

高等学校理工科材料类规划教材

工程材料简明教程

ENGINEERING MATERIALS

齐 民/主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校理工科材料类规划教材

工程材料简明教程

ENGINEERING MATERIALS

主编 齐 民

编者 齐 民 王伟强 叶 飞

董旭峰 王 清



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程材料简明教程 / 齐民主编. — 大连: 大连理工大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5611-9336-5

I. ①工… II. ①齐… III. ①工程材料—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 162191 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 12.25 字数: 280 千字
2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 于建辉 责任校对: 高 慧
封面设计: 季 强

ISBN 978-7-5611-9336-5

定 价: 28.00 元

前言

材料是人类生产和生活所必需的物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品,从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人,都是用各种材料制造而成或由其加工的零件组装而成的。人类社会发展的分类方法之一就是按照人类对材料的利用来划分:石器时代、青铜器时代和铁器时代。说明材料的发展水平和利用程度在人类文明发展中的巨大作用。

从简单地利用天然材料、冶铜炼铁到使用热处理工艺,人类对材料的认识是逐步深入的,由此逐渐形成了一门单独的学科——材料科学与工程。材料科学与工程学科以凝聚态物理、物理化学和晶体学为理论基础,结合冶金、机械、化工等领域的研究成果,探讨材料的成分、工艺、组织结构及性能之间的内在规律,并联系具体器件或构件的使用功能要求,力求用经济合理的办法制备出有效的器件或构件。

从几何学角度看,二维结构最稳定的形状是三角形,三维结构最稳定的形状是四面体(图1)。同样是这种结构,如果采用不同的材料做四面体的杆,则四面体的承载能力也不同,如木材与钢的承载能力显然不同。材料学家通过研究发现,材料的性能与材料的成分、结构以及加工工艺之间的关系也构成类似图1的四面体结构。图中最上面的节点代表材料的性能,底面上三个节点分别代表材料的成分(组成元素)、结构(微米或纳

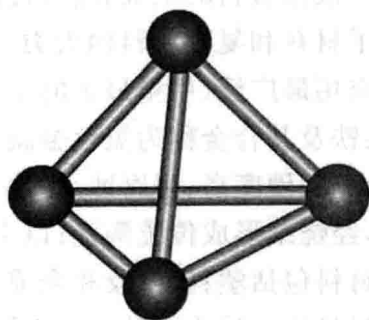


图1 四面体结构

米级)以及加工工艺。底面上三个节点中任何一个的改变都会影响材料的性能,而底面上三个节点又相互关联。当材料的组成确定后,要达到最佳性能,往往存在一个最佳的工艺——使材料形成最佳的微观或纳观结构。材料的成分指构成材料的基本组元以及数量配比。材料的结构包含如下几个层次:

(1)宏观结构(macro-structure),肉眼可见的尺度, $10^{-2} \sim 10^{-3}$ m。

(2)细观结构(meso-structure),借助放大镜可见, $10^{-3} \sim 10^{-5}$ m。

(3)微观结构(micro-structure),借助光学显微镜可见, $10^{-5} \sim 10^{-7}$ m。

(4)纳观结构(nano-structure),借助电子显微镜可见, $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m。

(5)原子排列(atom-arrangement),借助高分辨电子显微镜可见,或通过 X 射线衍射间接分析; $10^{-9} \sim 10^{-10}$ m。

(6)原子结构(atom-structure),指原子核外电子分布,决定材料的内禀性质。

材料科学重点关注层次(2)~(5),特别是层次(3),有一个专门的名词叫微观组织,类似生物的细胞层次。

加工工艺指材料在做成零部件过程中采取的手段,如金属零件可能需要从液体凝固成型(铸造)、固态变形(轧制、拉拔、挤压等)、热处理等。这些过程都改变材料的组织,进而影响材料的性能。

工程材料狭义上是指在机械、车辆、船舶、航空航天、化工、农业、建筑、军事等工程领域中用于制造工程构件和机械零件的结构材料,考核指标主要是力学性能;广义上还包括在能源、信息、环保及生物医学工程领域所用的功能材料,考核指标重点是声、光、电、磁、热等物理、化学性能。

“工程材料”这门课的首要目的是帮助大家建立起材料的性能与成分、结构以及加工工艺之间的关系。

按照材料的组成、结合键的特点,可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类。金属材料具有良好的延展性和宽泛的强度,是目前应用最广泛、用量最大的工程材料。金属材料分为黑色金属与有色金属两大类:铁及其合金称为黑色金属,其余金属称为有色金属。陶瓷材料的性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料主要分为两类:以多种天然材料为原料,经烧结形成传统陶瓷;以人工合成材料为原料,经烧结形成精细陶瓷。高分子材料包括塑料、橡胶和合成纤维,其应用越来越广泛,缺点是不耐高温。复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料,以微观或宏观的不同组合形式组合在一起所形成的材料。复合材料分为高分子基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。根据形态,复合材料又可分为粒子复合材料、纤维复合材料和层状复合材料。

“工程材料”这门课的另外一个目的就是通过介绍常见工程材料的成分、加工工艺、结构特点、性能特点以及在工程中的应用,对工程中常见材料的使用原则有初步的认识。

随着经济的发展和科学技术的进步,相关领域对材料的要求越来越苛刻,工程材料向高比强、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照和多功能的方向发展。

