设计时分别形成了铸件形成原理、焊接冶金原理,塑性力学在塑性成形中的应用形成了塑性成形原理等。

2. 材料成形原理的研究对象与发展

材料是社会进步的物质基础,是人类进步程度的主要标志,所以人类社会的进步以材料作为里程碑。纵观人类发现材料和利用材料的历史,每一种新材料的发现和广泛利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化,把人类的物质文明和精神文明向前推进一步。材料成形技术的发展史可以说是科学发展史的一个缩影。

早在一百万年以前,人类开始用石头做工具,使人类进入旧石器时代。大约一万年以前,人类知道对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具,从而使人类进入新石器时代。在新石器时代,人类开始用皮毛遮身。大约在8000~9000年前,人类开始发明用粘



土成型,再火烧固化而成为陶器。在烧制陶器过程中,偶然发现了色泽鲜艳、又能浇铸成型的青铜,从而使人类进入青铜时代。这是人类较大量利用金属的开始,也是人类文明发展的重要里程碑。世界各地进入以铸造成形、锻造成形和连接成形技术为主的青铜器时代的时间各不相同,希腊是在公元前3000年前,埃及是在公元前2500年前,巴比伦是在公元前19世纪中叶,印度大约在公元前3000年已广泛使用青铜器。中国的青铜器在公元前2700年已经使用,至今约5000年的历史,到商周(公元前17世纪到公元前3世纪)进入了鼎盛时期。我国商朝的司母戊鼎(图0.1)青铜器就是作为中国古代五千年文明发展的标志,当时需要300多人同时从事铸造技术工作,并且几千年来一直保存完好,体现了铸造的熔炼水平和工艺水平,是我们古代文明与科学技术发展的里程碑。秦始皇兵马俑内铜陵车马(图0.2)是世界科学技术发展史上的一个奇迹,浓缩了我国古代铸造和焊接技术的结晶。公元前13~14世纪前,人类已开始用铁,3000年前铁工具比青铜工具更为普通,人类开始进入铁器时代。中国最早出土的人工冶铁制品约出现在公元前9世纪。到春秋(公元前770—476年)末期,生铁技术有较大突破,遥遥领先于世界其他地区,如用生铁退火而制成韧性铸铁及以生铁炼钢(中国俗话“百炼成钢”和“恨铁不成钢”)技术的发明,促进了中国生产力的大发展,对战国和秦汉农业、水利和军事的发展起到很大作用。早在公元2世纪中国的钢和丝绸已驰名罗马帝国,生铁技术在公元前5世纪即春秋末期已经在黄河长江流域传播(图0.3)。这些技术于公元6~7世纪传入朝鲜半岛、日本和北欧,推动了世界文明的进步。



图 0.1 司母戊鼎

开始进入铁器时代。中国最早出土的人工冶铁制品约出现在公元前9世纪。到春秋(公元前770—476年)末期,生铁技术有较大突破,遥遥领先于世界其他地区,如用生铁退火而制成韧性铸铁及以生铁炼钢(中国俗话“百炼成钢”和“恨铁不成钢”)技术的发明,促进了中国生产力的大发展,对战国和秦汉农业、水利和军事的发展起到很大作用。早在公元2世纪中国的钢和丝绸已驰名罗马帝国,生铁技术在公元前5世纪即春秋末期已经在黄河长江流域传播(图0.3)。这些技术于公元6~7世纪传入朝鲜半岛、日本和北欧,推动了世界文明的进步。

