

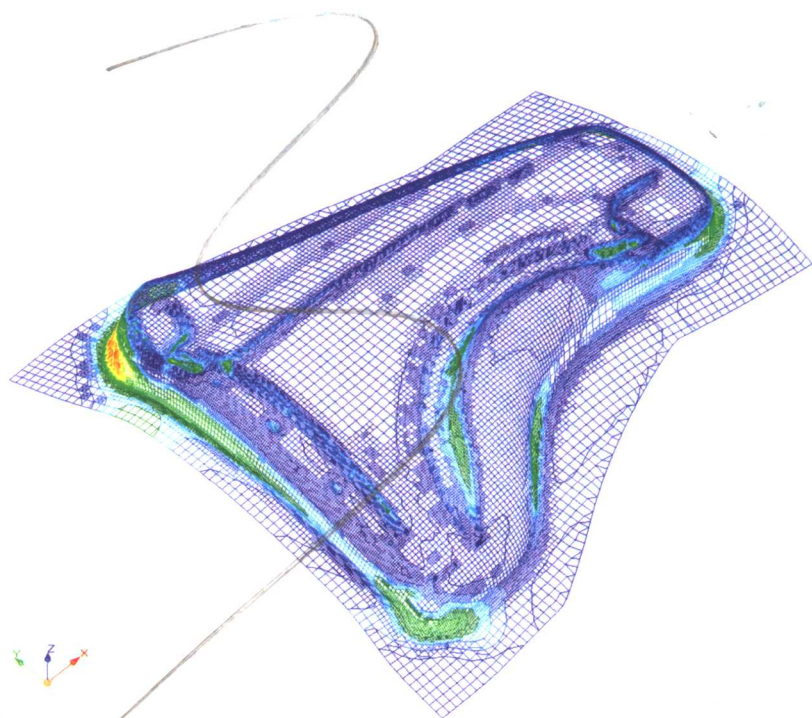


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第2版

材料成形原理

吴树森 柳玉起 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TB3/138

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料成形原理

第2版

主编	吴树森	柳玉起	
参编	蔡启舟	魏伯康	余圣甫
	熊建钢	周华民	
主审	熊守美	华林	

机械工业出版社

本教材是“材料成形及控制工程”和“材料加工工程”专业的理论基础教材，列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本教材包含主要成形方法——液态成形、塑性成形、焊接成形、塑料注射成型及粉末成形的基本原理方面的内容，同时引入了现代有关的新成果。学生学完本课程后，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技术奠定理论和实践基础。

本教材可以作为普通高等学校材料成形及控制工程专业、材料加工工程专业和机械类本科生教材，也可作为有关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/吴树森, 柳玉起主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-09113-4

I. 材… II. ①吴…②柳… 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 (2007) 第 206431 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: 冯春生

责任编辑: 董连仁 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 王伟光 责任印制: 李妍

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2008 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21 印张·516 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-09113-4

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379715

封面防伪标均为盗版

第2版前言

本教材列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是为适应教学改革需要，为材料成形及控制工程、材料加工工程专业编写的。“材料成形原理”是本专业的一门技术基础课程，在本专业的教学过程中具有十分重要的地位。

在编写本书的过程中，从培养学生成为专业知识面宽、基础扎实的人才目标出发，体现以下的编写思路及特点：以材料成形工艺的理论基础为主线，不叙述具体的成形工艺及方法，而根据成形加工过程中材料所经历的状态，分为液态凝固成形、固态塑性成形、连接成形、塑料注射成型及粉末成形等几类，讨论材料在成形过程中的组织结构、性能、形状随外在条件的不同而变化的规律。由于金属材料仍然是使用量最大的材料之一，所以本教材以金属的成形原理为主，兼顾其他种类材料的成形，如陶瓷及塑料的成形原理。同时，编写中引入了近年的一些成形新技术。

本课程着重运用所学的物理、化学等基础理论，以及传热学、流体力学等专业基础理论知识来阐明液态成形、塑性成形、连接成形和粉末成形等基本材料成形技术的内在规律和物理本质，突出共性，同时也兼顾个性。在材料的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，因此《材料成形原理》的内容主要涉及热量传输、动量传输、质量传输，以及物理冶金、化学冶金、力学冶金等基础理论和专门知识，并阐述这些现象的本质，揭示变化的规律。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，为研究新型的材料成形技术，开发新型材料，以及提高成形产品质量奠定坚实的理论基础和实际知识。

全书分四篇共16章。第一篇液态成形理论基础，系统地讲述了液态金属的结构和性质、液态成形中的流动与传热原理、液态金属的凝固理论、铸件凝固组织的控制及缺陷的防止等。第二篇连接成形理论基础，在讲述焊缝及其热影响区的组织及性能的基础上，叙述了与多种成形工艺密切相关的化学冶金原理、冶金缺陷的产生机理及防止措施，以及特种连接成形原理及方法。第三篇金属塑性加工力学基础，系统地讲述了应力应变理论、屈服准则、本构方程及塑性成形解析方法。第四篇塑料成型及粉末成形的理论基础，着重讲述了塑料的基本性质、塑料的流动充型特征、塑料制品中的取向、残余应力及缺陷，以及粉末的特性、模压成形及注射成形、粉末烧结过程原理。

