

工程材料及 成形技术

艾云龙 刘长虹 罗军明 等编著



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工程材料及成形技术

艾云龙 刘长虹 罗军明 等编著



机械工业出版社

本书立足于材料的工程应用,以材料的化学成分、组织结构、工艺方法、性能特点及其相互关系为主线,较为系统地论述了常用工程材料及成形技术的基本理论和知识。全书共14章,每章后均附有复习思考题。主要内容包括:工程材料及成形技术在制造业中的地位、作用与发展;工程材料的力学性能与工艺性能;材料科学基础知识(包括晶体结构与结晶、相图,塑性变形与再结晶);热处理原理及工艺方法;常用工程材料的分类及编号,特点及用途;机械零件的失效分析与选材;工程材料的成形(包括铸造成形、压力加工成形和焊接成形)等。书中所有涉及国家(行业)标准的力学性能符号及测试方法、材料分类和牌号、名词术语、计量单位,均与现行标准一致。

本书知识面广、综合性强、实例丰富,且适用范围广,可作为材料类、机械类、飞行器类、测控类等本科专业教材,其适用教学学时数为64~80学时,也可作为其他层次和相关工程技术人员的参考用书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 308596956, 电话: 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成形技术/艾云龙等编著. —北京:机械工业出版社,2016.2
ISBN 978-7-111-52755-8

I. ①工… II. ①艾… III. ①工程材料-成型 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第012549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:汤枫 责任编辑:汤枫 程足芬

责任校对:张艳霞 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年2月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·477千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-52755-8

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:(010)88379833

读者购书热线:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

工程材料及成形技术是研究工程构件及机械零件常用材料和成形加工方法的一门专业基础课。本书从机械工程材料的应用角度出发,系统阐述了常用工程材料及成形加工的基本知识,为读者从事材料成形、加工和机械设计及制造等工作奠定必要的基础。本书可以拓宽读者的专业面,同时也可以帮助高校培养复合型人才。

在结构体系上,本书强调厚基础、宽口径、重技能,在教学内容基础性和实践性的原则下,以培养学生的创新能力和解决实际问题的能力为主线,同时融合传统的“金属学”“金属材料及热处理”“金属工艺学”等知识,拓展了非金属材料的知识。

在编写过程中,本书注重在内容上的更新,并保持其先进性、科学性和实用性。主要体现在:①所有涉及国家(行业)标准的力学性能符号及测试方法、材料分类和牌号、名词术语、计量单位,均与现行标准一致;②介绍了热处理技术、材料成形技术的发展现状和趋势;③提供了两个实用的附录,即常用力学性能指标的新旧标准对照和国内外常用钢号对照表,以方便教学和工程研究人员查找对照。

本书知识面广、综合性强、实例丰富,且适用范围广,可作为金属材料工程、材料成形及控制、机械设计及其自动化、飞行器制造工程、测控技术与仪器等本科专业教材,也可供其他层次和相关工程技术人员参考。其适用教学学时数为64~80学时,使用时可结合各专业的具体情况进行调整,有些内容可供学生自学。

本书共14章,参加本书编写的作者为南昌航空大学金属材料工程专业的老师,他们分别是:艾云龙(第一、三、四章、第六章第九节、第七、十二章)、刘长虹(第二、五、六、八、十三章)、张剑平(第九章)、郑海忠(第十章)、邓莉萍(第十一章)和罗军明(第十四章)。

本书由艾云龙、刘长虹共同统稿,张建云主审了全书。

由于编者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请广大读者和师生批评指正。

编 者

目 录

前言		第三节 过冷奥氏体转变图	66
第一章 绪论	1	第四节 钢的退火和正火	69
第一节 材料科学和材料成形技术的发展	1	第五节 钢的淬火	71
第二节 工程材料及其分类	2	第六节 钢的回火	75
第三节 原子间的结合键	3	第七节 钢的表面热处理和化学热处理	77
复习思考题	5	第八节 热处理技术条件及工序位置	82
第二章 材料的性能	6	第九节 热处理技术发展概述	86
第一节 静态力学性能	6	复习思考题	90
第二节 动态力学性能	9	第七章 工业用钢	92
第三节 断裂韧度	12	第一节 钢的分类和牌号	92
第四节 高低温力学性能	13	第二节 合金元素在钢中的作用	94
第五节 材料的工艺性能	14	第三节 钢中常存杂质元素的影响	97
复习思考题	15	第四节 结构钢	97
第三章 金属的结构与结晶	16	第五节 工具钢	110
第一节 金属的晶体结构	16	第六节 不锈钢和耐热钢	121
第二节 金属的实际结构和晶体缺陷	21	复习思考题	129
第三节 金属的结晶与铸锭	25	第八章 铸铁	131
复习思考题	29	第一节 概论	131
第四章 二元合金	30	第二节 灰铸铁	132
第一节 合金的晶体结构	30	第三节 球墨铸铁	135
第二节 二元合金相图	32	第四节 蠕墨铸铁	137
第三节 铁碳合金	38	第五节 可锻铸铁	138
复习思考题	45	第六节 合金铸铁	139
第五章 金属的塑性变形与再结晶	47	复习思考题	141
第一节 金属的塑性变形	47	第九章 有色金属	142
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响	50	第一节 铝及铝合金	142
第三节 回复与再结晶	53	第二节 铜及铜合金	149
第四节 金属的热变形	56	第三节 钛及钛合金	154
第五节 提高材料塑性变形的抗力	56	第四节 轴承合金	156
复习思考题	58	第五节 镁及镁合金	159
第六章 钢的热处理	59	第六节 粉末冶金材料	162
第一节 钢在加热时的转变	59	思考练习题	164
第二节 钢在冷却时的转变	61	第十章 非金属材料	165

