



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学材料加工系列教材

# 材料加工工艺

Materials Processing  
Technology

主 编 黄天佑  
副主编 都 东 方 刚



清华大学出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学材料加工系列教材

材料加工工艺

Materials Processing  
Technology

主 编 黄天佑

副主编 都 东 方 刚

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材。全书共8章,介绍材料加工的一些主要工艺,包括液态金属成形(铸造)、金属塑性成形、连接成形(焊接)、金属的表面处理、粉末冶金、塑料成形、激光快速成形等。各章还附有参考书目和复习思考题。

本书可作为高等院校材料成形与控制工程、材料加工及制造等专业及相近专业学生的教材或参考书,也可以供有关工程技术人员学习、参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料加工工艺/黄天佑主编. —北京:清华大学出版社,2004.9  
(普通高等教育“十五”国家级规划教材 清华大学材料加工系列教材)  
ISBN 7-302-09649-X

I. 材… II. 黄… III. 工程材料—加工工艺—高等学校—教材 IV. TB30

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第098696号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦  
<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084  
社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 宋成斌

文稿编辑: 曾 洁

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印 张: 30 字 数: 587千字

版 次: 2004年9月第1版 2004年9月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-09649-X/TB·75

印 数: 1~4000

定 价: 39.00元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

# 序言

材料加工技术是制造业的关键共性技术之一,也是生产高质量产品的基础。材料加工工艺在制造业及国民经济中具有十分重要的作用和地位,从交通运输、通信到航空、航天,从生活用品到军事国防,都离不开材料加工技术。

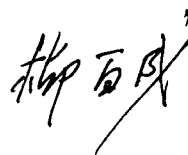
一方面,铸造、焊接、锻压、金属材料热处理等材料成形加工技术仍然是今天制造业,特别是装备制造业的主要成形加工技术,而且在相当长的时间里是不可能被其他技术完全替代的;另一方面,由于这些加工技术的不断进步,并和信息技术等高新技术融合、渗透,赋予这些成形加工技术新的内涵。同时,由于新材料及高新技术的出现,新一代成形加工工艺也日新月异。

在 21 世纪,以“精确成形”及“短流程”为代表的材料成形加工技术将得到快速发展。从宏观到微观的多尺度模拟仿真是材料成形加工计算机集成制造的主要内容,而高性能、高保真、高效率则是基于知识的材料成形加工工艺模拟仿真的目标。以“集成的产品与工艺设计”思想为核心的并行工程已成为产品及相关制造过程集成设计的系统方法。以计算机模拟仿真与虚拟现实技术为手段的敏捷制造技术将继续计算机网络技术、知识库技术,成为先进制造技术的重要支撑环境。网络化、智能化是 21 世纪产品与制造过程设计的趋势,而绿色制造将是 21 世纪材料成形加工技术的新的发展方向。

清华大学是全国高校中最早按“材料加工工程”二级学科对原有的铸造、焊接、锻压、金属材料及热处理几个专业的教学内容、课程设置进行合并与重组的学校之一。本书作者经过几年的辛勤努力,编写出版的这本教材重点突出,既有一定的深

## II 材料加工工艺

度,同时也有一定的广度,反映了当前材料成形加工领域的最新技术进展。相信《材料加工工艺》等系列教材的出版将有助于全国高等院校相关专业教学改革的一步深化,希望这本教材在今后的使用中不断得到改进和完善,成为一本精品教材。



中国工程院院士

2004年4月1日

# 前言

材料加工在机械制造业中占有重要地位,是制造业中各行业的基础,在今天计算机、信息技术产业飞速发展的时代,它仍然在国民经济中起主导作用。材料加工所包含的范围很广,主要有液态金属成形、金属塑性成形、焊接、金属的表面处理、粉末冶金成形、激光快速成形等,而且不断有新的工艺出现。材料加工是一门涉及材料、物理和化学、力学、机械、电子、信息等许多学科交叉的学科。

