

● 新专业规范

● 新基本要求

● 新课程体系

● 新教学内容



21世纪机械类课程系列教材

# 工程材料 与成形技术基础

□ 鞠鲁粤 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

21 世纪机械类课程系列教材

# 工程材料与 成形技术基础

鞠鲁粤 主编

高等教育出版社

## 内容简介

本书是根据教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》和《工程材料及机械制造基础系列课程改革指南》的精神编写的,在内容和体系上作了较大的更新。

本书共分7章,分别介绍了工程材料、铸造成形、锻压成形、焊接成形、非金属材料及成形、快速成形和零件的毛坯选择。为配合学习,每章都附有习题和思考题,便于读者进行复习和总结,巩固已学知识。本书阐述了各种材料技术和成形过程的工艺原理、工艺方法、自身规律、相互联系、技术经济性及发展趋势,归纳了选材和选择成形工艺的方法,为理论与实践相联系作了一些尝试。本书的主要特点是,较详细地阐述了材料技术和各种成形技术的基本理论,在此基础上较全面地介绍了现代成形方法和新成果、新发展,便于读者了解先进材料技术、成形工艺和方法的发展趋势。

本书作为机械类专业基础课程工程材料与成形技术基础的教学参考书,主要面向机械类本科生,工科相关专业也可采用本教材进行教学。本书也可作为相关工程技术人员和工厂管理人员的参考读物。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成形技术基础/鞠鲁粤主编. —北京:高等教育出版社,2004.12

ISBN 7-04-015872-8

I. 工... II. 鞠... III. 工程材料-成形-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116299 号

策划编辑 庚欣 责任编辑 胡纯 封面设计 王凌波  
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制 杨明

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 19  
字 数 450 000

版 次 2004年12月第1版  
印 次 2004年12月第1次印刷  
定 价 24.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究  
物料号:15872-00

# 前 言

工程材料与成形技术基础是高等工科院校机械类专业和相关专业的一门重要的技术基础课程,目的在于使读者了解工程材料和成形技术的基本原理和工艺知识,开拓工程眼界,了解工程材料与成形技术的发展趋势。

21世纪前后,随着现代自然科学的不断发展,新工艺不断涌现,传统工艺不断变革,作为现代社会的重要支柱之一的材料科学及成形工程正取得迅猛的发展。为适应这样的发展,使读者在材料成形领域掌握现代加工的基本原理,为解决现代工程材料的成形和新型材料的开发打下基础,特编写了本书。本书既可作为机械工程(院)系本科生的必修技术基础课教材,又可作为相关工科学生选修课教材,也可作为从事此领域的工程技术人员的参考书。

本书根据现代科学技术的发展,按机械工程和相关专业方向的教学要求,对原教学内容进行了较大的更新和充实。本书较系统地介绍了材料科学与工程、材料成形科学与工程的基础理论,紧密结合材料加工和材料成形学科的现状和发展动向,补充了较多的应用实例,介绍了行业前沿的科研成果,以便为读者进一步学习打下必要的基础。编者力求适应机械工程学科的教学改革要求,按照宽口径、厚基础的原则,加强对学科基础理论的阐述,增加学科知识信息量,增加对各种材料处理方法和成形方法的比较与分析,力求使读者提高分析问题和解决问题的能力。

编者长期从事本课程的教学工作,本书是编者长期教学工作经验的总结,对机械类和其他专业的学生掌握机械制造科学会有一定的帮助。

本书由上海大学鞠鲁粤教授主编,上海交通大学陈关龙教授主审。参加本书编写的人员有(按章节顺序):上海大学鞠鲁粤(前言、绪论、第2章),苏州大学潘钰娴、谢志余(第1章),上海理工大学朱莉(第3章),浙江工业大学陈珺(第4章),北京工业大学许东来(第5章),上海大学朱冒冒、冯祖军(第6章),上海大学鞠鲁粤、张萍(第7章)。

编写过程中参阅并引用了有关教材、手册及相关文献,在此对有关作者表示感谢,并把引用的资料一并列举在参考文献中。

编写过程中得到了各院校有关领导和同志们的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书涉及的专业面较广,由于编者的水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004年6月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

