



高等学校教材

金属材料及其强韧化

主 编 黄本生

副主编 范舟 杨军 罗霞

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

金属材料及其强韧化

主 编 黄本生

副主编 范舟 杨军 罗霞

常州大学图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为适应 21 世纪人才培养需求及高校专业设置调整和合并而提出的教学内容和课程体系改革的要求,在总结近些年来教学探索、改革和实践的基础上编写而成。

本书以金属材料的成分、结构、组织与性能的关系及其金属强韧化为主线进行论述和分析,系统地论述了工程材料及金属强化技术的基本理论和知识,分析了常用工程材料的化学成分、组织结构、工艺方法、性能特点及其相互关系。本书注重基本理论和基本概念的阐述,力求理论正确、概念清晰,同时又注重可读性和实用性。

本书适合作为高等学校本科材料类、机械类及近机械类专业技术基础课程的教材,也可作为相关专业科技人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料及其强韧化/黄本生主编. — 北京:
石油工业出版社, 2017.9

高等学校教材

ISBN 978—7—5183—2050—9

I. ①金… II. ①黄… III. ①金属材料—高等学校—
教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 179838 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64250991 图书营销中心: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京苏冀博达科技有限公司

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.5

字数: 345 千字

定价: 30.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

材料是科学发展与工程技术创新的基础。20 世纪后期,新材料成为高新技术的四大支柱之一,新材料对高科技和新技术具有非常关键的作用,没有新材料就没有发展高科技的物质基础,掌握新材料技术已成为一个国家在科技上处于领先地位的标志之一。因此,对材料理论基础的研究就变得尤为重要。随着科学技术的发展,新材料和新技术不断问世,对材料科学及工程的教学也提出了新的要求。

本书对传统工程材料学内容进行了精选,从机械工程材料的应用角度出发,阐明了工程材料(主要是金属材料)及其强化工艺的基础理论知识以及应用,注重分析材料的化学成分、加工工艺、组织结构和性能之间的关系。在编写过程中,始终贯穿一条主线,即材料的组成—结构—性能—应用,在系统地介绍了材料基础理论的同时,也引入了较多的新材料与新技术等知识,有利于培养学生的创新意识。本书具有以下几方面特点:

(1) 内容与实际生产、生活密切相关,注重实践应用。在对基础理论精简叙述的同时,对材料热处理、材料选用及强化技术等紧密联系生产实际的方面进行了详细介绍。

(2) 对传统工程材料的内容进行了精炼,根据当前材料科学的发展现状和应用情况更新了教材内容并调整了章节结构,增加了复合材料、纳米材料、绿色材料等新内容,反映了工程材料的发展趋势。

(3) 内容涉及面广、适应性强,因此在实际教学过程中有较大的选择余地,可以根据不同专业的需要及课时要求选择适当内容进行讲授。本书还加入了石油类特色知识,拓宽了学生的专业知识面,利于石油类高校有针对性地对相关专业学生进行教学。

本书对现代工程材料及强化工艺的基础理论知识及应用做了深入的介绍。通过对本书的学习,读者能够正确、合理地选用工程材料,并具有确定金属材料热处理工艺和妥善安排工艺路线的初步能力,为后续课程的学习和今后从事

材料加工、机械设计及制造等方面的工作奠定基础。

本书由西南石油大学黄本生教授、范舟副教授、杨军博士、罗霞博士等合作编写，黄本生教授为主编。具体分工如下：绪论、第1章、第3章、第4章由黄本生编写；第2章由张德芬、黄本生合编；第5章由范舟、黄本生合编；第6章、第11章由范舟编写；第7章、第9章由杨军编写；第8章由黄本生、杨军合编；第10章由范舟、罗霞合编。全书由黄本生教授统稿，研究生赵星、陈权也参加了教材部分编排工作。

本书在编写中参考了已出版的大量文献，在此，谨向其作者表示衷心的感谢。

由于水平所限，教材中难免出现疏漏甚至错误之处，请广大师生在实际教学中批评指正。

编 者
2017 年 5 月

目 录

绪论	1
第 1 章 材料的种类与性能	4
1.1 材料的分类	4
1.2 材料的性能	5
习题	14
第 2 章 材料的结构	15
2.1 原子的结合方式	15
2.2 纯金属的晶体结构	17
2.3 合金的晶体结构	21
2.4 金属的实际晶体结构	24
2.5 非金属材料的结构	26
习题	28
第 3 章 金属的结晶与塑性变形	29
3.1 金属的结晶	29
3.2 金属的塑性变形	33
3.3 金属的热加工	40
习题	42
第 4 章 二元合金相图及其应用	43
4.1 相图的建立	43
4.2 二元合金相图的基本类型	44
4.3 相图与合金性能的关系	52
4.4 铁碳合金相图	53
习题	64
第 5 章 金属热处理	65
5.1 钢的热处理原理	65
5.2 钢的普通热处理	72
5.3 钢的表面热处理	79
5.4 钢的特殊热处理	82
习题	87
第 6 章 工业用钢和铸铁	88
6.1 钢的分类和编号	88
6.2 钢中常存元素与合金元素	90