在我国的高等学校里,从 20 世纪 50 年代开始按照前苏联的模式,将材料加工类的专业分为铸造、锻压、焊接和金属学及热处理等几个窄专业。随着科学技术的迅猛发展,各学科间的渗透和交叉越来越多,专业面过窄的情况已不适应科学技术的发展。按照教育部 1999 年关于专业设置的调整意见,已将原来的铸造、锻压、焊接、热处理 4 个专业合并为“材料加工工程”专业(二级学科),清华大学机械工程系原有的 4 个专业也合并为“机械工程及自动控制”专业。从 1999 年秋季开始对全系本科生开设“材料加工工艺”和“材料加工原理”两门必修主干课,并编写了相应的教材。

我国绝大部分有工科专业的高等学校也先后根据教育部的意见将原来材料加工类的窄专业合并为“材料加工成形及控制工程”一个专业,一些出版社也出版了相应的教材。在国外,例如美国、德国、日本,在材料和机械类工科学学校里,一般也开设“材料加工工艺”(materials processing technology)课程,内容一般包括铸造、金属塑性变形、焊接、表面处理等加工方法。

#### IV 材料加工工艺

本书打破原有机电系各专业课程的体系,进行重组形成新的体系,是一次重大的改革。书中既介绍目前材料加工领域的主要工艺方法,又反映最新发展的材料加工领域的前沿技术。通过本书的学习使学生对材料加工的重要工艺方法有较深入和全面的了解,并且为今后研究生阶段的学习打下基础。本书在每章的最后还附有足够的参考书目、复习思考题,便于课后复习。配合课堂教学,通过另外开设的“材料加工系列实验”课程,使学生在材料加工工艺的系列实验中加深对各种工艺的理解、感性认识和动手能力。

本书第1,2章由黄天佑编写,第3,7章由方刚编写,第4章由都东编写,第5章由姚可夫编写,第6章由梁吉编写,第8章由张人佶编写。本书在正式出版之前已在清华大学本科教学中使用了4届,2002年列入“普通高等教育‘十五’国家级规划教材”。

本书得到清华大学“985”教材建设项目的资助,在此表示感谢。

本书的体系和具体内容将在本书今后的使用过程中不断改进和完善,恳切希望广大教师、学生和其他读者提出宝贵意见。

清华大学 黄天佑

2004年4月于北京清华园

# 目录

<b>1</b>	<b>绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1	材料加工工艺在制造业中的地位 .....	1
1.2	21世纪材料加工工艺的展望 .....	2
1.3	“材料加工工艺”课程的任务 .....	4
	参考文献 .....	5
<b>2</b>	<b>液态金属成形</b> .....	<b>6</b>
2.1	概述 .....	6
2.1.1	铸造生产的特点 .....	6
2.1.2	铸造方法 .....	7
2.2	铸造合金的工艺性能 .....	8
2.2.1	铸造合金的充型能力 .....	8
2.2.2	铸造合金的收缩性及缩孔、缩松的形成 .....	13
2.2.3	铸造应力、变形与裂纹 .....	19
2.2.4	铸造合金中的偏析、气体和夹杂物 .....	25
2.3	砂型铸造 .....	31
2.3.1	粘土砂型 .....	31
2.3.2	粘土砂型的类别 .....	32
2.3.3	湿型粘土砂的主要性能 .....	33
2.3.4	粘土型砂的循环使用 .....	35
2.3.5	砂型的紧实 .....	35
2.4	制芯工艺 .....	43
2.4.1	砂芯及其粘结剂 .....	43