# 目 录

绪论 .....	1	1.10 钢中的合金元素 .....	61
第1章 工程材料 .....	7	1.10.1 合金元素在钢中的分布 .....	61
1.1 概述 .....	7	1.10.2 合金元素在钢中的作用 .....	62
1.1.1 金属材料的发展 .....	7	1.11 合金钢 .....	65
1.1.2 非金属材料及复合材料的发展 .....	7	1.11.1 合金结构钢 .....	65
1.1.3 新材料的发展趋势 .....	8	1.11.2 合金工具钢 .....	68
1.2 固体材料的性能 .....	8	1.11.3 特殊性能钢 .....	70
1.3 金属的结构 .....	13	1.12 非铁金属材料 .....	71
1.3.1 金属的晶体结构 .....	13	1.12.1 铝及铝合金 .....	72
1.3.2 实际金属的晶体结构 .....	17	1.12.2 铜及铜合金 .....	73
1.4 金属的结晶 .....	18	1.12.3 镁合金 .....	74
1.4.1 纯金属的冷却曲线和过冷现象 .....	18	1.12.4 钛合金 .....	75
1.4.2 金属的同素异构性 .....	20	1.12.5 轴承合金 .....	75
1.4.3 金属铸锭的组织 .....	21	思考题与习题 .....	76
1.5 二元合金 .....	21	第2章 铸造成形 .....	79
1.5.1 二元合金的相结构 .....	21	2.1 概述 .....	79
1.5.2 二元合金相图 .....	23	2.2 铸件形成理论基础 .....	80
1.5.3 相图与性能的关系 .....	29	2.2.1 金属的充型 .....	80
1.6 铁碳合金 .....	30	2.2.2 铸件的温度场 .....	81
1.6.1 铁碳合金的基本相和基本组织 .....	30	2.2.3 金属的凝固 .....	82
1.6.2 铁碳合金相图 .....	30	2.2.4 合金的收缩、应力及变形 .....	83
1.7 碳钢 .....	36	2.3 砂型铸造工艺分析 .....	87
1.7.1 碳钢的分类 .....	36	2.3.1 浇注位置和分型面的确定 .....	87
1.7.2 碳钢的牌号 .....	37	2.3.2 主要工艺参数的确定 .....	89
1.8 铸铁 .....	37	2.3.3 铸造工艺图的制定 .....	90
1.8.1 铸铁的分类及特性 .....	37	2.4 铸件的结构设计 .....	92
1.8.2 铸铁的石墨化过程 .....	37	2.5 砂型铸造方法 .....	94
1.8.3 铸铁的牌号与性能 .....	39	2.5.1 气动微震压实造型 .....	94
1.9 钢的热处理 .....	40	2.5.2 高压造型 .....	95
1.9.1 钢在加热时的组织转变 .....	40	2.5.3 真空密封造型 .....	96
1.9.2 钢在非平衡冷却时的转变 .....	44	2.5.4 气流冲击造型 .....	97
1.9.3 钢的常用热处理工艺 .....	50	2.5.5 消失模造型 .....	98
1.9.4 钢的形变热处理 .....	57	2.5.6 冷冻造型 .....	100
1.9.5 钢的表面淬火 .....	58	2.6 特种铸造 .....	100
1.9.6 钢的化学热处理 .....	60		

2.6.1 金属型铸造 .....	100	3.4.10 粉末冶金温压成形技术 .....	159
2.6.2 离心铸造 .....	101	3.4.11 数字化塑性成形技术 .....	160
2.6.3 压力铸造 .....	103	思考题与习题 .....	162
2.6.4 低压铸造 .....	106	<b>第4章 焊接成形</b> .....	164
2.6.5 熔模铸造 .....	108	4.1 概述 .....	164
2.6.6 壳型铸造 .....	109	4.1.1 焊接基础知识 .....	164
2.6.7 陶瓷型铸造 .....	111	4.1.2 熔化焊化学冶金 .....	167
2.6.8 磁性铸造 .....	111	4.1.3 熔池结晶和接头组织 .....	168
2.6.9 石墨型铸造 .....	111	4.1.4 焊接结构力学 .....	169
2.6.10 真空吸铸 .....	112	4.2 常用焊接工艺方法 .....	175
2.6.11 差压铸造 .....	112	4.2.1 手工电弧焊 .....	175
2.6.12 半固态金属铸造 .....	113	4.2.2 气体保护焊 .....	177
2.6.13 现代整体精铸及快速凝固成形 技术 .....	114	4.2.3 埋弧自动焊 .....	179
2.6.14 铸造成形过程数值模拟 .....	115	4.2.4 电渣焊 .....	180
2.6.15 铸造工程中的并行工程 .....	116	4.2.5 电阻焊 .....	180
2.6.16 常用铸造方法的比较 .....	116	4.2.6 超声波焊 .....	183
2.7 铸造技术的发展趋势 .....	117	4.2.7 摩擦焊 .....	183
思考题与习题 .....	118	4.2.8 钎焊 .....	183
<b>第3章 锻压成形</b> .....	121	4.3 其他材料的焊接 .....	184
3.1 概述 .....	121	4.3.1 陶瓷的焊接 .....	184
3.1.1 金属的塑性变形 .....	121	4.3.2 塑料的焊接 .....	184
3.1.2 金属及合金的锻造性 .....	124	4.4 切割 .....	185
3.2 锻造 .....	126	4.4.1 气体火焰切割 .....	185
3.2.1 自由锻 .....	126	4.4.2 等离子弧切割 .....	186
3.2.2 模锻 .....	131	4.4.3 碳弧气刨 .....	186
3.2.3 胎模锻 .....	139	4.4.4 激光切割 .....	187
3.3 板料冲压 .....	140	4.5 焊接材料和金属材料的焊接 .....	187
3.3.1 板料冲压的基本工序、特点及应用 范围 .....	140	4.5.1 焊接材料 .....	187
3.3.2 冲模种类 .....	146	4.5.2 金属焊接性及其试验方法 .....	189
3.4 锻压新技术 .....	149	4.5.3 典型金属材料的焊接 .....	190
3.4.1 精密模锻 .....	150	4.6 焊接工艺设计 .....	191
3.4.2 精密冲裁 .....	150	4.7 焊接检验 .....	192
3.4.3 回转成形 .....	151	4.8 胶接 .....	194
3.4.4 多向模锻 .....	153	4.8.1 胶接工艺 .....	195
3.4.5 超塑性成形 .....	153	4.8.2 胶接应用举例 .....	197
3.4.6 高能率高成形 .....	155	4.9 焊接新技术及其发展 .....	198
3.4.7 粉末冶金及粉末锻造 .....	156	思考题与习题 .....	200
3.4.8 液态模锻 .....	158	<b>第5章 非金属材料及成形</b> .....	202
3.4.9 半固态金属塑性成形 .....	158	5.1 概述 .....	202
		5.1.1 非金属材料的发展 .....	202

