

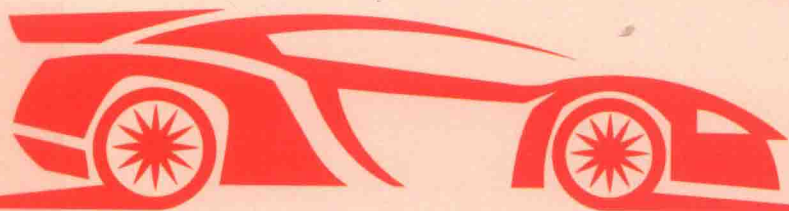


普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

# 工程材料与 成形技术基础

Foundation of Engineering Materials and  
Forming Technology

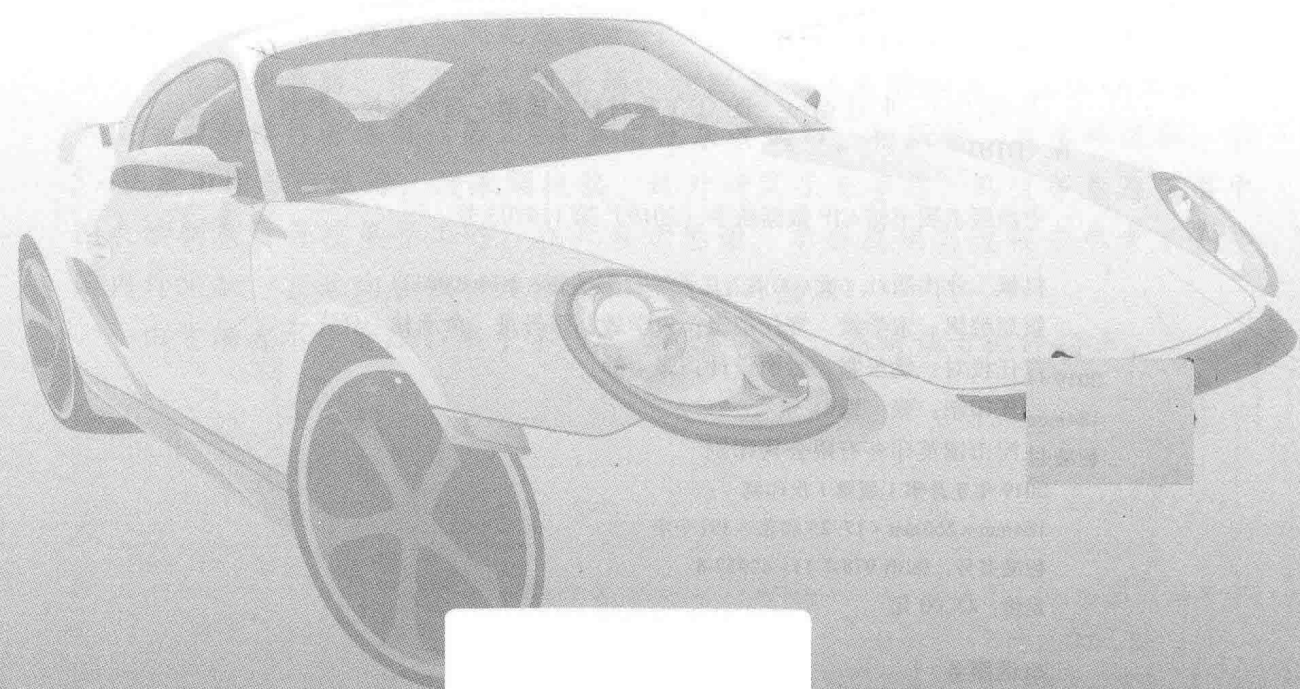
谢春丽 范东溟 刘永阔 等编



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

# 工程材料与成形技术基础

谢春丽 范东溟 刘永阔 柯跃前 庄文玮 编



机械工业出版社

本书主要讲解工程材料的类别、特点、应用及成形工艺基础和技术。在介绍每种材料以及成形技术的基本原理、成形方法、工艺等的基础上,选取典型工程材料的综合应用实例,着重介绍其工程应用,以增强学生的工程概念和实践能力。此外,本书对材料和成形技术的拓展性知识以及新材料和成形新技术的应用也进行了介绍。

本书内容共9章,主要包括钢铁材料、非铁金属材料、非金属材料、液态金属铸造成形、固态金属塑性成形、金属连接成形、高分子材料及复合材料成形、粉末冶金及陶瓷成形等。

本书可作为高等院校的机械工程、车辆工程等机械类专业本科学生的通用教材,也可作为近机械类专业选用教材,还可作为相关科研及工程技术人员的参考书。

本书配有PPT课件,采用本书作为教材的教师,可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载,或向编辑 ([tian.lee9913@163.com](mailto:tian.lee9913@163.com)) 索取。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成形技术基础/谢春丽等编. —北京:机械工业出版社, 2019.7

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-62952-8

I. ①工… II. ①谢… III. ①工程材料—成型—高等学校—教材  
IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第114703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:宋学敏 责任编辑:宋学敏 张丹丹 章承林 任正一

责任校对:姚玉霜 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2019年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·391千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62952-8

定价:43.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

材料是用来制造各种机器、器件、工具等并具有某些特性的物质。从广义上讲，对材料进行加工，使其具有一定形状、尺寸和使用性能（或可加工性能）的技术，都可以称为成形技术。“工程材料与成形技术”就是研究与材料有关的成分、组织结构、工艺和性能之间关系以及材料成形技术原理和工艺的一门专业基础课。为适应高等院校工科技术课程改革及工程教育认证对人才培养的要求，我们结合多年的教学经验，并参考了各高校相关课程的教学要求，将工程材料与成形技术进行有机融合编写了本书。

本书系统地阐述了常用的几种工程材料（包括钢铁材料、非铁金属材料和非金属材料）的基本结构及性能，对相应的成形技术进行了详细论述，包括液态金属铸造成形、固态金属塑性成形、金属连接成形、高分子材料及复合材料成形、粉末冶金及陶瓷成形。