这就要求工科学生掌握必要的材料科学与材料工程知识,建立材料的宏观性能与微观组织及加工工艺之间的联系。这种联系的建立过程不仅是知识的传授,而且是一种认识问题的方法的学习过程,特别能体现素质教育的内涵。

本书取名《工程材料简明教程》,在《机械工程材料》(第九版)的基础上,根据国家对本科生重点进行素质教育以及目前各个学校学时减少的现状,进一步凝练内容,同时结合国际上工程材料教育的最新进展,体现以下特点:

(1)拓宽范围 基础理论应用部分增加了非金属材料的比重,同时增加了材料组织结构的表征知识,使学生初步了解探索材料微观世界的途径。另外,鉴于材料表面改性无论从理论上还是从技术上都增加了很多内涵,本书将其从材料热处理部分剥离出来,单独形成了“材料表面技术”一章。

(2)简化内容 基础部分重点强化对原理的理解,减少专业较深的数学描述;应用部分重点强化各种材料的强化原理,减少了变化比较频繁的工业标准,仅给出相应的索引。使学生在较短的学习时间内重点掌握材料性能-成分-微观组织-加工工艺之间的联系。

(3)扩展索引 每章前面增加与本章内容相关的引导性事件或故事,使学生对本章的来龙去脉有个初步了解。每章后面增加扩展知识版块,提供与本章内容相关的、重要但又无法在书中展开的概念、工艺,或者表征方法,同时提供1~2本系统介绍上述扩展知识的扩展读物,为有兴趣的同学提供更深、更广的知识,并引导学生自我学习和加深理解。

本课程主要包括:(1)工程材料基本理论与技术基础(第1~6章);(2)各种常用工程材料的特点与应用(第7~12章);

本书由齐民担任主编(确定大纲、统稿定稿)并编写前言以及第3、4、6章。其余编者为王伟强(第1、7章),叶飞(第2、5章),王清(第8、9章),董旭峰(第10~12章)。感谢大连理工大学教材出版专项基金的资助。

编者
2014年5月

目 录

第1章 工程材料的性能及表征 /1

- 1.1 材料及构件的常见失效形式 /1
 - 1.2 材料的力学性能 /2
 - 1.2.1 拉伸试验 /2
 - 1.2.2 硬度试验 /4
 - 1.2.3 冲击试验 /5
 - 1.2.4 疲劳试验 /6
 - 1.2.5 蠕变与松弛 /7
 - 1.3 材料的腐蚀与氧化 /7
 - 1.3.1 材料的腐蚀及耐腐蚀性 /7
 - 1.3.2 材料的氧化及抗氧化性 /8
 - 1.4 材料的物理性能 /8
 - 1.4.1 密度 /8
 - 1.4.2 熔点 /8
 - 1.4.3 热膨胀性 /8
 - 1.4.4 导热性 /9
 - 1.4.5 导电性 /9
 - 1.4.6 磁性 /9
 - 1.5 材料的工艺性能 /9
 - 1.5.1 金属材料的工艺性能 /10
 - 1.5.2 高分子材料的工艺性能 /10
 - 1.5.3 陶瓷材料的工艺性能 /11
- 思考题 /11

第2章 材料的原子组合 /13

- 2.1 晶体的基本特征 /13
 - 2.1.1 晶体结构 /13
 - 2.1.2 晶体中的缺陷 /14
- 2.2 常见金属材料的结构 /16
 - 2.2.1 纯金属的晶体结构 /16
 - 2.2.2 合金的晶体结构 /18
- 2.3 常见陶瓷材料的结构 /20

- 2.3.1 硅酸盐的晶体结构 /21
 - 2.3.2 氧化物的晶体结构 /21
 - 2.3.3 玻璃相 /22
 - 2.4 常见高分子材料的结构 /22
 - 2.4.1 高分子化合物的组成 /22
 - 2.4.2 大分子链的结构 /23
 - 2.4.3 高分子化合物的聚集态结构 /24
 - 2.5 材料结构的表征 /24
 - 2.5.1 金属材料结构的表征 /24
 - 2.5.2 陶瓷材料结构的表征 /26
 - 2.5.3 高分子材料结构的表征 /26
- 思考题 /28

第3章 材料的平衡凝固与相变 /29

- 3.1 材料的凝固(结晶) /29
 - 3.1.1 结晶的热力学条件 /29
 - 3.1.2 原子迁移 /30
 - 3.1.3 结晶的基本过程 /32
 - 3.1.4 同素异构转变 /34
- 3.2 合金的凝固及二元平衡相图 /34
 - 3.2.1 二元相图的建立 /34
 - 3.2.2 二元匀晶相图 /35
 - 3.2.3 二元共晶相图 /37
 - 3.2.4 二元包晶相图 /41
 - 3.2.5 二元复合相图 /42
 - 3.2.6 二元相图的分析步骤 /42
- 3.3 铁碳合金平衡相图及应用 /43
 - 3.3.1 铁碳合金的组元和相 /44
 - 3.3.2 Fe-Fe₃C 合金平衡相图的分析 /44
 - 3.3.3 典型铁碳合金的平衡结晶过程 /46
- 3.4 金属及合金结晶后的组织 /50