第一节 高分子材料	165	第十三章 压力加工	230
第二节 陶瓷材料	169	第一节 压力加工基本原理	230
第三节 复合材料	174	第二节 自由锻	234
复习思考题	178	第三节 模锻	240
第十一章 工程材料的选用	179	第四节 板料冲压	249
第一节 零件的失效分析	179	第五节 少无屑锻压工艺简介	259
第二节 选材的一般原则和步骤	181	第六节 各种压力加工方法比较	264
第三节 典型零件选材及工艺分析	184	复习思考题	265
复习思考题	192	第十四章 焊接	267
第十二章 铸造	193	第一节 焊接方法	267
第一节 铸造基本原理	193	第二节 常用金属材料的焊接	280
第二节 砂型铸造	202	第三节 焊接结构设计	289
第三节 特种铸造	213	复习思考题	295
第四节 铸件结构设计	221	附录	298
复习思考题	228	参考文献	303

第一章 绪 论

第一节 材料科学和材料成形技术的发展

一、材料科学的发展

材料是所有科技进步的核心，是人类生产和社会发展的重要物质基础，而且与人类文明的关系非常密切。人类最早使用的材料是石头、泥土、树枝、兽皮等天然材料。由于火的使用，人类发明了陶器、瓷器，其后又发明了青铜器、铁器。因此，在人类文明史上曾以材料作为划分时代的标志，如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。而在 20 世纪 60 年代，人们把材料、能源、信息并列称为现代技术和现代文明的三大支柱，80 年代又把新型材料、信息技术和生物技术列为新技术革命的主要标志。现代社会，材料已成为国民经济建设、国防建设和人民生活的重要组成部分。

材料科学主要研究材料的化学组成、微观组织、加工制造工艺与性能之间的关系。材料科学是多学科交叉与结合的结晶，是一门与工程技术密不可分的应用科学。1863 年第一台金相光学显微镜面世，促进了金相学的研究，使人们步入材料的微观世界。1912 年发现了 X 射线，开始了晶体微观结构的研究。1932 年发明的电子显微镜以及后来出现的各种先进分析工具，把人们带到了微观世界的更深层次。X 射线技术、电子显微镜技术、同位素技术等 在材料科学中的成功应用，使材料科学进入了新的时代，推出了像“位错”“断裂物理”等一系列新的金属理论。同时，一些与材料有关的基础学科（如固体物理、量子力学、化学等）的发展，又更有力地推动了材料研究的深化。

材料研究和材料科学理论的发展促使金属材料得到飞速发展和大量应用。随着金属材料的发展，一些非金属材料、复合材料也迅速发展起来，弥补了金属材料性能的某些不足。复合材料具备的优异性能使得其广泛应用于卫星壳体、飞机机身、螺旋桨、发动机叶轮和汽车车身等。例如飞机机体材料中复合材料用量在不断增加，甚至出现了全塑料飞机。F22 战斗机钛合金用量为 40%，树脂基复合材料用量为 24%。20 世纪 90 年代出现了世界上第一架全塑料飞机“鹰”。2011 年首航的第一款塑料民航机——波音 787，包括机身和机翼在内的过半基本框架均由碳纤维增强塑料等新型复合材料制成。美国将火箭发动机金属壳体改用石墨纤维复合材料后其质量减轻了 38000 kg。碳-碳复合材料由于具有比强度高、抗热震性好、耐烧蚀性强、性能可设计等一系列优点，大量用于超音速飞机的制动片，以及洲际导弹弹头的鼻锥帽、固体火箭喷管和航天飞机的机翼前缘。陶瓷材料的发展同样引人注目，它除了作为重要的功能材料（例如可作光导纤维、激光晶体）以外，其脆性和热震性正在逐步改善，在提高飞机发动机的推重比和降低燃料消耗方面具有重要的作用，是最有前途的高温结构材料。目前世界范围内的新材料已有数万种，并以每年 5% 的速率递增，其发展趋势是高性能化、超高性能化、复合轻量化和智能化。今后人工合成材料将得到很大的发展，并进入金属、高分子、陶瓷及复合材料共存的时代。

除结构材料外，功能材料也在迅速发展，如高温超导材料、激光材料、磁性材料、电子材料、形状记忆材料等。材料科学技术的发展和 应用也促进了机械制造业的发展。现代设计与制造的机械已不是原来意义上的单纯机械了，已经发展到机电一体化的阶段，将来也可能把某些功能材料纳入机械工程材料之列。

二、材料成形技术的发展

传统的材料成形过程包括铸造、锻造和焊接，材料成形技术曾被称为材料热加工工艺，这是一门研究如何用热加工方法将材料加工成零构件，并研究如何保证、评估、提高其安全可靠度和寿命的科学。随着现代科技的飞速发展，材料成形技术的内容已远远超出了传统的热加工范围，例如常温下的冷冲压、超声波焊接，以及近年来发展的激光快速成形技术。因此现代材料成形技术可定义为“一切用物理、化学、冶金原理制造零构件，或改进其化学成分、微观组织及性能的方法”。其任务不仅是要研究如何获得必要的几何尺寸，同时还要研究如何控制获得一定的化学成分、组织结构和性能。

材料成形加工技术未来的发展方向是轻量化、精确化和高效化。主要表现在：

1) 成形精度向精密净成形的方向发展。主要方法有多种形式的精铸、精锻、精冲、冷温挤压、精密焊接与切割等。如用定向凝固熔模铸造生产的高温合金单晶体燃气轮机叶片，这是精密铸造技术在航空航天工业中应用的杰出体现。