5.1.2 非金属材料分类	203	6.3.4 熔化沉积成形 FDM	248
5.1.3 非金属材料的选择及应用	203	6.3.5 三维打印 3D-P	248
5.2 工程塑料及其成形	204	6.3.6 形状沉积制造 SDM	248
5.2.1 工程塑料的组成和性能	204	6.4 快速成形技术的应用	249
5.2.2 工程塑料的分类和应用	206	6.4.1 原型制造	249
5.2.3 工程塑料的成形	208	6.4.2 快速制模 RT	250
5.3 工业橡胶及其成形	213	6.5 快速成形材料	253
5.3.1 工业橡胶的组成及性能	213	6.6 快速成形与相关学科之间的关系	253
5.3.2 工业橡胶的分类及应用	215	6.7 采用逆向工程构造三维模型	253
5.3.3 工业橡胶件的成形	216	6.7.1 逆向工程系统	254
5.4 工业陶瓷及其成形	219	6.7.2 逆向工程应用与意义	255
5.4.1 陶瓷的组织结构及性能	220	6.7.3 逆向工程测量系统	255
5.4.2 陶瓷的分类及应用	221	6.7.4 逆向工程后处理	259
5.4.3 陶瓷的成形	223	6.7.5 快速原型数据后处理实例	261
5.5 复合材料及其成形	226	思考题与习题	264
5.5.1 复合材料的定义、分类和性能	226		
5.5.2 复合材料的应用	228	<b>第7章 零件的毛坯选择</b>	265
5.5.3 复合材料的成形	233	7.1 毛坯选择的原则	265
5.5.4 复合材料的二次加工	235	7.2 常用毛坯成形方法的比较	267
5.6 纳米材料	236	7.3 常用零件的成形方法	269
5.6.1 纳米材料的定义和特性	236	7.3.1 轴杆类零件	269
5.6.2 纳米陶瓷	238	7.3.2 盘套类零件	270
5.6.3 纳米复合材料	239	7.3.3 机架、箱体类零件	271
思考题与习题	240	7.4 毛坯成形方法选择实例	271
		7.4.1 V带轮零件的成形方法选择	271
<b>第6章 快速成形</b>	242	7.4.2 单级齿轮减速器组件的成形方法选择	273
6.1 概述	242	7.5 毛坯成形方法选择的经济性分析	275
6.2 快速成形技术原理及工艺	243	7.5.1 毛坯材料的经济性选材原则	275
6.2.1 快速成形技术原理	243	7.5.2 铸件的生产成本分析	277
6.2.2 快速成形方式分类	243	7.5.3 锻件的生产成本分析	281
6.2.3 快速成形的工艺流程	243	7.5.4 焊接件的生产成本分析	282
6.2.4 快速成形的优点	245	7.5.5 各种成形方案经济性综合比较	287
6.3 快速成形的主要工艺方法	246	思考题与习题	290
6.3.1 立体光固化 SLA	246	<b>参考文献</b>	294
6.3.2 分层实体制造 LOM	246		
6.3.3 选择性激光烧结 SLS	247		



# 绪 论

材料成形技术基础是机械工程专业和相关工程专业学生的一门重要的技术基础课程,主要研究机器零件的常用材料和材料成形方法,即从选择材料到毛坯或零件的成形。通过本课程的学习,可获得常用工程材料及材料成形工艺的基本知识,培养学生的工艺分析能力,了解现代材料成形的先进工艺、技术和发展趋势,是后续课程学习和工作实践的必要基础。

材料是科学与工业技术发展的基础,先进的材料已成为当代文明的主要支柱之一。人类文明的发展史,是一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史。如果查看一下诺贝尔物理、化学奖的获得者,不难发现,20世纪的物理学家和化学家们曾对材料科学做过一系列的贡献。Laue(1914)发现X射线晶体衍射,Guillaume(1920)发现合金中的反常性质,Bridgeman(1946)发现高压对材料的作用,Schockley、Bardeen、Brattain(1956)三人发现了半导体晶体管,Landau(1962)的物质凝聚态理论,Townes(1964)的发现导致固体激光出现,Neel(1970)发现材料的反铁磁现象,Anderson、Mott、van Vleck(1977)研究了非晶态中的电子性状,Wilson(1982)对相变的研究成功,Bednorz、Müller(1987)发现了30 K的超导氧化物,Smaller、Kroto(1996)发现C-60,Kilby(2000)发明第一块芯片,上述物理领域的诺贝尔获奖者的不少工作是直接针对材料的。至于化学家们,可以举出Giauque(1949)研究低温下的物性,Staudinger(1953)研究高分子聚合物,Pauling(1954)研究化学键,Natta、Ziegler(1963)合成高分子塑料,Barton、Hassel(1969)研究有机化合物的三维构象,Heegler、Medermild、白川英树(2000)三人发现导电高分子材料。

近年来,材料科学的发展极为迅速。以钢铁工业为例,2003年,我国钢产量2.2亿吨,是世界钢产量9.6亿吨的23%,从1890年张之洞创办汉阳铁厂,直到1949年的半个多世纪,中国产钢总量只有760万吨,不足现在一个大型钢铁厂的年产量。1949年,全国产钢量15.8万吨,占世界钢产量的0.1%,只相当于现在全国半天的产量。1996年至今,我国钢产量年年超过1亿吨,成为世界第一产钢大国。从6000万吨增长到1亿吨钢,美国经过13年,日本经过6年,中国为7年。这对于我国立足于工业化、现代化的世界,意义重大。但是我国又是一个钢的消费大国,2003年我国钢消费2.67亿吨。我国钢厂结构不合理,10%以上的钢是由规模不到50万吨的小型钢铁企业完成的,70%以上的生产能力是由150万吨以下的中小钢铁企业完成的。因此,我国钢铁企业的能耗大,产品品质不高,许多高附加值的优质钢材仍需进口,2003年就进口了3717万吨的优质钢材。所以,新一代钢铁材料的主要探索目标是提高钢材强度和使用寿命。研究证明,纯铁的理论强度应能高于8000 MPa,而目前碳素钢为200 MPa级,低合金钢(如16Mn)约400 MPa级,合金结构钢也只有800 MPa级。日本拟于2010年将钢的强度和寿命各提高1倍,2030年再翻一番(即1 t钢可相当于现在的4 t),这个计划展示了材料挖潜的前景。