3.4.1 均匀形核时的晶粒长大 /51

3.4.2 实际铸锭的宏观组织
及其缺陷 /51

思考题 /53

第4章 材料相变的动力学特征及非平衡相变 /54

4.1 材料相变的动力学特征 /54

4.1.1 相变宏观过程 /54

4.1.2 相变微观过程 /55

4.2 单相固溶体合金结晶时的成分
偏析 /55

4.3 钢的非平衡相变 /56

4.3.1 珠光体相变 /57

4.3.2 伪共析相变 /57

4.3.3 贝氏体相变 /58

4.3.4 马氏体相变 /59

4.3.5 冷却转变动力学描述 /60

4.4 过饱和固溶与析出 /64

4.5 合金非晶转变 /65

4.5.1 非晶合金的制备 /66

4.5.2 非晶合金的性能 /67

4.6 金属焊缝的组织与力学性能
特点 /67

思考题 /69

第5章 材料固态变形过程微观组织转变 /70

5.1 纯金属的塑性变形 /70

5.1.1 单晶体的塑性变形 /70

5.1.2 多晶体的塑性变形 /72

5.1.3 形变强化和细晶强化 /73

5.2 合金的塑性变形 /74

5.2.1 单相固溶体合金的塑性变形和
固溶强化 /74

5.2.2 多相混合物合金的塑性变形和
第二相强化 /74

5.3 冷加工对金属及合金组织的
影响 /74

5.4 回复与再结晶 /75

5.4.1 冷变形金属在加热过程中的
组织与性能变化 /75

5.4.2 回复和再结晶温度 /76

5.4.3 再结晶后晶粒度 /77

5.4.4 金属热加工与动态回复和
再结晶 /78

思考题 /80

第6章 材料表面技术 /81

6.1 喷丸处理 /82

6.2 表面淬火 /82

6.2.1 表面淬火用材及预备
热处理 /82

6.2.2 表面淬火方式 /83

6.2.3 表面淬火后的回火及
组织 /84

6.3 热喷涂 /84

6.3.1 热喷涂方法 /85

6.3.2 热喷涂工艺 /86

6.3.3 热喷涂涂层的结构 /86

6.3.4 热喷涂的特点及应用 /86

6.4 表面氧化 /87

6.4.1 钢铁的化学氧化 /87

6.4.2 有色金属的阳极氧化 /87

6.5 表面渗镀 /88

6.5.1 钢的渗碳 /88

6.5.2 钢的渗氮 /90

6.5.3 钢的热浸镀 /91

6.5.4 等离子体渗 /92

6.6 离子注入 /92

思考题 /93

第7章 工程用钢 /94

7.1 钢的分类 /94

7.2 钢中合金元素的作用 /96

7.2.1 淬透性 /96

7.2.2 固溶强化 /96

7.2.3 弥散强化 /97

7.2.4 耐腐蚀性 /97

7.2.5 奥氏体或铁素体稳定化 /97

7.3 典型工程用钢 /98

7.3.1 以力学性能为主的钢 /98

7.3.2 以化学性能为主的钢 /110

7.3.3 以物理性能为主的钢 /114

7.3.4 以工艺性能为主的钢 /116

思考题 /120

第8章 铸 铁 /121

- 8.1 铸铁的石墨化 /121
 - 8.1.1 Fe-Fe₃C和Fe-G双重相图 /121
 - 8.1.2 铸铁的石墨化过程 /122
 - 8.1.3 铸铁石墨化的影响因素 /122
- 8.2 铸铁的特点及分类 /123
 - 8.2.1 铸铁的特点 /123
 - 8.2.2 铸铁的分类 /124
- 8.3 常用铸铁 /124
 - 8.3.1 灰铸铁 /124
 - 8.3.2 可锻铸铁 /126
 - 8.3.3 球墨铸铁 /127
 - 8.3.4 蠕墨铸铁 /128
- 8.4 特殊性能铸铁 /129
 - 8.4.1 耐磨铸铁 /129
 - 8.4.2 耐热铸铁 /131
 - 8.4.3 耐腐蚀铸铁 /132
- 思考题 /134

第9章 有色金属及合金 /136

- 9.1 铝及铝合金 /137
 - 9.1.1 铝及铝合金的特点 /137
 - 9.1.2 铝合金的分类及热处理 /137
 - 9.1.3 常用铝合金 /139
- 9.2 铜及铜合金 /141
 - 9.2.1 铜及铜合金的特点 /141
 - 9.2.2 黄 铜 /141
 - 9.2.3 白 铜 /143
 - 9.2.4 青 铜 /143
- 9.3 钛及钛合金 /144
 - 9.3.1 钛及钛合金的特点 /144
 - 9.3.2 钛合金的分类 /144
- 9.4 镁及镁合金 /146
 - 9.4.1 镁及镁合金的特点 /146
 - 9.4.2 镁合金的分类 /146
- 9.5 镍及镍合金 /147
- 9.6 难熔金属及合金 /148
- 思考题 /149

第10章 陶瓷材料 /150

- 10.1 陶瓷材料概况 /150
- 10.2 陶瓷材料的结构 /151

10.3 陶瓷材料的成型 /152

- 10.3.1 坯料制备 /152
- 10.3.2 成 型 /152
- 10.3.3 烧 结 /152
- 10.4 常用工业陶瓷 /153
 - 10.4.1 普通陶瓷 /153
 - 10.4.2 特种陶瓷 /153