6.3 碳素钢·····	93
6.4 合金钢·····	95
6.5 铸铁·····	110
习题·····	117
第7章 有色金属及其合金 ·····	119
7.1 铝及铝合金·····	119
7.2 铜及铜合金·····	125
7.3 钛及钛合金·····	127
7.4 轴承合金·····	128
7.5 镁及镁合金·····	130
习题·····	133
第8章 新型材料 ·····	134
8.1 复合材料·····	134
8.2 形状记忆合金·····	139
8.3 减振合金·····	140
8.4 纳米材料·····	141
8.5 非晶态材料·····	143
8.6 磁性材料·····	143
8.7 光学功能材料·····	144
8.8 绿色材料·····	148
习题·····	151
第9章 金属表面工程技术 ·····	152
9.1 金属表面强化技术·····	152
9.2 金属表面改性技术·····	164
习题·····	173
第10章 金属材料强韧化及应用 ·····	174
10.1 金属材料强韧化机制·····	174
10.2 金属材料强韧化技术·····	186
10.3 油气田材料强韧化·····	190
习题·····	193
第11章 机械零件失效分析及选材 ·····	194
11.1 机械零件失效及分析·····	194
11.2 选材的基本原则和方法·····	197
11.3 典型零件的材料及成型工艺选择·····	203
习题·····	206
参考文献 ·····	207

绪 论

材料是能被人类加工利用的物质，是人类生产和生活所必需的物质基础。人类生活在材料组成的世界里，无论是经济活动、科学研究、国防建设，还是人们的衣食住行都离不开材料。材料是人类赖以生存并得以发展的物质基础，正是材料的发现、使用和发展，才使人类不断扩展和超越自身能力，创造出辉煌灿烂的文化。材料的利用情况标志着人类文明的发展水平，历史学家按照人类所使用材料的种类将人类历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。到了 20 世纪 70 年代，人们更是把材料、信息与能源并列为现代文明的三大支柱，而材料又是信息和能源的基础。

1. 材料与材料科学概述

在材料的发展、加工、生产的漫长历史过程中，我们的祖先有过辉煌的成就，为人类文明做出了重大贡献。早在公元前 6000—公元前 5000 年的新石器时代，我们的祖先就能用黏土烧制陶器，到了东汉时期又出现了瓷器，并广传海外。4000 年前的夏朝时期，开始了青铜冶炼。到了殷商时期，冶铸技术就已经达到了很高的水平，并形成了灿烂的青铜文化。河南安阳晚商遗址出土的后母戊鼎质量高达 832.84kg，在大鼎四周有蟠龙等组成的精美花纹，是这个时期青铜器的杰作。公元前 7 世纪到公元前 6 世纪的春秋时期，我国已经开始大量使用铁器，白口铸铁、麻口铸铁、可锻铸铁相继出现，比欧洲早了 1800 多年。大约 3000 年前，我国已采用铸造、锻造、淬火等技术生产工具和各种兵器。湖北江陵墓中出土的两把越王勾践的宝剑，长 55.7cm，至今仍异常锋利，金光闪闪。陕西临潼秦始皇陵出土的大型彩绘铜车马，有 3000 多个零部件，综合采用了铸造、焊接、凿削、研磨、抛光等各种工艺，结构复杂，制作精美。明朝科学家宋应星在他的名著《天工开物》中就记载了古代的渗碳热处理等工艺，这说明早在欧洲工业革命前，我国在金属材料及热处理方面就已经有了较高的成就。现存于北京大钟寺内明朝永乐年间制造的大钟，重达 46.6t，其上遍布经文共达 20 余万字，其钟声现在仍浑厚悦耳。

人类对材料的真正认识还是在近现代时期，随着 1863 年第一台光学显微镜问世，金相学的研究开始得到发展，人们步入了材料的微观世界。1912 年发现了 X 射线，开始了晶体微观结构的研究；1932 年电子显微镜的问世以及后来出现的各种仪器，把人们带入了微观世界的更深层次，人类开始对材料有了系统而深入的认识，迎来了材料科学研究的时代。

新中国成立后，我国工业生产迅速发展，先后建立了鞍山、攀枝花、宝钢等大型钢铁基地，钢产量由 1945 年的年产 $15.8 \times 10^4 \text{t}$ 上升到 2016 年的 $80840 \times 10^4 \text{t}$ ，已连续多年成为钢产量第一大国。近年来，国产隐身战斗机歼-20 的成功研制、神舟飞船的升空、辽宁号航母的服役以及国产航母和中国首艘万吨级驱逐舰的下水，都说明了我国在材料的开发、研究应用等方面有了飞跃的发展，并达到了较高的水平。科学技术进步神速，使许多科学设想都成为可能，科学技术为这些新技术提供了理论技术支持，但新型高性能材料却成了难以解决的难题。