本书由谢春丽、范东溟、刘永阔、柯跃前、庄文玮编写。具体分工如下：第1章由全体作者编写；第2~4章由范东溟编写，柯跃前、庄文玮统稿；第5~9章由谢春丽编写，刘永阔统稿。此外研究生王宇超、马悦等参与了书中图表绘制及资料搜集等工作，在此表示感谢。本书在编写过程中参考了一些国内外文献，在此向各位相关作者表示衷心的感谢。

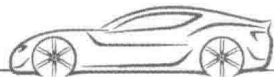
由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....       | 1   |
| 1.1 工程材料概述 .....            | 1   |
| 1.2 成形技术概述 .....            | 4   |
| 1.3 材料的性能及选材 .....          | 6   |
| 1.4 汽车材料及成形技术的现状及发展 .....   | 21  |
| <b>第 2 章 钢铁材料</b> .....     | 33  |
| 2.1 金属材料的基础知识 .....         | 33  |
| 2.2 钢的热处理.....              | 48  |
| 2.3 钢的分类及应用 .....           | 65  |
| 2.4 铸铁.....                 | 84  |
| <b>第 3 章 非铁金属材料</b> .....   | 96  |
| 3.1 铝及铝合金.....              | 96  |
| 3.2 铜及铜合金 .....             | 101 |
| 3.3 镁及镁合金 .....             | 105 |
| 3.4 滑动轴承合金 .....            | 108 |
| 3.5 钛、锌及其合金 .....           | 110 |
| 3.6 粉末冶金材料 .....            | 113 |
| 3.7 金属材料在汽车上的应用 .....       | 115 |
| <b>第 4 章 非金属材料</b> .....    | 124 |
| 4.1 高分子材料 .....             | 124 |
| 4.2 复合材料 .....              | 146 |
| 4.3 陶瓷材料 .....              | 151 |
| 4.4 玻璃 .....                | 156 |
| 4.5 摩擦材料 .....              | 160 |
| <b>第 5 章 液态金属铸造成形</b> ..... | 164 |
| 5.1 铸造成形技术的方法 .....         | 164 |
| 5.2 液态合金铸造成形的基本原理 .....     | 169 |
| 5.3 铸造成形工艺设计 .....          | 178 |
| 5.4 发动机缸体铸造工艺 .....         | 184 |
| <b>第 6 章 固态金属塑性成形</b> ..... | 188 |
| 6.1 固态金属塑性成形的基本原理 .....     | 188 |
| 6.2 金属塑性成形的方法 .....         | 191 |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 6.3 锻压成形工艺设计 .....            | 197        |
| 6.4 板料冲压成形工艺设计 .....          | 198        |
| 6.5 电液成形技术 .....              | 203        |
| 6.6 汽车车身覆盖件冲压工艺 .....         | 206        |
| <b>第7章 金属连接成形</b> .....       | <b>211</b> |
| 7.1 金属连接成形的基本原理 .....         | 211        |
| 7.2 金属焊接结构工艺设计 .....          | 217        |
| 7.3 车身装焊 .....                | 222        |
| 7.4 胶接 .....                  | 227        |
| <b>第8章 高分子材料及复合材料成形</b> ..... | <b>231</b> |
| 8.1 高分子材料成形的基本原理 .....        | 231        |
| 8.2 高分子材料成形的的方法 .....         | 234        |
| 8.3 高分子材料制品的结构工艺性 .....       | 238        |
| 8.4 复合材料的成形 .....             | 242        |
| 8.5 汽车轮胎的制造 .....             | 245        |
| 8.6 汽车玻璃的成形工艺 .....           | 252        |
| <b>第9章 粉末冶金及陶瓷成形</b> .....    | <b>254</b> |
| 9.1 粉末冶金及陶瓷成形的基本原理及工艺过程 ..... | 254        |
| 9.2 粉末冶金制品的结构工艺性 .....        | 263        |
| 9.3 铜基含油轴承的制造 .....           | 264        |
| 9.4 铝合金粉末锻造技术 .....           | 265        |
| <b>参考文献</b> .....             | <b>268</b> |



# 第1章 绪 论

## 1.1 工程材料概述

材料就是用来制造各种机器、器件、工具、结构等具有某种特性的物质。人类和材料的关系非常密切，这就要求我们更好地认识和了解材料。“工程材料与成形技术”就是研究与材料有关的成分、组织结构、工艺和性能之间关系的一门专业基础课。

材料是人类生活和生产的物质基础。人类社会发展的历史表明，生产技术的进步和生活水平的提高与新材料的运用息息相关。材料的利用水平标志着人类文明的发展水平，历史学家把人类的历史按人类所主要使用的不同材料种类划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代，人类社会的发展伴随着材料的发明和发展。每一种新材料的出现和应用，都会使社会生产和生活发生重大变化，并有力地推动着人类文明进步。

如今，我们把材料、信息、能源称为现代技术的三大支柱，许多工业化程度高的国家都把材料学作为重点发展的学科之一，可见材料在现代技术中的重要地位和作用。在人们日常生活和现代工程技术的各个领域，工程材料的重要作用都是很明显的。例如，耐腐蚀、耐高压的材料在石油化工领域中应用；强度高、自重轻的材料在交通运输领域中应用；某些高分子材料、陶瓷材料和金属材料在生物医学领域中应用；高温合金和陶瓷在高温装置中应用；半导体材料、超导材料在通信、计算机、航天和日用电子器件等领域中应用；强度高、自重轻、耐高温、抗热振性好的材料在航空航天领域中应用；在机械制造领域中，从简单的手工工具到复杂的智能机器人，都应用了现代工程材料。世界各国对材料的研究和发展都非常重视，它在工程技术中的作用是不容忽视的。