类比钢铁,其他材料也有很大潜力可挖。现代材料逐步向高比强度、比模量方向发展。20世纪上半叶,材料科学家利用合金化和时效硬化两个手段,把铝合金的强度提高到700 MPa,铝的比强度(强度/密度)达到 $2.6 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,是钢的比强度( $0.6 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )的4倍有余。要达

到同样的强度,铝合金的用量只有钢的 1/4,这就是铝合金作为结构材料的极大优势。美国 1980 年的汽车平均质量为 1 500 kg,1990 年则为 1 020 kg。每台车的铸铁用量由 225 kg 降至 112 kg,铸铁的比例由 15% 减至 11%;而铝合金由 4% 增至 9%;高分子材料由 6% 增至 9%。汽车重量减轻 10% 可使燃烧效率提高 7%,并减少 10% 的污染。为了达到这个目标,要求整车重量要减轻 40% ~ 50%,其中,车体和车架的重量要求减轻 50%,动力及传动系统必须减轻 10%。美国福特公司新车型中使用的主要材料如图 0-1 所示。从图中可见,黑色金属用量将大幅减少,而铝、镁合金用量将大幅增加。

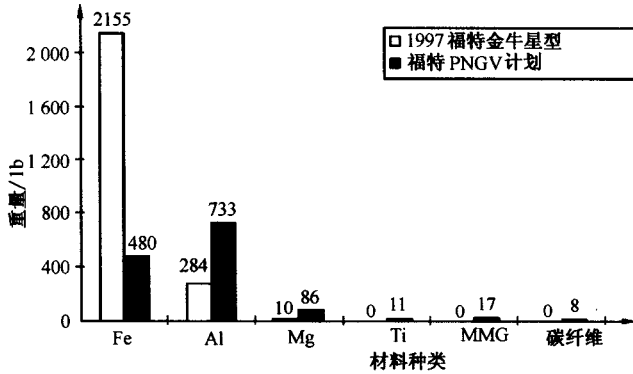


图 0-1 福特新一代汽车主要材料用量

在航空航天工业上,材料减重获得的效益更大,卫星减重 1 kg,可减少发射推力 50 N。一枚小型洲际导弹,减轻结构质量 1 kg,在有效载荷不变的条件下,可增加射程 15 km 左右,可减轻导弹起飞质量约 50 kg。图 0-2 所示为航空器飞行速度与效益的关系,图 0-3 为导弹壳体材料与导弹射程的关系。

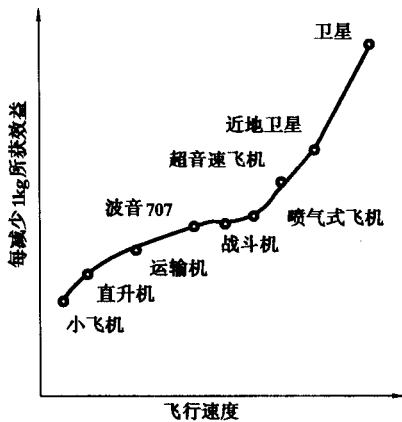


图 0-2 飞行器速度与效益

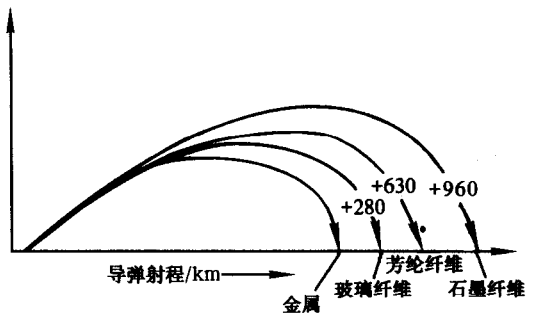


图 0-3 导弹壳体材料与导弹射程的关系

在过去的 30 年中,燃气轮机叶片的工作温度平均每年提高 6.67 °C。而工作温度每提高 83 °C,就可使推力提高 20%。图 0-4 所示为叶片材料的发展历程:1960 年以前主要用锻造镍基高温合金,20 世纪 60 年代初,美国采用在真空下的精密铸造,并铸出多道冷却孔,提高工作温度 50 °C;70 年代中期采用单晶合金(PWA1442),工作温度又提高 50 ~ 100 °C;目前采用第二代

