



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

材料成形原理

林小娉 主 编
陈翠欣 焦永树 副主编



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

材料成形原理

林小娉 主 编
陈翠欣 焦永树 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材系统阐述了各种材料成形过程的基本原理,即材料成形过程中的能流、物质流和信息流规律及其物理本质,涵盖了铸件形成理论、塑性成形原理、熔焊原理、粉末冶金原理等基本内容,并对它们之间的共性部分进行了有机整合,对个性部分也作了有选择性的重点论述。本教材共分为5篇,主要内容包括:液态金属的凝固、材料连接成形基础、材料成形过程中缺陷的形成与控制、金属塑性成形力学原理、粉末成形原理。本教材注重理论分析与实际应用相结合,既有一定的理论深度,又注意深浅适度。通过对本教材的学习,可对材料成形过程及其基本原理有较深入和系统的理解,为后续专业课程的学习以及研究新材料、新工艺奠定了理论和实践基础。

本书适合作为材料成型及控制工程专业应用型本、专科学生学习的教材,也可作为相关专业学生和工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理/林小娉主编. —北京:化学工业出版社, 2010.7

(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)
ISBN 978-7-122-08570-2

I. 材… II. 林… 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 (2010) 第 088211 号

责任编辑:彭喜英
责任校对:吴静

文字编辑:冯国庆
装帧设计:周遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数548千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.00 元

版权所有 违者必究

序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任
李春峰
2010年4月

前 言

为适应国家教育改革形势、满足教育部制定的材料成型及控制工程专业培养目标和培养要求，从学生宽口径、厚基础的人才培养目标出发，根据材料成型及控制工程专业教学大纲编写了本教材。本教材是将原铸造、焊接、模具三个专业“凝固成形原理”、“焊接成形原理”、“塑性成形原理”、“粉末成形原理”等原理性课程有机结合、融会贯通，形成的一本系统性强、重点突出、内容精炼，并适合材料成型及控制工程专业的理论基础教材，主要解释了近代材料成形技术中共同的物理现象、基本规律以及各种成形技术的基本原理、理论基础、分析问题的方法，使学生对材料成形过程及原理有深入的理解，为后续专业课程学习及科学研究奠定了理论基础。

本教材分为5篇21章，第一篇液态金属的凝固包括：第1章液态金属的结构与性质，第2章铸件的凝固，第3章液态金属结晶的基本原理，第4章铸件宏观凝固组织的形成与控制，第5章凝固新技术。第二篇材料连接成形基础包括：第6章焊接热过程，第7章焊接冶金，第8章焊缝金属的组织和性能，第9章焊接热影响区。第三篇材料成形过程中缺陷的形成与控制包括：第10章化学成分的不均匀性，第11章气孔与夹杂物，第12章缩孔与缩松，第13章热裂纹，第14章应力与变形、裂纹。第四篇金属塑性成形力学原理包括：第15章应力状态分析，第16章应变状态分析，第17章弹性平面问题，第18章屈服准则与塑性本构关系，第19章弹塑性问题分析实例，第20章塑性问题分析实例；第五篇粉末成形原理包括第21章粉末成形过程与原理。

本教材由东北大学秦皇岛分校林小娉担任主编，河北工业大学陈翠欣、焦永树担任副主编，参加编写的还有太原理工大学张金山、河南科技大学张占领、内蒙古工业大学韩永全以及河北工业大学李海鹏、丁检、薛海涛、李日。具体编写分工如下：第2章2.2、2.3节，第4章、第11章、第12章由林小娉编写；第6、8、9章由陈翠欣编写；第15~20章由焦永树编写；第1章、第5章、第10章由张占领编写；第3章由张金山编写；第7章由薛海涛编写；第14章由韩永全编写；第2章2.1节由李日编写；第21章由丁检编写；绪论、第13章由李海鹏编写。全书由林小娉统稿。

本教材在编写过程中参考了大量相关文献资料和书籍，在此对文献资料和书籍作者表示衷心的感谢！

由于本教材编者水平所限，书中难免有缺点和不足之处，恳求读者批评指正。

编 者

2010年4月

目 录

0 绪论	1	0.4 粉末成形技术	4
0.1 材料液态成形技术	1	0.5 本课程的性质与任务	4
0.2 材料连接成形技术	2	0.6 本课程与其他课程的联系与分工	5
0.3 材料塑性成形技术	3		