本书由华中科技大学吴树森、柳玉起主编，由吴树森进行全书的统稿。特别说明的是，本书是华中科技大学等高校编写，陈平昌、朱六妹、李赞主编的《材料成形原理》的修订版。新版的编写分工如下：绪论，第一、二、十六章，第四章的第四、五节由吴树森编写；第三章及第四章的一、二、三节由蔡启舟编写；第五、六章由魏伯康编写；

第七、九章由余圣甫编写；第八、十章由熊建钢编写；第十一~十四章由柳玉起编写；第十五章由周华民编写。

本书由清华大学熊守美教授、武汉理工大学华林教授主审。

由于编者的水平所限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正！

编者
于武汉

目 录

第 2 版前言

绪论 1

一、材料成形的重要意义及主要方法 1

二、材料成形原理的研究对象及其发展

概况 2

三、本课程的任务 6

第一篇 液态成形理论基础

第一章 液态金属的结构和性质 8

第一节 材料的固液转变 8

第二节 液态金属的结构与分析 11

一、液态金属的结构 11

二、液态金属结构的 X 射线衍射分析 12

第三节 液态金属的性质 13

一、液态金属的粘度 13

二、表面张力 15

第四节 半固态金属的流变性及其表现

粘度 20

习题 22

第二章 液态成形中的流动与传热 23

第一节 液体金属的流动性与充型能力 23

一、流动性与充型能力的基本概念 23

二、液态金属的停止流动机理 23

三、液态金属充型能力的计算 24

四、影响充型能力的因素及促进措施 26

第二节 凝固过程中的液体流动 29

一、凝固过程中液相区的液体流动 29

二、液体金属在枝晶间的流动 31

第三节 凝固过程中的热量传输 31

一、铸件凝固传热的数学模型 31

二、凝固潜热的处理 33

三、铸件凝固温度场的测量 34

第四节 铸件的凝固时间 36

一、理论算法 36

二、经验算法——平方根定律 37

习题 38

第三章 液态金属的凝固形核及生长

方式 39

第一节 凝固的热力学条件 39

第二节 均质形核与异质形核 40

一、均质形核 41

二、均质形核速率 41

三、异质形核 42

四、异质形核速率 44

第三节 纯金属晶体的长大方式 45

一、晶体宏观长大方式 45

二、固-液界面的微观结构 46

三、晶体的生长机理及生长速率 49

习题 51

第四章 单相合金与多相合金的凝固 52

第一节 单相合金的凝固 52

一、固-液界面前沿的溶质再分配现象 52

二、平衡凝固时的溶质再分配 53

三、近平衡凝固时的溶质再分配 54

四、成分过冷 59

五、“成分过冷”对单相合金凝固过程的影响 62

第二节 共晶合金的凝固 66

一、共晶组织的特点和共晶合金的分类 66

二、共晶合金的结晶方式 67

三、规则共晶凝固 69

四、非规则共晶凝固 72

第三节 偏晶合金与包晶合金的凝固 74

一、偏晶合金的凝固 74

二、包晶合金的凝固 76

第四节 对流对凝固组织的影响及半固态

金属的凝固 77

一、对流对凝固组织的影响 77

二、金属的半固态非枝晶组织与凝固机理 77

第五节 金属基复合材料的凝固 80

一、金属基人工复合材料的凝固	81	二、宏观偏析	115
二、自生复合材料的凝固	83	第六节 变形与裂纹	118
习题	86	一、铸件应力的基本概念	118
第五章 铸件凝固组织的形成与控制	87	二、铸件的变形和冷裂	118
第一节 铸件宏观凝固组织的特征及形成		三、热裂	120
机理	87	习题	121
一、铸件宏观凝固组织的特征	87	第六章 特殊条件下的凝固	123
二、铸件宏观凝固组织的形成机理	88	第一节 快速凝固	123
第二节 铸件宏观凝固组织的控制	91	一、快速凝固基本原理	123
一、铸件宏观组织对铸件性能的影响	91	二、急冷凝固技术及特点	123
二、铸件宏观组织的控制途径和措施	91	三、快速凝固晶态合金的组织 and 性能	
第三节 气孔与夹杂的形成机理及控制	95	特征	126
一、气孔	95	四、快速凝固非晶态材料的性能特征	126
二、夹杂物	100	第二节 定向凝固	127
第四节 缩孔与缩松的形成原理	104	一、定向凝固工艺参数	127
一、金属的收缩	104	二、常用定向凝固方法	129
二、缩孔与缩松的分类及特征	107	三、定向凝固技术的应用	129
三、缩孔与缩松的形成机理	108	第三节 非重力凝固	132
四、影响缩孔与缩松的因素及防止措施	111	一、微重力凝固	132
第五节 化学成分의 偏析	113	二、超重力凝固	134
一、微观偏析	114	习题	135
第二篇 连接成形理论基础			
第七章 焊缝及其热影响区的组织和性能	136	二、连接成形的冶金反应特点	158
第一节 焊接及其冶金特点	136	第二节 液态金属与气体界面的反应	160
一、焊接	136	一、焊接区气体的来源	160
二、熔焊焊接接头的形成及其冶金		二、液态金属与气体的反应	162
过程	137	第三节 液态金属与熔渣的反应	169
三、焊接温度场	139	一、熔渣	169
第二节 焊缝金属的组织与性能	142	二、熔渣的成分和分类	169
一、焊接熔池的结晶	142	三、熔渣的物理性能	171
二、焊缝金属的组织	149	四、活性熔渣对金属的氧化	173
三、焊缝金属性能的控制	152	五、脱氧处理	174
第三节 焊接热影响区的组织与性能	152	六、金属中硫和磷的控制	176
一、焊接热影响区的热循环特点	152	第四节 合金化	178
二、焊接热影响区的组织转变特点	153	一、合金化的目的	178
三、焊接热影响区的组织与性能变化	154	二、合金化的方式	178
习题	157	三、合金化的效果	178
第八章 成形过程的冶金反应原理	158	第五节 工艺条件对冶金反应的影响	179
第一节 成形工艺中的冶金反应特点	158	习题	181
一、液态成形的冶金反应特点	158	第九章 成形缺陷的产生机理及防止	
		措施	182