2. 工程材料的应用与发展趋势

新材料是高新技术的重要组成部分，又是高新技术发展的基础和先导，也是提升传统产业的技术能级、调整产业结构的关键。新材料产业已被世界公认为最重要、发展最快的高新技术产业之一，且已成为产业进步、国民经济发展和保证国防安全的重要推动力。

工业发达的国家都十分重视新材料在国民经济和国防安全中的基础地位和支撑作用，为保持其经济和科技的领先地位，都把发展新材料作为科技发展战略的目标，在制定国家科技与产业发展计划时将新材料列为 21 世纪优先发展的关键技术之一，予以重点发展。

我国非常重视功能材料的发展，在国家科技攻关、“863”、“973”、国家自然科学基金等项目中，新材料都占有很大比例。在“九五”、“十五”国防计划中还将特种功能材料列为“国防尖端”材料。这些科技行动的实施，使我国在新材料领域取得了丰硕的成果。在“863”计划支持下，开辟了超导材料、稀土功能材料、生物医用材料、储氢材料、高性能固体推进剂材料、红外隐身材料、材料设计与性能预测等功能材料新领域，取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果，在国际上占有了一席之地。镍氢电池、锂离子电池的主要性能指标和生产工艺技术均达到了世界先进水平，推动了镍氢电池的产业化；功能陶瓷材料的研究开发取得了显著进展，以片式电子组件为目标，我国在高性能瓷料的研究上取得了突破，并在低烧瓷料和贱金属电极上形成了自己的特色并实现了产业化，使片式电容材料及其组件进入了世界先进行列；高档钎铁硼产品的研究开发和产业化取得显著进展，在某些成分配方和相关技术上取得了自主知识产权。

材料工业是国民经济的基础产业，新材料是材料工业发展的先导，是重要的战略性新兴产业。“十三五”期间，加快培养和发展新材料产业，对于引导材料工业升级换代，支撑战略性新兴产业发展，保障国家重大工程建设，促进传统产业转型升级，构建国际竞争新优势具有重要的战略意义。新材料设计领域广，一般是指新出现的具有优异性能和特殊功能的材料，或是传统材料改进后性能明显提高和产生新功能的材料，主要包括新兴功能材料、高性能结构材料和先进复合材料。其范围随着经济发展、科技进步、产业升级不断发生变化，为突出重点，“十三五”规划中主要包括以下六大领域：特种金属功能材料、高端金属结构材料、先进高分子材料、新型无机非金属材料、高性能复合材料、前沿新材料。

新材料对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。

3. 金属的热处理、表面改性及强化技术

金属的热处理是根据材料在固态下组织及形态的变化规律，通过不同参数的加热、保温和冷却过程，达到改变材料内部组织结构的目的，由于此过程中存在热源的作用，所以热处理是一种热加工工艺。在实际的工业生产应用中，大部分工件均需要热处理。例如在汽车、拖拉机的制造过程中，60%~70%的工件需要进行热处理，而滚动轴承和各种工模具等则需要百分之百地进行热处理。热处理在钢中的应用最多，热处理能使钢的性能发生较大的改变是由于纯铁具有同素异构转变，可使钢在加热及冷却过程中，组织和结构得到相应的变化。例如将钢件加热到 AC_3 以上 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ，保温足够长的时间，使钢种的组织完全转变成奥氏体后，随炉冷却，以获得接近平衡组织的最终热处理工艺，称为钢的完全退火处理。完全退火的目的是细化晶粒，均匀组织，消除应力，降低硬度和改善钢的切削加工性能。

由于工件的服役条件存在差异，大量的工件处于高过载、高磨损、严重腐蚀等环境下，

所以工件的实际寿命往往远低于正常的服役寿命。工件的表面往往直接与载荷、腐蚀物质接触，所以可以认为工件表面受环境因素的影响最大。延长金属的实际使用寿命，其关键是如何提高金属表面的性能指标，金属的表面改性技术正是基于这一理念发展而来的强化技术。本书将介绍化学转化膜技术、热喷涂技术、气相沉积技术、三束表面改性技术等表面改性技术，旨在提高学生对金属表面改性技术的认识与应用。关于表面改性的应用实例很多，例如将钢铁材料放入磷酸盐的溶液中，可获得一层不溶于水的膜；将钢件放入某些氧化性溶液中，使其表面形成厚度约为 $0.5\sim 1.5\mu\text{m}$ 致密而牢固的 Fe_3O_4 薄膜的工艺；将热喷涂材料加热至熔化或半熔化状态，用高压气流将其雾化并喷射与工件表面，以形成涂层的工艺，也能达到表面改性的作用。