第一篇 液态金属的凝固

第1章 液态金属的结构与性质	6	3.1 生核过程	38
1.1 固态金属的加热、膨胀及熔化	6	3.1.1 液态金属结晶的热力学条件	38
1.1.1 原子间作用力的电子理论	6	3.1.2 自发形核	39
1.1.2 金属的加热膨胀	7	3.1.3 非自发形核	41
1.1.3 金属的熔化	7	3.2 晶体的长大	43
1.2 液态金属的结构	8	3.2.1 晶体长大的动力学条件	43
1.2.1 从物质熔化过程对液态金属结构的认识	8	3.2.2 液-固界面自由能及界面的微观结构	44
1.2.2 X射线衍射对液态结构的研究	8	3.2.3 晶体的微观生长方式和速率	45
1.2.3 理想液态金属结构	9	3.2.4 晶体的生长方向和生长表面	47
1.2.4 实际金属和合金的液体结构	10	3.3 凝固过程中的质量传输	47
1.3 液态合金的性质	11	3.3.1 溶质分配方程	47
1.3.1 液态合金的表面张力	11	3.3.2 凝固传质过程的有关物理量	48
1.3.2 液态合金的黏度	15	3.3.3 稳定态扩散过程的一般性质	49
1.4 液态金属的流动性与充型能力	16	3.4 单相合金的凝固	51
1.4.1 流动性与充型能力的基本概念	17	3.4.1 溶质再分配现象的产生	51
1.4.2 影响液态金属充型能力的因素及铸造工艺中的促进措施	18	3.4.2 平衡凝固时的溶质再分配	51
思考与练习	23	3.4.3 非平衡凝固时的溶质再分配	52
第2章 铸件的凝固	24	3.4.4 成分过冷的产生	58
2.1 铸件的温度场	24	3.4.5 界面前方过冷状态对凝固过程的影响	60
2.1.1 数学分析法	24	3.5 共晶合金的凝固	65
2.1.2 数值计算方法	25	3.5.1 共晶组织的分类与特点	65
2.1.3 铸件温度场的测定	29	3.5.2 规则共晶的凝固	66
2.1.4 影响铸件温度场的因素	29	3.5.3 非小平面-小平面共晶合金的凝固	70
2.2 铸件的凝固方式	31	思考与练习	72
2.2.1 凝固动态曲线	31	第4章 铸件宏观凝固组织的形成与控制	74
2.2.2 凝固区域及其结构	31	4.1 铸件宏观凝固组织的形成及其影响因素	74
2.2.3 铸件的凝固方式	32	4.1.1 铸件宏观凝固组织特征	74
2.2.4 影响铸件凝固方式的因素	33	4.1.2 凝固过程中晶粒游离的产生	74
2.3 铸件的凝固时间	34	4.1.3 表面细晶粒区的形成	76
2.3.1 理论计算法	34	4.1.4 柱状晶区的形成	77
2.3.2 经验计算法——平方根定律	34	4.1.5 内部等轴晶区的形成	77
思考与练习	36	4.2 铸件宏观凝固组织的控制	78
第3章 液态金属结晶的基本原理	38		

4.2.1 铸件凝固组织对铸件质量和性能的影响	78	5.1.4 快速凝固的非晶态合金	89
4.2.2 等轴晶组织的获得和细化	78	5.2 定向凝固	90
思考与练习	84	5.2.1 定向凝固的理论基础	90
第5章 凝固新技术	85	5.2.2 单晶生长	92
5.1 快速凝固	85	5.2.3 柱状晶的生长	93
5.1.1 快速凝固技术	85	5.3 半固态金属的特性	94
5.1.2 快速凝固的热力学及动力学	87	5.3.1 连续搅拌对半固态金属凝固的影响	94
5.1.3 快速凝固晶态合金的显微结构特征	89	5.3.2 半固态铸造	95

第二篇 材料连接成形基础

第6章 焊接热过程	97	思考与练习	137
6.1 焊接热过程的特点	97	第8章 焊缝金属的组织 and 性能	138
6.2 焊接热源	97	8.1 焊接熔池的形成及凝固	138
6.2.1 单一热源	98	8.1.1 熔池凝固的特点	138
6.2.2 复合热源	98	8.1.2 熔池凝固的一般规律	139
6.3 焊接热效率	99	8.1.3 熔池的结晶形态	141
6.3.1 焊接热效率及其影响因素	99	8.2 焊缝金属的组织	143
6.3.2 焊接热效率的测试及计算方法	100	8.2.1 焊缝金属的一次结晶组织	143
6.4 焊件加热区的热能分布	102	8.2.2 焊缝金属的固态相变	143
6.5 焊接温度场	104	8.3 焊缝金属的强韧化	148
6.5.1 焊接温度场的分类	104	8.3.1 焊缝金属的强韧化方式	148
6.5.2 影响温度场的因素	104	8.3.2 焊缝金属的强韧性匹配	151
6.6 焊接热过程计算	107	8.4 焊缝金属的性能控制	152
6.6.1 解析法	108	8.4.1 焊接工艺	152
6.6.2 数值方法	110	8.4.2 变质处理	153
6.7 焊接热循环	111	8.4.3 振动结晶	153
6.7.1 焊接热循环的特征参数	111	8.4.4 其他方法	154
6.7.2 焊接热循环参数的测试与计算	113	思考与练习	154
6.7.3 多层焊热循环	114	第9章 焊接热影响区	156
思考与练习	116	9.1 焊接热影响区的组织分布	156
第7章 焊接化学冶金	117	9.2 焊接热影响区的组织转变	158
7.1 焊接化学冶金的特点	117	9.2.1 相变温度	159
7.1.1 焊接过程对金属的保护	117	9.2.2 晶粒的长大	159
7.1.2 冶金反应区	118	9.2.3 焊接热影响区的组织转变	161
7.1.3 冶金反应的影响因素	119	9.2.4 焊接条件下的 CCT 图及其影响因素	162
7.2 气体对金属的作用	120	9.3 焊接热影响区性能	164
7.2.1 气体的来源与组成	120	9.3.1 焊接热影响区的力学性能	164
7.2.2 气体对金属的作用	121	9.3.2 焊接热影响区的硬度	165
7.3 焊接熔渣	125	9.3.3 软化	166
7.3.1 熔渣的作用	125	9.3.4 脆化	168
7.3.2 熔渣的成分及结构理论	126	9.3.5 焊接热影响区的韧性	170
7.3.3 熔渣的性能	127	9.4 焊接热模拟技术	171
7.4 焊接过程中的化学反应	129	9.4.1 焊接热模拟的原理及试验装置	171
7.4.1 氧化反应及脱氧	129	9.4.2 焊接热模拟技术的应用及局限性	172
7.4.2 合金化	134	思考与练习	174
7.4.3 焊缝中硫、磷的控制	136		