2) 成形质量向近无缺陷方向发展。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，优化工序设计，实现一次成形及试模成功，保证质量。

3) 成形过程向快速化的方向发展。快速原型（RP）技术是一种将零件的电子模型（CAD模）应用“堆积”的原理直接制成产品原型的新技术。由于工艺过程简单，制造速度比传统制造方法快得多。

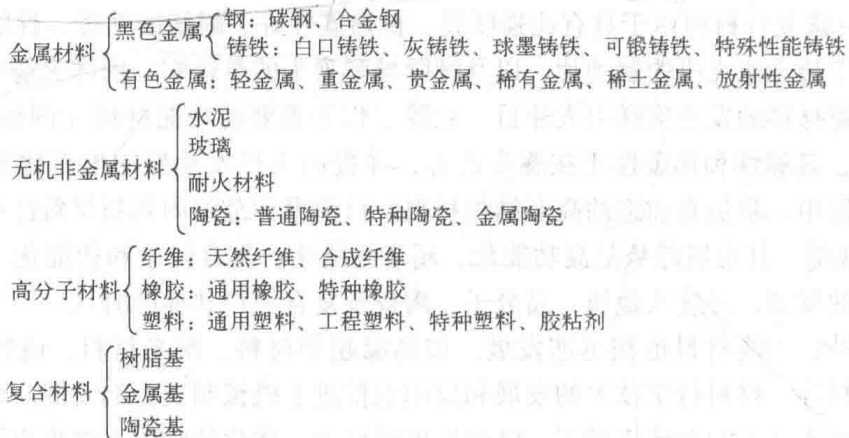
4) 成形方法向复合方向发展。如超塑性成形/扩散连接、形变热处理技术以及电弧与激光复合热源焊接等。

5) 材料成形加工过程向建模与仿真的方向发展。如锻件和铸件缺陷形成及预测的数值模拟，焊接热效应的数值模拟，金属材料热处理相变过程的模拟仿真以及组织、变形、性能预测等。多尺度模拟，特别是微观组织模拟（从毫米、微米至纳米尺度）是近年来研究的新课题，已经在汽车及航空航天工业中应用。

第二节 工程材料及其分类

工程材料是应用十分广泛的一大类材料，主要指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，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（如耐蚀、耐高温等）的材料。它通常用强度、硬度、韧性、塑性等力学性能指标来衡量其使用性能。

工程材料种类很多，用途广泛，有许多不同的分类方法，通常按其组成进行分类，如下所示：



1. 金属材料

金属材料是最重要的工程材料，包括钢铁、有色金属及其合金。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能，能采用比较简便和经济的工艺方法制成零件，因此金属材料是目前应用最广泛的材料。

2. 无机非金属材料

无机非金属材料主要是陶瓷材料、水泥、玻璃、耐火材料。它具有不可燃性、高耐热性、高化学稳定性、不老化性以及较高的硬度和良好的耐压性，且原料丰富，受到材料工作者和特殊行业的广泛关注。

陶瓷可作为各种无机非金属材料的通称。陶瓷是人类应用最早的材料，它坚硬、稳定，可以制造工具、用具，也可作为结构材料。陶瓷是一种或多种金属元素与一种非金属元素的化合物（主要为金属氧化物和金属非氧化物），其硬度很高，但脆性大。按照成分和用途，工业陶瓷材料可分为：

(1) 普通陶瓷（或传统陶瓷） 主要为硅、铝氧化物的硅酸盐材料。

(2) 特种陶瓷（或新型陶瓷） 主要为高熔点的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等的烧结材料。

(3) 金属陶瓷 主要指用陶瓷生产方法制取的金属与碳化物或其他化合物的粉末制品。

3. 高分子材料

高分子材料包括塑料、橡胶和纤维等。因其具有原料丰富、成本低、加工方便等优点，发展极其迅速，目前已在工业上得到了广泛的应用，并将越来越多地被采用。

工程上通常根据高分子材料的力学性能和使用状态将其分为三大类：

(1) 塑料 主要指强度、韧性和耐磨性较好的、可制造某些机器零件或构件的工程塑料，分热塑性塑料和热固性塑料两种。

(2) 橡胶 通常指经硫化处理的、弹性特别优良的聚合物，有通用橡胶和特种橡胶两种。

(3) 合成纤维 指由单体聚合而成的、强度很高的聚合物，通过机械处理所获得的纤维材料。

4. 复合材料

复合材料是两种或两种以上不同材料的组合材料，它的结合键非常复杂，其性能是它的组成材料所不具备的。复合材料通常是由基体材料（树脂、金属、陶瓷）和增强剂（颗粒、纤维、晶须）复合而成的。它既保持所组成材料的各自特性，又具有组成后的新特性，它在强度、刚度和耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越，且其力学性能和功能可以根据使用需要进行设计、制造。所以自1940年玻璃钢问世以来，复合材料的应用领域迅速扩大，其品种、数量和质量有了飞速发展，具有广阔的发展前景。

第三节 原子间的结合键

当原子相互靠近时，它们之间的相互作用将以键合方式进行。由于组成不同，材料的原子（或分子）结构各不相同，原子间的结合键性质和状态存在很大差别。

一、离子键

当正电性金属原子与负电性非金属原子接触时，前者失去最外层电子变成正离子，后者获得电子变成负离子，正、负离子由于静电引力而相互结合成化合物，这种相互作用就称为离子键。

图1-1a所示为离子键结合的示意图。离子键有较强的结合力，因此离子化合物的熔点、沸点、硬度很高，热膨胀系数很小。离子键中很难产生可以自由运动的电子，所以离子晶体是良好的绝缘