随着金属材料得到了大量应用，改善金属的性能是人们一直探索的问题。材料抵抗变形和破坏的能力称为材料的强度，材料的塑性用于评定材料在破坏前产生永久变形的程度，材料的韧性则是指材料变形和破坏过程中吸收能量的能力，所以材料的韧性是强度和塑性的综合表现。研究材料的强韧化机理和强韧化方法，提高材料的强韧化水平，充分挖掘现有材料的潜力，不仅可以满足工程结构和技术装备制造中对高强韧性材料的要求，还能达到节约能源和原材料的目的。金属的强韧化技术很多，例如在钢中加入某些合金元素，以固溶强化的形式对晶体进行强化，溶质原子溶入基体中产生原子尺寸效应、弹性模量效应和固溶体有序化作用而导致材料强化；细晶强化主要是利用晶界对位错的阻碍作用，通过细化晶粒来增加晶界或改善晶界性质，阻碍位错运动，提高材料强度。本书将从机理、组织与结构的改变等方面对多种强韧化技术进行阐述。

4. 课程目的和基本要求

工程材料是材料学中的重要部分，作为机械制造基础中的系列课程之一，是高等学校机械类及近机械类专业必修的技术基础课。学习本课程的目的：获得有关工程材料的基础理论和必要的工艺知识，培养工艺分析的初步能力；掌握和运用常用工程材料的种类、成分、组织、性能和改进方法；理解和应用材料的性能、结构、工艺、使用之间的关系规律，合理使用材料和正确选择加工工艺。

学习本课程的基本要求是：了解常见材料的性能、结构特点以及缺陷，包括金属、轻金属、新型材料；熟悉金属的结晶与塑性变形过程，以及相变过程中金属的组织 and 结构的变化规律，重点掌握二元合金相图及其应用实例；掌握金属材料及其热处理，金属材料表面强化技术，以及金属材料的强韧化原理及技术；能对机械零件的失效现象进行分析，以及能根据工况合理选材。

第 1 章 材料的种类与性能

1.1 材料的分类

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或者其他产品的物质，但并不是所有物质都可以称为材料，如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物，一般都不算是材料。材料是人类生产的物质基础，是维持以及推动现代科学技术发展的重要支柱。材料的品种、数量以及质量是衡量一个国家科学技术实力和国民经济水平的重要标志。

不同的分类标准，材料的划分也存在差异。按材料结晶状态，可分为单晶质材料、多晶质材料、非晶质材料以及准晶态材料。按材料尺寸，可分为零维材料、一维材料、二维材料以及三维材料。按材料用途，可分为结构材料（如机械零件、工程构件）、工具材料（如量具、刃具、模具）以及功能材料（如磁性材料、超导材料）。最常见的是按化学组成及结合键分类，可分为金属材料、高分子材料、无机非金属材料以及复合材料，如图 1.1 所示。

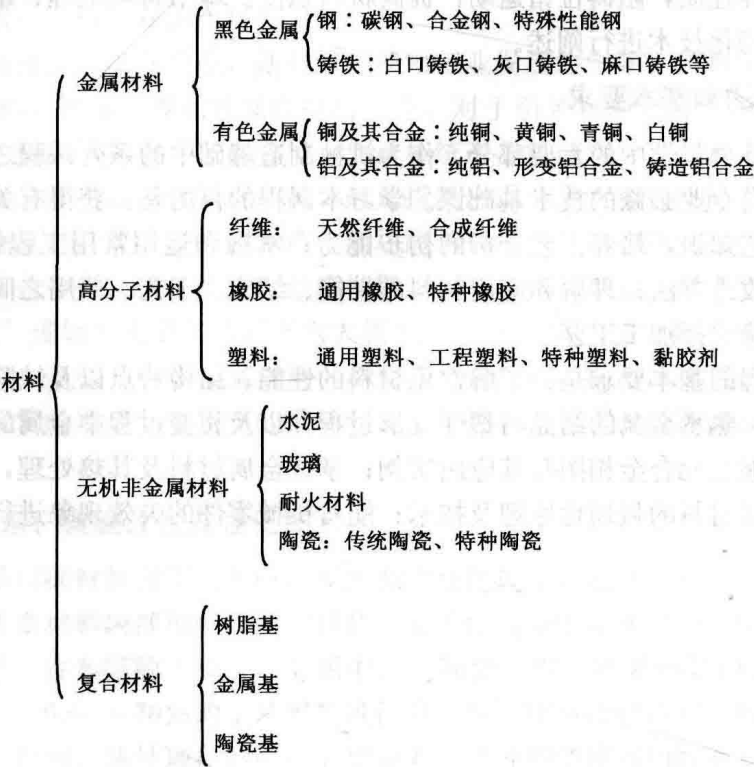


图 1.1 材料按组成及结合键的特点分类

1.1.1 金属材料

金属材料是以金属键结合为主的材料，包括钢铁、有色金属及其合金。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，并易于采用比较简单和经济的方法制成零

