



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级精品课程“材料加工”系列教材

清华大学材料加工系列教材

材料加工工艺 (第2版)

Materials Processing
Technology 2nd Edition

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“十一五”国家级规划教材

国家级精品课程“材料加工”系列教材

清华大学材料加工系列教材

材料加工工艺 (第2版)

Materials Processing Technology 2nd Edition

主 编 黄天佑

副主编 都 东 方 刚

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

材料加工工艺/黄天佑主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2010.10
(清华大学材料加工系列教材)

ISBN 978-7-302-23899-7

I. ①材… II. ①黄… III. ①工程材料—加工工艺—高等学校—教材
IV. ①TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 186702 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:23.75 字 数:445 千字

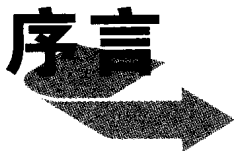
版 次:2010 年 10 月第 2 版 印 次:2010 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80 元

产品编号:026918-01

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,从日常生活用品到军事国防,都离不开材料加工技术。

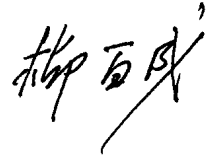
一方面,铸造、焊接、锻压、金属材料热处理等材料成形加工技术仍然是今天制造业,特别是装备制造业的主要成形加工技术,而且在相当长的时间里是不可能被其他技术完全替代的;另一方面,由于这些加工技术的不断进步,并和信息技术等高新技术融合、渗透,赋予这些成形加工技术新的内涵。同时,由于新材料及高新技术的出现,新一代成形加工工艺也日新月异。

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

II 材料加工工艺(第2版)

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进一步深化,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“材料成型及控制工程”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。

本书打破原有机械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章由方刚编写,第4章由都东编写,第5,7章由唐靖林编写,第6章由吕志刚编写。本书第1版已在清华大学本科教学中使用了10届,2005年列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。本书和由我校编写的《材料加工原理》和《材料加工系列实验》以及相应的教师手册(均由清华大学出版社出版)共五本教材是由本书主编负责的国家级精品课“材料加工”所使用的系列教材。

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

2010年9月于北京清华园

目录



1	绪论	1
1.1	材料加工工艺在制造业中的地位	1
1.2	材料加工工艺的展望	3
1.3	“材料加工工艺”课程的任务	4
	参考文献	5
2	液态金属成形	6
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	金属的熔炼	8
2.2.1	铸铁的熔炼	8
2.2.2	铸钢的熔炼	12
2.2.3	铝合金的熔炼	14
2.3	砂型铸造	16
2.3.1	粘土砂型	16
2.3.2	粘土砂型的类别	17
2.3.3	砂型的紧实	18
2.3.4	制芯工艺	25
2.3.5	树脂自硬砂型(芯)	31
2.3.6	水玻璃砂型(芯)	33

2.4	涂料	35
2.4.1	涂料的作用	35
2.4.2	涂料的基本组成	36
2.4.3	涂料的制备与涂敷方法	37
2.5	铸造工艺设计	38
2.5.1	零件结构的工艺性	38
2.5.2	造型及制芯方法的选择	46
2.5.3	浇注位置的确定	48
2.5.4	分型面的选择	50
2.5.5	砂芯设计	54
2.5.6	铸造工艺设计参数	55
2.5.7	浇注系统设计	57
2.5.8	冒口与冷铁	64
2.6	其他铸造方法	69
2.6.1	金属型铸造	70
2.6.2	低压铸造	72
2.6.3	压力铸造	73
2.6.4	熔模铸造	76
2.6.5	陶瓷型铸造	78
2.6.6	消失模铸造	79
2.6.7	离心铸造	81
	复习思考题	82
	参考文献	83

3 金属塑性成形 84

3.1	塑性成形工艺概述	84
3.1.1	塑性成形工艺的特点及应用	84
3.1.2	塑性成形工艺的分类	85
3.2	锻造工艺	86
3.2.1	锻前加热	87
3.2.2	自由锻造	90
3.2.3	模锻	100
3.2.4	锻造模具	109