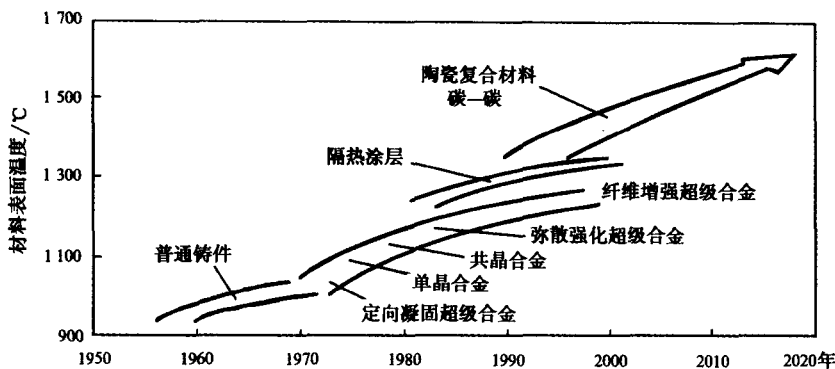


图 0-4 叶片材料的发展历史

单晶(PWA1484),进一步改进冷却技术,再加上热障涂层,涡轮进口温度达到 1 650 °C。推重比达 15~20 的叶片材料要能承受 1 930~2 220 °C 的高温,所以涡轮叶片实际上是材料技术与制造工艺的结合,不仅要有高性能的材质,而且要有高度精确的成形技术。

材料成形技术一般包括铸造成形、锻压成形、焊接成形和非金属材料成形等工艺技术。材料成形技术是一门研究如何用热或常温成形的方法将材料加工成机器部件和结构,并研究如何保证、评估、提高这些部件和结构的安全可靠度和寿命的技术科学。它属于机械制造学科。材料成形过程与金属切削过程不同,在大部分成形过程中材料不仅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,材料成形学科的任务不仅是要研究如何使机器部件获得必要的几何尺寸,而更重要的是要研究如何通过过程控制获得一定的化学成分、组织结构和性能,从而保证机器部件的安全可靠度和寿命。

我国已是制造大国,仅次于美、日、德,位居世界第四。20 世纪末 21 世纪初,我国的材料成形技术有了突飞猛进的发展,如三峡水利建设中,440 t 不锈钢转轮、750 t 蜗壳和 300 t 的闸门都是世界上最重的钢铁结构。最近建成的 30 万吨超级大型油轮(长 333 m,宽 58 m)、1 000 吨级的大型热壁加氢反应器(壁厚 280 mm)、空间环境模拟装置(直径 18 m、高 22 m 的大型不锈钢真空容器)等都是材料及材料成形工艺的重大成就。

材料成形加工是制造业的重要组成部分。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。我国铸件年产量超过 1 400 万吨,成为世界铸件生产第一大国。汽车工业是材料成形技术应用最广的领域。以汽车生产为例,1953—1992 年 40 年间,我国共生产汽车 100 万辆,而 2003 年一年全国就生产汽车 207 万辆,预计到 2010 年,年产量将达到 1 000 万辆左右,成为世界汽车生产第二大国。据统计,2000 年全球汽车用材总质量的 65% 由钢材(约 45%)、铝合金(约 13%)及铸铁(约 7%)通过锻压、焊接和铸造成形,并通过热处理及表面改性获得最终所需的实用性能。

对国防工业而言,由于现代武器装备性能提高很快,相应的结构、材料和成形制造工艺就成为关键。以航空航天工业为例,中国航空业 40 余年来共生产交付了各种类飞机 14 000 余架,各种类发动机 50 000 余台,海防和空-空战术导弹 14 000 余枚,目前已能成批生产第二代军用飞机,正在研制相当于国际水平的第三代军用飞机,从“九五”计划开始开展了第四代军用飞机的预研。现代飞机要求超音速巡航、非常规机动性、低环境污染、低油耗、全寿命成本等性能,很大

程度上是依靠发动机性能的改进和提高来实现的。发动机性能提高的目标是提高推重比、功率重量比、增压比和涡轮前温度,国外现役机推重比 7~8,在研机 9~10,预研机 15~20,我国相应为 5.5、6.5~7.5、8~10。要实现上述指标,要不断发展先进涡轮盘材料和这些材料的精密成形和加工技术。图 0-5 所示为航空发动机进口温度与高温合金叶片制造技术的发展。因此,材料精密成形和加工技术成为关系国防安全的一种关键技术。

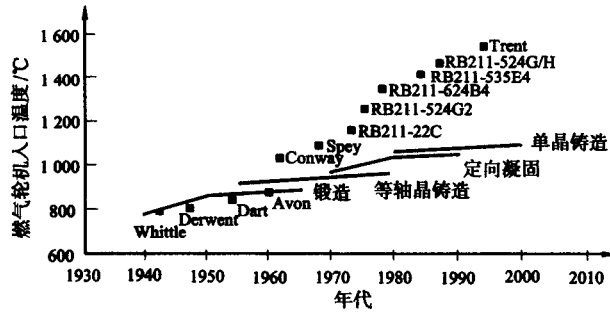


图 0-5 航空发动机进口温度与高温合金叶片制造技术的发展

材料成形技术在 21 世纪的发展过程中,将逐步形成“精密”、“优质”、“快速”、“复合”、“绿色”和“信息化”的特色。

### 1. 精密的材料成形特征

随着材料资源和能源的日益紧缺,材料的少、无切削加工已作为制造技术发展的重要方向。材料成形加工的精密化,从尺度上看,已进入亚微米和纳米技术领域。表现为零件成形的尺寸精度正在从近净成形 (near net shape forming) 向净终成形 (net shape forming),即近无余量成形方向发展,毛坯与零件的界线越来越小。采用的主要方法是多种形式的精铸(如熔模铸造、陶瓷型铸造、消失模铸造、挤压铸造、充氧压铸、流变铸造、触变铸造等)、精密压力加工(如精锻、零件精轧、精冲、粉末冶金温压成形、冷温挤压、超塑成形、反压力液压成形、铸锻工艺、同步成形工艺、变压力胀形技术等)、精密焊接与切割(如等离子弧焊、电子束焊、激光焊、脉冲焊、窄间隙焊、激光和电弧复合加热焊、等离子弧切割、激光切割、水射流切割等)等。