21世纪以来，随着科学技术和现代工业的迅猛发展，对材料提出了更为严格的要求。新材料是材料科学发展的新趋势，新材料是指新出现的或正在发展中的、具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料；或采用新技术（工艺、装备），使传统材料性能有明显提高或产生新功能的材料。已发明的新材料（如纳米材料、超导材料、新能源材料、智能材料、生物医用材料、形状记忆合金、光学材料、航空材料等）是发展

信息、航空、生物、能源等高新技术的重要物质基础。在世界范围内，新材料技术的发展领域已成为高科技发展的一个关键领域。

### 1.1.1 工程材料的分类及其应用

工程材料是应用十分广泛的一类材料，主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、桥梁、化工、能源、仪器仪表和航空航天等工程领域中的材料，以及用来制造工程构件、机械装备、机械零件、工具、模具和具有特殊性能（如耐腐蚀、耐高温等）的材料，工程材料学是材料科学的一个分支。

据粗略统计，目前世界上的材料已达40余万种，并且每年还以约5%的速率增加。现代材料种类繁多，用途广泛。工程材料有许多不同的分类方法，通常按照使用性能的不同，将工程材料分为结构材料和功能材料两大类。结构材料是指以力学性能为主要使用性能的材料，主要用于工程结构和机械零件等；功能材料是以某些物理、化学或生物功能等为主要使用性能的材料，主要用于特殊功能零件。

按照化学组成的不同，可将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。

#### 1. 金属材料

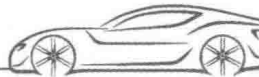
目前，机械工业生产中，金属材料因具有良好的力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能，是目前用量最大、应用最广泛、最重要的工程材料。金属材料包括：①钢铁材料——指铁和以铁为基的合金；②非铁金属材料——指钢铁材料以外的所有金属及其合金。金属材料还可通过不同成分配制冶炼、不同加工和热处理方法来改变其组织和提高性能，从而进一步扩大其使用范围。金属材料中应用最广的是钢铁材料，在机械产品中占整个用材的60%以上。

#### 2. 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组成物的材料，是有机合成材料。高分子材料某些力学性能不如金属材料，但它们具有金属材料不具备的特性，如塑性、耐蚀性、隔声、电绝缘性、减振性等性能较好，以及密度小、原料来源丰富、价廉以及成形加工容易等优点，因而近年来发展迅速。目前，高分子材料在机械、电气、纺织、汽车、飞机和轮胎等制造工业和化学、交通运输、航空航天等行业中都有广泛应用。它们不仅被用作人们的生活用品，而且在工业生产中已日益广泛地用于代替部分金属材料，将成为可与金属材料相匹敌的、具有强大生命力的材料。

#### 3. 陶瓷材料

陶瓷材料是人类应用最早的材料之一：它坚硬、稳定，可用于制造工具、用具；在一些特殊的情况下也可作为结构材料。陶瓷属于一种无机非金属脆性材料，分为普通陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三类。普通陶瓷主要用作建筑材料；特种陶瓷主要用作耐高温、耐腐蚀、耐普通磨损等的工程材料；金属陶瓷主要用作工具材料和耐热材料。新型陶瓷材料的塑性与韧性虽低于金属材料，但它们具有高熔点、高硬度、耐高温以及一些其他



特殊的物理性能，可用于制造工具、用具以及功能结构材料，已成为具有很大潜力的新型工程材料。

#### 4. 复合材料

复合材料是两种或两种以上不同化学性质或不同组织结构，以微观或宏观的形式组合而成的材料。它既保持了所组成材料各自的特性，又具有组成后的新特性，在强度、刚度和耐蚀性等方面比单纯的金属、陶瓷、高分子材料等优越，是一类特殊的工程材料，且其力学性能和功能可以根据使用需要进行设计、制造。现在，复合材料的应用领域正在迅速扩大，其种类、数量和质量得到了飞速发展，具有广阔的应用前景。高比强度和比弹性模量的复合材料已广泛地应用于航空、建筑、机械、交通运输以及国防工业等领域。

### 1.1.2 材料发展简史

材料是人类生产、生活的物质基础。人类社会的发展历程是以材料为主要标志的。历史上，新材料的发明和广泛使用被视为人类社会进化的重要里程碑，对材料的认识和利用能力决定着社会的形态和人类生活的质量。

中国古代在材料及其加工工艺方面的科学技术曾遥遥领先于同时代的欧洲，为世界文明和人类进步做出了杰出的贡献。100 万年以前的旧石器时代，原始人以石头作为工具；1 万年以前，人类对石器进行加工，使之成为器皿和精致的工具，从而进入新石器时代。现代考古发掘证明，原始社会末期已经制成实用的陶器，由此发展到东汉出现瓷器，中国成为最早生产瓷器的国家。夏朝（约公元前 2070 年始）以前就开始了青铜的冶炼，至公元前 1000 多年的殷商时代，青铜冶铸技术已达到很高的水平。在 3000 多年前已开始用陨铁制造兵器，在 2700 多年前的春秋时期已冶炼出生铁，比欧洲要早 1800 多年。18 世纪，钢铁工业的发展成为产业革命的重要内容和物质基础。19 世纪中叶，现代平炉和转炉炼钢技术的出现使人类真正进入了钢铁时代。与此同时，各种有色金属相继问世并得到广泛应用。直到 20 世纪中叶，金属材料在材料工业中一直占有主导地位。此后，科学技术迅猛发展，新材料出现了划时代的变化。首先是人工合成高分子材料问世，仅几十年的时间，高分子材料就成为国民经济、国防尖端科学和高科技领域不可缺少的材料。其次是陶瓷材料的快速发展，合成化工原料和特殊制备工艺的发展使陶瓷材料产生了飞跃，出现了从传统陶瓷向先进陶瓷的转变，许多新型功能陶瓷形成了产业，满足了电力、电子技术和航天技术的发展需要。