第一节 内应力	182	第五节 焊缝中的化学成分不均匀性	215
一、内应力的形成	182	习题	216
二、残余应力的分布	184	第十章 特种连接成形原理与方法	217
三、减小或消除焊接残余应力的途径	187	第一节 超塑成形/扩散连接	217
第二节 焊接变形	188	一、新型材料的超塑成形	218
一、焊接变形的形式	188	二、金属超塑成形/扩散连接	219
二、影响变形的因素	188	三、相变超塑性在焊接中的应用	221
三、防止或减少焊接变形的的方法	189	第二节 扩散连接技术	222
第三节 裂纹	192	一、扩散连接原理及特点	222
一、焊接裂纹的分类	193	二、材料的扩散连接工艺	223
二、热裂纹	194	第三节 摩擦焊技术	225
三、冷裂纹	202	第四节 微连接技术	226
第四节 焊缝中的气孔与夹杂物	210	一、倒装芯片法	227
一、焊缝中的气孔	210	二、印制电路板组装中的微连接技术	228
二、焊缝中的夹杂物	214	习题	232

第三篇 金属塑性加工力学基础

第十一章 应力与应变理论	234	二、屈服准则的一般形式	264
第一节 应力空间	234	三、屈服表面	264
一、应力的概念	234	四、Tresca 屈服准则	265
二、点的应力状态	236	五、Mises 屈服准则	266
三、张量和应力张量	238	六、屈服准则的几何表示	268
四、主应力、应力张量不变量和应力椭 球面	240	七、两个屈服准则的比较	270
五、主切应力和最大切应力	243	八、应力硬化材料的屈服准则	273
六、应力偏张量和应力球张量	245	习题	275
七、八面体应力和等效应力	247	第十三章 本构方程	276
八、应力莫尔 (Mohr) 圆	248	第一节 塑性变形时应力应变关系的 特点	276
九、应力平衡微分方程	250	一、应力-应变关系的特点	276
第二节 应变空间	252	二、等效应力-等效应变曲线	276
一、应变的概念	253	三、等效应力-等效应变曲线的简化 模型	277
二、应变与位移的关系 (小变形几何 方程)	254	四、弹性应力应变关系	278
三、应变张量分析	256	第二节 塑性变形的增量理论	278
四、应变协调方程	257	一、Levy-Mises 理论	279
五、应变增量张量和应变速率张量	259	二、Prandtl-Reuss 理论	280
习题	260	第三节 塑性变形的全量理论	280
第十二章 塑性与屈服准则	262	习题	281
第一节 塑性	262	第十四章 金属塑性成形解析方法	283
一、塑性的基本概念	262	第一节 塑性成形问题的解与简化	283
二、塑性指标	262	一、塑性成形问题解的概念	283
第二节 屈服准则	263	二、塑性成形问题的简化	283
一、屈服准则的一般概念	263	三、边界条件	285

第二节 主应力法	286	压力	287
一、主应力法的概念	286	三、圆柱体镦粗问题	288
二、长矩形板镦粗时的变形力和单位流动		习题	288

第四篇 塑料成型及粉末成形的理论基础

第十五章 塑料成形的理论基础	290	四、注射速度的影响	305
第一节 塑料的基本性质	290	五、潜流效应	305
一、塑料的结构	290	六、熔接线与熔合线	306
二、塑料的基本物理性质	292	七、凹痕	306
三、塑料的基本力学性质	293	八、热引起的不稳定流动	306
四、塑料的流变性	294	习题	307
五、聚合物熔体的粘性	294	第十六章 粉末材料成形原理	308
第二节 注射过程及塑料熔体在型腔中的流动	295	第一节 粉末的制备与特性	308
一、注射工艺过程	295	一、粉末的制备方法	308
二、塑料熔体在型腔中的流动	296	二、粉末的特性	309
第三节 注射制品中的取向	299	第二节 粉末模压成形及注射成形	311
第四节 注射制品中的残余应力	301	一、粉末的模压成形	311
一、流动残余应力	301	二、粉末注射成形	314
二、热残余应力	302	第三节 粉末烧结过程原理	315
第五节 塑料熔体的复杂流动现象与缺陷	303	一、粉末烧结的基本类型	316
一、翘曲	303	二、粉末烧结的扩散理论	316
二、过度充填	304	三、烧结工艺与质量	321
三、快车道效应	304	习题	323
		参考文献	324