第三篇 材料成形过程中缺陷的形成与控制

第 10 章 化学成分的不均匀性	175	12.2.3 缩孔和缩松的相互转化	202
10.1 微观偏析	175	12.2.4 灰铸铁和球墨铸铁铸件的缩孔和缩松	203
10.1.1 枝晶偏析	175	12.3 防止铸件产生缩孔和缩松的途径	205
10.1.2 晶界偏析	176	12.3.1 顺序凝固	205
10.1.3 胞状偏析	177	12.3.2 同时凝固	206
10.2 宏观偏析	177	12.3.3 浇注系统的引入位置及浇注工艺	207
10.2.1 晶间液体的流动对宏观偏析的影响	177	12.3.4 冒口、补贴和冷铁的应用	207
10.2.2 正常偏析	179	12.3.5 加压补缩	207
10.2.3 逆偏析	180	思考与练习	208
10.2.4 V形偏析和逆V形偏析	180	第 13 章 热裂纹	209
10.2.5 带状偏析	181	13.1 焊接热裂纹	209
10.2.6 重力偏析	181	13.1.1 结晶裂纹	210
10.3 焊接接头的化学成分不均匀性	182	13.1.2 高温液化裂纹	213
10.3.1 焊缝中的化学成分不均匀性	182	13.1.3 多边化液化裂纹	215
10.3.2 熔合区的化学成分不均匀性	183	13.2 铸件的热裂及其影响铸件热裂纹的因素、防止措施	216
思考与练习	183	13.2.1 铸件的热裂纹	216
第 11 章 气孔与夹杂物	184	13.2.2 影响铸件热裂因素	216
11.1 气孔	184	13.2.3 防止铸件产生热裂的途径	217
11.1.1 气体的析出与气泡的形成	184	思考与练习	218
11.1.2 析出性气孔的形成及防止措施	185	第 14 章 应力与变形、裂纹	219
11.1.3 反应性气孔的形成及防止措施	187	14.1 内应力	219
11.1.4 焊缝中的气孔	188	14.1.1 内应力的形成机理	219
11.2 非金属夹杂物	190	14.1.2 焊接件残余应力的分布规律	220
11.2.1 夹杂物的来源和分类	190	14.1.3 残余应力的防止及去除措施	222
11.2.2 一次非金属夹杂物	191	14.2 焊接变形与焊接变形的控制与消除	223
11.2.3 二次氧化夹杂物	193	14.2.1 焊接残余变形	223
11.2.4 偏析夹杂物	193	14.2.2 焊接变形控制与消除	224
11.2.5 焊缝中的夹杂物	195	14.3 焊件冷裂纹	226
思考与练习	196	14.3.1 焊接冷裂纹的分类及特征	226
第 12 章 缩孔与缩松	197	14.3.2 冷裂纹的形成机理	227
12.1 金属收缩的概念	197	14.3.3 焊接冷裂纹的防止	230
12.1.1 液态收缩	197	14.4 铸件的变形、冷裂及其控制与消除	230
12.1.2 凝固收缩	198	14.4.1 铸件的变形	230
12.1.3 固态收缩	199	14.4.2 铸件的冷裂纹	231
12.1.4 铸件的收缩	200	14.4.3 防止铸件产生变形、冷裂的途径	231
12.2 缩孔与缩松的形成机理	200	思考与练习	232
12.2.1 缩孔的形成	201		
12.2.2 缩松的形成	201		

第四篇 金属塑性成形力学原理

第 15 章 应力状态分析	233	15.1 外力、内力与应力	233
----------------------------	-----	---------------------	-----