2.4.2	油砂和合脂砂 .....	45
2.4.3	热芯盒制芯 .....	46
2.4.4	覆膜砂制芯(型)工艺 .....	47
2.4.5	树脂自硬砂造型 .....	49
2.4.6	气硬冷芯盒法制芯 .....	51
2.5	水玻璃砂型(芯).....	52
2.5.1	水玻璃 .....	52
2.5.2	CO <sub>2</sub> 硬化水玻璃砂及砂型(芯)的制造工艺 .....	52
2.6	涂料.....	54
2.6.1	涂料的作用 .....	54
2.6.2	涂料的基本组成 .....	55
2.6.3	涂料的制备与涂敷方法 .....	55
2.7	铸造工艺设计.....	55
2.7.1	零件结构的工艺性 .....	56
2.7.2	造型及制芯方法的选择 .....	65
2.7.3	浇注位置的确定 .....	66
2.7.4	分型面的选择 .....	69
2.7.5	砂芯设计 .....	73
2.7.6	铸造工艺设计参数 .....	77
2.7.7	浇注系统设计 .....	79
2.7.8	冒口与冷铁 .....	89
2.8	其他铸造方法 .....	100
2.8.1	金属型铸造.....	101
2.8.2	低压铸造.....	103
2.8.3	压力铸造.....	104
2.8.4	熔模铸造工艺.....	107
2.8.5	消失模铸造工艺.....	110
2.8.6	陶瓷型铸造工艺.....	111
2.8.7	离心铸造.....	112
	复习思考题.....	114
	参考文献.....	116

### 3 金属塑性成形 ..... 117

3.1	塑性成形工艺概述 .....	117
3.1.1	塑性成形工艺的特点及应用.....	117

3.1.2	锻压工艺的分类	118
3.2	塑性成形的机理及力学分析	119
3.2.1	滑移和孪晶	119
3.2.2	变形量的表达	120
3.3	锻造工艺	123
3.3.1	锻前加热	124
3.3.2	锻造温度范围的确定	126
3.3.3	自由锻造	127
3.3.4	模型锻造	140
3.4	冲压工艺	146
3.4.1	冲裁工艺	147
3.4.2	弯曲工艺	151
3.4.3	拉深工艺	155
3.4.4	胀形工艺	167
3.4.5	翻边工艺	170
3.4.6	板料冲压性能参数及试验方法	172
3.4.7	冲压模具	180
3.5	金属塑性成形设备	184
3.5.1	机械压力机	185
3.5.2	液压机	189
	复习思考题	194
	参考文献	195

## 4 金属连接成形 ..... 196

4.1	焊接技术的范畴和发展	196
4.1.1	金属焊接过程的本质	197
4.1.2	金属焊接方法的分类	197
4.1.3	金属焊接方法的选用	201
4.1.4	焊接工艺方法的发展	205
4.2	电弧焊接	208
4.2.1	焊接电弧的导电机理	208
4.2.2	弧焊电源基础知识	216
4.2.3	焊接电弧产热机理	219
4.2.4	焊接电弧的作用力	221
4.2.5	熔滴过渡	227

## 目 录 材料加工工艺

4.2.6 焊缝成形	237
4.2.7 焊条电弧焊	245
4.2.8 埋弧焊	248
4.2.9 CO <sub>2</sub> 电弧焊	253
4.2.10 熔化极氩电弧焊	261
4.2.11 钨极氩电弧焊	267
4.2.12 等离子弧焊	277
4.2.13 电弧焊自动控制基础	284
复习思考题	293
参考文献	295

## 5 表面工程 296

5.1 概述	296
5.1.1 前言	296
5.1.2 表面工程技术分类	296
5.1.3 表面工程技术的目的和特征	297
5.2 气相沉积技术	298
5.2.1 物理气相沉积	299
5.2.2 化学气相沉积	313
5.2.3 等离子体增强化学气相沉积	316
5.3 热喷涂技术	319
5.3.1 热喷涂技术的原理及特点	319
5.3.2 热喷涂工艺	322
5.4 激光表面处理技术	326
5.4.1 激光表面处理的原理及特点	326
5.4.2 激光淬火	330
5.4.3 激光合金化	332
5.4.4 激光表面熔覆	334
5.4.5 其他激光表面处理技术	334
5.5 其他表面处理技术	336
5.5.1 电镀	336
5.5.2 化学镀	346
复习思考题	351
参考文献	351