件，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。

金属材料分为黑色金属和有色金属两类。铁、锰、铬及其合金称为黑色金属。黑色金属在机械产品中的用量占全部用材的 60% 以上。黑色金属具有良好的力学性能，是最重要的工程金属材料。黑色金属之外的所有金属及其合金称为有色金属。有色金属的种类很多，是重要的特色用途材料。

1.1.2 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为基础的材料，由相对分子质量较大的化合物构成，以分子键和共价键结合为主，包括橡胶、塑料、纤维、涂料、胶黏剂和高分子基复合材料。

高分子材料具有良好的塑性、耐蚀性、电绝缘性、减震性，以及密度小等优良性能，并且原料丰富、成本低、加工方便，因此在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中广泛应用，是工程上发展最快的一类新型结构材料。

1.1.3 无机非金属材料

无机非金属材料是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化合物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料，常具有比金属键和纯共价键更强的离子键和混合键。这种化学键赋予了这类材料高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度和良好的抗氧化性等基本属性以及隔热性、透光性及良好的铁电性、铁磁性和压电性。由于它具有这些优点，在电力、建筑、机械等行业有广泛应用。工程常用的无机非金属材料主要有水泥、玻璃、陶瓷材料和耐火材料。

1.1.4 复合材料

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料，通过物理或化学的方法，在宏观上组成具有新性能的材料。各种材料在性能上取长补短，产生协同效应，使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。复合材料可由基体材料（金属基、陶瓷基、聚合基）和增强剂（纤维、晶须、颗粒）复合而成，它的结合键非常复杂，使其在强度、刚度和耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越，是一类特殊的工程材料，具有广阔的发展前景。

1.2 材料的性能

材料的性能直接关系到产品的质量、使用寿命和加工成本，是产品选材和拟定加工工艺方案的重要依据。材料的性能可分为使用性能和工艺性能两类。材料的使用性能是指材料在服役条件下能保证安全可靠工作所必备的性能，包括材料的力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指材料承受各种加工、处理的能力的性能，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

1.2.1 材料的力学性能

1. 静载荷时材料的力学性能

静载荷是指施于构件的载荷恒定不变或加载变化缓慢以致可以忽略惯性力作用的载荷，

最常用的静载荷实验有拉伸、压缩、弯曲、扭转等，利用这些实验方法，可以测得材料的各种力学性能指标。本节仅介绍工程领域应用广泛的强度、塑性和硬度等指标。

1) 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。

强度指标常通过材料拉伸实验测定。在标准试样的两端缓慢地施加拉伸载荷，使试样在工作部分受轴向拉力 F ，并引起试样沿轴向产生伸长 ΔL ，随着 F 值的增加， ΔL 也相应增大，直到试样断裂为止。由载荷（拉力）与变形量（伸长量）的相应变化，可以绘出拉伸曲线。图 1.2 (a) 就是退火低碳钢的拉伸曲线。如果把拉力除以试样的原始截面积 S_0 ，得到拉应力 σ （单位面积上的拉力），把伸长量 ΔL 除以试样的标距长度 L_0 ，得到应变 ϵ （单位长度的伸长量）。根据 σ 和 ϵ ，则可以画出拉伸试样的应力—应变曲线，如图 1.2 (b) 所示，可以从图上直接读出材料的一些常规力学性能指标。静载拉伸下材料的力学性能指标主要有以下几个。

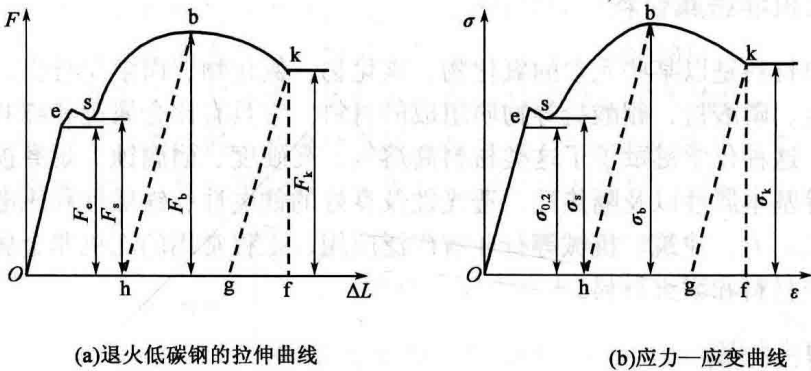


图 1.2 退火低碳钢的拉伸曲线和应力—应变曲线

(1) 弹性极限和弹性模量。

在应力—应变曲线上，e 点以前产生的可以恢复的变形称为弹性变形，e 点对应的弹性变形阶段的极限值，称为弹性极限，以 σ_e 表示（单位为 MPa），对一些弹性零件如精密弹簧等，弹性极限是主要的性能指标。