15.2 斜面上的应力	234	18.2.2 特雷斯卡屈服准则	271
15.3 主应力与主方向	236	18.2.3 米塞斯屈服准则	272
15.4 最大剪应力与正八面体面应力	238	18.3 屈服准则的几何描述	273
15.5 应力球张量与偏张量	239	18.3.1 平面应力状态下的屈服轨迹	273
15.6 平衡微分方程	240	18.3.2 三维主应力空间中的屈服曲面	274
15.6.1 直角坐标系中的平衡方程	240	18.3.3 π 平面上的屈服轨迹	275
15.6.2 平面极坐标系中的平衡微分 方程	242	18.4 屈服准则的实验验证	275
思考与练习	242	18.4.1 罗德实验	275
第16章 应变状态分析	244	18.4.2 泰勒和奎宁实验	276
16.1 几何方程	244	18.4.3 两个屈服准则作比较	276
16.1.1 直角坐标系中的几何方程	244	18.5 塑性本构关系	277
16.1.2 其他正交坐标系中的几何方程	245	18.5.1 塑性变形的特点	277
16.2 主应变和任意方向的线应变	246	18.5.2 增量理论	278
16.2.1 任意方向的线应变	246	18.5.3 全量理论	281
16.2.2 主应变	248	思考与练习	282
16.3 主剪应变和应变张量的分解	248	第19章 弹塑性问题分析实例	283
16.4 应变率张量与应变增量张量	250	19.1 圆轴的弹塑性扭转	283
16.4.1 应变率张量	250	19.2 梁的弹塑性弯曲	284
16.4.2 应变增量张量	251	19.2.1 纯弯曲梁的弹塑性分析	284
16.5 应变协调方程	251	19.2.2 横力弯曲梁的弹塑性分析	285
思考与练习	252	19.2.3 残余应力的计算	287
第17章 弹性平面问题	254	19.3 厚壁筒的弹塑性分析	287
17.1 弹性本构方程	254	19.3.1 厚壁筒的弹性分析	287
17.1.1 直角坐标系中的本构方程	254	19.3.2 厚壁筒的弹塑性分析	288
17.1.2 柱坐标系中的本构方程	255	19.3.3 厚壁筒的位移计算	290
17.2 弹性平面问题	255	19.3.4 厚壁筒的残余应力计算	290
17.2.1 平面应力问题与平面应变问题	255	思考与练习	292
17.2.2 艾雷应力函数	256	第20章 塑性问题分析实例	293
17.2.3 逆解法与半逆解法	257	20.1 主应力法及其应用	293
17.3 受均布载荷的简支梁	258	20.1.1 受内拉塑性圆环问题	293
17.4 平面问题的极坐标解答	261	20.1.2 平行模板间平面应变墩粗	294
17.4.1 极坐标系中的应力函数与协调 方程	261	20.1.3 平行模板间圆柱体墩粗	295
17.4.2 轴对称问题的应力和位移	262	20.2 滑移线场法及其应用	297
17.5 受均布压力作用的圆环	264	20.2.1 滑移线场的概念	297
17.6 薄板中圆孔附近的应力集中	265	20.2.2 滑移线场的性质	298
思考与练习	268	20.2.3 几种典型的滑移线场	299
第18章 屈服准则与塑性本构关系	269	20.2.4 滑移线场确定极限载荷举例	300
18.1 弹性与塑性	269	20.3 上限法及其应用	302
18.1.1 弹性变形与塑性变形	269	20.3.1 动可容速度场	302
18.1.2 几种简化的本构模型	269	20.3.2 变形体的虚功原理	302
18.2 屈服准则	270	20.3.3 最大散逸功原理	303
18.2.1 屈服准则的概念	270	20.3.4 上限定理	304
		20.3.5 上限法应用实例	305
		思考与练习	306

第五篇 粉末成形原理

第21章 粉末成形过程与原理	308	21.1 粉末的制取及性能	308
-----------------------------	-----	---------------------	-----

21.1.1 粉末体及粉末性能	308	21.3.2 烧结机构	312
21.1.2 粉末粒度及其测定	308	21.3.3 烧结装置与烧结气氛	314
21.1.3 粉末的比表面积	309	21.3.4 烧结体的性能	314
21.2 粉末压制成型	309	21.4 液相烧结	316
21.2.1 金属粉末压制过程	309	21.4.1 液相烧结方法	316
21.2.2 影响压制过程的因素	309	21.4.2 液相烧结条件与过程	318
21.3 烧结	311	21.4.3 影响液相烧结的因素	319
21.3.1 烧结过程热力学基础	311	21.4.4 液相烧结的优缺点与应用	321
附录 A 指标符号与二阶张量	322		
参考文献	326		

0 绪 论

材料成形是制造业的重要组成部分，是冶金、机械、交通运输、航空航天、电力、石化等支柱产业的基础制造技术。材料成形加工业在国民经济中占有重要地位，已成为 21 世纪我国经济发展和腾飞的重要基石。因此，多种材料成形技术、方法和设备得到了广泛应用，各种新型材料成形技术也不断涌现，成为推动我国装备制造业发展的重要动力。在此过程中，对于材料成形原理的研究至关重要，其核心就是解决各种材料的成形及其内部组织、性能等的控制问题。材料成形主要包括液态金属成形（铸造）、连接成形（焊接）、塑性成形（压力加工）、粉末成形（粉末冶金成形）等工艺方法，每种成形工艺方法又有其各自的特点，因此，只有在充分了解各种材料成形工艺原理的基础上，才能在使用过程中对其进行合理选择和控制，从而获得所需形状、尺寸和性能的零部件。

0.1 材料液态成形技术

材料液态成形是一种利用液态金属生产制品的工艺方法，该技术首先将原材料加热熔化，形成具有一定化学成分和良好流动性的液态金属，而后在重力或其他外力（例如压力、离心力、电磁力、振动惯性力等）作用下进行浇注和对铸型的填充，最后液态金属在铸型中冷却并逐渐凝固形成具有型腔形状的铸件。早期的液态成形技术只能生产半成品毛坯件，需后续清整、机加工等工序才能得到所需零部件；但随着液态成形技术的发展，各种少余量、无余量铸造方法逐渐出现并在实际生产中得到了推广应用，使得部分铸件无需机加工切削即可满足零部件的尺寸和精度要求。