<b>6</b>	<b>粉末冶金</b> .....	<b>352</b>
6.1	概述 .....	352
6.1.1	粉末冶金的工艺过程 .....	352
6.1.2	粉末冶金的工艺特点 .....	353
6.1.3	粉末冶金制品的应用 .....	354
6.1.4	粉末冶金的发展 .....	355
6.2	粉末的制备方法及性能 .....	356
6.2.1	粉末的制备方法 .....	356
6.2.2	粉末特性 .....	362
6.3	粉末成形 .....	364
6.3.1	成形前物料准备 .....	364
6.3.2	模压成形 .....	366
6.3.3	其他成形方法 .....	369
6.4	烧结 .....	378
6.4.1	烧结原理及过程 .....	378
6.4.2	单相烧结 .....	380
6.4.3	液相烧结 .....	383
6.4.4	烧结后的处理 .....	387
6.5	粉末冶金制品 .....	389
6.5.1	粉末冶金铁基结构件 .....	389
6.5.2	粉末冶金多孔材料 .....	393
6.5.3	粉末冶金摩擦材料 .....	396
	复习思考题 .....	400
	参考文献 .....	401
<b>7</b>	<b>塑料成形</b> .....	<b>402</b>
7.1	塑料及其工艺特性 .....	402
7.1.1	塑料的发展及用途 .....	402
7.1.2	塑料的分类及其工艺特性 .....	403
7.2	塑料的主要成形方法 .....	408
7.2.1	注射成形 .....	408

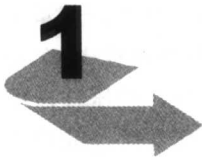
## X 材料加工工艺

7.2.2	压缩成形	410
7.2.3	压注成形	411
7.2.4	挤出成形	413
7.2.5	吹塑成形	414
7.3	塑料注射成形模具(注射模)	416
7.3.1	注射模的基本结构	416
7.3.2	注射模结构的设计	421
7.3.3	注射模浇注系统	426
7.3.4	注射模成形部分	428
7.3.5	注射模导向、推出及侧抽机构	431
7.3.6	注射模温度调节系统	433
	复习思考题	435
	参考文献	436

## 8 快速成形 437

8.1	快速成形技术的基本原理	437
8.2	典型的快速成形工艺	440
8.2.1	立体光刻	441
8.2.2	分层实体制造	443
8.2.3	激光选区烧结	446
8.2.4	熔融沉积制造	450
8.2.5	三维打印	451
8.2.6	增材成形	453
8.2.7	形状沉积制造	453
8.2.8	多功能快速原型制造系统	455
8.2.9	无木模铸型制造	456
8.3	快速成形技术的特点	457
8.3.1	高度柔性	457
8.3.2	技术的高度集成	458
8.3.3	快速性	458
8.3.4	自由成形制造	458
8.3.5	材料的广泛性	458
8.4	快速成形技术的应用	459
8.4.1	产品开发与设计	459
8.4.2	快速工模具	460

8.4.3 非制造业实体的三维复制.....	462
8.4.4 从快速成形到快速制造.....	462
8.4.5 在生物医学上的应用——生物制造工程.....	463
复习思考题.....	465
参考文献.....	465