体，但在熔融状态下可借助离子迁移呈离子导电性。大部分盐类、碱类和金属化合物多以离子键方式结合，部分陶瓷材料（ MgO 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等）及钢中的一些非金属夹杂物也以此方式结合。

二、共价键

当两个相同的原子或性质相差不大的原子相互接近时，原子间不会有电子转移。此时原子间借助共用电子对所产生的力而结合，这种结合方式称共价键。图 1-1b 所示为共价键结合的示意图。共价键结合极为牢固，所以共价晶体（如金刚石）具有高的熔点、硬度和强度。由于全部外层电子束缚于共价键，所以它们不是导体（金刚石是绝缘体，硅、锗是半导体）。碳、硅、锗、锡、铅等亚金属主要以共价键方式结合，一些陶瓷（如碳化硅、氧化硅）和一些聚合物也是通过共价键使它们的原子结合在一起的。

三、金属键

金属原子结构中具有较少的外层电子，且易电离，当原子相互接近时，原子中的外层电子从各个原子中脱离出来为整个金属所共用，它们在金属内可自由运动而形成“电子气”。金属正离子和自由电子间的静电作用，使原子结合成金属整体，这种结合方式称为金属键，如图 1-1c 所示。由于在金属晶体中，价电子弥漫在整个体积内，所有的金属离子皆处于相同的环境之中，全部离子（或原子）均可被看成是具有一定体积的圆球，所以金属键无所谓饱和性和方向性。

金属由金属键结合，因此金属具有下列特性：

1) 良好的导电性和导热性。金属中的自由电子在一定的电位差条件下做定向运动，形成电流，从而显示出良好的导电性；自由电子的运动以及金属正离子的振动使金属具有良好的导热性。

2) 正的电阻温度系数（即随温度升高电阻增大）。绝大多数金属具有超导性，即在温度接近绝对零度时电阻突然下降，趋近于零。加热时，金属正离子振动加剧，阻碍电子通过，电阻升高，因而金属具有正的电阻温度系数。

3) 自由电子能吸收可见光的能量使金属具有不透明性，而吸收了能量被激发的电子回到基态时产生辐射，使金属具有光泽。

4) 金属键没有方向性，原子间也没有选择性，所以在受外力作用造成原子面做相对移动时，正离子与自由电子之间的结合键仍旧保持着，使金属显示出良好的塑性。

一般除铍、锑、锗、镓等亚金属为共价键结合外，绝大多数金属均以金属键方式结合。

四、分子键

He 、 Ne 、 Ar 等原子态惰性气体和 H_2 、 N_2 、 O_2 等气体分子在低温时都能结合成液体和固体，这类原子或分子间相互作用并没有价电子的得失、共有或公有化。它们的结合是依靠分子（或原子）偶极间的作用力（色散力、诱导力、取向力）来完成的。这种存在于中性的原子或分子间的结合力称为分子键，也称范德华力。图 1-1d 所示为分子键示意图。



图 1-1 原子结合键的类型

由于分子键很弱，故结合成的晶体具有低熔点、低沸点、低硬度、易压缩等性质。例如，石墨的各原子层之间为分子键结合，从而易于分层剥离，强度、塑性和韧性极低，接近于零，是良好的润滑剂。塑料、橡胶等高分子材料中的链与链间的结合力为范德华力，故它们的硬度比金属低，耐热性差，不具有导电能力。

五、氢键

氢键是一种特殊的分子间作用力。当两种负电性大且原子半径较小的原子与氢原子结合时，氢原子与一种原子间形成共价键，与另一原子间形成氢键。氢键的本质是静电吸引力，具有饱和性和方向性。氢键比一般范德华力强得多，但比离子键、共价键等要小。

氢键的形成对化合物的物理性能和化学性质有各种影响。例如水的物理性质，如密度、比热容、熔点、沸点等都较同类化合物高。

以上讨论的几种结合键的强度，以离子键和共价键最强，金属键次之，分子键最弱。

实际上，只有一种结合键的材料并不多见，大多数材料往往是几种键的混合结合，而以一种结合键为主。表 1-1 列出了常用工程材料的原子间结合键及其性能特点。

表 1-1 常用工程材料的原子间结合键及其性能特点

种类	结合键	熔点	弹性模量	强度硬度	塑性韧性	导电性 导热性	耐热性	耐腐蚀性	其他性能
金属材料	金属键为主	较高	较高	较高	良好（铸铁等脆性材料除外）	良好	较高	一般	密度大，不透明，有金属光泽
高分子材料	分子内共价键， 分子间分子键	较低	低	较低	变化大	绝缘， 导热不良	较低	高	密度小，热膨胀系数大， 抗蠕变性能低，易老化， 减摩性好
陶瓷材料	离子键或 共价键为主	高	高	抗压强度 与硬度高， 抗拉强度低	差	绝缘， 导热不良	高	高	耐磨性好，热硬性高， 抗热振性差
复合材料	取决于组成物的结合键	能克服单一材料的某些弱点，充分发挥材料的综合性能							

复习思考题

1. 四大工程材料各有何特点？
2. 试比较金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料在结合键上的差别。
3. 石墨和金刚石都是纯碳，但前者是电的良好导体而后者是电的不良导体。试根据金属键和共价键的特性解释这一现象。

第二章 材料的性能

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用条件下表现出来的性能，如力学性能、物理性能和化学性能。其中力学性能主要指强度、硬度、塑性和韧性等；物理性能主要有密度、熔点、磁性、导电导热性、热膨胀性等；化学性能是指材料在室温或高温下抵抗各种化学作用的性能。工艺性能是指材料在加工过程中反映出的性能，如切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能和热处理性能等。