改革开放以来，作为国民经济物质基础的材料得到了高速发展。目前，各种金属材料品种较齐全，已基本满足国民经济高速发展的需要。我国粗钢产量自 1996 年的 1.01 亿 t 到 2013 年的 7.79 亿 t，一直位居世界第一。近年来，我国从“神舟”号到“玉兔”号载人飞船相继发射成功，蛟龙号载人潜水器载人深潜成功，以及在生物医学（如骨科、齿科材料，人工器官材料，医用器械等）方面所取得的显著成果，都离不开材料科学与工程技术的支撑。随着现代科学技术的发展，对工程材料的要求也越来越高。

### 1.1.3 工程材料的发展展望

目前,机械工业正朝着高速、自动、精密化方向发展。在机械产品设计及制造与维修过程中,所遇到的有关机械工程材料和热处理及材料选用方面的问题日趋增多,使机械工业的发展与工程材料学科之间的关系更加密切。机械产品的可靠性和先进性,除设计因素外,在很大程度上取决于所选用材料的质量和性能。新型材料的发展是发展新产品和提高产品质量的物质基础。例如,各种高强度材料的出现,为发展大型结构件和逐步提高材料的使用强度等级、减轻产品自重提供了条件;高性能的高温材料、耐腐蚀材料为开发和利用新能源开辟了新的途径。现代发展起来的新型材料(如新型纤维材料、功能性高分子材料、非晶质材料、单晶体材料、精细陶瓷和新合金材料等)对于研制新一代的机械产品具有重要意义。如碳纤维比玻璃纤维强度和弹性更高,用于制造飞机和汽车等结构件,能显著减轻自重,从而节约能源。精细陶瓷(如热压氮化硅和部分稳定结晶氧化锆)具有足够的强度,且相比合金材料有更高的耐热性,能大幅度提高热机的效率,是制造绝热发动机的关键材料。此外,还有很多与能源利用和转换密切相关的功能材料的技术突破,将会引起机电产品设计与制造的巨大变革。

## 1.2 成形技术概述

材料成形一般指采用适当的方法或手段,将原材料转变成所需要的具有一定形状、尺寸和使用功能的毛坯或成品。汽车材料在制造成产品的过程中,都需要经过成形加工。如发动机气缸体、变速器箱体、转向器壳体等需要铸造成形;齿轮和轴的毛坯、连杆、曲轴等需要锻造成形;车身钣金件需要冲压、拉深及焊接成形;车厢隔板、门内装饰板、仪表板等塑料制品多采用注塑成形技术生产。同种产品可以通过不同成形方法获得,同时为获得成品往往需要多种成形技术共同作用。随着新材料的不断涌现、工业技术的发展,材料成形技术得到了突飞猛进的发展,从传统的铸造、锻造等技术发展到以精密成形、复合成形、材料制备与成形一体化、数字化成形等技术为代表的新一代材料成形技术,镁合金、铝合金、碳纤维等材料的大量应用,推动了新型材料成形技术的发展。计算机、人工智能等技术的应用也进一步推动了材料成形技术向着更高水平发展。

### 1.2.1 制造与材料加工及成形

#### 1. 制造

制造一般指通过人工或机器将原材料或半成品加工成为可供使用的物品(即产品)。随着历史的发展和技术的进步,制造的含义在不断扩展。目前制造的含义有狭义制造和广义制造两类。狭义制造又称为“小制造”,指产品的制作过程,如齿轮的制造、发动机的制造等。而广义制造又称为“大制造”,指产品的全生命周期过程,是包括产品设计、材料选择、生产规划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售和售后服务的一



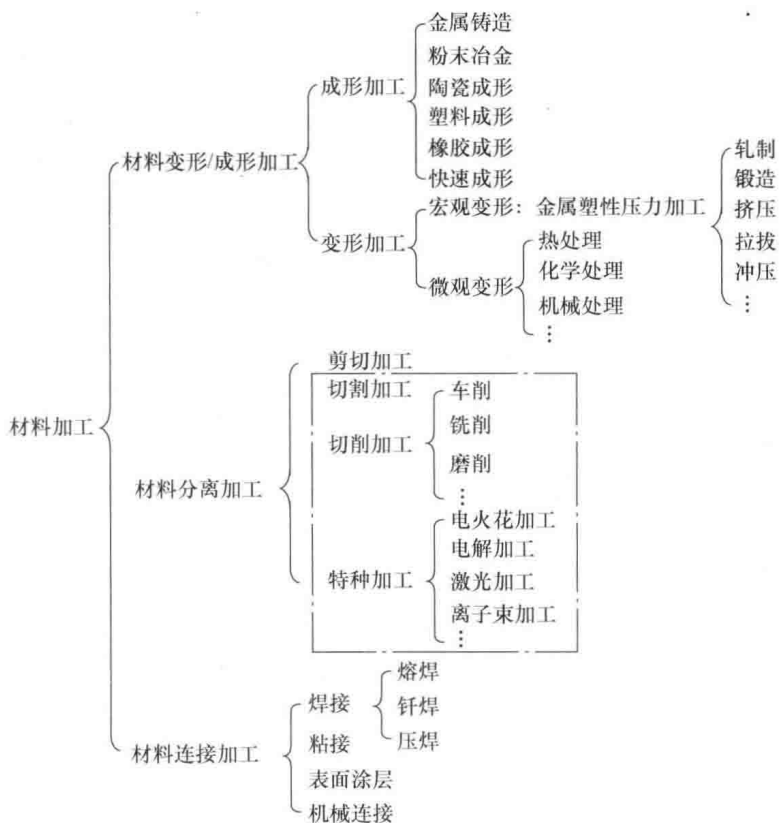
系列相关活动和工作的总称。

## 2. 材料加工及成形

材料加工一般指采用适当的方式，将材料加工成具有一定形状、尺寸和使用性能的零件或产品。材料加工的方法较多，按照在加工过程中材料的形态改变方式的不同，材料加工可以分为三大类：材料变形/成形加工、材料分离加工和材料连接加工，见表1-1。