# 绪 论

## 1.1 材料加工工艺在制造业中的地位

材料加工工艺(materials processing technology)又称材料成形技术,是金属液态成形、焊接、金属塑性加工、激光加工及快速成形、热处理及表面改性、粉末冶金、塑料成形等各种成形技术的总称。它利用熔化、结晶、塑性变形、扩散、相变等各种物理化学变化使工件成形,达到预定的机器零件设计要求。材料加工成形制造技术与其他制造加工技术不同,它的鲜明特点是工件的最终微观组织及性能受控于成形制造方法与过程。换句话说,通过先进的成形制造技术,不仅可以用各种成形方法获得无缺陷工件,而且能够控制、改善或提高工件的最终使用特性。材料加工工艺与机械切削加工方法不同,在加工过程中机器部件不仅会发生几何尺寸的变化,而且会发生成分、组织结构及性能的变化。因此材料加工工艺的任务不仅要研究如何获得必要几何尺寸的机器零部件,还要研究如何通过过程的控制而使零件具有设定的化学成分、组织结构和性能,从而保证机器零部件的安全性、可靠性和寿命。

材料加工是汽车、电力、石化、造船、机械等支柱产业的基础,新一代材料加工技术也是先进制造技术的重要组成部分。我国机械工业总产值已占全国工业总产值的25%,而材料加工工业在机械工业中又具有举足轻重的地位。我国钢年产量2003年已达22233万t,居世界第一位,成品钢材24119万t。据统计,全世界75%的钢材经塑性加工,45%的金属结构用焊接得以成形。我国的铸造行业有100万职工,20000多个工厂,2001年产量达1480万t,在世界上是第一铸造大国。我国拥有近6000个锻造厂,锻件的年产量约250万t,为亚洲第一,其中40%的锻件用于汽车行业。2002年,我国有冲压工厂12000个,从业人员40万人,据12个行业的统计,冲压产品共405.2万t。我国热处理行业拥有职工14万人,年产量约300万t。

材料加工行业与国民经济中的各行各业休戚相关。国民经济急需的重大关键装备,如能源工程的火电、水电、核电,海洋工程、潜艇、航空母舰、航空航天及交通运输工业中最重要的关键部件的制造都离不开材料加工行业。以机床为例,铸件重量占机床总重的70%~80%。再以汽车为例,我国汽车产量2003年已达444万辆,其中轿车产量为202.01万辆,比2002年增加了84%,2004年的产销量又有迅速、大幅度增长,已成为我国国民经济的支柱产业。在汽车制造过程中,车身的成形是通过冲压生产线来实现的,然后再通过焊接装配成白车身。冲压件占整个汽车零部件的75%,而发动机的曲轴、连杆以及底盘中的零件都是通过锻造来成形的。发动机绝大部分零件则用铸造加工而成,汽车的心脏——发动机的关键零部件,如汽缸体、缸盖、曲轴、齿轮轴、进排气管、活塞及活塞环等八大件全部是铸造而成,驱动装置中的关键零部件亦是如此。而且它们全部是用高强度、高韧性球墨铸铁铸造而成。铸件重量占每辆汽车重量的15%(轿车)至20%(卡车)。根据日本资料统计,小轿车中各种材料组成的重量百分数,冲压用钢板/钢材、铸铁及铸造铝合金的重量在1968年时占整车的78%,虽然在20年来新材料不断涌现,但是在小轿车中这些材料的重量比例在1988年仍占78.9%,几乎没有变化。

世界制造业的发展史告诉我们,要制造一部好的机器,不单需要好的设计,更重要的要靠良好的制造工艺来保证,特别是要保证有好的零件毛坯;用劣质的、不良的毛坯是不可以装配出优质的产品来的。我国生产的汽车质量与工业发达国家有较大的差距,其原因主要不在于设计水平,而在于制造工艺水平较差,汽车的使用寿命、耗油量、可靠性、安全性等无不与毛坯的加工工艺水平有密切关系。所以,材料加工工艺在制造业中占有非常重要的作用。