3.3	板料冲压工艺	112
3.3.1	冲裁	113
3.3.2	弯曲	117
3.3.3	拉深	121
3.3.4	胀形	131
3.3.5	翻边	134
3.3.6	旋压	136
3.3.7	板料冲压性能参数及实验方法	138
3.3.8	冲压模具	145
3.4	锻压设备	149
3.4.1	机械压力机	149
3.4.2	液压机	153
3.5	轧制工艺	158
3.6	挤压工艺	162
3.7	拉拔工艺	165
	复习思考题	167
	参考文献	168
4	金属的焊接	169
4.1	焊接技术的范畴	169
4.2	电弧焊接技术基础	170
4.2.1	焊接电弧	170
4.2.2	熔滴过渡	184
4.2.3	焊缝成形	194
4.2.4	焊接接头	201
4.2.5	弧焊电源基础知识	211
4.2.6	焊接电弧自动控制基础	213
4.3	常用的电弧焊接方法	222
4.3.1	焊条电弧焊	222
4.3.2	埋弧焊	225
4.3.3	CO ₂ 电弧焊	230
4.3.4	熔化极氩弧焊	237
4.3.5	钨极氩弧焊	242

4.3.6	等离子弧焊	252
4.4	焊接工艺方法的分类和选用	257
4.4.1	金属焊接方法的分类	257
4.4.2	金属焊接方法的选用	260
4.4.3	焊接工艺方法的发展	266
	复习思考题	268
	参考文献	269
5	粉末成形	270
5.1	概述	270
5.2	粉末体及粉末特性	274
5.2.1	粉末体和粉末颗粒	274
5.2.2	粉末颗粒的结晶构造和表面状态	274
5.2.3	粉末的性能	275
5.3	粉末成形对成形原料的要求	281
5.3.1	对粉末性能的要求	281
5.3.2	对坯料流动性和水分的要求	284
5.3.3	对坯料流变性的要求	285
5.3.4	粉末成形前原料的准备	285
5.4	粉末成形坯体的结构与性质	287
5.4.1	粉末成形坯体的结构	287
5.4.2	粉末成形坯体性能	287
5.5	粉末成形方法	287
5.5.1	粉末成形方法分类	287
5.5.2	常用的粉末成形方法	290
5.6	烧结	291
5.6.1	材料的烧结过程	291
5.6.2	粉末烧结材料的显微结构特征	293
5.7	粉末成形对后续加工工艺的影响	294
5.7.1	对干燥工艺的影响	295
5.7.2	对烧结的影响	295
5.7.3	对机械加工的影响	298
5.8	粉末成形技术的发展	300

复习思考题	301
参考文献	302
6 高分子材料成形方法	303
6.1 高分子材料成形概述	303
6.1.1 塑料	303
6.1.2 橡胶	305
6.1.3 高分子复合材料	306
6.2 高分子材料的加工特性	308
6.2.1 高分子材料物理形态的转变温度	308
6.2.2 高分子材料熔体的流动	309
6.2.3 高分子材料加工的取向结构	311
6.2.4 高分子材料的结晶性	313
6.2.5 高分子材料的降解	314
6.3 注射成形	315
6.3.1 注射成形设备	315
6.3.2 注射成形工艺	320
6.3.3 其他注射成形方法	322
6.4 挤出成形	325
6.4.1 挤出成形设备	326
6.4.2 挤出成形工艺	329
6.5 其他常见的高分子材料成形方法	330
6.5.1 中空成形	330
6.5.2 模压成形	333
6.5.3 压延成形	334
6.5.4 热成形	335
6.6 树脂基复合材料成形	337
6.6.1 几种接触成形方法	339
6.6.2 复合材料模压成形技术	339
6.6.3 缠绕成形	341
6.6.4 树脂传递模塑成形	343
复习思考题	344
参考文献	345

7	机械零件成形方法的选择	346
7.1	机械零件成形方法的选择原则和依据	346
7.1.1	机械零件的总体要求	346
7.1.2	选择成形方法的一般原则和依据	347
7.1.3	其他应考虑的问题	349
7.2	典型装备制造中成形工艺的应用	349
7.2.1	成形技术的发展	349
7.2.2	飞机制造中的成形工艺	351
7.2.3	宇航结构制造中的成形工艺	352
7.2.4	装甲结构制造中的成形工艺	352
7.2.5	船舶结构制造中的成形工艺	353
7.2.6	汽车结构制造中的成形工艺	354
7.3	成形质量与检验	355
7.3.1	成形质量检验方法	355
7.3.2	成形质量检验过程	357
7.3.3	成形件质量控制	357
7.4	机械零件的失效、修复与再制造	358
7.4.1	机械零部件的失效	358
7.4.2	机械零部件的修复与再制造	362
	复习思考题	364
	参考文献	365