为适应不同要求的铸件产品生产，液态成形技术已形成了多种工艺方法，例如，根据造型材料的不同，可将其分为砂型铸造、金属型铸造、熔模铸造、陶瓷型铸造、石膏型铸造、消失模铸造等；按照造型方法的不同可分为普通砂型铸造和特种铸造，前者包括湿砂型、干砂型和化学硬化砂型三类，后者可分为以天然矿产砂石为主要造型材料的特种铸造（如熔模铸造、泥型铸造、铸造车间壳型铸造、负压铸造、实型铸造、陶瓷型铸造等）和以金属为主要铸型材料的特种铸造（如金属型铸造、压力铸造、连续铸造、低压铸造、离心铸造等）。

材料液态成形技术的主要特点如下。

(1) 适应性强，应用范围广 同其他材料成形方法相比，液态成形几乎可用于生产各种尺寸、重量、形状、材质和性能的产品，即对于产品的适应范围广。对于有些难以切削的零部件，如燃汽轮机的镍基合金零件不用铸造方法无法成形。

(2) 成本低廉 由于液态成形技术可用于产品的批量生产，对设备和操作人员要求不高，工艺简单；同时，产品的形状、尺寸接近最终零件，减少了切削加工量，所以液态成形工艺生产的产品成本低廉并具有较高的性价比，特别对于形状复杂的零件更能显示出其经济性，如汽车发动机的缸体和缸盖、船舶螺旋桨以及精致的艺术品等。

(3) 产品性能多样化 通过液态成形技术生产的产品除具有常规的物理和力学性能外，还具有耐磨、耐腐蚀、吸震等综合性能，这是其他材料成形方法所不具备的，因此，在装备制造业所使用的零部件中，以液态成形技术生产的铸件为主。

(4) 易于实现机械化 由于采用液态成形技术生产产品的工艺流程简单、工艺相对固定且适合大批量生产，所以该工艺易于实现机械化。由于具有诸多优点，2000 多年来液态成形技

术始终在各个阶段的工业发展中占有重要地位。但同时，产品质量可控性、尺寸均一性、生产过程可观察性差以及环境污染等问题都是困扰现阶段和今后液态成形技术发展的重要难题，有待进一步解决。

从历史悠久的传统铸造发展到今天的现代铸造技术或液态凝固成形技术，这不仅与金属结晶和凝固理论研究的深入及发展有关，还与各种凝固技术的出现和提高、计算机技术的应用等有关，而且与化学工业、机械制造业、现在制造方法和技术的发展密不可分，现代凝固理论的成熟与发展以及新型液态成形凝固技术的出现，都为当前液态成形技术的发展提供了新的动力，这主要体现在以下三个方面。

(1) 凝固理论的发展 凝固过程是液态成形过程的核心，它决定着凝固组织和铸造缺陷的形成，决定了铸件性能和质量。在 20 世纪 60 年代完整晶体生长的微观理论、晶体缺陷生长理论、成分过冷理论、局部溶质再分配方程等经典凝固理论形成之后，激冷等轴晶理论、枝晶熔断和结晶雨理论等的提出推动了经典凝固理论的应用，近年来，在计算机技术飞速发展、极端和特殊条件下凝固研究不断深入的背景下，快速凝固理论、凝固过程组织形态选择的时间相关性和历史相关性理论等新型凝固理论不断出现。

(2) 凝固技术的发展 凝固技术是指控制凝固过程按照预定方向进行的技术，是开发新材料、提高铸件质量的重要途径。近年来，定向凝固、快速凝固、半固态铸造、原位自生复合材料等新型凝固技术的出现，都为高性能新型材料的开发提供了有效途径。

(3) 计算机技术的应用 随着计算机技术的发展，其在凝固过程数值模拟、铸造过程 CAD/CAE/CAM 以及成形过程计算机控制等方面得到了推广应用。

0.2 材料连接成形技术

材料连接成形技术是工业生产制造中的重要工艺，包括焊接技术、机械连接技术和胶接技术等。在生产中选用何种连接技术主要取决于材料的强度、负载的类型及方向、结构的可靠性、使用环境、生产成本以及其他因素。与机械连接和胶接相比，焊接技术由于可以形成永久性连接，接头强度高、轻便、密封性好，在制造业中具有极其广泛的应用。

焊接是通过加热或加压，或加热、加压两者并用，用或不用填充材料使两个分离的表面产生原子间扩散与结合作用，从而形成不可拆卸接头的材料成形方法。与其他连接形式不同，焊接不仅在宏观上形成了永久的结合，而且微观上也建立了材料之间的内在联系。

焊接方法种类繁多，新的方法仍在不断地涌现。根据焊接工艺特征，焊接方法可以分为熔化焊、压力焊和钎焊三大类。

(1) 熔化焊 熔化焊是不施加压力，仅通过加热使母材局部熔化来实现焊接的方法，需要一种或多种能量密度足够高的热源来实现其加热过程，焊接接头要经历复杂的冶金过程。根据焊接热源的不同，熔化焊可以分为气焊、电渣焊、电弧焊和高能密度焊。其中电弧焊又可分为焊条电弧焊（手工电弧焊）、埋弧焊、熔化极氩弧焊、钨极氩弧焊、CO₂ 气体保护焊、等离子弧焊等；高能密度焊分为电子束焊和激光焊。