材料用于结构零件时，其力学性能是工程设计的重要依据。当材料以其他性能（如物理、化学）为主要使用要求时，其力学性能同样是设计的主要参考依据。本章主要介绍材料的力学性能。

第一节 静态力学性能

材料在静载荷的作用下所表现出的各种性能称为静态力学性能。静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。材料的静态力学性能可以通过静载试验确定，该试验可以确定材料在静载荷作用下的变形（弹性变形、塑性变形）和断裂行为，其数据广泛应用于结构载荷机件的强度和刚度设计中，也是材料加工工艺有关材料变形行为的重要资料。这些资料对于科学工作者研究和改善材料的组织与性能十分必要。在金属材料的生产过程中，静载试验是检验材料质量的基本手段之一。

一、拉伸试验

拉伸试验是工业上应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。该试验方法的特点是温度、应力状态和加载速率是确定的，并且常用标准光滑圆柱试样进行试验。通过拉伸试验可以揭示材料在静载荷作用下常见的三种失效形式，即过量弹性变形、塑性变形和断裂。还可以标定出材料最基本的力学性能指标，如强度、塑性和硬度等。这些指标是机械设计、制造、选材、工艺评定以及贸易订货的主要依据。

1. 拉伸试验曲线

将被测材料按照 GB/T 228.1—2010 的要求制成标准拉伸试样（图 2-1 中 1 试样），试样的原始标距为 L_0 ，原始横截面积为 S_0 。在拉伸试验机上夹紧试样两端，缓慢地对试样施加轴向拉伸力，使试样被逐渐拉长，最后被拉断。拉伸试验机的记录器在试验过程中直接描画出拉伸力 F 与试样标距伸长量 ΔL 之间关系曲线，称为拉伸曲线（ $F - \Delta L$ ）。

为消除试样几何形状对试验结果的影响，将拉伸力转化为试样单位面积上所受的力，称为拉伸应力（ R ），即

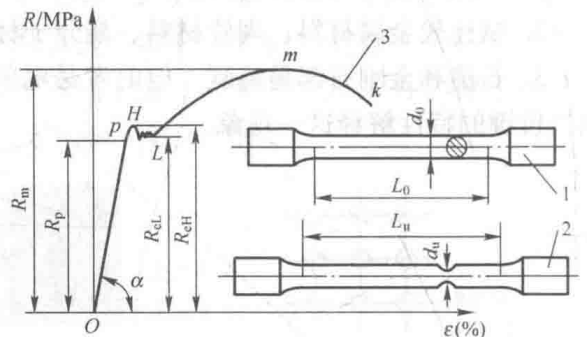


图 2-1 低碳钢的工程应力 - 应变曲线

1—拉伸原始试样 2—拉断后试样 3—应力 - 应变曲线

$$R = F/S_0 \quad (2-1)$$

将试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量，称为拉伸应变(ε)，即

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (2-2)$$

以 $R - \varepsilon$ 为坐标作图得到的曲线就是工程应力 - 应变曲线 ($R - \varepsilon$ 曲线)，例如图 2-1 中曲线 3，其形状与 $F - \Delta L$ 曲线相似，仅在尺寸比例上有一些差异。

2. 弹性和刚性

材料的弹性指标主要是指弹性极限，刚性指标主要是指材料的弹性模量。

(1) 弹性极限(R_p) 当外加应力 R 小于 R_p (图 2-1) 时，试样的变形能在卸载后 ($R=0$) 立即消失，即试样恢复原状，这种不产生永久变形的性能称为弹性。 R_p 是指在产生完全弹性变形时材料所能承受的最大应力，称为弹性极限。工程上，对于服役条件下不允许产生微量塑性变形的弹性元件 (如汽车板簧、仪表弹簧) 均是按弹性极限来进行设计选材的。

(2) 弹性模量(E) 在弹性范围内，应力与应变成正比，即 $R = E\varepsilon$ ，或 $E = R/\varepsilon$ 。比例常数 E 称为弹性模量，它是衡量材料抵抗弹性变形能力的指标，在工程上称为材料的刚度。刚度大，不易产生弹性变形。在机械工程上的一些零件或构件，除了满足强度要求外，还应严格控制弹性变形量；如锻模、镗床的镗杆，若没有足够的刚度，所加工的零件尺寸就不精确。

金属材料的弹性模量 E 主要取决于基体金属的性质，是一个对组织不敏感的参数，与合金化、热处理、冷热加工等关系不大。而陶瓷材料、高分子材料、复合材料的弹性模量对其成分和组织结构是敏感的，可以通过不同方法使之改变。

3. 强度

强度是指在外力作用下材料抵抗变形和断裂的能力，是材料最重要、最基本的力学性能指标之一。

(1) 屈服强度 (R_{eH} 和 R_{eL}) 屈服强度是指当材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，分为上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度 (R_{eH}) 是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力；下屈服强度 (R_{eL}) 是指在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最低应力。

工业上使用的某些金属材料 (如高碳钢和一些经热处理后的钢等)，在拉伸试验中没有明显的屈服现象发生，故无法确定其屈服强度。此时以规定塑性延伸强度，如规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力 $R_{p0.2}$ 替代，即所谓的“条件屈服强度”。

通常，机械零件不仅是在破断时形成失效，更多时候是在发生少量塑性变形后，因为零件精度降低而形成了失效。所以，屈服强度是零件设计时的主要依据，同时也是评定金属材料强度的重要指标之一。