材料在弹性变形阶段内，应力与应变的比值为定值，这表征了材料抵抗弹性变形的能力，其值大小反映材料弹性变形的难易程度，称为弹性模量，以 E 表示（单位为 GPa）：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{1.1}$$

在工程上，零件或构件抵抗弹性变形的能力称为刚度。显然，在零件的结构、尺寸已确定的前提下，其刚度取决于材料的弹性模量。

弹性模量主要取决于材料内部原子间的作用力，如晶体材料的晶格类型、原子间距，热处理对弹性模量的影响极小。

(2) 屈服强度。

在拉伸曲线中，s 点出现一近似水平线段，这表明拉力虽然不再增加，但变形仍在进行。这时若卸去载荷，则试样的变形不能全部恢复，将保留一部分残余变形。这种不能恢复的残余变形称为塑性变形。s 点是材料从弹性状态过渡到塑性状态的临界点，它所对应的应力为材料在外力作用下开始发生塑性变形的最低应力值，称为屈服极限或屈服强度，用 σ_s (R_{el}) 表示（单位为 MPa）：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1.2)$$

式中 F_s ——对应于 s 点的外力，N；

S_0 ——试样的原始截面积， m^2 。

由于很多材料的拉伸曲线上没有明显的屈服点（图 1.3），无法确定屈服极限，因此规定试样产生 0.2% 塑性变形时的应力值为该材料的屈服极限，称为条件屈服极限，以 $\sigma_{0.2}$ 表示：

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (1.3)$$

式中 $F_{0.2}$ ——产生 0.2% 残余伸长量的载荷，N。

$F_{0.2}$ 的确定方法是：首先在拉伸图上截取 $d=0.2\%L_0$ ，过 A 点做平行于拉伸曲线弹性变形阶段的平行线与拉伸曲线交于 s 点，再过交点 s 作水平线，与 F 轴的交点即为 $F_{0.2}$ 。

工程中大多数零件都是在弹性范围内工作的，如果产生过量塑性变形就会使零件失效，所以屈服强度是零件设计和选材的主要依据之一。

(3) 抗拉强度。

试样拉断前最大载荷所决定的条件临界应力，即试样所能承受的最大载荷除以原始截面积，以 σ_b (R_m) 表示（单位为 MPa）：

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1.4)$$

式中 F_b ——试样所能承受的最大载荷，N。

抗拉强度的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力，表征材料在拉伸条件下，所能承受的最大载荷的应力值，它是设计和选材的主要依据之一。因为有些材料几乎没有塑性，或塑性很低，因此 σ_b 就是这类材料的主要选材设计指标。

2) 塑性

断裂前材料发生塑性变形的能力称为塑性。塑性以材料断裂后塑性变形的大小来表示。拉伸时用延伸率 δ (A) 和断面收缩率 ψ (Z) 表示，两者均无量纲。

① 延伸率 δ (A) 表示试样拉伸断裂后的相对伸长量，其计算公式为

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中 L_0 ——拉伸试样原始标距长度，mm；

L_k ——拉伸试样拉断后的标距长度，mm。

② 断面收缩率 ψ (Z) 表示试样断裂后截面的相对收缩量，其计算公式为

$$\psi = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中 S_0 ——拉伸试样原始截面面积， m^2 ；

S_k ——拉伸试样拉断处的截面面积， m^2 。

3) 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标，表征材料抵抗比其更硬的物体压入或刻画的能力。因为

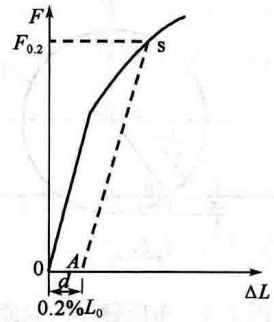


图 1.3 图解法确定 $\sigma_{0.2}$

硬度的测定总是在试样的表面上进行，所以硬度也可以看做是材料表面抵抗变形的能力。

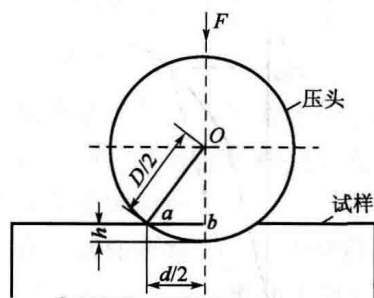


图 1.4 布氏硬度实验原理

硬度是材料力学性能的一个重要指标，材料制成的半成品和成品的质量检验中，硬度是标志产品质量的重要依据。常用的硬度有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