绪 论

一、材料成形的重要意义及主要方法

1. 支撑起物质文明的材料成形

在谈到“人类的幸福是什么?”的话题时,虽然人们有各种各样不同的观点,但能够夸耀的物质文明是一个重要指标。在我们的周围聚集了许多物质文明的物品,即工业制品。在家中使用家用电器、家具或杂货,一旦外出汽车、火车、轮船以及飞机等交通运输手段为我们提供方便,电视、电话等信息传播手段已成为了我们生活中不可缺少的东西。此外,若到办公室或工厂这些地方去,可看到人们操纵电脑或办公机器进行工作,借助复杂的生产设备进行工业制品的制造。

支撑起这些物质文明的工业制品中,很显然通过材料成形方法制造的各种不同材料的零件是主要的构成部件。对于材料的使用,几乎都要赋予材料一定的形状。给材料赋予形状并形成所需要的功能,是制造业的根本。我们以生产、制造为生计,而且享受着作为制造业产生的结果的物质文明,过着丰富的生活。

2. 材料成形的主要方法

赋予材料一定形状的方法从大的方面可分为以下4种:

一种是除去加工法 (Materials Removal Process): 通过将块体材料的一部分去除掉,剩余的材料得到一定的形状。具有代表性的是使用机床通过刀具、磨具或放电进行加工,是制造业的主要加工方法之一。常用的加工工艺有切削、磨削、电火花、电解、束流(激光或等离子)、腐蚀等。

另一种是连接(或附加)加工法 (Materials Joining Process): 与除去加工相反,通常是将材料附着或连接等方法造出形状来。例如,焊接、粘结、熔射、电镀、电铸、涂覆、层积造形等,甚至螺栓连接组合成形也属此类。从某种意义上说,组合而成的物件都是附加加工的产物,不仅仅是机械制品,也包括土木施工或建筑方法得到的物品等。

再一种是变形加工法 (Materials Deformation Process): 通过改变材料的形状而造形的方法,使材料变形而赋予形状,一般是通过模具或工具对材料施加力,材料变形流入型腔而复制出相同形状部件的方法。例如,金属塑性加工。本方法在准备好型腔后就能够高效率地、大量地制造出较复杂形状的零件,成为机械制造业的基本方法,被广泛使用。

第四种是液态及粉末成形加工法 (Materials Forming Process): 通过将材料熔化、浇注成形,或粉末材料压制、烧结成形的方法。例如,铸造、注射成形和粉末冶金等。本方法在准备好铸型或型腔后能制造出复杂形状的零件,也是机械制造业的基本方法。

若采用直观的表达方法,材料或毛坯的制造方法的特征是,使材料沿着模样或型腔的形状产生变形而进行的形状复制方法。在实际的材料成形中,根据工业用材料的种类的不同,即金属或陶瓷或塑料,成形方法有很大的差别。此外,对液态、固体或是粉末状的不同形态的材料,其成形方法也不同。若将这些材料的制造方法根据材料的形态分类,可见表0-1。

作为主要工业材料的金属的成形加工方法,根据材料的形态不同,有液态铸造成形、块体锻造成形、板料压延成形、连接成形、粉末烧结成形等各种各样的方法。

对于塑料、橡胶或玻璃之类材料，虽然与金属相同的成形方法也适用，但它们的成形方法都考虑了这些材料特有的变形特性。对于陶瓷，由于其固体几乎都没有变形能力，且原料都是以粉状提供，除具有与金属粉末相同的模膛压缩成形方法外，通过添加各种赋予流动性的介质，从而具有表观变形能力，具有与铸造或锻造相似的成形方法。这种情况下，必须有烧结前的介质去除工序。

表 0-1 各种材料的制造方法

液态的流动成形（固化）	金属材料的铸造、压铸，液态树脂的注塑
固体与液体的中间态（粘性体的成形）	塑料的注射成型，金属的半固态成形，玻璃的成形
固体的塑性变形	块体材料的锻造，板材的压延加工
固体的连接成形	金属材料的焊接，有机及无机材料的粘结
粉末的成形（烧结）	型内压缩成形，含粘结剂的流动成形，陶瓷粉的浇注

二、材料成形原理的研究对象及其发展概况

如上所述，材料成形的工艺方法多种多样，不同的材料要用不同的成形加工方法，而且同样的材料制造不同的产品也可能要用不同的成形方法。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，分为液态凝固成形、固态塑性成形、连接成形、塑料注射成型及粉末烧结成形等几类，分析研究成形过程中材料的组织结构、性能、形状随外在条件的不同而变化的规律，阐述成形加工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发现的新问题、发展新的成形加工技术奠定理论基础。