(2) 抗拉强度 (R_m) 抗拉强度 (R_m) 是材料在破断前所承受的最大应力值，标志其在承受拉伸载荷时的实际承载能力。对于塑性较好的材料， R_m 表示材料对最大均匀塑性变形的抗力；而对塑性较差的材料，塑性变形量很少，一旦达到最大载荷，材料迅即发生断裂，故常用 R_m 作为脆性材料的力学设计指标。

4. 塑性

塑性是指材料在静载荷作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

(1) 断后伸长率 (A) 断后伸长率是指试样拉断后标距伸长量与原始标距之比的百分率，即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中 L_u ——试样断裂后的标距 (mm)；

L_0 ——试样的原始标距 (mm)。

(2) 断面收缩率(Z) 断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比的百分率, 即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中 S_u ——试样断裂处的最小横截面积 (mm^2);

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

虽然塑性指标通常不直接用于工程设计计算, 但任何零件都要求材料具有一定的塑性。因为零件使用过程中, 偶然过载时, 由于能产生一定的塑性变形而不至于突然脆断。同时, 塑性变形还有缓和应力集中、削减应力峰的作用, 在一定程度上保证了零件的工作安全。此外, 各种成形加工都要求材料具有一定的塑性。

二、硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标。目前工程上, 测定硬度最常用的方法是压入法, 该方法所表示的硬度是指材料表面抵抗硬物压入的能力。

硬度试验设备简单, 操作迅速方便, 又可以直接在零件或工具上进行试验而不破坏工件, 并且还可以根据硬度值估计材料的近似抗拉强度和耐磨性。此外, 硬度与材料的冷成形性、切削加工性、焊接性等工艺性能间也存在着一定的联系, 可作为选择加工工艺时的参考。由于以上原因, 所以硬度试验在实际生产中作为产品质量检查、制订合理加工工艺的最常用的重要试验方法。在产品图样的技术条件中, 硬度也是一项主要技术指标。

测定硬度的方法很多, 生产中应用较多的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等试验方法。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验通常是以一定的压力 F , 将直径为 D 的硬质合金球压入被测材料的表层, 经过规定的保持载荷时间后, 卸除载荷, 即得到一直径为 d 的压痕, 如图 2-2 所示。载荷除以压痕表面积所得的值即为布氏硬度, 以 HBW 表示, 单位为 MPa, 但习惯上不标出。

布氏硬度值的表示方法为: 硬度值 + HBW + 球直径 (单位为 mm) + 试验力对应的 kgf 值 + 与规定时间 (10 ~ 15 s) 不同的试验力保持时间。例如, 500HBW1/30/20 表示用直径为 1mm 的硬质合金球在 30 kgf (即 294.2 N) 试验力下保持 20 s 测定的布氏硬度值为 500HBW。实际测定时可根据测得的 d 值按已知的 F 、 D 值查表求得硬度值。布氏硬度的上限为 650HBW。

布氏硬度试验的优点是测定结果较准确, 有代表性和重复性。不足之处是压痕大, 不适合成品检验。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是以一定的压力将一特定形态的压头压入被测材料的表面, 根据压痕的深度 h 来计算并表示其硬度值 (用 HR 表示), 如图 2-3 所示。压痕越深, 硬度越低, 反之硬度越高。

按压头和载荷不同, 洛氏硬度有不同标尺, 常用的为 HRA、HRB 和 HRC 三种类型, 见表 2-1。实际检测时, HR 值可从硬度计的刻度盘上直接读出, 标记时硬度值置于 HR 之前, 如 60HRC、80HRA 等。三种洛氏硬度中, 以 HRC 应用最多。

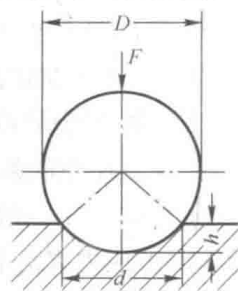


图 2-2 布氏硬度试验原理图

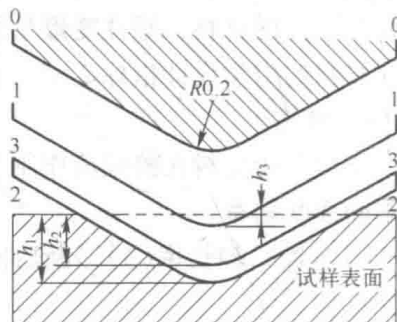


图 2-3 洛氏硬度试验原理图

表 2-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件和应用

硬度符号	压头类型	总载荷/kg	测量范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	60	70HRA 以上	硬质合金、表面淬火钢
HRB	φ1.588 mm 淬火钢球	100	25 ~ 100HRB	退火钢、铸铁、有色金属
HRC	120°金刚石圆锥	150	20 ~ 67HRC	淬火、回火钢件

洛氏硬度试验的优点是：测量简单易行，效率高；压痕小，既可以测量成品和零件的硬度，也可以检测较薄工件或表面较薄硬化层的硬度。其缺点是：因压痕面积小代表性差，测量结果重复性差、分散度大；用不同标尺测得的硬度值既不能直接进行比较，又不能彼此互换。

3. 维氏硬度

维氏硬度的测定原理与布氏硬度基本相同，不同之处在于压头采用锥面夹角为 136°的金刚石正四棱锥体，压痕为正四方锥形，如图 2-4 所示。维氏硬度用 HV 表示，单位为 MPa。

维氏硬度值的表示方法为：硬度值 + HV + 试验力对应的 kgf 值 + 与规定时间（10 ~ 15 s）不同的试验力保持时间。例如，640HV30/20 表示在 30 kgf（即 294.2 N）试验力下保持 20 s 测定的维氏硬度值为 640HV。