思考题 /156

第11章 高分子材料 /157

- 11.1 高分子材料概况 /157
 - 11.1.1 高分子材料的分类 /158
 - 11.1.2 高分子材料的命名 /159
- 11.2 高分子材料的性能 /160
- 11.3 高分子材料的成型 /161
 - 11.3.1 高分子材料的聚合 /161
 - 11.3.2 高分子材料的成型 /162
- 11.4 常用高分子工程材料 /163
 - 11.4.1 工程塑料 /163
 - 11.4.2 合成橡胶 /166
 - 11.4.3 合成纤维 /168

思考题 /169

第12章 复合材料 /170

- 12.1 复合材料概述 /170
- 12.2 复合材料的分类 /172
 - 12.2.1 按基体材料分类 /172
 - 12.2.2 按增强纤维种类分类 /172
 - 12.2.3 按增强体形态分类 /173
 - 12.2.4 按用途分类 /173
- 12.3 复合材料的成型工艺 /174
- 12.4 典型工程复合材料 /175
 - 12.4.1 纤维增强聚合物基
复合材料 /175
 - 12.4.2 纤维增强金属基
复合材料 /176
 - 12.4.3 纤维增强陶瓷基
复合材料 /177

思考题 /178

附 录 /179

- 附录1 化学元素中英文名称、常见结构及基本物理化学参数 /179
- 附录2 部分国内外钢号对照 /184

参考文献 /185

工程材料的性能及表征

“泰坦尼克”号——材料没有科学表征的牺牲品

泰坦尼克号(RMS Titanic),长约 269 m,重 46 000 多吨,其设计达到两个世纪更替期轮船设计的顶峰,整船按一流标准制造。1912 年 4 月,在她的处女航中,泰坦尼克号载客 2 000 多人,从英国南安普敦出发,途经法国瑟堡-奥克特维尔以及爱尔兰昆士敦,最后穿越北大西洋向美国纽约进发。4 月 14 日夜泰坦尼克号撞上冰山并于次日凌晨裂成两半后沉入大海。泰坦尼克号海难为和平时期死伤人数最惨重的海难之一,同时也是最为人所知的海上事故之一。最终沉没原因是技术上的不足,直至 1991 年才逐步被发现。当时的造船工程师只考虑到要增加钢的强度,而没有想到要增加其韧性。把泰坦尼克号残骸的金属碎片与现代造船钢材作对比试验发现,在泰坦尼克号沉没点的水温中(约 -2°C),现代造船钢材在受到撞击时可弯成 V 形,而残骸上的金属碎片则因韧性不够而很快断裂。由此发现了钢材的冷脆性,即在 $-40\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的温度下,钢材的力学行为由韧性变成脆性,从而导致灾难性的脆性断裂。而用现代技术炼的钢要在 $-70\sim -60^{\circ}\text{C}$ 的温度下才会变脆。如果当时采用冲击试验了解到材料的低温脆性问题,就会改进材料,避免此次灾难的发生。

1.1 材料及构件的常见失效形式

工程结构(如房屋、桥梁、船舶等)与机械零件(如轴、齿轮、紧固件、轴承等)在服役条件下要受到力学负荷、热负荷或环境介质的作用,有时只受到一种负荷作用,更多的时候将受到两种或两种以上负荷的同时作用。在这些负荷的单独或共同作用下,因材料冶金质量或设计、加工、装配方面的原因,零件可能会在使用期限内发生失效问题。如,在力学负荷作用下,零件将产生变形,甚至出现断裂等;在热负荷作用下,零件将产生热胀冷缩,导致尺寸和体积的改变,并产生热应力,同时随温度的升高材料的承载能力下降,随温度降低材料可能脆化等;环境介质的作用主要表现为环境对零件表面造成的化学腐蚀、电化学腐蚀及摩擦磨损等。

在产品的设计时,应该充分考察零件的服役条件,并找出容易引起失效的主要原因,从而选择具有合适性能参数的制备材料是零件能否安全应用的关键。这里所提的材料性能广义上讲应包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中所表现的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能,包括铸造、

锻压、焊接、热处理和切削性能等。

表 1-1 列出了典型机械零件的服役工况、常见失效形式及材料选用的主要指标。

表 1-1 典型机械零件的服役工况、常见失效形式及材料选用的主要指标

零件类型	服役工况	常见失效形式	材料选用的主要指标
紧固螺栓	负荷种类:静载、疲劳 应力状态:拉、弯、切	过量变形,塑性断裂,脆性断裂,疲劳,腐蚀,咬蚀	疲劳、屈服及剪切强度
轴类零件	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损	脆性断裂,疲劳,咬蚀,表面局部变化	弯、扭复合疲劳强度
齿轮	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:压、弯、接触 其他因素:磨损	脆性断裂,疲劳,咬蚀,表面局部变化,尺寸变化	弯曲和接触疲劳强度,耐磨性,芯部屈服强度
螺旋弹簧	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损	过量变形,脆性断裂,疲劳,腐蚀	扭转疲劳强度,弹性极限
板弹簧	负荷种类:疲劳、动载荷 应力状态:弯 其他因素:磨损	过量变形,脆性断裂,疲劳,腐蚀	弯曲疲劳强度,弹性极限
滚动轴承	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:压、接触 其他因素:磨损、温度、介质	脆性断裂,表面变化,尺寸变化,疲劳,腐蚀	接触疲劳强度,耐磨性,耐腐蚀性
曲轴	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:弯、扭 其他因素:磨损、振动	脆性断裂,表面变化,尺寸变化,疲劳,咬蚀	扭转、弯曲疲劳强度,耐磨性,循环韧度
连杆	负荷种类:疲劳、冲击 应力状态:拉、压 其他因素:磨损	脆性断裂	拉、压疲劳强度