下面简要介绍几类成形加工方法所涉及的基本问题及其发展概况

1. 液态凝固成形

液态凝固成形是将熔化的金属或合金在重力或其他外力的作用下注入铸型的型腔中，待其冷却凝固后获得与型腔形状相同的铸件的一种成形方法，这种成形方法通常又称为铸造。它是一个质量不变过程，其基本过程是熔炼、浇注和凝固。熔炼和凝固是两个相反的热过程。前者将固态物质熔化成液态，并使其获得一定的化学成分；而后者将熔融液体变为固态，使之成为具有一定形状和尺寸的铸件。铸件的形状和尺寸信息是由铸型提供的，而其性能是由熔炼过程所获得的化学成分及冷却过程的快慢确定的。

液态成形方法有几千年的发展历史，中国古代的青铜铸造曾取得过辉煌的成就。它之所以经久不衰，是因为它有着突出的适应性强的特点。它能铸出轻至几克，重达几百吨；薄至 0.2mm，厚达 1m 左右；小至几毫米，大到十几米；形状从简单到任意复杂；金属种类从黑色到有色，以至难熔合金的铸件。这样广泛的适应性是其他任何金属成形方法无可比拟的。而且，具体的液态成形工艺也分重力铸造、压力铸造、砂型铸造、金属型铸造等多种。图 0-1 是用现代压铸方法成形的汽车发动机缸体零件。

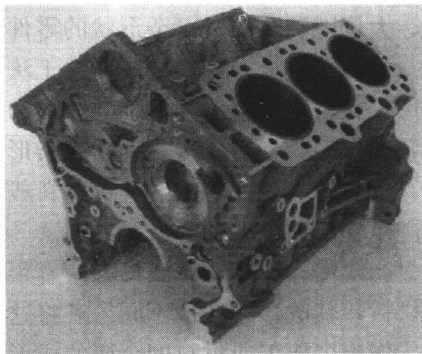


图 0-1 铝合金压铸的发动机缸体

液态凝固成形所研究的主要对象及基本问题主

要有:

(1) 凝固组织的形成与控制 金属的凝固组织包括相结构、晶粒的大小和形态等。铸件的凝固组织是在凝固过程中形成的,对铸件的物理性能和力学性能有着重大的影响。控制铸件的凝固组织是凝固成形中的一个基本问题,能得心应手地获得所要求的凝固组织是人们长期以来追求的目标之一。到目前为止,关于凝固组织的形成机理及其影响因素,人们已经进行了广泛深入的研究,且找到了许多有效的控制方法,如孕育处理、动态结晶、定向凝固等,但这还远远不够,要彻底解决这方面的问题,还有许多工作要做。

(2) 零件成形缺陷的防止与控制 铸造缺陷五花八门,种类繁多,既有内在缺陷与外观缺陷之分,又有宏观缺陷与微观缺陷之分。它们对铸件质量是一个严重的威胁,是造成废品、加大生产成本的主要原因。铸件缺陷的种类主要有缩孔、缩松、偏析、变形、气孔、夹杂、冷隔、夹砂等,它们的形成原因十分复杂。在这方面人们也做了许多深入细致的研究工作,建立了比较完善的理论。但在各种成形方法中,如何有效地控制铸造缺陷仍是一个重要的基本问题。

(3) 液态精密成形 随着科学技术的发展,许多制造领域对铸件尺寸精度和外观质量的要求越来越高。这也促进了精密铸造技术的迅猛发展,改变了铸造只能提供毛坯的传统观念,使毋需机加工的净成品或只需很少机加工的近净成品铸件应运而生。然而,铸件尺寸精度和表面粗糙度要受到液态成形方法和工艺中诸多因素的影响,其控制难度很大,这又阻碍着精密铸造技术的发展。

液态成形技术的近期发展主要体现在以下几个方面:

1) 凝固理论的发展。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。近十多年来,借助于金属学、物理化学和计算数学,从传热、传质和固液界面等诸方面进行了研究,使金属凝固理论有了很大的发展。这不仅使人们对在许多条件下的凝固现象和组织特征有了更深入的认识,而且促进了许多凝固技术和液态成形方法的建立、使用和发展。

2) 计算机技术的应用和发展。计算机技术在液态成形工艺中的应用,使技术水平大幅度提高,相关新技术不断涌现,使该领域步入了快速发展的轨道。计算机技术的应用主要体现在以下几个方面:一是凝固过程数值模拟技术,目前可以模拟液体金属充型过程的流动场、温度场以及应力场,正在向凝固过程的组织模拟方向发展;二是 CAD/CAM 技术的广泛应用;三是成形过程或成形设备运行的计算机控制。