### 2. 优质的成形技术特征

反映成形加工的优质特征是产品近无缺陷、零缺陷。此缺陷是指不致引起早期失效的临界缺陷的概念。采取的主要措施有:采用先进工艺、净化熔融金属、增大合金组织的致密度,为得到健全的铸件、锻件奠定基础;采用模拟技术、优化工艺技术,实现一次成形及试模成功,保证质量;加强工艺过程控制及无损检测,及时发现超标零件;通过零件安全可靠性及评估,确定临界缺陷量值等。美国 GM 公司采用 CAE 技术,每年节省试制费用数百万美元。

### 3. 快速的成形技术特征

表现在各种新型高效成形工艺不断涌现,新型铸造、锻压、焊接方法从不同角度提高生产率。采取的主要措施有:将逆向设计 (RE)、快速成形 (RP)、快速制模 (RT) 技术相结合,建立起快速制造平台;应用数值模拟技术于铸、锻、焊和热处理等工艺设计中,并与物理模拟和专家系统结合起来确定工艺参数、优化工艺方案,预测加工过程中可能产生的缺陷及防止措施,控制和保证成形工件的质量。波音公司采用的现代产品开发系统,将新产品研制周期从 8 年缩短到 5 年,工程返工量减少了 50%。日本丰田公司在研制 2002 年佳美新车型时缩短了研发周期 10 个月,减少了

试验样车数量 65%。德国 RIVAGE 公司以一辆旧保时捷跑车做基础,以逆向工程和快速制造为手段,7 个月造出一辆概念新车。

#### 4. 复合的材料成形特征

激光、电子束、离子束、等离子束等多种新能源和能源载体的引入,形成多种新型成形方法与改性技术,其中以各种形式的激光成形技术发展最迅速。一批新型复合工艺的诞生,如超塑成形/扩散连接技术、爆炸焊/热轧复合成形技术等,造就了一些特殊材料如超硬材料、复合材料、陶瓷等的应用。此外,复合的特征还表现在冷热加工之间、加工过程、检测过程、物流过程、装配过程之间的界限趋向淡化、消失,而复合、集成于统一的制造系统之中。

#### 5. 绿色的材料成形特征

成形加工向清洁生产方向发展,其主要的技术意义在于:①高效利用原材料,对环境清洁;②以最小的环境代价和能源消耗来获取最大的经济效益;③符合持续发展和生态平衡。

美国在展望 2020 年的制造业时,把材料净成形工艺发展为“无废弃物成形加工技术(waste-free process),即加工过程中不产生废弃物,或产生的废弃物能被整个制造过程中作为原料而利用,并在下一个流程中不再产生废弃物。由于无废物加工减少了废料、污染和能量的消耗,成为今后推广的重要绿色制造技术。

#### 6. 信息化特征

成形工艺逐步向柔性、集成系统发展,大量应用了各种信息和控制技术,如柔性压铸系统,轧、锻柔性生产线、搅拌摩擦焊机器人柔性生产线、弧焊/压焊焊接机器人生产线等,使用远程控制 and 无人化成形工厂,质量控制向控制过程智能化方向发展等,都使材料成形技术注入了自动化、信息化特征。

综上所述,现代科学的发展使材料成形技术的内容远远超出了传统的热加工范围。现代材料成形技术可拓展为:一切用物理、化学、冶金原理制造机器部件和结构,或改进机器部件化学成分、微观组织及性能,并尽可能采用复合制造、绿色制造、信息化制造获得优质毛坯或零件的现代制造方法。

所有的零件加工工艺在成形学上按对材料的操作方式可归结为三类,即受迫成形、去除成形和堆积成形。

##### (1) 受迫成形

利用材料的流动性和塑性在特定外力或边界的约束下成形的方法。铸造、锻压以及注塑成形工艺都属于受迫成形。在这种成形方式中,能量的使用体现在使零件发生形态变化或塑性形状变化上;零件的制造信息(几何信息、工艺信息和控制信息等)经预处理后以形状信息的形式物化于工具之中,如模具、型腔等。这种信息处理过程与物理制造过程的结合形式,具有较好的刚性,即制造零件时重复性好,但其柔性较差。零件信息的任何改变都将导致工具的重新制造,因而较适用于定型产品的大批量生产方式或毛坯制造。

##### (2) 去除成形

运用材料的可分离性,把一部分材料(裕量材料)有序地从基体分离出去而成形的方法。传统的车、铣、刨、磨等机加工工艺和激光、电火花加工工艺均属于去除成形。在这种成形方式中,零件制造信息体现在去除材料的顺序和每一步材料的去除量上,即信息通过控制刀具(激光、电火花等也可看作去除刀具)与待加工工件的相对运动,实现材料的有序去除。与受迫成形相比,

这种信息过程与物理过程的结合方式具有较大的柔性,实际上可以把刀具与工件的相对运动看作是一种易于修改、易于编程和易于控制的“动态模具”。但这种零件加工方式由于受到刀具与工件相对运动的条件限制,难以加工形状极为复杂的零件。

### (3) 堆积成形

利用材料的可连接性,将材料有序地合并堆积起来而成形的方法。快速成形是堆积成形的典型方法,其次,一些焊接和喷镀也可视为堆积成形。快速成形的特点是从无到有、从小到大有序进行,零件的制造信息体现在材料结合的顺序以及每一次材料转变量与深度的控制上,即信息通过控制每个单元的制造和各个单元的结合而实现对整个成形过程的控制。在堆积成形过程中,信息过程与物理过程的结合达到比较高级的阶段,没有“模具”、“卡具”和“切削加工”的概念,成形零件不受复杂程度的限制,它提供了一种直接地并完全自动地把三维 CAD 模型转换为三维物理模型或零件的制造方法。