(1) 布氏硬度。

用一定的载荷 F ，将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压入被测材料的表面（图 1.4），保持一定时间后卸除载荷，载荷与压痕表面积 S 的比值称为布氏硬度值，用 HB 表示，即

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi D h} = \frac{2F}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}]} \quad (1.7)$$

布氏硬度的单位为 N/mm^2 ，但一般都不标出，硬度值越高，表明材料越硬。

采用布氏硬度试验的优点是压痕面积大，不受微小不均匀硬度的影响，试验数据稳定，重复性好，但不适用于成品零件和薄壁器件的硬度检验。

硬度的表示方法：压头为淬火钢球时用 HBS ，适用于布氏硬度值在 450 以下的材料；压头为硬质合金球时用 HBW ，适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。硬度值写在符号 HBS 或 HBW 之前，符号之后按下列顺序用数值表示试验条件：球体直径（mm），试验力（N），力保持时间（s），如 120HBS 10/1000/30。

(2) 洛氏硬度。

在先后两次施加载荷（初载荷 F_0 及总载荷 F ）的条件下，将标准压头（常为顶角为 120° 的金刚石圆锥）压入试样表面，然后根据压痕的深度来确定试样的硬度。

根据压头和压力的不同，洛氏硬度用 HRA 、 HRB 、 HRC 三种不同符号表示，最常用的是 HRC 。它们的数值直接可以从硬度试验机仪表盘上的指示针位置读出。

洛氏硬度的测定操作迅速、简便，压痕面积小，适用于成品检验，硬度范围广，但由于接触面积小，当硬度不均匀时，数值波动较大，需多打几个点取平均值。必须注意，不同方法、级别测定的硬度值无可比性，只有查表转换成同一级别后，才能比较硬度值的高低。

(3) 维氏硬度。

将相对面夹角为 136° 的方锥形金刚石压入材料表面，保持规定时间后测量压痕对角线长度，然后通过计算得出相应硬度值，该硬度值称为维氏硬度。维氏硬度试样表面应光滑平整，不能有氧化皮及杂物，不能有油污。一般情况下，维氏硬度试样表面粗糙度参数 R_a 不大于 $0.40\mu m$ ，小复合维氏硬度试样不大于 $0.20\mu m$ ，显微维氏硬度试样不大于 $0.10\mu m$ ，维氏硬度试样制备过程中，应尽量避免过热或者冷作硬化等因素对表面硬度的影响。此外，对于小界面或者外形不规则的试样，如球形、锥形，需要对试样进行镶嵌或者使用专用平台。

维氏硬度计测量范围宽广，可以测量工业上所用到的几乎全部金属材料，从很软的材料（几个维氏硬度单位）到很硬的材料（3000 个维氏硬度单位）都可测量。维氏硬度用符号 HV 表示。 HV 前面的数值为硬度值，后面则为试验力值，如果试验力保持时间不是通常的 10~15s，还需要再试验力值后标注保持时间，如：600HV30/20 表示采用 30kgf 的试验力，保持 20s 后测得的硬度值为 600。

2. 动载荷时材料的力学性能

动载荷是指由于运动而产生的作用在构件上的作用力，根据作用性质的不同分为冲击载荷和交变载荷等。材料的主要动载荷力学性能指标有冲击韧性、疲劳强度、断裂韧度和耐磨性。

1) 冲击韧性

材料不仅受静载荷的作用，在工作中往往也受到冲击载荷的作用，例如锻锤、冲床、铆钉枪等，这些零件和工具在设计和制造时，不能只考虑静载荷强度指标。所谓冲击韧性简称韧性，是指材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力。

冲击韧性用一次摆锤进行冲击试验测定。其原理如图 1.5 所示。试验时将待测材料的带缺口标准试样放置在试验机的支座上，然后将重量为 G 的摆锤抬升到一定高度 H ，使其获得 GH 的位能，再让其释放，冲断试样，摆锤继续上升到高度 h 。若忽略摩擦和空气阻力等，则冲断试样所消耗的能量称为冲击功即 A_K （单位：J），其计算公式为