1.2 材料的力学性能

材料在加工和使用过程中,总要受到外力作用。材料受外力作用时常表现为变形和断裂。所以材料的力学性能(也称机械性能)可以理解为材料抵抗外加载荷所引起的变形和断裂的能力。室温下常用的力学性能指标有强度、塑性、刚度、弹性、硬度、冲击韧性及疲劳强度等。

1.2.1 拉伸试验

评价材料力学性能最简单和最有效的办法就是测定材料的拉伸曲线。当评价材料本身的性能特征时,为了消除尺寸和形状的影响,仅反映不同材料或不同工艺引起的性能差别,通常要将材料加工成标准拉伸试样(图 1-1)。对标准拉伸试样施加一单轴拉伸载荷,使之发生变形直至断裂,便可得到该试样应变 ϵ (拉伸后试样标距的伸长与原始标距 L_0 之比)随应力 σ (试验期间任一时刻的力除以试样原始横截面积 S_0)变化的关系曲线,称为应力-应变曲线,图 1-2 为低碳钢单轴拉伸的应力-应变曲线。下面以低碳钢单轴拉伸的应力-应变曲线为

例,分析拉伸过程中表征材料力学性能的几个参数。

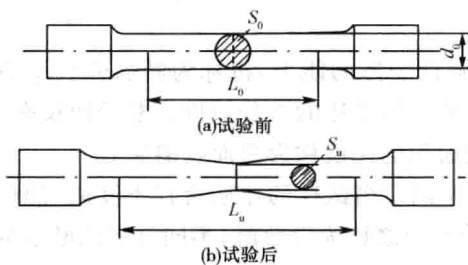


图 1-1 标准拉伸试样

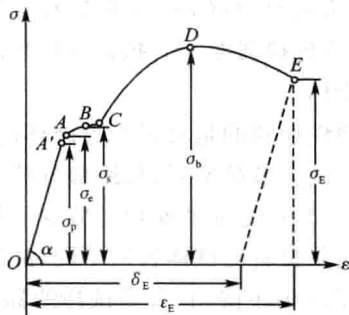


图 1-2 低碳钢单轴拉伸的应力-应变曲线

1. 弹性和刚度

在应力-应变曲线中,OA 段为弹性变形阶段,此时卸掉载荷,试样将恢复到原来尺寸。A 点所对应的应力为材料承受最大弹性变形时的应力,称为弹性极限,大多数的弹性零件依据此值进行设计。弹性变形阶段中的 OA' 段,应力与应变呈线性比例关系,A' 点所对应的应力为保持这种比例关系的最大应力,称为比例极限。由于大多数材料的 A 点和 A' 点几乎重合在一起,一般不作区分。在弹性变形范围内,应力与相应应变的比值称为弹性模量 E 。 E 实际上是 OA' 线段的斜率; $E = \tan\alpha$ (MPa),其物理意义是产生单位弹性变形时所需应力的。弹性模量是材料最稳定的性质之一,它的大小主要取决于材料的本性,除随温度升高而逐渐降低外,其他强化材料的手段如热处理、冷热加工、合金化等对弹性模量的影响很小。材料受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度,其指标即为弹性模量。可以通过增加横截面积或改变截面形状来提高材料的刚度。

2. 强度和塑性

材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。根据加载方式不同,强度指标有许多种,如抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度、抗扭强度等。其中以拉伸试验测得的屈服强度和抗拉强度两个指标应用最广泛。

在图 1-2 中,应力超过 B 点后,材料将发生塑性变形(外力去除后不能恢复的变形,属永久变形)。在 BC 段,应力几乎不增加,但应变大量增加,这种现象称为屈服。B 点所对应的应力称为屈服强度 σ_s 。一般而言,零件在工作时不允许产生塑性变形,屈服强度是零件设计的重要依据之一。实际上,大多数材料的应力-应变曲线上没有明显的屈服现象,屈服强度也不明显。因此规定拉伸时产生 0.2% 塑性变形时所对应的应力为该类材料的屈服强度,记为 $\sigma_{0.2}$ (也叫规定塑性延伸强度,或条件屈服强度),如图 1-3 所示。

图 1-2 中的 CD 段为均匀塑性变形阶段。在这一阶段,如果要进一步变形,必须要提高应力,这种

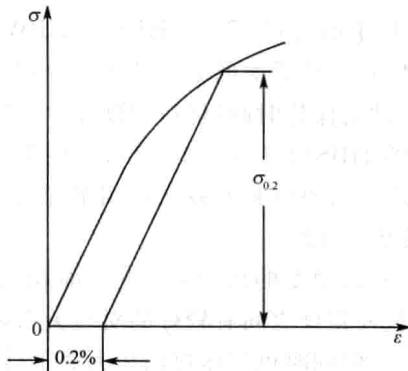


图 1-3 条件屈服强度的确定

现象称为应变强化。变形超过 D 点后,试样开始发生局部塑性变形,即出现颈缩,随应变增加,应力明显下降,并迅速在 E 点断裂。 D 点所对应的应力为材料断裂前所承受的最大应力,称为抗拉强度 σ_b 。抗拉强度反映材料抵抗断裂破坏的能力,也是零件设计和评价材料的重要指标。