通常情况下，根据材料在加工过程中的温度，人们将金属材料的加工分为冷加工和热加工两大类。即在金属再结晶温度以下的材料加工称为冷加工，而高于金属再结晶温度的材料加工称为热加工。铸造、锻造和焊接等是金属材料的常见热加工方法，是将金属原材料加工成毛坯或成品的主要方法，人们习惯称为成形加工。车削、铣削、磨削以及特种加工等是金属材料的常见冷加工方法，人们习惯称为机械加工。相应地，制造技术也可以分为成形制造技术和机械加工制造技术两大类。

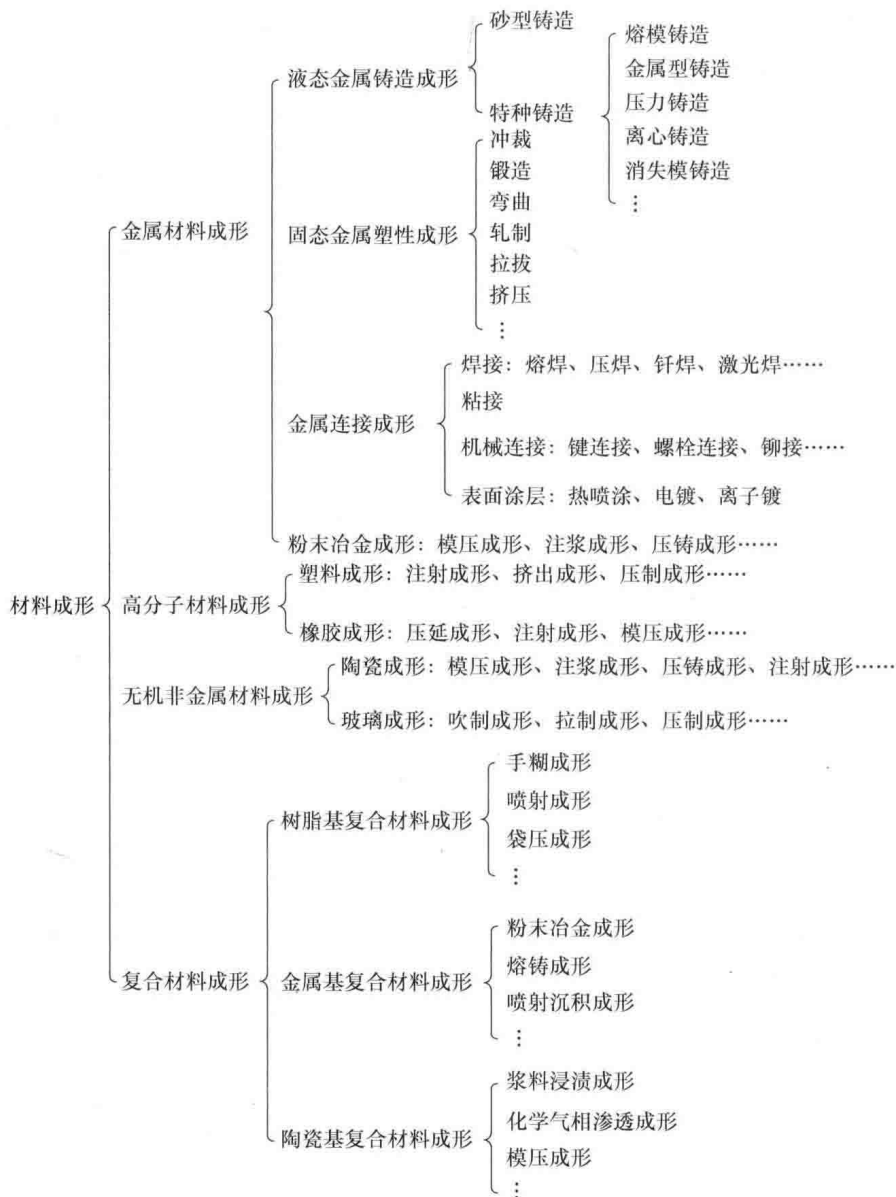
表 1-1 材料加工的分类



### 1.2.2 材料成形方法的分类

材料成形方法除了切割加工、切削加工和特种加工（见表1-1点画线），其余材料加工方法都可以归为材料成形方法。按照材料的种类分类，材料成形大致可分为金属材料成形、高分子材料成形、无机非金属材料成形以及复合材料成形，见表1-2。在表1-2中，有一些成形方法是重复的，例如注射成形可以用于塑料成形，也可以用于橡胶成形，还可以用于陶瓷制品成形。

表 1-2 材料成形方法的分类

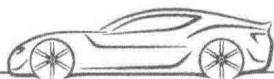


### 1.3 材料的性能及选材

材料的性能是用来表征材料在给定外界条件下的行为的参量。材料的性能包括使用性能和工艺性能。

材料的使用性能是指零部件在正常使用条件下材料所表现出来的性能。它主要包括力学性能、物理性能和化学性能。材料的使用性能决定了材料的使用范围、安全可靠性和使用寿命。

材料的工艺性能是指材料在加工过程中对各种不同加工方法的适应能力，即材料采用某种加工方法制成成品的难易程度。对于金属材料来讲，工艺性能主要包括铸造性能、



锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性能。材料的工艺性能直接影响着零部件的质量，是零部件选材和制订加工工艺路线时必须考虑的因素之一。

由于非金属材料性能指标及测试方法与金属材料相同或相似，所以本节主要以金属材料为例阐述工程材料的一般性能及主要指标。

### 1.3.1 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在外加载荷作用下所表现出来的性能，主要包括强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度等。用来表征材料力学性能的各种临界值或规定值，统称为力学性能指标。材料力学性能的优劣就是用这些指标的具体数值来衡量的。