教材对以上成形的方式、成形产品的结构、成形工艺、技术经济性、成形方法的选择和发展趋势等问题进行了介绍、探讨和比较。

教材的体系与结构如下:

- (1) 工程材料,主要介绍工程材料及其性能控制和应用;
- (2) 铸造成形,主要介绍铸件成形理论、成形方法、特种铸造及现代铸造技术发展趋势;
- (3) 锻压成形,主要介绍金属的塑性变形理论,锻压成形方法及锻压新技术;
- (4) 焊接成形,主要介绍焊接成形理论,各种焊接成形方法及其新技术、新工艺;
- (5) 非金属材料的成形,主要介绍工程塑料、工业橡胶、工业陶瓷、复合材料和纳米材料及其应用、成形方法和新技术;
- (6) 快速成形,主要介绍快速成形方法、逆向工程及其发展趋势;
- (7) 零件的毛坯选择,主要介绍各种成形方法的工艺比较、选择以及成形技术的应用和经济性分析。

本课程的目的及要求是:

- (1) 了解和掌握材料的各种性能、特点以及改变材料性能的途径;
- (2) 能经济地选用材料并能根据材料的使用要求,了解和掌握在加工过程中如何保证并改进材料化学成分、内部组织、表面性能和加工性能;
- (3) 了解材料成形工艺、零件结构工艺性、加工装备及生产过程自动化和生产流水线;
- (4) 对材料成形方法进行经济分析和比较;
- (5) 掌握各种材料成形工艺的相互关联性和互补性。

本课程的教学安排建议如下:

- (1) 在金工实习后实施课程教学;
- (2) 教材适宜的学时数为 50 ~ 80 学时;
- (3) 应用多种教学手段结合电视教学片和多媒体 CAI 组织教学。

# 第 1 章

## 工程材料

### 1.1 概述

材料是现代文明的三大支柱之一,也是发展国民经济和机械工业的重要物质基础。材料作为生产活动的基本投入之一,对生产力的发展有深远的影响。历史上曾把当时使用的材料当作历史发展的里程碑,如“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”等。我国是世界上最早发现和使用金属的国家之一。周朝是青铜器的极盛时期,到春秋战国已普遍应用铁器。直到 19 世纪中叶大规模炼钢工业兴起,钢铁才成为最主要的工程材料。

科学技术的进步推动了材料工业的发展,使新材料不断涌现。石油化学工业的发展促进了合成材料的兴起和应用;20 世纪 80 年代特种陶瓷材料又有很大进展,工程材料随之扩展为包括金属材料、有机高分子材料(聚合物)和无机非金属材料三大系列的全材料范围。

#### 1.1.1 金属材料的发展

人类早在 6 000 年以前就发明了金属冶炼,约公元前 4 000 年,古埃及人便掌握了炼铜技术。我国青铜冶炼约始于公元前 2000 年(夏代早期)。古埃及在 5 000 年以前,就用含镍 7.5% 的陨石铁做成铁球。我国春秋战国时期已经大量使用铁器。铸铁的发展经历了 5 000 年的漫长岁月,只是到了瓦特发明蒸汽机以后,由于在铁轨、铸铁管制造中的大量应用,才走上工业生产的道路。15 世纪到 19 世纪,从高炉炼铁到电弧炉炼钢,逐步奠定了近代钢铁工业的基础。

19 世纪后半叶,欧洲社会生产力和科学技术的进步,推动了钢铁工业的大步发展,扩大了钢铁生产规模,提高了产品质量。从 20 世纪 50 年代到 2003 年,全世界的钢产量由 2.1 亿吨增加到 9.6 亿吨。而我国 2003 年钢产量达到 2.2 亿吨,超过 20 世纪 50 年代全球钢产量,跃居全球钢产量首位。

在钢铁材料发展的同时,有色金属也得到发展。人类自 1866 年发明电解铝生产工艺以来,铝已成为用量仅次于钢铁的金属。1910 年纯钛的制取,满足了航空工业发展的需求。

#### 1.1.2 非金属材料及复合材料的发展

非金属材料如陶瓷、橡胶等的发展历史也十分悠久,进入到 20 世纪后更是取得了重大的进展。人工合成高分子材料从 20 世纪 20 年代至今发展最快,其产量之大、应用之广可与钢铁材料

相比。20世纪60年代到70年代,有机合成材料每年以14%的速度增长,而金属材料年增长率仅为4%。1970年世界高分子材料年产量为4000万吨,其中3000万吨为塑料,橡胶为500万吨(已超过天然橡胶的产量),合成纤维为400万吨。20世纪90年代,塑料产量已逾亿吨,按体积计,已超过钢铁产量。2002年我国塑料产量1401万吨,到2005年我国塑料年需求量将超过2500万吨。

陶瓷材料近几十年的发展也十分引人注目。陶瓷材料在冶金、建筑、化工和尖端技术领域已成为耐高温、耐腐蚀和各种功能材料的主要用材。

航空、航天、电子、通信、机械、化工、能源等工业的发展对材料的性能提出了越来越高的要求。传统的单一材料已不能满足使用要求,复合材料的研究和应用引起了人们的重视。玻璃纤维树脂复合材料、碳纤维树脂复合材料等已在航空航天工业和交通运输、石油化工等工业中广泛应用。