塑性反映的是材料受力破坏前承受最大塑性变形的能力,指标为断后伸长率或断面收缩率。试样被拉断后,标距部分的伸长量与原始标距之比的百分数称为断后伸长率 δ 。试样断裂后,断口处横截面积的减少值与原始横截面积的比值称为断面收缩率 φ 。

同一材料的试样长短不同,测得的 δ 略有不同。当试样的原始直径不变时,随标距长度的增加, δ 值下降,只有当试样的标距与其原始直径之比为常数时,不同材料的断后伸长率才有可比性。考虑到材料塑性变形时可能有颈缩行为,故 φ 能更真实地反映材料塑性的好坏(但 δ 、 φ 均不能直接用于工程计算)。

从拉伸曲线我们还可以得到材料韧性的信息,所谓材料的韧性是指材料从变形到断裂整个过程所吸收的能量,具体地说就是拉伸曲线与横坐标所包围的面积。

1.2.2 硬度试验

硬度是反映材料软硬程度的一种性能指标,它表示材料抵抗局部塑性变形的能力,现在多用压入法测定。根据测量方法不同,常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。用各种方法所测得的硬度值不能直接比较,可通过硬度对照表换算。硬度表征法最大的优势在于它不必破坏试样或零件。

1. 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1-4 所示。详细说明见 GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》。其基本方法是将直径为 D 的钢球或硬质合金球,在一定载荷 P 的作用下压入试样表面,保持一定时间后卸除载荷,所施加的载荷与压痕面积的比值即为布氏硬度。布氏硬度值可通过测量压痕平均直径 d 查表得到。

当压头为钢球时,布氏硬度用符号 HBS 表示,适用于布氏硬度值在 450 以下的材料。压头为硬质合金球时,布氏硬度用符号 HBW 表示,适用于布氏硬度在 650 以下的材料。符号 HBS 或 HBW 之前的数字表示硬度值,符号后面的数字按顺序分别表示球体直径、载荷及载荷保持时间(保持时间 10~15 s 时可不标注)。如 120HBS10/1 000/30 表示直径为 10 mm 的钢球在 9 807 N(1 000 kgf)载荷作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 120。

布氏硬度的优点:因压痕面积大,测量结果误差小,且与强度之间有很好的对应关系,具有代表性和重复性。但同时也因压痕面积大而不适宜于成品零件以及薄而小的零件。最常用的钢球压头适于测定低、中硬度的退火钢、正火钢、调质钢、铸铁及有色金属的硬度。

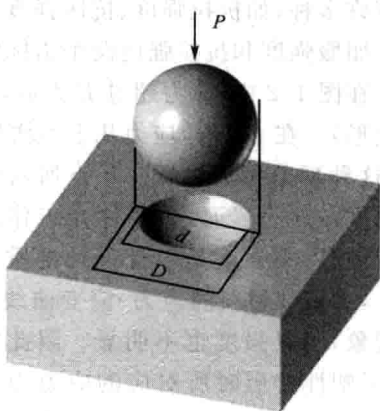


图 1-4 布氏硬度的试验原理图

2. 洛氏硬度

GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法(A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T标尺)》中详细说明了洛氏硬度的测试原理、方法与条件。它也是采用一定规格的压头,在一定载荷作用下压入试样表面,然后用测定的压痕残余深度来计算其硬度值,用符号HR表示。实际测量时可直接从硬度计表盘上读得硬度值(现在硬度计上多配备数字显示器),十分方便。

为测定不同性质工件的硬度,采用不同材料与形状尺寸的压头和载荷的组合,可获得不同的洛氏硬度标尺。每一种标尺用一个字母写在硬度符号HR之后,其中HRA、HRB、HRC最常用,其硬度值置于HR之前,如60HRC、75HRA等。常用洛氏硬度标尺的试验条件与应用见表1-2。

表 1-2

常用洛氏硬度标尺的试验条件与应用

硬度标尺	硬度符号	压头类型	初载荷 P_0/N	主载荷 P_1/N	硬度数 K	表盘刻度颜色	硬度范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	100	黑色	20~88	碳化物、硬质合金、表面淬火钢等
B	HRB	直径 1.588 mm 钢球	98.07	882.6	130	红色	20~100	软钢、退火钢、铜合金等
C	HRC	金刚石圆锥	98.07	1373	100	黑色	20~70	淬火钢、调质钢等

洛氏硬度的优点是操作迅速简便,压痕较小,几乎不损伤工件表面,故应用最广。但因压痕较小,代表性、重复性较差一些,测量结果分散度也较大一些。

3. 维氏硬度

维氏硬度的测试原理、方法与条件参照 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》。其测试原理类似于布氏硬度,是将顶部两相对面具有规定角度(136°)的正四棱锥体金刚石压头在载荷 P 的作用下压入试样表面,保持一定时间后卸除载荷,所施加的载荷与压痕表面积的比值即为维氏硬度。维氏硬度可通过测量压痕对角线长度 d 查表得到。维氏硬度用符号HV表示,符号前的数字为硬度值,后面的数字按顺序分别表示载荷值及载荷保持时间。如640HV30/20表示在294.3 N(30 kgf)载荷作用下保持20 s测定的维氏硬度值为640(加载时间为10~15 s时不注明时间)。根据施加的载荷范围不同,规定了3种维氏硬度的测定方法,见表1-3。

表 1-3

维氏硬度的测定方法(摘自 GB/T 4340.1—2009)