3) 凝固技术的发展。所谓凝固技术就是控制凝固过程按照预定方向进行的技术,它是开发新材料和提高铸件质量的重要途径。凝固技术发展的典型例子是定向凝固技术、快速凝固技术和自生复合材料的制取。定向凝固技术的最新发展是制取单晶体铸件,最突出的应用就是生产单晶涡轮机叶片。这种单晶涡轮机叶片比一般定向凝固的柱状晶叶片具有更高的工作温度、抗热疲劳强度、抗蠕变强度和抗热腐蚀性能。快速凝固技术采用的冷却速度常高达 $10^4 \sim 10^9$ °C/s。这样的冷却条件可使材料具有很细的晶粒 ($< 0.1 \mu\text{m}$ 甚至达到纳米级),避免了偏析缺陷和高分散度的超细析出相,从而表现出高强度和高韧性。自生复合材料是用控制凝固过程(如定向凝固)的方法而获得的一种共晶合金或偏晶合金,其中的增强相与基体相均匀相间,定向排列,因而具有许多重要特性,如高强度、良好的高温性能和抗疲劳性能等。用这种方法人们已经制取了 Nb-NbC、Ta-TaC 共晶体自生复合材料,它们的强度高于 Nb 合金和 Ta 合金,抗蠕变性能更好。

2. 固态塑性成形

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。图 0-2 为通过热锻加工的曲轴毛坯。

尽管塑性成形方法多种多样，所要生产的零件毛坯种类繁多，其中仍存在以下一些共同的尚未很好解决的基本问题。

(1) 塑性变形体内应力场、应变场的确定

塑性成形需要输入能量，即对材料施加外力和做功。只有知道所需成形力和功的大小才能正确选用成形设备和设计成形模具，并且通过

对成形力影响因素的分析，为减小成形力和节约能耗提供依据。求解所需的成形力，从根本上说就是确定工件内部的应力场，因为应力场的确定自然包括与工模具接触表面处应力分布的确定，进而才能求得成形力及模壁的压力分布。材料在应力场作用下发生塑性变形时，内部还存在着位移场和应变场。将应变场和应力场结合起来，再利用必要的判据则可进一步预测工件内部产生缺陷的倾向和空洞愈合的可能性。然而，由于成形件形状的复杂性和多样性，真正准确地确定变形体内的应力场和应变场仍然还是一个尚未解决的基本问题。

(2) 材料对塑性变形的适应能力——塑性 材料的塑性是材料塑性成形的前提条件。材料的塑性除与材料的种类、成分、内部组织结构有关以外，还与外部变形条件——变形温度、变形速度和应力状态密切相关。在这方面人们已经做了很多的研究工作，基本掌握了塑性变形的物理本质和机理、塑性变形所引起的材料组织和性能变化以及在不同条件下材料的塑性行为，但还有很多问题尚未解决，需要继续研究和探索。

(3) 塑性精密成形 模具的制造精度以及工模具与被加工材料之间的相对运动精度对成形件的精度起着至关重要的作用。此外，材料在塑性变形的同时还有弹性变形和热胀冷缩，这些都会影响成形件的最终精度。

塑性成形技术的近期发展主要体现在以下几个方面：

1) 体积成形技术的发展。在模锻技术方面，越来越多的锤上模锻被压力机（曲柄压力机和螺旋压力机）取代，以适应机械化、自动化生产线的要求；精密模锻的发展使模锻件的精度不断提高；模锻过程的计算机模拟和模具的 CAD/CAM 技术不断进步。在自由锻技术方面，大型锻件的质量不断提高，主要的技术措施有：改进锻造工艺，如采用“中心压实法”，改进冶炼和浇注技术，提高钢锭的冶金质量，发展锻焊联合工艺，采用程控联动快锻法等。

2) 板料成形技术的发展。一是在大批量生产中向高速化、自动化方向发展。高速压力机，小型的行程次数已高达 2000~3000 次/min，中型的也有 600~800 次/min。这样一台高速压力机的生产率相当于 5~10 台普通压力机。多工位压力机增多，由多台压力机配上自动装料、送料、出件、传递翻转、检测、保护等辅助装置组成的冲压自动线已在汽车工业中得到广泛应用。二是在小批量生产中向简易化、通用化和万能化方向发展。三是工艺过程的模拟化和模具的 CAD/CAM 技术的广泛应用。四是成形件向精密化发展。

3) 特种成形技术的发展。这方面的技术主要有超塑性成形、粉末冶金锻造成形、无模

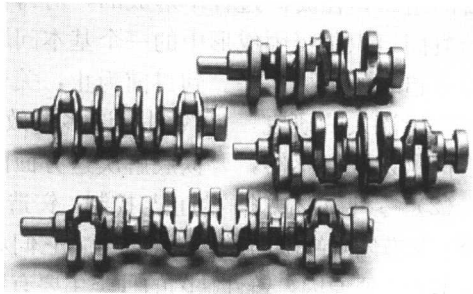


图 0-2 热锻加工的曲轴

渐进成形、液态模锻，以及材料—工艺—产品的一体化技术等。

3. 连接成形

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。

焊接成形方法多种多样，目前已有数十种，按照焊接成形过程特点，焊接成形可以分为三大类，即熔焊（被焊材料表面熔化）、压焊（被焊材料表面不熔化）、钎焊（被焊材料表面不熔化，填入其间的低熔点钎料熔化）。图 0-3 是将冲压等方法制造的金属零件通过焊接而组合成的轿车车体。