制造业在过去的20年中发生了巨大变化,这种变化还会延续。高速发展的工业技术要求材料加工产品精密化、轻量化、集成化;国际竞争更加激烈的市场要求产品性能高、成本低、周期短;日益恶化的环境要求材料加工原料与能源消耗低、污染少;另外,材料成形本身要求制造性好、成品率高。为了生产高精度、高质量的产品,材料正由单一的传统型向复合型、多功能型发展;材料加工技术逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。21世纪高新技术材料的出现将导致材料加工的科技进步与变革,包括全新的加工方法与工艺,及传统加工方法的改进与工序综合。

## 1.2 21世纪材料加工工艺的展望

材料加工工艺已有6000年的悠久历史,然而,从材料加工技艺发展到材料加工科学也只有近百年的历史。从某种意义上来说,材料加工学科仍然是一个正在发展的新兴学科,亟待发展提高。

展望21世纪,一方面,材料成形制造技术正在从主要制造毛坯向直接制造成



工件(即精确成形或称净成形工艺)的方向发展;另一方面,为控制或确保工件质量,成形制造技术已经从主要凭经验走向有理论指导的生产过程,成形制造过程的计算机模拟仿真技术已经进入实用化阶段。

近年来,精确铸造成形技术发展迅速,方法繁多,在诸多的工业领域中,轿车铸件的生产往往最集中地反映了精确铸造成形技术发展的新动向。为了提高轿车的运行速度和节约能源,轿车铸件生产朝着轻量化、精确化、强韧化和复合化方向发展。国外正在研究 3mm 壁厚的灰铸铁缸体,3mm 壁厚的耐热合金钢排气管和 2.0~2.5mm 壁厚的球墨铸铁件。扩大铝镁合金的应用是轿车工业的重要发展趋势,国外汽车材料铝合金用量以每年 10% 的速度递增。日本轿车缸盖已全部采用高强度铝合金生产,预计越来越多的汽缸体也将采用铝合金生产。国外已经提出从近精确成形铸造向精确成形铸造发展。为了实现这一目标,除继续发展低压铸造及压力铸造等工艺外,各种新一代精确铸造成形技术的应用也更加普遍,水平更高。与此同时,各种铸造工艺的复合、传统铸造合金与新型工程材料的复合成为铸造生产的另一重要动向。

21 世纪的金属塑性成形产品将朝着轻量化、高强度、高精度、低消耗的方向发展。同时,还要有效地利用能源、改善环境。加工材料仍会是以汽车业为代表的大规模制造业所用的材料为主,但也有难加工的高价格材料的塑性成形。上述客观需求将汇聚在精确塑性成形这个焦点上。1997 年,我国的锻件年产量为 253 万 t,其中模锻件 151 万 t,占锻件总产量的 59.6%。而 1991 年日本锻件年产量就已达到 243 万 t,其中模锻件占 70%,而冷温精锻件(不包括传统的紧固件和轴承)估计为 70 万 t/年。

展望 21 世纪,焊接技术仍将是金属与非金属材料重要的成形制造技术之一,从而也是先进制造技术领域的重要组成部分。焊接技术的主要发展趋势是:①精确焊接成形技术;②特种材料及特种环境下的焊接技术;③焊接过程的智能控制;④胶接与复合材料构件的成形技术。焊接生产自动化将突出表现为生产系统的柔性化和焊接控制系统的智能化。

快速原型制造是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种先进制造技术,是近年来制造技术领域的一次重大突破。快速原型制造技术由于具有能缩短产品上市时间、提高生产效率、改善产品质量和设计等优点,因而从诞生之日起,就受到了学术界和工业界的极大重视,并迅速在航空航天、汽车、机械、电子、电器、医学、玩具、建筑和艺术品等许多领域获得了广泛应用,并取得了迅速的进展。

随着金属间化合物材料、金属基复合材料、各种新型功能材料、超导材料等高新技术材料的不断出现,传统的加工方式或多或少地遇到了困难。与新材料的制备和合成技术相适应,新的加工方法成为材料加工研究开发的一个重要领域。材料制备和材料加工一体化是一个发展趋势。新材料的发展与新技术密切相关。因