载荷范围/N	硬度符号	实验名称
$P \geq 49.03$	$\geq HV5$	维氏硬度试验
$1.961 \leq P < 49.03$	$HV0.2 \sim < HV5$	小载荷维氏硬度试验
$0.098\ 07 \leq P < 1.961$	$HV0.01 \sim < HV0.2$	显微维氏硬度试验

维氏硬度保留了布氏硬度和洛氏硬度的优点,既可测量由极软到极硬的材料的硬度,又能互相比较。既可测量大块材料、表面硬化层的硬度,又可测量金相组织中不同相的硬度。

1.2.3 冲击试验

许多机械零件、构件或工具在服役时,会受到冲击载荷的作用,如冲模、锻模、飞机起落架等。在一定温度下,材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧性。材料的韧性为

其强度和塑性的综合指标,反义为脆性。采用摆锤冲击试验(图 1-5)冲断标准缺口试样,测得的冲击吸收功 A_K (单位:J),来表示冲击韧性的。一般把冲击韧性值高的材料称为韧性材料,低者为脆性材料。韧性材料在断裂前有明显的塑性变形,脆性材料则反之。

实践表明, A_K 对材料的一些缺陷很敏感,能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而是生产上用来检验冶炼、热加工得到的半成品和成品质量的有效方法之一。

材料的冲击韧性随温度下降而下降。在某一温度范围内 A_K 值发生急剧下降的现象称为韧/脆转变,发生韧/脆转变的温度范围称为韧/脆转变温度,如图 1-6 所示。常在低温下服役的船舶、桥梁等结构材料的使用温度应高于其韧/脆转变温度,如果使用温度低于韧/脆转变温度,则材料处于脆性状态,可能发生低应力脆性破坏。应当指出的是,并非所有材料都有韧/脆转变现象,如铝和铜合金等就没有韧/脆转变。

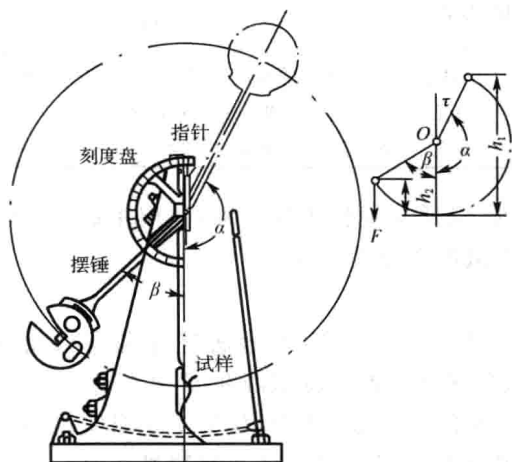


图 1-5 摆锤冲击试验示意图

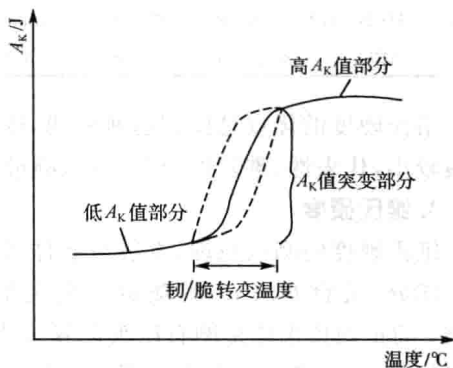


图 1-6 韧/脆转变温度曲线示意图

1.2.4 疲劳试验

齿轮、轴承、叶片、弹簧等机械零件在工作过程中各点的应力随时间作周期性的变化,即承受交变应力的作用。此时,虽然零件所承受的应力低于材料的屈服强度,但经过较长时间的工作可能产生裂纹或突然发生完全断裂的过程,称为材料的疲劳。实际服役的金属材料有 90% 是因为疲劳破坏。疲劳破坏是脆性破坏,它的一个重要特点是具有突发性,因而更具灾难性。

材料承受的交变应力幅 σ (最大应力减去最小应力的差值的二分之一) 与断裂时应力循环次数 N 之间的关系可用 $\sigma-N$ 应力寿命曲线来描述(图 1-7)。材料承受的交变应力幅 σ 越大,则断裂时应力循环次数 N 越少。当应力低于一定值时,试样可以经受无限次应力循环而不被破坏,此应力值称为材料的疲劳极限(或称为疲劳强度)。对称循环交变应力的疲劳极限用

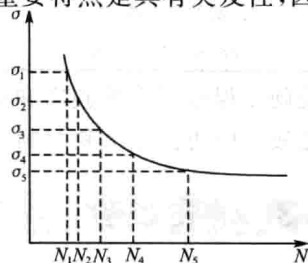


图 1-7 材料应力寿命曲线示意图

σ_{-1} 表示。实际当中,作无限次应力循环的疲劳试验是不可能的,对于钢铁材料,一般规定疲劳极限对应的应力循环次数为 10^7 ,有色金属为 10^8 。

金属材料的疲劳极限受到很多因素的影响。主要有工作条件(温度、介质及负荷类型)、表面状态(粗糙度、应力集中情况、硬化程度等)、材质、残余内应力等。对塑性材料,一般其抗拉强度越大,则相应的疲劳极限越高。提高零件的疲劳抗力,除应合理选材外,改善零件的结构形状,避免应力集中,降低零件表面粗糙度,以及采取各种表面强化的方法,都能提高其疲劳极限。