材料的力学性能不仅是设计和制造机械零件的主要依据，也是评价金属材料质量的重要依据。

根据外力的性质和作用方式不同，一般可将载荷分为静载荷、冲击载荷和交变载荷。静载荷指大小和作用方向不变或者变动非常缓慢的载荷，如汽车在静止状态下，车身自重引起的对车架的压力就属于静载荷。冲击载荷是指以较高速度作用于零部件上的载荷，即突然增大或变动很大的载荷，如当汽车在颠簸不平的道路上行驶时，车身对悬架的冲击即为冲击载荷。交变载荷指大小与方向随时间发生周期性变化的载荷，又称循环载荷，如运转中的发动机曲轴、齿轮等零部件所承受的载荷均为交变载荷。载荷按其作用形式的不同，又可分为拉伸载荷、压缩载荷、扭转载荷、剪切载荷和弯曲载荷等，如图 1-1 所示。

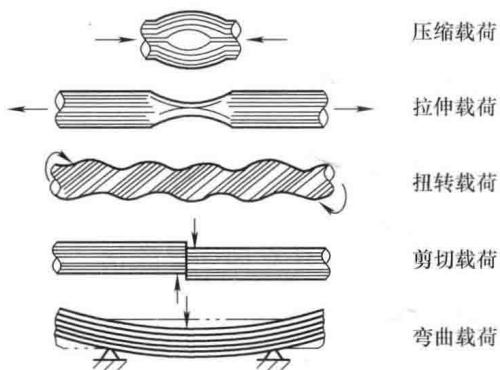


图 1-1 载荷的不同作用形式

在外载荷作用下，材料几何尺寸和形状的变化称为变形。变形一般可分为弹性变形和塑性变形。所谓弹性变形，是指构件随着外力的作用而产生变形，并随着外力卸除后恢复原状。材料在外力作用下发生形状和尺寸的变化，外力卸除后又恢复原来形状和尺寸的特性称为弹性。而塑性变形则是指构件在外力作用下产生变形后，不能随着外力的卸除而消失的变形，也称为永久变形。

材料的力学性能主要取决于材料本身的化学成分、组织结构、冶金质量、表面和内部的缺陷等内在因素，但一些外在因素（如载荷性质、温度、环境介质等）也会影响到材料的力学性能。因此，力学性能不仅是验收、鉴定材料性能的重要依据，也是零件设计和选择材料的重要依据。

#### 1. 强度与塑性

材料的强度与塑性是材料最重要的力学性能指标。

强度是指材料在载荷作用下，抵抗塑性变形或断裂的能力。根据所加载荷形式的不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。材料的塑性是指材料在断裂之前产生永久变形的能力，通常采用断后伸长率和断面收缩率两个指标来表征。

材料的抗拉强度和塑性指标可以通过拉伸试验获得。拉伸试验的方法是用静拉力对标准试样进行轴向拉伸，同时连续测量力和试样相应的伸长量，直至试样断裂。根据测得的数据，可求出材料有关的力学性能。通常，采用拉伸试验来测定材料的强度与塑性等各种力学性能指标。

**(1) 拉伸试验** 根据国家标准《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)的规定，将材料制成标准拉伸试样，如图1-2所示，将试样装在材料拉伸试验机上，缓慢地加载进行拉伸，试样逐渐伸长，直至断裂。国家标准对拉伸试样的形状、尺寸及加工要求均有明确规定，通常采用圆柱形拉伸试样。 $L_0 = 10d_0$ 时称为长试样， $L_0 = 5d_0$ 时称为短试样。在拉伸试验过程中，自动记录装置可给出能反映静拉伸载荷  $F$  与试样轴向伸长量  $\Delta L$  对应关系的  $F - \Delta L$  曲线。低碳钢的  $F - \Delta L$  曲线如图1-3所示。

将载荷  $F$  除以试样原始横截面面积  $S_0$ ，得到应力  $R$  ( $R = F/S_0$ )，单位为 MPa。将伸长量  $\Delta L$  除以试样原始长度  $L_0$ ，得到应变  $e$  ( $e = \Delta L/L_0$ )。以  $R$  为纵坐标， $e$  为横坐标，作出应力-应变曲线，即  $R - e$  曲线。

应力-应变曲线与  $F - \Delta L$  曲线形状差别不大。由于应力-应变曲线已消除了试样尺寸对试验结果的影响，从而能直接反映出材料的性能，也便于材料之间力学性能指标的比较。

由图1-3中的曲线可以看出，拉伸过程中明显地表现出以下几个变形阶段：

1) 弹性变形阶段 ( $Op$  段,  $pe$  段)。在  $Op$  段，试样的变形量与外加载荷成正比。如果卸除载荷，试样立即恢复原状。在  $pe$  段，试样仍处于弹性变形阶段，但载荷与变形量不再成正比。

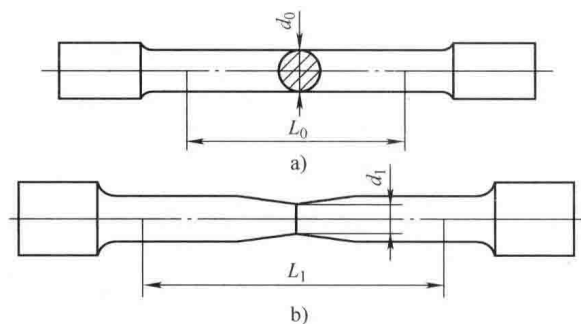


图 1-2 标准拉伸试样

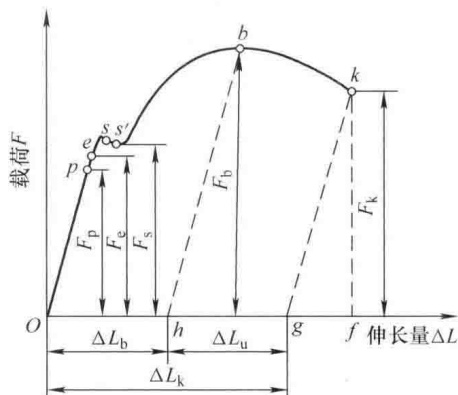
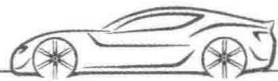