### 1.1.3 新材料的发展趋势

随着社会的发展和科学技术的进步,新材料的研究、制备和加工应用层出不穷。每一种重要的新材料的发现和运用,都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平。工程材料目前正朝高比强度(单位密度的强度)、高比模量(单位密度的模量)、耐高温、耐腐蚀的方向发展。图1-1为材料比强度随时间的进展,指出今日先进材料强度比早期材料增长50倍。

新材料主要在以下几方面获得发展:

#### 1. 先进复合材料

由基体材料(高分子材料、金属或陶瓷)和增强材料(纤维、晶须、颗粒)复合而成的具有优异性能的新型材料。

#### 2. 光电子信息材料

光电信息处理材料包括量子材料、生物光电子材料、非线性光电子材料等。

#### 3. 低维材料

指超微粒子(零维)、纤维(一维)、和薄膜(二维)材料,这是近年来发展最快的材料领域。

#### 4. 新型金属材料

如镍基高温合金、非晶态合金、微晶合金、Al-Li合金金属间化合物等。

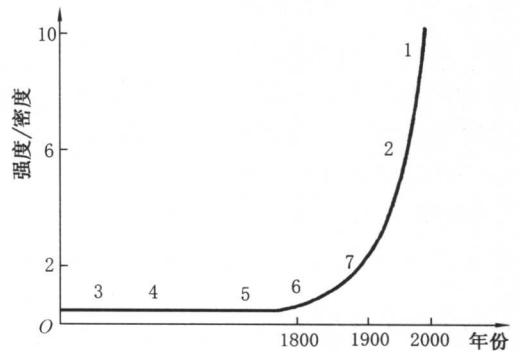


图 1-1 材料比强度随时间的进展

1—芳纶纤维、碳纤维; 2—复合材料; 3—木材、石; 4—青铜; 5—铸铁; 6—钢; 7—铝

## 1.2 固体材料的性能

固体材料的主要性能包括力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能等。力学性能是工程材料最主要的性能,又称机械性能,指材料在外力作用下表现出来的性能,包括弹性、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度、蠕变和磨损等。外力即载荷,常见的各种外载荷如图1-2所示。

### 1. 强度和塑性



材料强度指材料在达到允许的变形程度或断裂前所能承受的最大应力,如弹性极限、屈服点、抗拉强度、疲劳极限、蠕变极限等。按外力作用的方式不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。工程上最常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

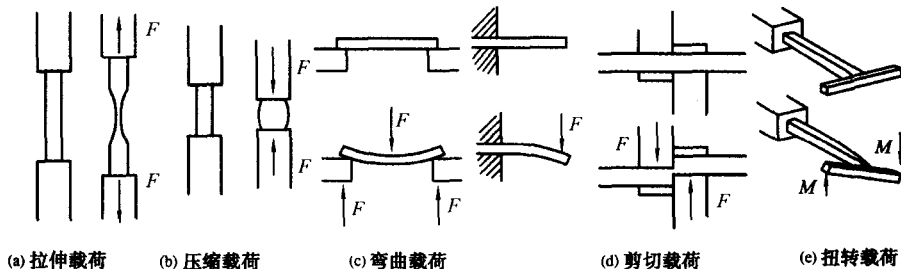


图 1-2 载荷的形式

材料的强度、塑性指标可以通过实验测定。图 1-3a 为低碳钢拉伸实验测得的应力-应变图。实验时将材料做成如图 1-3b 所示的标准试样,试样在外力作用下,其内部产生一种内力,其数值大小与外力相等,方向相反。材料单位面积上的内力称为应力,以  $\sigma$  (单位:Pa) 表示。可按下式计算:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1-1)$$

式中:  $S_0$ ——试样原始横截面面积,  $\text{mm}^2$ 。

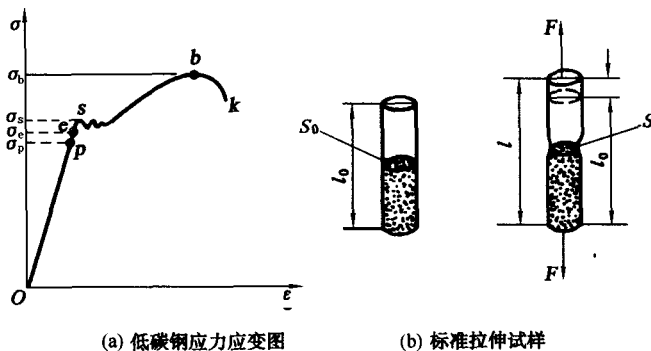


图 1-3 拉伸试样及低碳钢的应力-应变图

### 1) 弹性和弹性模量

试样加载后应力不超过  $\sigma_e$ ,若卸载,试样能恢复原状,这种材料不产生永久变形的性能,称为弹性。 $\sigma_e$  为材料不产生永久变形时所能承受的最大应力,称为弹性极限。

图中  $O_p$  为直线,表示应力( $\sigma$ )与应变( $\epsilon$ )成正比。 $p$  点是保持这种正比关系的最高点, $\sigma_p$  称为比例极限。 $\sigma_p$  与  $\sigma_e$  在数值上很接近,应用时两者常取同一数值。

$O_p$  的斜率  $E(E = \frac{\sigma}{\epsilon})$  称为材料的弹性模量,即引起单位弹性变形所需要的应力。工程上把弹性模量  $E$  称为材料的刚度,表示材料抵抗弹性变形的能力。

弹性模量  $E$  主要取决于材料的化学成分,合金化、热处理、冷热加工对它的影响很小。室温