(2) 压力焊 压力焊是指在焊接过程中对焊件施加压力（加热或不加热）以完成材料连接的方法。压力焊的种类很多，有电阻焊、摩擦焊、扩散焊、高频感应焊、超声波焊、爆炸焊和冷压焊等。近年来，又出现了搅拌摩擦焊和激光-搅拌摩擦焊等新型复合焊接工艺。

(3) 钎焊 钎焊是利用比被焊材料熔点低的金属或合金作钎料，通过加热使钎料熔化来润湿被焊材料表面，通过液相与固相之间的相互扩散而实现连接。根据钎料熔点的高低，钎焊分为硬钎焊（熔点高于 450℃）和软钎焊（熔点低于 450℃）；根据钎焊的热源和保护气体的不同，钎焊可以分为火焰钎焊、感应钎焊、炉中钎焊、电阻钎焊等。

焊接成形技术的主要特点如下。

(1) 适应性好 种类繁多的焊接方法几乎可以焊接所有的金属材料及部分非金属材料，适用范围广。焊接结构不受外形尺寸的限制，可以制造不同尺寸和形状的工程结构。除此之外，焊接技术还可以根据结构服役及设计的需要，将不同材料或同种材料不同级别、不同厚度的构件连接在一起，使焊接结构不同部分或不同位置具备不同的性能。

(2) 连接性能好 焊接结构具有良好的力学性能，能耐高温、低温，具有良好的密封性、导电性、耐腐蚀性及耐磨性等，可以达到与母材相当的力学性能和其他相应的特殊性能。

(3) 节省材料，结构重量轻 与其他加工技术相比，焊接结构可以方便地制成空心结构或封闭结构，质量较轻，一般比铆接节省金属材料10%~20%。

(4) 工艺简化，可以制造复杂的大型结构 由于焊接的方法种类多且工艺灵活，对大型复杂结构可以化大为小，化复杂为简单，然后通过装配的方法以小拼大、以简单成复杂来制造工程结构，生产周期短。许多结构都可以以铸-焊、锻-焊形式组合来简化加工工艺。

(5) 生产效率高，易于实现机械化和自动化。

综上所述，焊接成形工艺具有许多优点；在生产加工过程中具有不可替代的作用。但是由于大部分焊接过程是在快速加热和冷却的热作用下完成的，焊接接头的局部位置将经历复杂的化学冶金和物理冶金过程，同时由于受局部拘束应力的作用，焊接接头易产生偏析、夹杂、气孔、裂纹、脆化、变形等缺陷。另外焊接结构是不可拆卸的，不便于更换修理。因此这些不足之处还有待于进一步研究和完善。

0.3 材料塑性成形技术

塑性成形又称为塑性加工、压力加工，是材料成形的的基本方法之一，它是利用材料（以金属材料为主）的塑性变形能力，使金属在外力作用下成形为所需形状、尺寸和性能的一种压力加工方法。根据加工时金属受力和变形特点的不同，塑性成形可分为体积成形（如锻造、轧制、挤压、拉拔等）和板料成形（如冲裁、弯曲、拉深、翻边、胀形等）两类；根据加工温度的不同，塑性成形可分为冷加工和热加工两类。

同其他材料成形工艺相比，塑性成形技术具有以下特点。

① 金属材料经过一定的塑性变形以后，材料中原始的粗大树枝晶组织被破碎，原始基体组织晶粒被破碎或形态发生改变，孔隙、疏松等材料缺陷被压实，使得材料致密性提高，导致塑性成形产品的组织和性能得到较大的改善。例如，连杆、曲轴等承受载荷较大的关键传动部件一般都通过塑性成形工艺制备。

② 塑性成形工艺主要通过材料的塑性变形实现体积转移，而不是部分切除多余部分的体积，因此，可有效提高材料利用率并使材料流线合理分布，这也进一步提高了产品的力学性能。

③ 采用塑性成形工艺生产的产品可以达到较高的精度，从而实现了少切削甚至无切削，降低了加工成本。

④ 塑性成形工艺可实现较高的生产效率，并且易于实现自动化、机械化。

⑤ 塑性成形工艺的应用范围广泛，特别适合薄壁零部件，例如汽车覆盖件的生产。

由于具有以上优点，塑性成形工艺在制造业中得到了大量应用，特别在交通运输、航空航天、家用电器等领域应用更为广泛。但其局限性在于不适合复合形状或脆性材料产品的加工，且投资大、有一定程度的污染。

在塑性成形技术的研究过程中，塑性变形体内部应力场和应变场的确定、材料对塑性变形的适应能力以及塑性精密成形的途径等都是需要着重解决的主要问题。近年来，塑性成形技术

的发展主要体现在以下三个方面。

(1) 体成形技术的发展 以锻造为例,在自由锻技术方面,通过提高钢坯冶金质量、改进锻造工艺、采用程控联动快锻法等技术措施,大型锻件质量得到提高;在模锻技术方面,精密模锻工艺的发展、模锻过程计算机模拟技术的提高、模具 CAD/CAE/CAM 技术的推广应用以及模锻设备的更新等使得模锻工艺适用范围不断扩大,模锻件精度不断提高。

(2) 板料成形技术的发展 高速压力机、多工位压力机以及冲压自动线等的出现使得大批量板料成形向自动化、高速化方向发展,同时,小批量板料成形向简易化、通用化方向发展;此外,板料成形过程的 CAD/CAE/CAM 技术也得到了广泛应用,使得成形精度不断提高、成本降低。