1.2.5 蠕变与松弛

前述金属拉伸试验过程中,变形只随应力变化,未考虑时间因素。事实上,当温度较高时,给定金属固定的载荷(小于屈服强度),除了短时间发生瞬时弹性应变外,在保持载荷的过程中,随时间延长,样品会继续缓慢变形。这种在弹性应力范围内样品随时间发生变形的现象称为蠕变。蠕变进行到一定程度,尺寸超出要求而使零件失效,甚至发生破坏而造成灾难性后果。在发动机、化工反应器等涉及高温的装备都必须考虑蠕变问题。研究表明,蠕变与原子的扩散过程相关。一般而言,当工作温度超过材料熔点的 $1/2$ 后,蠕变问题就必须加以考虑。对于高分子材料,室温下长期受力,就会发生蠕变。

与蠕变相关的另一个概念是松弛,它是指在弹性变形范围内给样品施加载荷而使样品产生一定变形并维持变形大小不变,随时间的延长,对应的载荷会逐渐减小。蠕变、松弛原理相同,只是两种表现形式。

1.3 材料的腐蚀与氧化

在一些腐蚀性介质(如潮湿大气、海水、酸性溶液、碱性溶液等)或高温氧化环境(如航空航天发动机,锅炉的过热器,石油化工的反应器,输送管道等)下服役的材料将会发生腐蚀和氧化的现象。腐蚀和氧化会使材料逐渐损失、破坏,丧失功能。材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性。耐腐蚀性和抗氧化性统称为材料的化学稳定性。而高温下的化学稳定性则称为热化学稳定性。

1.3.1 材料的腐蚀及耐腐蚀性

一般说来,非金属材料的耐腐蚀性能要高于金属材料。金属材料易发生腐蚀的主要原因是金属中不同组织、成分、应力区域之间由于电极电位不同在腐蚀介质中形成了腐蚀原电池,从而产生了电化学腐蚀。因此,不同金属材料由于组织、成分等不同,其耐腐蚀性有较大差异。碳钢、铸铁的耐腐蚀性较差,而不锈钢、铝合金、铜合金、钛及其合金耐腐蚀性较好。

金属材料常见的腐蚀形态有均匀腐蚀和局部腐蚀(电偶腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等),以及应力腐蚀、腐蚀疲劳、磨损腐蚀、氢腐蚀等。金属被腐蚀后,其质量、厚度、力学性能等都会发生变化,他们的变化率可用来表示金属被腐蚀的速度。在均匀腐蚀的情况下,通常用质量指标(单位时间内在单位金属表面上由腐蚀引起的质量变化,单位: $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)、深度指标(单位时间内的腐蚀量,单位: mm/a (毫米/年))表示金属被腐蚀的程度。

材料的耐腐蚀性对机械的使用与维护意义重大,各种与化学介质相接触的零件和容器都要考虑腐蚀问题。

1.3.2 材料的氧化及抗氧化性

由于多数金属在高温下其氧化物的自由能低于纯金属,所以都能自发地被氧化腐蚀。不同结构和性质的氧化膜,其氧化动力学过程也是不同的。氧化速度主要取决于化学反应的速度和原子扩散的速度。显然,温度高,化学反应速度和扩散速度都会增大,但随着时间的延长和氧化膜的增厚或氧化膜的致密度提高而减慢。金属被氧化的速度有以下三种情况:氧化物比体积较小,氧化膜不完整、不连续,氧化膜的厚度和时间的关系呈线性;氧化膜虽覆盖金属表面,但膜层中可进行离子扩散,氧化膜的厚度和时间的关系遵循抛物线规律;氧化膜不仅能覆盖金属表面,而且膜层中离子扩散比较困难,氧化膜的形成规律符合对数规律。最后一种形式的氧化膜致密稳定,阻碍了氧化的进一步发生,对基体金属能够起到保护的作用,是抗氧化钢的设计依据。

金属材料的高温氧化实际上是一种化学腐蚀过程,因此其抗氧化性好坏可用氧化腐蚀的速率来评价。

1.4 材料的物理性能

材料的物理性能包括密度、热学性能(熔点、热容、热膨胀性、导热性)、导电性、磁性和光学性能等等。在机械 engineering 行业,虽然物理、化学性能不是构件设计的主要参数,但是在某些特定的情况下,也需要加以考虑。

1.4.1 密度

单位体积材料的质量称为材料的密度。对于飞机、车辆等运动机械构件,需要减轻自重,降低能量消耗,所使用材料的密度越小越好。材料的抗拉强度与密度之比称为比强度。铝合金的抗拉强度虽然低于钢的抗拉强度,但它的密度却小得多,比强度大,用铝合金代替钢制造同一零件,其质量可减少很多。在航空航天领域,选用高比强度的材料更为重要。如采用抗拉强度高、密度小的钛合金制造飞机主承力结构,既保证了飞机的安全性,又大大提高了其飞行效率。

1.4.2 熔点

材料从固态向液态转变时的平衡温度称为熔点。一般来说,材料的熔点越高,材料在高温下保持强度的能力越强。在设计高温条件下工作的构件时,需要考虑材料的熔点。另外,金属的铸造与焊接要利用材料的熔点。熔点低的合金可用于制造焊锡、保险丝(铅、锡、铋、镉的合金)等。金属中,汞的熔点最低,为 -38.8°C ,而钨的熔点最高,达 3410°C 。

1.4.3 热膨胀性

材料随温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。材料的热膨胀性通常用线膨胀系