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。它是利用熔化、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的重要不同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,通过各种先进的成形加工工艺,不仅可以获得无缺陷工件,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,在加工过程中机器零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,还要研究如何通过加工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。

材料的使用性能取决于材料的组织结构和成分,然而材料的应用最终取决于材料的制备与成形加工。因而,材料的成形加工工艺是制造高质量、低成本产品的中心环节,是材料科学与工程四要素中极为关键的一个要素(图 1-1),也是促进新材料研究、开发、应用和产业化的决定因素。

材料加工技术不仅在机械电子工业领域、而且对制造业中的纺织工业、资源加工业及其他工业领域都起着重要作用。机械工业是国民经济的支柱产业。我国机械工业近年来取得了飞速的发展。根据中国机械工业联合会提供的统计数字,2006 年我国机械工业的工业增加值占同期国内生产总值(GDP)的 6.86%,国际上通常认为:当一个产业的增加值超过国内生产

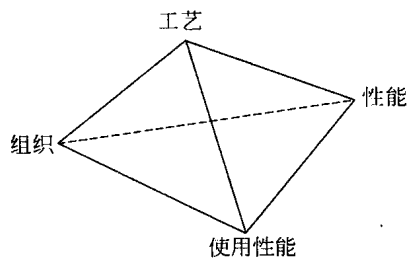


图 1-1 材料科学与工程四要素关系三角锥

总值的5%即为支柱产业,我国机械工业长期以来高于此值。我国的机械工业无论产值、利润、新产品产值、进出口总额都在我国有着重要地位。

2006年,我国机械工业总产值突破5万亿元大关,全行业连续4年以20%以上的增幅快速发展。在主要机械产品中,2006年发电设备产量为1.1亿千瓦,比2005年创造的9200万千瓦的历史纪录又增加了1800万千瓦。汽车产量为728万辆,比上年增长27.6%,已超过德国,仅次于美国、日本,居世界第三位。金属切削机床,按销售额计仅次于日本、德国,居世界第三位。在其他重要机械产品中,产量已居世界第一位的还有大中型拖拉机、铲土运输机械、数码相机、复印机械、塑料加工机械、起重设备、工业锅炉、变压器、电动工具、金属集装箱、摩托车等。

以铸造、塑性加工、焊接、热处理、电镀为代表的材料成形与改性加工技术是国民经济的基础制造技术,它所提供的产品零件具有精密化、轻量化、高质量和高精度、形状复杂、生产效率高的特点,同时又能做到材料和能源消耗少、污染低,节约资源和能源,是一种可持续发展的技术。它对我国国民经济的发展和国防力量的增长起着重要作用,占有重要地位。

在汽车、石化、钢铁、电力、造船、纺织、装备制造等支柱产业中,铸件都占有较大的比重。全世界钢材的75%要进行塑性加工,65%的钢材要用焊接得以成形,80%以上的零件需经过热处理提高其性能;汽车重量的65%以上仍由钢材、铝合金、铸铁等材料通过铸造、塑性加工、焊接、热处理等加工方法而成形。

铸造是制造业的基础,也是国民经济的基础产业,各行业都离不开铸件,从汽车、机床到航空、航天、国防以及人们的日常生活等都需要铸件。汽车中铸件重量占整车重量的19%(轿车)~23%(卡车);手机、笔记本电脑和许多照相机、录像机的壳体都是铝镁轻合金铸件。我国铸件总产量2007年已达3127万t,超过美国和日本铸件年产量的总和,占世界产量的30%。我国铸件出口数量呈逐年递升趋势,目前每年铸件出口总量占铸件总产量的1/10左右。