(3) 特种成形技术的发展 例如超塑性成形、粉末冶金锻造成形、液态锻模、无模渐进成形等。

0.4 粉末成形技术

粉末冶金是制取金属粉末并采用成形和烧结工艺将金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)制成制品的工艺技术。该工艺的主要工序是:①制备原料粉末(纯金属粉末、合金粉末、金属与陶瓷粉末的混合物);②将原料粉末通过成形工艺制成所需形状的坯块;③将坯料加热到一定温度进行烧结,使制品具有最终的物理、化学与力学性能。

粉末冶金技术的历史很悠久,早在公元前 3000 年,就已经开始了铁粉的使用。到了 18 世纪,粉末冶金技术才开始得到真正有价值的应用。近年来,粉末冶金技术已得到越来越广泛的应用,从普通机械制造到精密仪器;从小的五金件到大型的机械;从电子工艺到电机制造等。可以说,现在几乎没有一个工业部门不在使用粉末冶金材料或者制品,这是由粉末冶金本身的特点所决定的:①粉末冶金在生产零部件时成本低;②有些要求独特性能或结构的部件只能由粉末冶金方法来实现;③有些材料用其他工艺制取时非常困难。该工艺的不足之处是粉末成本较高,制品的大小和形状受到一定的限制,烧结件的韧性较差等。但是,随着新工艺、新技术、新材料的发展和基础理论研究的深入,粉末冶金必将呈现出一个崭新的局面。

0.5 本课程的性质与任务

《材料成形原理》是“材料成型及控制工程”专业的核心专业基础理论课。本课程为后续的《材料成形工艺》、《铸造合金及熔炼》、《电弧焊与电渣焊》、《材料的焊接》、《冲压工艺学》、《模具设计》等课程提供了理论基础。

本课程是以“材料成形原理”为主线,分为“液态金属的凝固”、“材料连接成形基础”、“材料成形过程中缺陷的形成与控制”、“金属塑性成形力学原理”和“粉末成形原理”五个部分,力图融合近代材料成形技术中共同的物理现象、基本原理并突出各种成形技术的特性。

本课程的主要任务是分析材料成形过程的基本规律及内在联系;阐明液态金属的结构、性质,凝固过程中的传输,液态金属结晶的基本规律,铸件结晶组织的形成及偏析、缩孔与缩松、热裂、气孔等缺陷的形成机理、影响因素;探讨热作用下材料成形过程中的化学冶金特点、组织的转变规律以及对材料成形后的质量进行控制的方法和手段;从力学角度剖析金属塑性成形的本质,阐明金属塑性变形的力学原理及其数值分析方法;阐明金属粉末和粉末冶金材料的制备工艺过程,探讨粉末成形机制和烧结过程的热力学基础。

通过授课、实验等教学环节,使学生对各种材料成形过程的实质有深入的理解,并能从理论的高度认识和分析材料成形过程所产生的一系列实际问题,提出解决途径,为学习后续课

程，从事工程技术工作和科学研究工作打下坚实的专业理论基础。

0.6 本课程与其他课程的联系与分工

本课程的理论基础是《材料科学基础》、《物理化学》、《工程力学》、《理论力学》等，其重点在于阐述成形技术的理论基础、基本原理，而不涉及具体的成形工艺方法，具体成形工艺方法则以本课程为理论基础在后续《材料成形工艺》、《铸造合金及熔炼》、《电弧焊与电渣焊》、《材料的焊接》、《冲压工艺学》、《模具设计》等课程中讲授。

第一篇 液态金属的凝固

第1章 液态金属的结构与性质

液态成形是将金属熔化，成为具有良好流动性的液态，在重力场或其他力（压力、离心力、电磁力等）作用下充满铸型，经凝固和冷却成为具有铸型型腔形状的制品，所铸出的金属制品称为铸件。液态金属在冷却和凝固过程中除与铸型发生作用外，还要进行结晶和晶体的长大、溶质的传输、体积的收缩以及热的传导等，都与金属结构及其物理性质有关。因此，了解液态金属的结构和性质，是控制铸件形成过程的必要基础。

1.1 固态金属的加热、膨胀及熔化

1.1.1 原子间作用力的电子理论

金属中的原子主要靠金属键结合。原子中不是所有电子在决定固体金属的强度、硬度等特性的相互作用中都起同样作用的。形成原子满壳层的内部原子实质上没有影响，只是外面的价电子在金属键中起主要作用。金属键的理论模型有经典电子理论和金属的分子轨道模型（即能带理论）。

(1) 经典电子理论 1916年，荷兰理论物理学家洛仑兹（H. A. Lorentz）提出金属“自由电子理论”模型。认为在金属晶体中金属原子失去其价电子成为阳离子，阳离子如刚性球体排列在晶体中，电离下来的电子可在整个晶体范围内在阳离子堆积的空隙中“自由”地运行，称为自由电子。金属阳离子之间固然相互排斥，但在晶体中自由运行的电子把所有的金属阳离子吸引在一起，“胶合”成金属晶体，这种作用称为金属键。

从自由电子理论可以看出，金属键没有方向性和饱和性，金属键是在一块晶体的整个范围内起作用。由于金属键没有方向性，原子排列方式简单，重复周期短（阳离子堆积得很紧密），因此在两层阳离子之间比较容易产生滑动，在滑动过程中自由电子的流动性帮助克服势垒障碍。滑动过程中，各层之间始终保持着金属键的作用，金属虽然发生了形变，但不至于断裂。自由电子的存在使金属具有良好的延展性、导电性和导热性。