$$A_K = GH - Gh \quad (1.8)$$

试样缺口处单位截面积上所吸收的冲击功称为冲击韧度，即 α_k （单位：J/m²），其计算公式为

$$\alpha_k = \frac{A_K}{S} \quad (1.9)$$

式中 S ——试样缺口处的横截面积，m²。

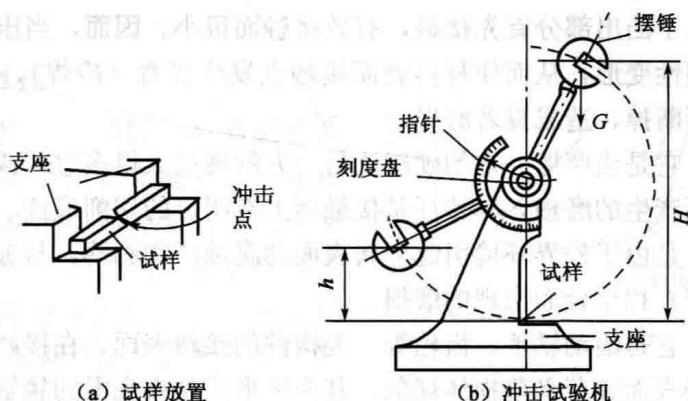


图 1.5 摆锤冲击实验示意图

一般来说：强度相近的材料，冲击功数值越大，则材料抵抗大能量冲击破坏的能力越好，即冲击韧度越好，在受到冲击时不易断裂。但是在冲击载荷作用下工作的零件，很少是受到大能量一次冲击而破坏的，往往是经受小能量多次冲击，由于冲击损伤的积累引起裂纹扩展而造成断裂，所以用 α_k 值来反映冲击韧度有一定的局限性。研究表明，塑性、韧性越高，材料抵抗大能量冲击的能力越强；强度、塑性越高，材料承受小能量多次重复冲击的能力就越好。

2) 疲劳强度

许多机械零件，如轴、齿轮、弹簧等，在工作中承受的是交变载荷。在这种载荷作用下，虽然零件所受应力远低于材料的屈服强度，但在长期使用中往往会突然发生断裂，这种现象称为“疲劳”。疲劳断裂并无先兆，会产生突然断裂，危害很大。

疲劳强度就是用来表征材料抵抗疲劳的能力。所谓疲劳强度就是指材料经无数次重复交变载荷作用而不发生断裂的最大应力称为疲劳强度，用 σ_{-1} 表示，单位为 MPa。例如实际工程中常采用钢在经受 10^7 次、有色金属在经受 10^8 次交变应力作用下不发生破坏的应力作为材料的疲劳强度。

3) 断裂韧性

断裂韧性是表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标，用 K_{IC} 表示，单位为 $MN/m^{3/2}$ 。

工程上使用的材料常存在一定的缺陷，如气孔、夹杂物和微裂纹等，这些缺陷在材料受力时相当于裂纹，在其前端产生应力集中，形成应力场，该应力场的强弱用 K_I 表示，称为应力场强度因子。在载荷作用下， K_I 不断增大，当其增大到某一临界值 K_{IC} 时，材料会发生脆性断裂。这个临界值 K_{IC} 就称为材料的断裂韧性。断裂韧性与材料本身的成分、组织和结构有关。

4) 耐磨性

磨损将会造成零部件的几何尺寸变小，严重的时候还会造成零部件失去原有设计所规定的性能指标，从而产生失效现象。工程上，常用耐磨性来反映零部件抵抗磨损的能力，它以一定摩擦条件下的磨损率或磨损度的倒数来表示，即耐磨性 $=dt/dV$ 或 dL/dV 。

按磨损的破坏机理，磨损可分为黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、接触疲劳。

(1) 黏着磨损：又称咬合磨损，实质是相对运动的两个零件的表面总是凹凸不平的，在接触压力作用下，由于凸出部分首先接触，有效接触面很小。因而，当压力较大时，凸起部分便会发生严重的塑性变形，从而使材料表面接触点发生黏着（冷焊），随后，在相对滑动时黏着点又被剪切而断掉，造成黏着磨损。

(2) 磨粒磨损：它是当摩擦一方的硬度比另一方的硬度大得多时，或者在接触面之间存在着硬质粒子时，所产生的磨损，其特征是接触面上有明显的切削痕迹。

(3) 腐蚀磨损：是由于外界环境引起金属表面的腐蚀产物剥落，与金属摩擦面之间的机械磨损（磨粒、黏着）相结合而出现的磨损。

(4) 接触疲劳：它是滚动轴承、齿轮等一类构件的接触表面，在接触压应力的反复长期作用后所引起的一种表面疲劳剥落损坏现象，其损坏形式是在光滑的接触面上分布有若干深浅不同的针尖或豆状凹坑，或较大面积的表层压碎。

3. 不同温度时材料的力学性能

温度是影响材料性能的重要外部因素之一。一般随温度升高，材料的强度、硬度降低而塑性增加。在高温下，载荷作用时间对材料的性能也会产生很大影响。例如，蒸汽锅炉、汽轮机、燃气轮机、核动力及化工设备中的一些高温高压管道，虽然工作应力小于工作温度下材料的屈服强度，但在长期使用过程中，会产生缓慢而连续的塑性变形，使管径增大，最后可能导致管道破裂。因此在高温或者低温条件下工作的零部件，需要认真考虑材料的高温或低温力学性能。

1) 高温力学性能

材料的高温性能指标主要有蠕变极限、持久强度、高温韧性等。

(1) 蠕变极限。