我国也是世界塑性成形的第一大国,我国锻造、冲压、零件轧制成形超过2000万t。我国生产大型锻件的能力和拥有自由锻造水压机的数量、压力等级及大型锻件生产能力等均已跨入世界大型锻件生产大国之列。通过技术引进、技术改造和科技创新,我国大型锻件的生产技术水平大大提高,能提供如300MW核电机组及火电机组成套锻件和轧钢设备等用大型锻件,已具备走向国际市场的能力。

我国2007年粗钢产量达到4.8966亿t,成品钢材5.6894亿t,成为世界最大的钢生产与消费国,而焊接结构的用钢量也相当于美国或日本一年的钢产量,成为世界上最大的焊接钢结构制造国。

我国每年钢材热处理的总重量约为全国钢材总产量的30%,年实际热处理生产量超过1亿t。我国现有热处理厂点约为2余万家,主要分布在钢铁和机械行业中。

世界制造业的发展史告诉我们,要制造一部好的机器,不仅需要好的设计,更重要的是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

毛坯是无法装配出优质的产品来。现在我国生产的汽车质量与工业发达国家相比仍有较大的差距,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制造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。

1.2 材料加工工艺的展望

展望未来,材料成形制造技术一方面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。日本全部轿车缸盖已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,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,其中模锻件占 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 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。精确焊接成形、特种材料及特种环境下的焊接技术、焊接过程的智能控制、胶接与复合材料构件的成形是当今世界焊接技术的主要发展趋势。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。

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。与新的材料制备和

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。新材料的发展与新的成形加工技术密切相关。因此,要使材料达到极端状态,则往往要改变材料的原有属性。从新材料的合成与制造来看,往往利用极端条件作为必要的手段。如超高压、超高温、超高真空、极低温、超高速冷却及超高纯等。

激光加工技术多种多样,包括电子元件的精密微焊接、汽车和船舶制造中的焊接、坯料制造中的切割、雕刻与成形等。有不同种类的表面改性处理方法,如热处理、表面修整、合金化、打标等,使用的激光器主要是大功率 CO₂ 激光器、YAG 激光器。

纳米材料是现代材料科学的一个重要的发展方向。作为新的结构功能材料的纳米材料,其未来的应用在很大程度上取决于纳米材料零件的成形技术的发展,以保证纳米微结构的稳定性,保留成形加工后的纳米团组良好的机械、磁学、固化性能等。

计算机技术的发展引起了机械制造工业一场新的革命。计算机模拟仿真或称计算机辅助工程(CAE),并行工程技术及虚拟制造技术的相继出现为成形制造技术注入了新的活力。计算机模拟仿真是人类的大量生产实践与实验研究基础上,建立物理及数学模型,充分利用计算机的强大计算功能而发展起来的多学科交叉的学科前沿领域。因此,在大力发展成形制造过程仿真研究的同时,仍然要重视成形制造过程的机理及基础理论的实验研究。并行工程的出现正在改变着制造企业的企业结构和工作方式,而材料成形制造过程模拟技术将成为与产品设计开发和制造加工紧密相连、必不可少的重要环节。

环境与资源是当今世界的两个重大课题。遵循“减量化、再循环、再利用和再制造”的 4R 原则,实现可持续发展,这也是摆在材料加工领域的重要课题,所谓集约化制造和清洁生产是指整个制造生产过程中应满足对环境无害、合理使用和节约自然资源、依靠科学技术得到最大的产出和效益等几个要求。因此,在材料加工工艺的应用和发展中,必须充分重视环境保护和资源的合理利用,体现“以人为本”的思想,包括对企业周边环境和工人作业环境、安全的保障。

1.3 “材料加工工艺”课程的任务

“材料加工工艺”课程的任务是讲授材料加工的一些主要方法及其相关的工艺装备,使“材料成形与控制工程”专业或相近专业的学生对材料加工领域的技术现状和发展趋势有一个较为系统和全面的了解。与本门课程同时(或先后)讲授的另一门课程——“材料加工原理”则主要阐述材料加工过程中的内在规律和物理本质,从而揭示材料加工过程中所出现的共性现象。这两门课程都是“材料加工工程”类专业学生所必须掌握的专业基础知识。由于学时的限制,本书不可能介绍所有的加工方法,只能有重点地介绍一些常用的方法,对其他方法只作简单介绍,学生如有兴趣或需要,可以通过查阅有关书籍或选修课来了解。配合本门课程和“材料加工原理”开设的