图 1-3 低碳钢的  $F - \Delta L$  曲线

2) 屈服阶段 ( $es$  段,  $ss'$  段)。此阶段试样不仅产生弹性变形，还发生塑性变形。即载荷卸掉以后，一部分变形可以恢复，还有一部分变形不能恢复。在  $ss'$  段，会出现平台或锯齿线，这时载荷不增加或只有较少增加，试样却继续伸长，这种现象称为屈服， $s$  点称为屈服点。

3) 强化阶段 ( $s'b$  段)。要使试样继续发生变形，必须不断增加载荷，随着试样塑性变形的增大，材料的变形抗力也逐渐增加， $b$  点即为试样抵抗外加载荷的最大能力。



4) 缩颈阶段 ( $bk$  段)。当载荷增加到最大值后, 试样发生局部收缩, 称为“缩颈”, 此时变形所需载荷也逐渐降低。至  $k$  点, 试样断裂。

也就是说, 逐渐加大拉伸载荷  $F$ , 试样将出现弹性变形、微量永久变形、屈服变形、均匀变形、(大量永久变形) 缩颈与断裂几个阶段。

做拉伸试验时可以观察到, 低碳钢等材料在断裂前有明显的塑性变形, 这种断裂称为塑性断裂, 塑性断裂的断口呈“杯锥”状, 这种材料称为塑性材料。铸铁、玻璃等材料在断裂前未发生明显的塑性变形, 为脆性断裂, 断口是平整的, 这种材料则称为脆性材料。汽车工业上使用的金属材料通常都没有明显的屈服现象, 而且有些车用脆性材料不仅没有屈服现象, 也不产生“缩颈”现象, 如高碳钢和铸铁等材料。

**(2) 材料强度** 根据材料的变形特点, 表征材料强度的指标主要有屈服强度和抗拉强度; 表征材料刚度的指标为弹性模量。

1) 屈服强度。金属材料产生屈服时对应的最低应力称为屈服强度, 用符号  $R_{eL}$  表示, 单位为 MPa。

$$R_{eL} = F_s / S_0$$

式中,  $F_s$  为试样发生屈服变形时的载荷 (N);  $S_0$  为试样原始横截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

机械零件经常因过量的塑性变形而失效, 一般来说不允许零件发生明显的塑性变形。正因为如此, 工程中常根据  $R_{eL}$  确定材料的许用应力。

弹性模量  $E$  为弹性变形的应力与应变的比值, 表示金属材料抵抗弹性变形的能力。弹性零件的工作应力不能大于其弹性极限, 否则将导致零件失效或损坏。因此弹性极限是弹性零部件 (钢板弹簧、螺旋弹簧等) 设计和选材的主要依据。

除退火和热轧的低碳钢和中碳钢等少数材料在拉伸过程中有屈服现象以外, 工业上使用的大多数材料都没有屈服现象。因此, 需采用规定塑性延伸强度  $R_p$ ,  $R_p$  是指规定残余伸长下的应力。国家标准 GB/T 228.1—2010 中规定: 当试样卸除载荷后, 其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比时的应力, 即作为规定塑性延伸强度  $R_p$ , 并附角标说明规定残余伸长率。例如  $R_{p0.2}$  表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力。

2) 抗拉强度。抗拉强度指试样在拉伸过程中所能承受的最大应力值, 用符号  $R_m$  表示, 单位为 MPa。

$$R_m = F_b / S_0$$

式中,  $F_b$  为试样断裂前所承受的最大载荷 (N);  $S_0$  为试样原始横截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

抗拉强度  $R_m$  是设计和选材的主要依据之一, 是工程技术上的主要强度指标。一般来说, 在静载荷作用下, 只要工作应力不超过材料的抗拉强度, 零件就不会发生断裂。

在工程上, 屈强比  $R_{eL} / R_m$  是一个很有意义的指标。其比值越大, 越能发挥材料的潜力。但是为了使用安全, 该比值也不宜过大, 适当的比值一般为 0.65 ~ 0.75。另外, 比强度  $R_m / \rho$  也常被提及, 它表征了材料强度与密度之间的关系。在考虑汽车轻量化的问题时, 常常用到这个指标。

**(3) 材料的塑性指标** 工程上广泛应用的表征材料塑性好坏的力学性能指标主要有断后伸长率和断面收缩率。

1) 断后伸长率。断后伸长率指试样拉断后, 标距伸长量与原始标距的百分比, 用符

号  $A$  表示, 即

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中,  $L_1$  为试样断裂后的标距;  $L_0$  为试样的原始标距。

2) 断面收缩率。断面收缩率指试样拉断后, 横截面面积的缩减量与原始横截面面积之比, 用符号  $Z$  表示, 即

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中,  $S_1$  为试样断裂处的最小横截面面积 ( $\text{mm}^2$ );  $S_0$  为试样的原始横截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

断后伸长率  $A$  表示材料的伸长变形能力, 断面收缩率  $Z$  则代表材料的收缩变形能力。由上述公式可知,  $A$ 、 $Z$  值越大, 材料的塑性越好。材料具有一定的塑性, 可以提高零件使用的可靠性, 这样零件在使用过程中偶然过载时, 若发生一定的塑性变形, 也不至于突然断裂, 造成事故。对于金属材料来讲, 具有一定的塑性才能顺利地进行各种变形加工。材料的塑性越好, 就越易于进行压力加工, 例如铜、铝、低碳钢的加工成形, 又如汽车车身外用钢板件, 只有采用具有优良塑性的冷轧钢板, 才能确保加工出各种复杂的形状。