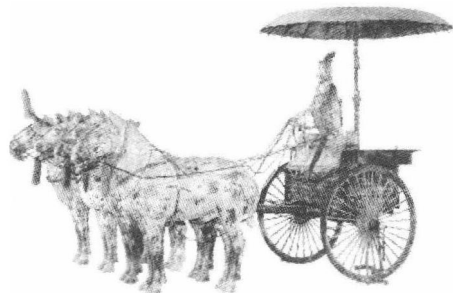


图 0.2 铜陵车马

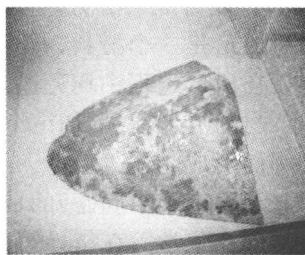


图 0.3 明朝铁犁

随着世界文明的进步,18世纪发明了蒸汽机,19世纪发明了电动机,对金属材料提出了更高要求,同时对钢铁冶金技术产生了更大的推动作用。1854年和1864年先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢产量有一个飞速发展。此后,铜合金、铝合金也得到大量应用,而后镁合金、钛合金、金属玻璃、形状记忆合金和很多稀有金属相继出现,从而使金属材料在整个20世纪内占据了结构材料的主导地位。在此期间发展了如铸锻联合技术、锻焊联合工艺等现代先进材料成形技术。20世纪后期复合材料、电子材料和纳米材料的发展,对人类社会进入信息时代起了关键的作用。我国已成功地生产出世界上最大的轧钢机机架铸件(重410t)和长江三峡电站巨型水轮机的特大型铸件。长江三峡水轮机叶轮的不锈钢叶片重62吨(图0.4),已由德阳中国二重集团铸造厂(中国二重)于2001年首次

试制成功，其铸造工艺方案采用了先进的计算机模拟仿真技术，经反复模拟得到了最优化的铸造工艺方案。2009年3月24日，中国二重在国内首次成功浇注出重560吨的特大型钢锭。近年来，纳米成形技术发展突飞猛进，已经相继发明了纳米机器人、纳米蜘蛛等，如图0.5所示。“纳米”机器人可以用于医疗事业，以帮助人类识别并杀死癌细胞以达到治疗癌症的目的，还可以帮助人们完成外科手术，清理动脉血管垃圾及组成计算机新硬件等。目前科学家们已经研发出这种机器人的生产线。

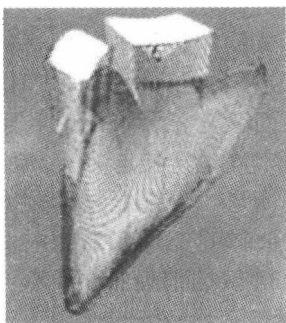


图 0.4 不锈钢叶片模拟

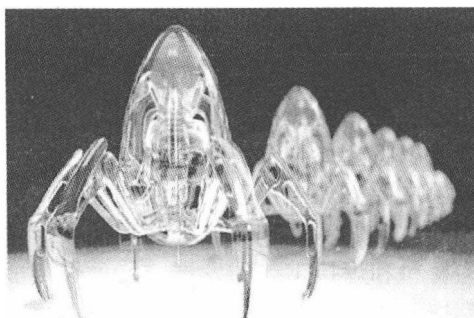


图 0.5 纳米蜘蛛

材料科学与工程就是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途的关系的基本原理及其运用。换言之，就是研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用效能的原理以及它们之间的关系。我国有人提出一个5个基本要素的模型，即成分 (composition)、合成/加工 (synthesis/processing)、结构 (structure)、性质 (properties) 和使用效能 (performance) 这5个基本要素。如果把它们连接起来，则形成如图0.6所示的六面体 (hexahedron)。

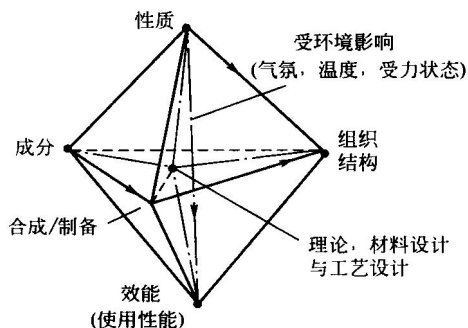


图 0.6 材料科学与工程五要素

材料成形原理是研究这5个要素之间的共性和基本原理。材料成形的工艺方法有很多种，本课程不针对具体的成形加工工艺，而根据成形过程中材料所经历的状态，分析研究成形过程中发生的物理化学变化、物质移动等现象的本质，使学习者掌握材料成形加工的实质，为理解和解决材料成形加工过程中出现的新问题、发展新的成形加工技术奠定理论基础。