(2) 能带理论 能带理论把任何一块金属晶体都可看作一个大分子，然后应用分子轨道理论来描述金属晶体内电子的运动状态。认为晶体中的电子是在整个晶体内运动的共有化电子，并且共有化电子是在晶体周期性的势场中运动，在金属中存在着一组连续或部分连续的“自由”电子能级。把由 n 条能级相同的原子轨道组成能量几乎连续的 n 条分子轨道总称为能带，由 $2s$ 原子轨道组成的能带叫做 $2s$ 能带。

按照组合能带的原子轨道能级以及电子在能带中分布的不同，有满带、导带和禁带等多种能带。充满电子的低能量能带叫做满带；未充满电子的高能量能带叫做导带，例如金属锂的 $2s$ 能带就是导带；在金属晶体能带的带隙中电子不能停留，带隙是电子的禁区，所以又叫做禁带。

能带理论可以用来阐明金属的一些物理性质。在外加电场作用下，金属导体内导带中的电

子在能带中做定向运动，形成电流，所以金属能够导电。光照时导带中的电子可以吸收光能跃迁到能量较高的能带上，当电子跃回时把吸收的能量又发射出来，使金属具有金属光泽。局部加热时，电子运动和核的振动可以传热，使金属具有导热性。受机械力作用时，原子在导带中自由电子的润滑下可以相互滑动，而能带并不因此被破坏，故金属具有良好的延展性。

1.1.2 金属的加热膨胀

物质是由原子构成的，原子之间存在着相互作用力，即库仑引力和库仑斥力，如图 1-1 所示。当原子间的距离为 R_0 时，原子受到的引力与斥力相等，处于平衡状态，而向左和向右运动都会受到一个指向平衡位置的力的作用。于是原子在平衡位置附近做简谐振动，维持晶体的固定结构。当温度升高时，原子振动能量增加，振动频率和振幅增大。以双原子模型为例，假设左边的原子被固定不动而右边的原子是自由的，则随着温度的升高，原子间距将由 $R_0 \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4$ ，原子的能量也不断升高，由 $W_0 \rightarrow W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow W_4$ ，即产生膨胀，如图 1-2 所示。显然，原子在平衡位置时，能量最低；而两边时能量较高，这称为势垒。势垒的最大值为 Q ，称为激活能（也称结合能或键能）。势垒之间称为势阱。原子受热时，若获得的动能大于激活能 Q ，原子就能越过原来的势垒进入另一个势阱。这样，原子处于新的平衡位置，即从一个晶格常数变成另一个晶格常数。晶体比原先尺寸增大，即晶体受热而膨胀。

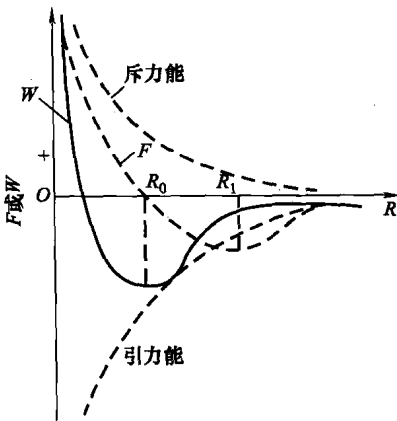


图 1-1 原子间的作用力

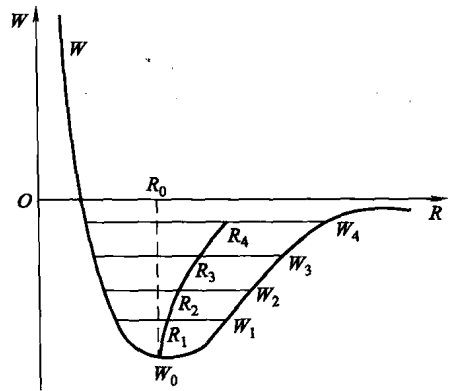


图 1-2 加热时原子间距和原子势垒的变化

1.1.3 金属的熔化

若对晶体进一步加热，则达到激活能值的原子数量也进一步增加。首先，在晶界处的原子跨越势垒而处于激活状态；当这些原子的数量达到某一数量值时，以至于一些原子能脱离晶粒的表面，向邻近的晶粒跳跃，导致原有晶粒失去固定的形状与尺寸。晶粒间可出现相对流动，称为晶界流动。此时，金属处于熔化状态。金属被进一步加热，其温度不会进一步升高，而是晶粒表面原子跳跃更频繁。晶粒进一步瓦解成小的原子团簇和游离原子，形成时而集中、时而分散的原子团簇、游离原子和空穴。此时，金属从固态转变为液态，金属由固态变成液态时体积膨胀 $3\% \sim 5\%$ 。而且，金属的其他性质，如电阻、黏性也会发生突变。金属由固态变成液态的过程中，在完全熔化前温度维持不变，这时的温度称为金属的熔点。金属在熔点温度的固态变为同温度的液态时，要吸收大量的热量，称为熔化潜热。实验证明，金属的熔化是从晶界开始的。

固态金属的加热熔化完全符合热力学条件。外界提供的热能，除因原子间距增大、体积膨