由于维氏硬度所用载荷小，压痕浅，故特别适用于测量零件表面的薄硬化层、镀层及薄片材料的硬度。此外，载荷可调范围大，对软硬材料均适用。其缺点是硬度的测定较麻烦，工作效率不如测定洛氏硬度高。

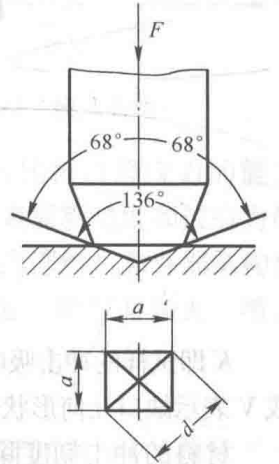


图 2-4 维氏硬度试验原理图

第二节 动态力学性能

材料在动载荷的作用下所表现出的各种性能称为动态力学性能。动载荷主要是指加载速度较快，材料的塑性变形速度也较快的冲击载荷和作用力大小与方向做周期性变化的交变载荷。在这类载荷作用下，材料强度和塑性都表现出下降的现象，而且难以像静载荷那样测出外力与变形的关系曲线。所以，其力学性能指标必须从另一角度来定义。材料的动态力学性能指标主要有冲击韧性、疲劳强度和耐磨性等三种。

一、冲击韧性

冲击载荷是以很大速度作用于工件上的载荷。许多零件和工具在工作过程中，往往受到冲击载荷的作用，如压力机的冲头、锻锤的锤杆、内燃机的活塞销与连杆、风动工具等。由于冲击载荷的加载速度高，作用时间短，使金属在受冲击时，应力分布与变形很不均匀。故对承受冲击载荷的零件来说，仅具有足够的静载荷强度是不够的，必须还具有抵抗冲击载荷的能力，即足够的韧性。

韧性是指零件在工作状态承受载荷的作用下，对所引起的塑性变形和断裂的抵抗程度，它是材料强度和塑性的综合表现。评定材料韧性的指标主要有冲击韧度和多冲抗力。

1. 冲击韧度

冲击韧度通常按 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行。其原理如图 2-5 所示，将带有 U 型或 V 型缺口的标准试样放在冲击试验机支座上，将具有一定质量 G 的摆锤从高度 H_1 位置自由下落，摆锤经过试样上缺口处时将其冲断，沿着运动路线上升至 H_2 ，略去摆锤运动时消耗的摩擦功，则摆锤作用在试样上的冲击吸收能量为

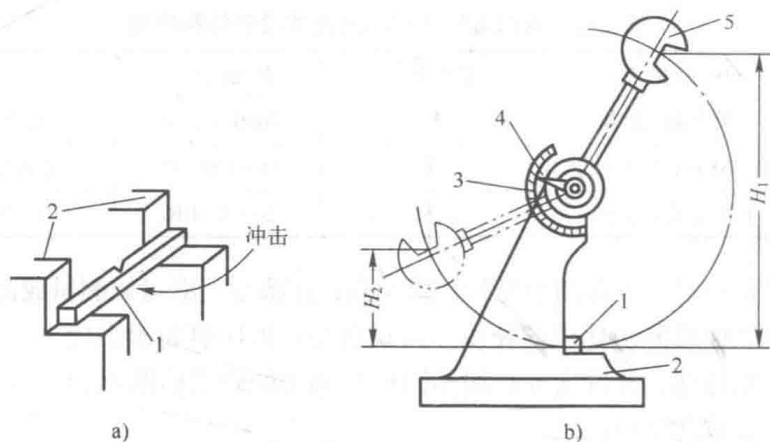


图 2-5 摆锤式冲击试验示意图

a) 试样安放 b) 冲击试验过程

1—试样 2—支座 3—分度盘 4—指针 5—摆锤

$$K = GH_1 - GH_2 \quad (2-5)$$

K 即试样的冲击吸收能量 (单位为 J), 可从试验机上直接读取。完整的吸收能量符号还有字母 U 或 V 表示缺口几何形状, 用下标 2 或 8 (单位为 mm) 表示摆锤刀刃半径, 即 KV_2 、 KV_8 、 KU_2 、 KU_8 。

材料的冲击韧度除了取决于材料本身之外, 还与环境温度及缺口的状况密切相关。所以, 冲击韧度除了用来表征材料的韧性大小外, 还用来测量金属材料随环境温度下降由塑性状态转变为脆性状态的韧脆转变温度, 也用来考察材料对缺口的敏感性。

目前多直接用冲击吸收能量 K 作为材料抵抗冲击载荷作用的力学性能指标, 用来评定材料的韧脆程度。需注意的是, 由于长期的使用习惯, 仍有很多场合用冲击吸收能量与试样缺口处的截面积之比 a_K (单位为 $J \cdot cm^{-2}$) 作为冲击韧度指标。

2. 多冲抗力

在生产中, 冲击载荷下工作的零件, 往往是经受千万次小能量冲击而破坏的, 很少是受大能量一次性冲击破坏的, 因此应进行多次冲击试验以确定其多次冲击抗力。用多冲抗力作为材料抵抗冲击载荷作用的力学性能指标更为切合实际。

多次冲击试验在落锤式多次冲击试验机上进行, 冲击频率为 450 次/min 和 600 次/min, 冲击吸收能量通过冲程调节 (0.1 ~ 1.5 J), 可做多冲弯曲、拉伸和压缩试验。记录试验过程中冲击吸收能量 (K) 与冲断次数 (N) 的关系曲线, 如图 2-6 所示。在一定的冲击能量下, 将试样断裂前的冲击次数作为多冲抗力指标。