液态成形 (又名铸造 (Foundry)) 是一个质量不变的过程，其基本过程是熔炼、浇注和凝固。凝固过程是铸件成形过程的核心，它决定着凝固组织和铸造缺陷的形成，从而也决定了铸件的性能和质量。液态成形的研究对象主要包括凝固组织的形成与控制、铸造缺陷的防止与控制、铸件尺寸精度和表面粗糙度的控制等。随着定向凝固技术、快速凝固技术、自生复合材料的制取等凝固技术的发展和凝固过程数值模拟技术 (MagmaSoft、Procast、Anycasting、FLOW-3D、CASTsoft 和华铸 CAE 等模拟分析软件)、快速样件制造技术、过程和设备运行中的计算机控制、集成制造技术等计算机的应用和发展，将大幅度提高生产效率和降低生产成本。



许多金属材料具有延展性，只要施加足够大的力，它们就会产生塑性变形。如果材料具有大的塑性变形能力，就能够通过塑性加工使其变成复杂形状的零件。塑性成形的研究对象主要是体积成形技术、板料成形技术和特种成形技术等。塑性成形在大批量生产中朝着高速化、自动化方向发展(高速自动压力机、多工位压力机和冲压生产线等)，在小批量生产中向着简易化、通用化和万能化方向发展，成形件向精密化发展。塑性成形工艺过程向计算机模拟 CAE(FASTAMP、Fastform、Dynaform、Defrom、CASFORM 等模拟分析软件)和模具 CAD/CAM(UG NX、Pro/e、CATIA 等软件)方向发展。

连接成形中的主要方法是焊接成形，它是利用各种形式的能量使被连接材料在连接处产生原子或分子间的结合而成为一体的成形加工方法。其过程由热过程、物理化学冶金过程及应力变形的机械过程所组成，这三者几乎是同时发生而又互相影响的。利用焊接成形方法可以将金属与金属、金属与非金属、非金属与非金属牢固地连接起来。焊接成形的研究对象主要是焊接接头的组织和性能、焊接的残余应力和变形、焊接能量的输入方式、焊接表面污染的清除和防止等。焊接成形技术的近期发展主要体现在焊接结构的发展、焊接结构材料和焊接工艺的发展、特种焊接成形技术的发展、焊接数值模拟(如 SysWeld 等数值模拟分析软件)等方面。

3. 本课程的任务与特色

“材料成形原理”课程是材料成型及控制工程专业或材料加工工程专业的必修核心课程之一，是许多后续专业课程的理论基础，所以在本专业的课程中具有十分重要的地位。本课程着重运用所学的物理、化学等基础理论及专业基础理论知识，阐明液态成形和塑性成形等基本材料成形技术的共有的物理现象、基本规律以及各种材料成形技术的基本原理、理论基础、分析问题的方法，使学生学完本课程后对材料成形过程及其基本原理有实质性的、深入的理解，为研究与开发新型材料、开拓新型的材料成形技术及提高成形产品质量奠定坚实的理论基础和实际知识。

本课程的先导课程除一般的数学基础课程外，还应有工程材料学、传热学、流体力学、材料成形工艺基础等课程。本课程为许多后续专业课程提供理论基础，如材料成形工艺、材料成形装备及自动化、材料成形计算机模拟、模具设计等课程。同时，在材料成形加工过程中往往发生多种物理化学现象，涉及物质和能量的转移和变化，本教材的内容就是阐述这些现象的本质，揭示变化的规律。

将液态成形和连接成形的凝固部分、化学冶金、成形缺陷与控制等共性的方面有机地结合起来阐述其材料成形的现象与原理。结合国内外最新的研究进展，将金属材料成形最新的研究成果应用在本教材中，使学生了解最近的研究进展及本教材相关的材料成形原理知识，通过结合典型案例将原理应用化是本教材的特色。