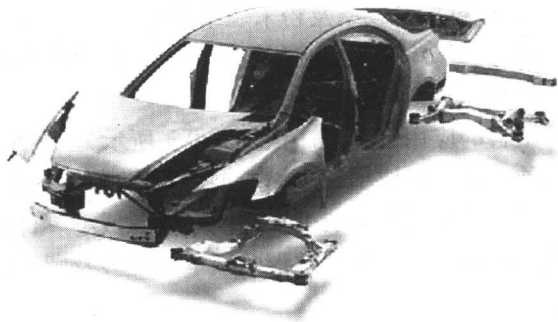


图 0-3 通过焊接方法组合成的汽车车体

各种连接成形方法都是为了适应生产的需要而发展起来的。随着科学技术的发展，新的连接方法还会不断出现，现有的方法也会不断改进。焊接成形所研究的主要对象及基本问题主要有：

(1) 焊接接头组织性能及其不均匀性 在熔焊过程中，由于熔池体积小，冷却快，其中的各种冶金反应极不平衡，原子扩散也极不充分，使形成的焊缝金属的化学成分和组织性能极不均匀；同时，在焊接热作用下，焊缝两侧不同位置的金属经历着不同的热循环，这就相当于进行了不同规范的热处理，使整个热影响区的组织和性能产生极不均匀的变化。这种成分、组织和性能的不均匀性，会对整个结构的强度和断裂行为产生显著的影响。

(2) 焊接残余应力和变形 由于焊接过程是一个局部的加热过程，因此焊件上的温度分布极不均匀，各部分的热胀冷缩不协调而互相妨碍，使焊接件内部在焊后存在很大的残余应力，引起结构变形，甚至开裂。影响焊接残余应力和变形的因素十分复杂，主要与焊接热输入、焊接参数、焊接结构的形状和尺寸以及拘束状态等有关。

(3) 焊接能量的输入方式 对于焊接成形，最重要的是要给被焊部位提供某种形式的能量，如加热使其熔化，或达到焊接温度，或发生塑性变形。除钎焊以外，几乎所有的焊接成形方法都是局部加热的。特别是熔焊，它是以集中的移动热源来加热和熔化焊件的，其热过程具有局部性、瞬时性、极高的温度梯度等特点，因此焊件上的温度分布是不均匀的、不稳定的。正因为如此，使得焊接过程分析变得相当复杂，伴随着不平衡的热过程，产生了一系列焊接所独有的问题，如不平衡的物理化学冶金过程、焊接应力与变形等。

(4) 焊接表面污染的清除和防止 两个被焊接的表面只有在不存在氧化和其他污染的情况下才能形成满意的焊接接头，而被焊材料表面在焊接之前往往存在着有机薄膜、氧化物和吸附的气体；在焊接高温下，被焊材料容易氧化或烧损。焊前如何彻底清除被焊材料表面的污染，在焊接过程如何有效地保护被焊材料不被氧化或烧损，这是各种焊接成形方法所面临的共同问题。

焊接成形技术的近期发展主要体现在以下几个方面：

1) 焊接结构的发展。现代对焊接结构的承载能力的要求越来越大，工作条件也越来越

苛刻,要求越来越严格。它们正向着大型化和高参数方向发展,例如核压力容器和 6100m 深海探测器就是典型的现代焊接结构的例子。核压力容器的壁厚已达 200mm 左右,深海探测器要承受海水巨大的压力。

2) 焊接结构材料及焊接工艺的发展。超高强度钢在现代焊接结构中的应用越来越广泛,如 18Ni 钢和 HT80 钢等。在工艺技术方面,以电子技术、信息技术和计算机技术的综合应用为标志的焊接机械化、自动化技术成为主要特点。

3) 特种焊接成形技术的发展。例如,20 世纪 90 年代开发出的搅拌摩擦焊技术,已成功用于航天器低温燃料箱等铝、镁、钛合金结构件的焊接等。

4. 塑料注射成型及粉末烧结成形

塑料 (Plastics) 及陶瓷 (Ceramics) 与金属材料 (Metallic Materials) 一起并称为三大结构材料。

塑料的应用已经很广泛。图 0-4 所示为塑料注射成型的手机框体。塑料的成型方法也有许多种,如注射成型、压缩成型、挤出成型、浇注成型等。应用最广泛的方法是注射成型,即利用注射成型机,装上有浇注系统及成型零件形状的模具,将熔融的塑料在压力作用下注入模具的型腔而成型。过程的基本原理涉及塑料的充型流变性、结晶过程与组织及性能的关系等。

粉末烧结成形,包括传统的金属粉末材料的烧结成形和新兴的结构陶瓷材料的粉末烧结成形,其成形加工方法十分相似。结构陶瓷材料也已广泛进入实际应用领域。图 0-5 所示为用氧化铝陶瓷做成的各种机械密封件。陶瓷原材料几乎都是粉体材料,因此其成形过程首先是将粉末成形为零件的形状,然后主要通过烧结的方法连成一体而成为零件。粉末成形的方法主要有冷压成形、热压成形、挤出成形、注射成形、注入成形等。陶瓷粉末的烧结过程与金属粉末冶金烧结相类似,所涉及的基本原理主要是物质的扩散、相变与再结晶等。