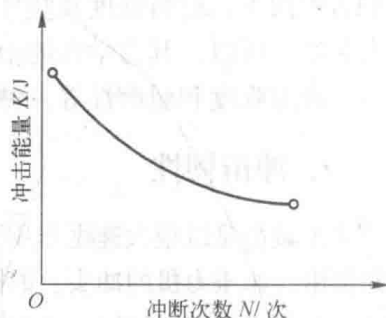


图 2-6 多次冲击曲线

二、疲劳强度

工程中有许多零件, 如发动机曲轴、齿轮、弹簧及滚动轴承等都是在交变应力或重复应力作用下工作的。在这种情况下, 零件往往在工作应力低于其屈服强度的条件下发生断裂, 这种现象称为疲劳断裂。疲劳断裂都是突然发生的, 事先均无明显的塑性变形预兆, 很难事先觉察到, 也属于低应力脆断, 故具有很大的危险性。据统计, 在机械零件的断裂失效中, 80% 以上属于疲劳断裂。

1. 疲劳强度

疲劳强度是用来表示材料抵抗交变应力的能力。常用材料经受无限多次循环而不断裂的最大应力 S_r 表示 (单位 MPa), 其下标 r 为应力比。它是交变循环应力中的最小应力值与最大应力值的比值。

2. 疲劳强度的测量

材料的疲劳强度是在疲劳试验机上测定的。对于金属材料,通常测定在对称应力循环条件($r = -1$)下材料的疲劳强度(S_{-1})。试验时用多组试样,在不同的交变应力(S)下测定试样发生断裂的周次(N),绘制 $S - N$ 曲线,如图 2-7 所示。对于钢铁材料和有机玻璃等,当应力降到某值后, $S - N$ 曲线趋于水平直线,此直线对应的应力即为疲劳极限。大多数有色金属和许多聚合物,其疲劳曲线上没有水平直线部分,工程上常规定 $N = 10^7$ 次或 10^8 次时对应的应力作为条件疲劳极限。

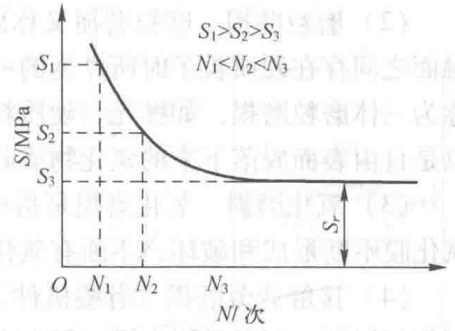


图 2-7 疲劳曲线

金属材料的疲劳强度通常都小于屈服强度,这说明材料抵抗交变应力比抵抗静应力的能力低。材料的疲劳强度值虽然取决于材料本身的组织结构状态,但也随试样表面粗糙度和拉应力的增加而下降。疲劳强度对缺口也很敏感。为提高零件的疲劳强度,除改善内部组织和外部结构形状避免应力集中外,还可以通过降低零件表面粗糙度和采取表面强化方法(如表面淬火、喷丸处理、表面滚压等)来提高疲劳强度。

3. 高周疲劳和低周疲劳

(1) 高周疲劳 当机件在较低交变应力作用下,经受的循环周次较高($N > 10^5$)的疲劳断裂称为高周疲劳,亦称应力疲劳。以上提到的疲劳现象都属于高周疲劳。

当机件在高周疲劳下服役时,应主要考虑材料的强度,即选用高强度的材料。

(2) 低周疲劳 当机件在较高的交变应力(接近或超过材料的屈服强度)作用下,经受的循环周次较低($N = 10^2 \sim 10^5$)的疲劳断裂称为低周疲劳,亦称应变疲劳。工程上,许多机件是由于低周疲劳而破坏的,例如,风暴席卷海船的壳体、常年尘风吹刮的桥梁、飞机在起飞和降落时的起落架、经常充气的高压容器等,往往都是因承受循环塑性应变作用而发生低周疲劳断裂。

应当指出,低周疲劳的寿命与材料的强度及各种表面强化处理关系不大,它主要取决于材料的塑性。因此,当机件在低周疲劳下服役时,应在满足强度要求的前提下,选用塑性较高的材料。

三、耐磨性

运转中的机器,各机件如轴与轴承、活塞与气缸套、齿轮与齿轮之间总要发生相对运动。当两个相互接触的机件表面做相对运动时就会产生摩擦,有摩擦就必有磨损。磨损是降低机器和工具效率、精确度甚至是其报废的重要原因,也是机械零件失效的主要形式之一。因此,研究磨损规律,提高机件耐磨性,对节约能源,减少材料消耗,延长机件寿命具有重要意义。

1. 耐磨性定义

耐磨性是材料抵抗磨损的性能,这是一个系统性质。迄今为止,还没有一个统一的明确的耐磨性指标。通常用磨损量来表示材料的耐磨性,磨损量越小,耐磨性越高。磨损量既可以用试样摩擦表面法线方向的尺寸减小来表示,也可以用试样体积或质量损失来表示。前者称为线磨损,后者称为体积磨损或质量磨损。

2. 磨损的种类

磨损是多种因素相互影响的复杂过程,根据摩擦面损伤和破坏的形式,磨损主要分为黏着磨损、磨粒磨损、氧化磨损和接触疲劳磨损等类型。

(1) 黏着磨损 黏着磨损又称咬合磨损,是在滑动摩擦条件下,当摩擦副相对滑动速度较小(钢小于 1 m/s)时发生的。它是因缺乏润滑油,摩擦副表面无氧化膜,并且单位法向载荷很