## 2. 硬度

硬度是材料抵抗局部变形或破坏的能力, 特别是抵抗塑性变形、压痕或划痕的能力。它是衡量材料软硬程度的一项性能指标, 也是评定材料力学性能的重要指标之一。硬度是强度的局部反映, 一般来说强度越高, 硬度也越高。硬度试验已成为产品质量检查、制定合理工艺的重要试验方法之一。在产品设计的条件中, 硬度也是一项主要的指标。

生产中, 测定硬度的方法最常用的是压入硬度法, 是用一定载荷将一定几何形状的压头压入被测试的金属表面, 根据压头压入程度来测量硬度值。同样的压头在相同载荷作用下压入金属材料表面时, 压入程度越大, 材料的硬度值越低; 反之, 硬度值就越高。测试硬度的方法很多, 最常用的有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法。

最常用的硬度指标有布氏硬度 (HBW) 和洛氏硬度 (HRC)。此外, 还有维氏硬度 (HV)、显微硬度和锤击式布氏硬度等。

**(1) 布氏硬度** 布氏硬度指在布氏硬度试验机上测得的材料的硬度。布氏硬度试验是用一定大小的载荷  $F$ , 把直径为  $D$  的硬质合金球压入被测试样表面, 如图 1-4 所示, 保持规定时间后卸除载荷, 移去压头, 用读数显微镜测出压痕平均直径  $d$ 。用载荷  $F$  除以压痕的表面积所得的商, 即为被测材料的布氏硬度值。布氏硬度的单位为 MPa, 但习惯上只写明硬度值而不标出单位。在实际测试时, 布氏硬度值一般不用计算, 而是在测出  $d$  值之后, 根据  $d$  值查表得到硬度值。

用硬质合金球作为压头所测得的布氏硬度用符号 HBW 表示, 适用于测量硬度值不超过 650 的材料。布氏硬度试验因压痕面积较大, 能反映出一定范围内被测金属的平均硬度, 所以试验结果较精确。但因压痕偏大, 适用于测量组织粗大或组织不均匀的材料



(如铸铁), 常用于测定退火、正火、调质钢、铸铁以及非铁金属等原材料或半成品的硬度, 一般不宜用于测试成品或薄片金属的硬度。布氏硬度的表示方法规定为: 符号 HBW 前面的数值为硬度值, 符号后面按以下顺序排列, 以表示试验条件: 压头球体直径 (单位: mm)、试验载荷 (单位: kgf,  $1\text{kgf} \approx 9.807\text{N}$ )、试验载荷保持时间 (单位: s, 10 ~ 15s 不标注)。如 500HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球在 750kgf (7355N) 的载荷下保持 10 ~ 15s, 测得的布氏硬度值为 500。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度指在洛氏硬度试验机上测得的材料的硬度。洛氏硬度是目前应用最广泛的硬度力学性能试验方法之一, 它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。洛氏硬度试验原理如图 1-5 所示。洛氏硬度试验操作简单迅速, 压痕较小, 有利于保护成品件表面, 且硬度测量范围宽, 可测试很薄、极软和极硬的材料, 测试时不必查表或计算即可直接读出硬度值。但其缺点是, 精确度较差, 重复性不好, 通常要求在同一零件的多个表面进行测试, 取其平均值作为该零件的硬度值。

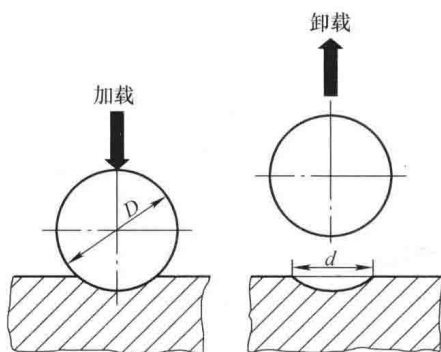


图 1-4 布氏硬度试验原理

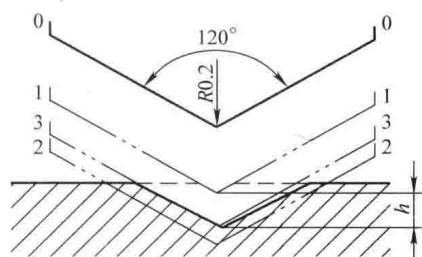


图 1-5 洛氏硬度试验原理

洛氏硬度是用金刚石圆锥体或硬质合金球作为压头, 先施加初载荷  $F_1$  (99N), 再施加主加载荷  $F_2$ , 即总载荷  $F = F_1 + F_2$ 。总载荷分别为 588N、980N 和 1471N 三种。我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种, 试验条件及应用范围见表 1-3。

表 1-3 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围 (GB/T 230.1—2009)

| 硬度符号 | 压头类型                           | 总试验力/N | 硬度值的有效范围 | 应用范围            |
|------|--------------------------------|--------|----------|-----------------|
| HRA  | 金刚石圆锥体                         | 588    | 70 ~ 85  | 硬质合金、碳化物、表面淬火钢等 |
| HRB  | $\phi 1.588\text{mm}$<br>硬质合金球 | 980    | 25 ~ 100 | 非铁金属、正火钢、退火钢等   |
| HRC  | 金刚石圆锥体                         | 1471   | 20 ~ 69  | 一般淬火钢、调质钢等      |

洛氏硬度值的表示方法规定为: A、C 标尺洛氏硬度用硬度值、硬度符号 HR 和使用标尺字母表示, 如 52HRC、70HRA; B 标尺洛氏硬度值用硬度值、硬度符号 HR、使用标尺字母和球压头代号 (硬质合金球代号为 W) 表示, 如 60HRBW。

由于各种硬度试验条件不同, 因此各硬度试验值之间不能直接进行比较。但根据试验结果, 可以按如下经验公式粗略换算布氏硬度和洛氏硬度: 硬度在 200 ~ 600HBW 范围内,  $1\text{HRC} = 1/10\text{HBW}$ 。