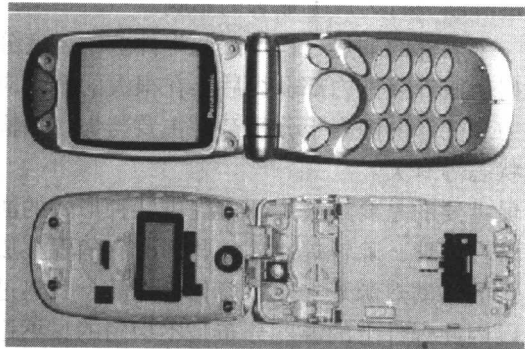


图 0-4 塑料注射成型的手机框体
(正面(上)、背面(下))

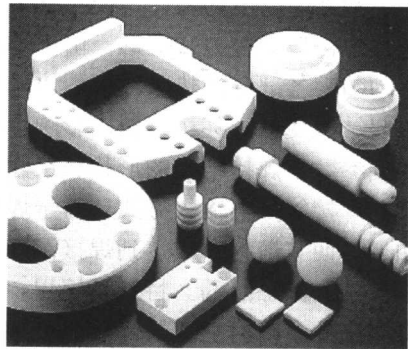


图 0-5 各种机械密封件(氧化铝陶瓷)

三、本课程的任务

“材料成形原理”(Principle of Materials Processing)课程是材料成形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、塑性成形、连接成形和粉末成形等基本材料成形技术的内在规律和

物理本质，突出共性，同时也兼顾个性。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。

本课程的先导课除一般的数理基础课程外，还应有工程材料学、传热学、流体力学、材料成形工艺基础等。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。

由于材料成形的工艺方法有许多种，不同的材料要用不同的成形加工方法，即使用同样的材料制造不同的产品也要用不同的成形加工方法。本课程不针对具体的成形工艺，而根据成形加工过程中材料所经历的状态，分为液态凝固成形、半固态成形、固态塑性成形、连接成形、塑料注射成型及粉末成形等几类，讨论材料在成形过程中的组织结构、性能、形状随外在条件不同而变化的规律。由于金属材料仍然是使用量最大的材料，本教材以金属的成形原理为主线，兼顾其他种类材料的成形。从前述内容也可知道，材料成形原理的内容涉及热量传输、动量传输、质量传输以及物理冶金、化学冶金、力学冶金等基础理论和专门知识。同时，在材料的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，本教材的内容就是要阐述这些现象的本质，揭示变化的规律。

第一篇 液态成形理论基础

第一章 液态金属的结构和性质

从宏观意义而言，凝固不过是一种相变过程，即物质从液态转变成固态的过程称为凝固 (Solidification)。金属的凝固是液态金属转变成固态金属的过程，因而液态金属的特性必然会影响凝固过程。因此，研究和了解液态金属的结构和性质，是分析和控制金属凝固过程的必要基础。

近代用原子论方法研究液态金属，并采用经典液体统计力学的各种理论探讨它，对液态金属结构有了进一步的认识，在一定范围和程度上能定量地描述液态金属的结构和性质。

第一节 材料的固液转变

一般而言，自然界的物质可以呈现出三种状态，即固态、液态和气态，如图 1-1 所示。从图可知，在这三种状态之间变化时都发生着相变，如升华、熔化、凝结等。凝固的相转变，可以认为是物质的各种相变中的一种。因此，凝固学可以说是相变学的部分内容。

相变并不只发生在固相、液相、气相三相之间，例如在固相中也存在相变，即同素异构转变，热处理就是应用这些相变而进行的。此外，在合金系中，液相内两相的分离也是相变。一个典型的例子是，纯铁具有几种结晶形态 (α 、 γ 、 δ 相)。很好地利用了这一固态相变的技术就是钢的淬火，以及不锈钢的固溶处理。此外，具有代表性的陶瓷 Al_2O_3 或 SiO_2 ，同样存在同素异构体。例如，后者的结晶系之一就是水晶，它被广泛应用于手表的振子或作为各种功能材料。

虽然图 1-1 中将气相—液相—固相三相同画出来了，但一般的物质气相 \rightleftharpoons 液相 \rightleftharpoons 固相之间相的转变，是根据温度的变化来决定相的变化的。但是，有的物质直接进行固相 \rightleftharpoons 气相的相转变，而不存在液相。这是由于压力参与了相变。例如，二氧化碳气体的固相——干冰，在 1atm° 下会直接汽化，但在室温下，在高压气瓶内是以液态二氧化碳的形态存在的。

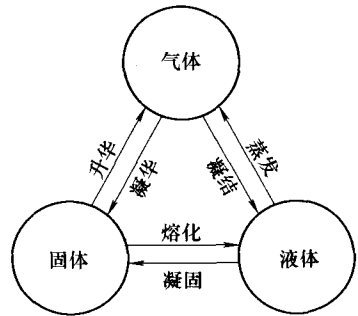


图 1-1 物质的三态及相转变

$^\circ$ atm 为标准大气压， $1\text{atm}=101\text{kPa}$ 。